Diseño integral metodológico de un túnel de congelación industrial para productos avícolas mediante modelado térmico y selección técnica de equipos.

Modalidad: Proyecto de Investigación

Cristian Ferley Baez Estupiñan
CC 1002455001
José Vicente Chia Arenas
CC 1005105520
Danilo Andrés Contreras Galeano
CC 1095825481

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías
Ingeniería Electromecánica
Bucaramanga 23/09/2026

Diseño integral metodológico de un túnel de congelación industrial para productos avícolas mediante modelado térmico y selección técnica de equipos.

Modalidad: Proyecto de Investigación

Cristian Ferley Baez Estupiñan
CC 1002455001
José Vicente Chia Arenas
CC 1005105520
Danilo Andrés Contreras Galeano
CC 1095825481

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniería Electromecánica

DIRECTOR
Arley Darío Rincón Quintero

Grupo de Investigación en Diseño y Materiales - DIMAT

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías
Ingeniería Electromecánica
Bucaramanga 23/09/2026

Nota de Aceptación

Aprobado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Institución Universitaria Tecnológica de Santander para optar al título de Ingeniero Electromecánico según acta del comité de trabajo de grado número 30 del 13 de octubre de 2026

Evaluador: Luis Alonso Betancur Arboleda

Luis Alonso Betancur A
cc 3482001 de envigado (Ant)

Firma del Evaluador
Luis Alonso Betancur Arboleda

Firma del Director
Arly Darío Rincón Quintero

DEDICATORIA

Dedico este logro, en primer lugar, a Dios, por darme la fortaleza y perseverancia para alcanzar esta meta. A mi padre, que desde el cielo me acompaña y cuya memoria, enseñanzas y amor siguen siendo una fuente de inspiración. Este logro es especialmente para él, con la certeza de que estaría orgulloso de verme cumplir este sueño. A mi madre y hermano, por su amor, apoyo y comprensión durante este camino. Gracias por ser mi motivación para seguir adelante. Finalmente, me dedico este logro por el esfuerzo, sacrificio y constancia que me permitieron alcanzar el sueño de convertirme en Ingeniero Electromecánico.

Cristian Ferley Baez Estupiñan

A Dios, por sostenerme en silencio en cada madrugada donde el cansancio pesaba más que las ganas de continuar. A mis padres, por enseñarme a trabajar sin quejarme y a soñar sin miedo. Este título lleva su nombre tanto como el mío, porque cada esfuerzo suyo fue la base sobre la que construí el mío. A mis hermanos, por recordarme quién soy en los días en que yo mismo lo olvidaba, y por caminar a mi lado sin pedir nada a cambio. Y a mí mismo, por no soltar el sueño cuando fue más fácil hacerlo, y por convertir cada noche de sacrificio en el paso que me trajo hasta este logro.

Jose Vicente Chía Arenas

Dedico la culminación de esta etapa a Dios, por concederme la sabiduría y la perseverancia para superar los obstáculos y alcanzar esta meta. A mis padres, con profunda gratitud, por sus infinitos sacrificios, su apoyo incondicional y por sembrar en mí los valores que hoy me definen como persona y profesional. A mi esposa, por su presencia constante, sus palabras de aliento y su paciencia infinita durante las largas jornadas de estudio. Su amor y respaldo incondicional hicieron posible que hoy pueda celebrar la satisfacción de este logro cumplido.

Danilo Andrés Contreras Galeano

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a las Universitaria Tecnológica de Santander (UTS), y en particular a la Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías, por brindarnos los espacios académicos, herramientas computacionales y recursos bibliográficos que hicieron posible el desarrollo de este trabajo de investigación.

Un agradecimiento especial a nuestro director de trabajo de grado, el ingeniero Arley Darío Rincón Quintero (DIMAT), por su orientación técnica, su rigurosidad y su acompañamiento constante durante el desarrollo metodológico del proyecto, desde el cálculo de cargas térmicas hasta el diseño eléctrico final del sistema.

Agradecemos también a los docentes del programa de Ingeniería Electromecánica que, con su conocimiento en transferencia de calor, refrigeración industrial y diseño eléctrico normativo, contribuyeron a fortalecer las bases técnicas de esta investigación.

Finalmente, reconocemos nuestro propio trabajo conjunto, disciplina y compromiso como equipo, cuya colaboración constante nos permitió integrar exitosamente el análisis térmico, el modelado CAD, la selección técnica de equipos y el diseño eléctrico en una sola propuesta metodológica.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO **10**
INTRODUCCIÓN **11**
1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN **13**
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA **13**
1.2. JUSTIFICACIÓN **15**
1.3. OBJETIVOS **17**
1.3.1. OBJETIVO GENERAL 17
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 17
1.4. ESTADO DEL ARTE **18**
2. MARCO REFERENCIAL **22**
2.1. MARCO CONCETUAL **22**
2.2. MARCO TEORICO **24**
2.2.1. TRANSFERENCIA DE CALOR Y TERMODINÁMICA APLICADA A LA CONGELACIÓN DE ALIMENTOS 24
2.2.2. CÁLCULO DE CARGAS TÉRMICAS Y MODELADO DE TÚNELES DE CONGELACIÓN 27
2.2.3. PROPIEDADES TERMO FÍSICAS Y PROCESOS DE CONGELACIÓN DE PRODUCTOS AVÍCOLAS 31
2.2.4. CICLO DE REFRIGERACIÓN POR COMPRESIÓN DE VAPOR Y SELECCIÓN DE EQUIPOS FRIGORÍFICOS 34
2.2.5. DISEÑO FÍSICO DE TÚNELES DE CONGELACIÓN Y CRITERIOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA 36
2.3. MARCO LEGAL **39**
2.4. MARCO AMBIENTAL **41**
3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN **43**
4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO **46**
4.1. DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES TÉRMICAS DEL PROCESO DE CONGELACIÓN **46**
4.1.1. DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO 46
4.1.2. CONFIGURACIÓN DE ALMACENAMIENTO DEL PRODUCTO 48
4.1.3. MODELADO Y CÁLCULO DE LA CARGA TÉRMICA MEDIANTE COOLTOOL 50
4.2. DISEÑO DEL CUARTO DE CONGELACIÓN MEDIANTE HERRAMIENTA CAD **59**
4.2.1. MODELADO CAD 3D DEL TÚNEL DE CONGELACIÓN 59
4.2.2. DESARROLLO DE LA DISTRIBUCIÓN INTERNA, CIRCULACIÓN DE AIRE, UBICACIÓN DE ACCESOS, MATERIALES CONSTRUCTIVOS Y ESPESORES DE AISLAMIENTO TÉRMICO 65
4.3. SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS FRIGORÍFICOS **67**
4.3.1. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD FRIGORÍFICA REQUERIDA A PARTIR DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN EL CÁLCULO DE CARGAS TÉRMICAS 67
4.3.2. DESARROLLO DE LA DISTRIBUCIÓN INTERNA, CIRCULACIÓN DE AIRE, UBICACIÓN DE ACCESOS, MATERIALES CONSTRUCTIVOS Y ESPESORES DE AISLAMIENTO TÉRMICO 69

4.3.3. DESARROLLO DE LA DISTRIBUCIÓN INTERNA, CIRCULACIÓN DE AIRE, UBICACIÓN DE ACCESOS, MATERIALES CONSTRUCTIVOS Y ESPESORES DE AISLAMIENTO TÉRMICO..... 77
4.4. DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA Y CONTROL..... 80
4.4.1. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA ELÉCTRICA DEL SISTEMA Y CÁLCULO DE CONDUCTORES, PROTECCIONES Y DISPOSITIVOS DE MANIOBRA CONFORME A LA NORMATIVA APLICABLE..... 80
4.4.2. ELABORACIÓN DE DIAGRAMAS UNIFILARES, ESQUEMAS DE POTENCIA Y CONTROL DEL SISTEMA ELÉCTRICO 84
4.4.3. VERIFICACIÓN DEL CUMPLIMIENTO DE LOS REQUISITOS ESTABLECIDOS EN EL RETIE Y CONSOLIDACIÓN DE LA DOCUMENTACIÓN TÉCNICA DEL DISEÑO ELÉCTRICO 86
5. RESULTADOS..... 88
5.1. RESULTADOS DE LA DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES TÉRMICAS DEL PROCESO DE CONGELACIÓN 88
5.1.1. RESULTADO DE LA DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO 88
5.1.2. RESULTADO DE LA DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO 90
5.1.3. RESULTADO DE LA DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE DISEÑO 92
5.2. RESULTADOS DEL DISEÑO DEL CUARTO DE CONGELACIÓN MEDIANTE HERRAMIENTA CAD 3D..... 95
5.2.1. RESULTADO DEL MODELADO CAD 3D DEL TÚNEL DE CONGELACIÓN 95
5.2.2. RESULTADO DE LA DISTRIBUCIÓN INTERNA, CIRCULACIÓN DE AIRE, ACCESOS Y CONFIGURACIÓN CONSTRUCTIVA 101
5.3. RESULTADOS DE LA SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS FRIGORÍFICOS ... 104
5.3.1. RESULTADO DE LA DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD FRIGORÍFICA REQUERIDO..... 104
5.3.2. RESULTADO DE LA SELECCIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA FRIGORÍFICO..... 106
5.3.3. RESULTADO DE LA VERIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES OPERATIVAS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS 109
5.4. DISEÑO DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA Y CONTROL..... 112
5.4.1. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA ELÉCTRICA DEL SISTEMA Y DIMENSIONAMIENTO DE CONDUCTORES, PROTECCIONES Y DISPOSITIVOS DE MANIOBRA..... 112
5.4.2. DIAGRAMAS UNIFILARES, ESQUEMAS DE POTENCIA Y CONTROL DEL SISTEMA ELÉCTRICO 118
5.4.3. VERIFICACIÓN DE LOS REQUISITOS APLICABLES DEL RETIE Y DOCUMENTACIÓN TÉCNICA DEL DISEÑO ELÉCTRICO 124
6. CONCLUSIONES..... 127
7. RECOMENDACIONES..... 129
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 131
9. ANEXOS 143
9.1. ANEXO A-PLANOS 143

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema general del ciclo de refrigeración por compresión de vapor 35
Figura 2. Interfaz principal del software CoolTool 50
Figura 3. Dimensiones del túnel de congelación ingresadas en CoolTool 51
Figura 4. Parámetros térmicos del aire interior 51
Figura 5. *Configuración de paredes y superficies de transferencia térmica* 52
Figura 6. Selección del aislamiento térmico 53
Figura 7. Configuración de la temperatura exterior de diseño 54
Figura 8. Parámetros de infiltración de aire exterior 54
Figura 9. Configuración de las condiciones de apertura de puerta 55
Figura 10. Definición de cargas térmicas internas 56
Figura 11. Selección preliminar del evaporador 57
Figura 12. Cargas térmicas asociadas al evaporador 58
Figura 13. Parámetros del producto a congelar 58
Figura 14. Ensamblaje CAD 3D general del túnel de congelación y sistema frigorífico. 60
Figura 15. Modelado CAD del condensador y estructura de soporte. 61
Figura 16. Modelado CAD del conjunto de compresión y elementos auxiliares del sistema frigorífico. 61
Figura 17. Modelado CAD del evaporador HEB 8003 4.5D y sus elementos de soporte. 63
Figura 18. Modelado CAD del recipiente de líquido y sus elementos de conexión 63
Figura 19. Resultado de la carga frigorífica total. 68
Figura 20. *Interfaz principal del software BITZER* 69
Figura 21. Parámetros de selección del compresor en el software BITZER. 70
Figura 22. Resultado de selección del compresor mediante BITZER. 71
Figura 23. Dimensiones generales del compresor seleccionado. 72
Figura 24. Interfaz principal del software Danfoss Coolselector®. 73
Figura 25. Selección de válvula de expansión termostática. 74
Figura 26. Selección de tuberías del sistema frigorífico. 75
Figura 27. Evaporador seleccionado modelo HEB 8003 439 4.5D. 76
Figura 28. Condensador seleccionado modelo HCV 5003 182-4D. 77
Figura 29. Interfaz de CADe SIMU utilizada para la elaboración de los esquemas eléctricos del túnel de congelación. 85
Figura 30. Renderizado general del túnel de congelación y sistema frigorífico. 96
Figura 31. Renderizado del condensador y estructura de soporte. 97
Figura 32. Renderizado del conjunto de compresión y elementos auxiliares del sistema frigorífico. 98
Figura 33. Renderizado del evaporador HEB 8003 4.5D instalado en el túnel de congelación 99
Figura 34. Renderizado del recipiente de líquido y los elementos de conexión 100
Figura 35. Renderizado del evaporador HEB 8003 4.5D instalado en el túnel de congelación 103
Figura 36. Circuito de potencia de compresores y motoventiladores del condensador 119
Figura 37. Circuito de potencia del evaporador y sistema de deshielo. 120
Figura 38. Circuito de control y protección de compresores y motoventiladores del condensador. 121
Figura 39. Circuito de control de temperatura, deshielo, ventilación y señalización de fallas 122
Figura 40. Circuito de señalización de estados operativos del sistema eléctrico. 123

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. *Conceptos fundamentales asociados al diseño de túneles de congelación industrial para productos avícolas* 22
Tabla 2. *Propiedades termo físicas típicas de productos avícolas* 32
Tabla 3. *Influencia de la velocidad de congelación sobre la calidad del producto avícola* 33
Tabla 4. *Componentes principales del sistema de refrigeración industrial* 36
Tabla 5. *Criterios generales para el diseño físico de túneles de congelación* 38
Tabla 6. *Normatividad colombiana aplicable al diseño de un túnel de congelación industrial para productos avícolas* 39
Tabla 7. Consideraciones ambientales asociadas al diseño de un túnel de congelación industrial para productos avícolas 41
Tabla 8. *Condiciones generales de diseño del túnel de congelación* 47
Tabla 9. *Configuración de almacenamiento del producto*..... 49
Tabla 10. *Especificaciones técnicas de los equipos frigoríficos seleccionados*..... 79
Tabla 11. *Especificaciones técnicas de los equipos frigoríficos seleccionados*..... 89
Tabla 12. Resultados de la configuración de almacenamiento del producto..... 91
Tabla 13. Resultados de la configuración de almacenamiento del producto..... 94
Tabla 14. Configuración física y funcional resultante del túnel de congelación.... 104
Tabla 15. Distribución de la capacidad frigorífica requerida..... 105
Tabla 16. Componentes seleccionados para el sistema frigorífico 108
Tabla 17. Verificación de las especificaciones técnicas del sistema frigorífico 111
Tabla 18. Cuadro de cargas eléctricas principales del túnel de congelación 114
Tabla 19. Selección de conductores, protecciones y dispositivos de maniobra... 115
Tabla 20. Verificación de criterios técnicos aplicables al diseño eléctrico..... 124

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo desarrolló el diseño metodológico de un túnel de congelación industrial para productos avícolas, integrando el análisis térmico, el modelado CAD, la selección de equipos frigoríficos y el diseño del sistema eléctrico de potencia y control. La metodología se estructuró en cuatro fases: determinación de las condiciones térmicas y cálculo de cargas mediante CoolTool; diseño tridimensional del recinto y distribución de sus componentes; selección y dimensionamiento de equipos mediante software especializado y catálogos técnicos; y diseño eléctrico considerando criterios técnicos y normativos aplicables.

Como resultado, se estableció una configuración para el procesamiento de 5.544 kg de producto por ciclo, desde una temperatura inicial de 2 °C hasta −18 °C, obteniéndose una carga frigorífica total de 42,28 kW. A partir de esta demanda se definió una arquitectura frigorífica de dos circuitos y se seleccionaron los principales componentes del sistema. El modelado CAD permitió integrar el recinto, la distribución del producto y los equipos, mientras que el diseño eléctrico permitió establecer las cargas, protecciones, dispositivos de maniobra y circuitos de potencia y control requeridos para su operación.

Se concluyó que la integración progresiva de los análisis térmico, mecánico y eléctrico permite relacionar la demanda frigorífica con las capacidades comerciales de los equipos y sus requerimientos de alimentación y control, consolidando una propuesta técnica que constituye la base para una futura etapa de implementación y validación experimental.

PALABRAS CLAVE: túnel de congelación, productos avícolas, carga térmica, refrigeración industrial, diseño eléctrico.

INTRODUCCIÓN

La congelación industrial constituye una de las tecnologías más utilizadas para la conservación de alimentos debido a su capacidad para prolongar la vida útil de los productos, mantener sus propiedades fisicoquímicas y microbiológicas, y garantizar condiciones adecuadas de almacenamiento y distribución dentro de la cadena de suministro alimentaria. Particularmente, la industria avícola requiere sistemas de congelación que permitan controlar de manera precisa las condiciones térmicas del proceso, asegurando la calidad, inocuidad y estabilidad de los productos durante su almacenamiento y comercialización (F. Liu et al., 2026).

Entre las diferentes tecnologías empleadas para la congelación industrial, los túneles de congelación por aire forzado se han consolidado como una de las alternativas más utilizadas debido a su flexibilidad operativa, capacidad de procesamiento y facilidad de adaptación a diferentes tipos de productos alimenticios. No obstante, el desempeño de estos sistemas depende en gran medida de la correcta determinación de las cargas térmicas, la adecuada selección de los equipos frigoríficos y el diseño eficiente de la infraestructura requerida para garantizar una distribución uniforme del aire y una transferencia efectiva de calor (Nikic et al., 2026). Asimismo, diversos estudios han demostrado que un diseño inadecuado puede generar incrementos en el consumo energético, disminución de la capacidad frigorífica efectiva y variaciones en las condiciones de congelación del producto (Kahandage et al., 2026; Yan et al., 2026).

En los últimos años, la literatura científica ha evidenciado avances significativos en el modelado térmico, la simulación de procesos de congelación y la optimización de sistemas de refrigeración industrial. Investigaciones recientes han abordado aspectos relacionados con la eficiencia energética de los sistemas frigoríficos, la mejora de la distribución del flujo de aire y la selección de refrigerantes con menor

impacto ambiental (L. Li et al., 2025; R. Wang et al., 2025; Ye et al., 2025). Sin embargo, persiste una limitada integración metodológica entre el cálculo de cargas térmicas, el diseño físico del recinto, la selección de equipos frigoríficos y el diseño eléctrico normativo, especialmente en aplicaciones orientadas a productos avícolas y condiciones operativas específicas.

En este contexto, el presente trabajo de grado propone el diseño metodológico de un túnel de congelación industrial para productos avícolas, integrando criterios de modelado térmico, diseño asistido por computador, selección técnica de equipos frigoríficos y análisis eléctrico conforme a la normativa colombiana vigente. El desarrollo de esta propuesta busca establecer una metodología estructurada que permita relacionar las condiciones térmicas del proceso con el dimensionamiento de los sistemas frigorífico y eléctrico, garantizando condiciones adecuadas de operación, seguridad y eficiencia energética.

Para el cumplimiento de este propósito se adopta un enfoque cuantitativo de carácter descriptivo-aplicado, basado en el análisis de variables térmicas y eléctricas asociadas al proceso de congelación. La metodología emplea herramientas computacionales para el cálculo de cargas térmicas, modelado del recinto mediante software CAD, selección de equipos frigoríficos mediante programas especializados y diseño del sistema eléctrico de potencia y control conforme a los lineamientos establecidos por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE). Los resultados obtenidos permitirán consolidar una propuesta técnica aplicable al diseño de sistemas de congelación industrial orientados al sector avícola.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El crecimiento del sector avícola en la ciudad de Bucaramanga ha incrementado la demanda de procesos de congelación industrial que garanticen estabilidad térmica, tiempos controlados de enfriamiento y cumplimiento de estándares sanitarios en la conservación de productos alimentarios (Restrepo-Díaz et al., 2025). Sin embargo, se evidencia una insuficiencia técnica en el diseño integral de túneles de congelación, manifestada principalmente en el dimensionamiento inadecuado de equipos frigoríficos y en la limitada articulación entre el sistema térmico y el sistema eléctrico de la instalación (Xia et al., 2025).

Esta situación se origina, en gran medida, por la aplicación de criterios empíricos en el cálculo de cargas térmicas, la ausencia de modelado termodinámico detallado del proceso de congelación y la integración incompleta de los requerimientos eléctricos conforme a la normativa técnica vigente (Wadawa et al., 2025). En este sentido, Saeed (2020) señala que la precisión en el diseño de sistemas de refrigeración depende de un cálculo riguroso de las cargas térmicas que considere variables dinámicas del proceso, así como de la utilización de metodologías de diseño fundamentadas en principios termodinámicos, evitando aproximaciones simplificadas que puedan comprometer el desempeño del sistema (Saeed, 2020).

La ausencia de este enfoque técnico puede generar variaciones en las condiciones de operación del sistema frigorífico, sobrecargas en los componentes eléctricos y desviaciones en las temperaturas finales requeridas para la conservación adecuada del producto, donde estas deficiencias, afectan la eficiencia

energética del sistema y pueden comprometer la confiabilidad operativa de las instalaciones de congelación industrial (A. J. Lee et al., 2026; K. H. Lee et al., 2026).

En el marco de la línea de investigación en diseño y optimización de sistemas térmicos industriales, se hace necesario desarrollar un diseño técnicamente validado que relacione las condiciones térmicas del proceso de congelación con el dimensionamiento de los equipos frigoríficos y el sistema eléctrico asociado, garantizando una operación segura y el cumplimiento de los parámetros técnicos requeridos para la congelación de productos avícolas (Saeed, 2020).

Por todo lo anterior, surge el siguiente interrogante de investigación:

¿Cómo se relacionan el cálculo de cargas térmicas y el dimensionamiento integral de los sistemas frigorífico y eléctrico con el cumplimiento de las condiciones de congelación y la operación segura de un túnel de congelación industrial para productos avícolas bajo las condiciones ambientales de la ciudad de Bucaramanga?

1.2. JUSTIFICACIÓN

La insuficiencia técnica en el diseño integral de túneles de congelación industrial en el sector avícola de Bucaramanga evidencia la necesidad de desarrollar una propuesta que articule el análisis térmico del proceso con el diseño eléctrico del sistema bajo criterios normativos. Por otro lado, un dimensionamiento inadecuado de los equipos frigoríficos y de los componentes eléctricos puede generar desviaciones en las temperaturas de congelación, riesgos operativos y posibles afectaciones en la calidad e inocuidad del producto (James & James, 2023).

Desde el punto de vista tecnológico, la presente investigación propone integrar el modelado termodinámico del proceso de congelación con el diseño eléctrico del sistema conforme al Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), promoviendo soluciones de ingeniería estructuradas que garanticen condiciones adecuadas de operación, seguridad y eficiencia energética.

En el ámbito económico, un diseño correctamente dimensionado permite reducir riesgos de fallas operativas, reprocesos y pérdidas de producto, optimizando los costos asociados al funcionamiento de los sistemas de refrigeración industrial (Palacz et al., 2021). Asimismo, desde una perspectiva social, la implementación de sistemas de congelación diseñados bajo criterios técnicos adecuados contribuye al fortalecimiento de la seguridad alimentaria, al asegurar procesos de conservación que mantienen la calidad e inocuidad de los productos destinados al consumo (G. Jia et al., 2025).

Por otra parte, desde un enfoque ambiental, la optimización del diseño de sistemas frigoríficos permite mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo de recursos asociados a los procesos de refrigeración industrial, contribuyendo a la mitigación del impacto energético de estos sistemas en el sector productivo (Refahi et al., 2025).

Finalmente, para las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS)**,** la presente investigación aporta al fortalecimiento de la línea de investigación en diseño y optimización de sistemas térmicos industriales, consolidando la formación aplicada en el programa de Ingeniería Electromecánica. De igual manera, el proyecto contribuye al desarrollo de competencias profesionales en el diseño integral de sistemas industriales, generando conocimiento técnico que puede ser replicado en el sector productivo regional.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar metodológicamente un túnel de congelación industrial, empleando modelado térmico, herramientas CAD para el diseño del cuarto, software especializado para la selección de equipos y análisis eléctrico normativo, asegurando un proceso de congelación avícola que cumpla las condiciones técnicas requeridas para una operación estable y segura.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

i. Determinar las condiciones térmicas requeridas para el túnel de congelación, mediante el cálculo de cargas térmicas y la aplicación de modelado térmico, estableciendo los parámetros fundamentales que garanticen la correcta congelación de producto avícolas.
ii. Diseñar el cuarto de congelación empleando herramientas CAD para la representación dimensional, la distribución interna y la definición de materiales y aislamientos, asegurando una infraestructura adecuada que soporte las condiciones térmicas del proceso de congelación.
iii. Seleccionar y dimensionar los equipos frigoríficos necesarios para el túnel de congelación, utilizando softwares libres que permitan evaluar capacidades, eficiencias y compatibilidad operativa, garantizando que la potencia frigorífica instalada cumpla con los requerimientos del proceso.
iv. Diseñar el sistema eléctrico de potencia y control del túnel de congelación, mediante la aplicación de criterios del RETIE y el uso de herramientas de análisis eléctrico normativo, certificando una operación segura, estable y acorde con los requisitos técnicos del sistema frigorífico.

1.4. ESTADO DEL ARTE

El diseño de túneles de congelación industrial ha transitado desde reglas empíricas hacia metodologías de ingeniería basadas en cálculos estructurados y simulaciones numéricas; por ende, este avance permite una optimización energética y operativa mucho más precisa en el sector alimenticio, por lo tanto, la literatura técnica contemporánea enfatiza que la carga de refrigeración varía según factores específicos de operación (Jiang et al., 2025).

La carga de refrigeración puede variar ampliamente por factores de operación (tipo de producto, flujo de entrada, capacidad diaria de congelación), condiciones del edificio y clima, y por lo tanto “no existen reglas simples” de diseño, por lo tanto, se requiere analizar transmisión por cerramientos, infiltración, cargas internas (ventiladores, iluminación, equipos, personal), y especialmente la carga por enfriamiento y congelación del producto, en conclusión, este enfoque metodológico resulta central para reducir los sobredimensionamientos y los consumos excesivos de energía (Gaukel, 2016).

Los sistemas de congelación industrial se clasifican según su mecanismo de extracción de calor, convección, conducción, criogenia o esquemas híbridos; en este sentido, la congelación por aire forzado destaca por configuraciones como túneles, celdas estáticas y sistemas de espiral; por tal razón, se ha consolidado como la solución preferida gracias a su alta escalabilidad en las líneas de proceso (Hoang & Carson, 2024).

Esta tecnología exige un control riguroso de variables como la temperatura del aire y la uniformidad del flujo; sumado a esto, es indispensable supervisar la distribución del producto, el bypass de aire y el control de escarcha, puesto que, el éxito del proceso depende directamente de la precisión en el manejo de estas condiciones operativas (J. Wang et al., 2024).

A nivel de rangos típicos de operación en la industria, se reportan temperaturas que oscilan usualmente entre los −18 a −35 °C, estas temperaturas se ajustan estrictamente según el tipo de alimento y el objetivo de conservación del producto, por el cual, se aplican condiciones aún más severas durante las etapas críticas de congelación rápida para garantizar la calidad (James & James, 2023).

Una tendencia fuerte en la última década es el uso de herramientas de simulación (incluyendo CFD) para estudiar y corregir no uniformidades de flujo y de transferencia de calor dentro de túneles de congelación(Garvin & Kirchhefer, 2025). La evidencia muestra que modificaciones geométricas (ejemplo, deflectores/baffles, rediseño de plenums y arreglos de carros o bandejas) pueden mejorar la distribución de aire frío y, con ello, disminuir la variabilidad espacial de temperaturas y tiempos de proceso, dado que la convección forzada es el mecanismo dominante de intercambio térmico, y la “mala hidráulica” interna se traduce en diferencias de congelación y riesgo de no cumplir la temperatura objetivo en el núcleo del producto (Alonso et al., 2011)

Desde la perspectiva de calidad del alimento, el estado del arte coincide en que la velocidad de congelación es determinante: tasas rápidas tienden a generar cristales de hielo más pequeños, reduciendo daño estructural y pérdida de textura, mientras que la congelación lenta promueve cristales más grandes asociados con degradación de calidad (Y. Wang et al., 2025). En estudios experimentales y de correlación microestructural han mostrado relaciones sistemáticas entre la tasa de congelación y la escala de cristales/Inter espaciado en distintos alimentos y biomateriales, aportando criterios para justificar técnicamente la elección de túneles de congelación (y sus parámetros de operación) cuando se busca preservar atributos del producto (Chang et al., 2026).

La congelación industrial se ha re-enmarcado como un problema de eficiencia energética y sostenibilidad, la refrigeración y congelación en aplicaciones comerciales e industriales enfatiza que el reto ya no es solo “alcanzar” temperaturas, sino hacerlo con menor consumo, mejor control y menor impacto ambiental, lo cual impulsa la investigación en mejoras de compresores, intercambiadores, estrategias de control, materiales de aislamientos y selección de refrigerantes (Gheshlaghi et al., 2025).

El climático, la política pública y organismos internacionales han insistido en la necesidad de descarbonizar el sector de refrigeración mediante eficiencia energética, adopción de refrigerantes de menor impacto y mejores prácticas de diseño/operación, la IIR (Instituto Internacional de Refrigeración) ha destacado la magnitud del sector en consumo energético global y su potencial de mitigación con tecnologías eficientes y refrigerantes de bajo impacto climático (Bolaji et al., 2025). De igual manera el IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) ha advertido que la acción climática exige reducciones profundas y sostenidas de emisiones en todos los sectores, lo que refuerza la pertinencia de proyectos que optimicen consumos eléctricos y desempeño térmico en infraestructura industrial (Enrique & Muriel, 2025).

Otro componente es la seguridad y el cumplimiento normativo que, a escala internacional la norma ISO 5149 establecen requisitos de seguridad y ambientales para diseño/instalación/operación y documentación de sistemas de refrigeración, para aplicaciones con amoníaco, estándares especializados como ANSI/IIAR 2 que consolidan lineamientos de diseño seguro para sistemas cerrados industriales, reforzando que el diseño integral no debe limitarse a la selección térmica puesto que debe contemplar criterios de seguridad, operación, mantenimiento y documentación del sistema (Jaafar et al., 2025).

En Colombia, la integración de requisitos eléctricos resulta especialmente crítica, dado que las instalaciones industriales deben alinearse con el RETIE y sus actualizaciones, recientemente el Ministerio de Minas y Energía reportó cambios normativos asociados al RETIE mediante la Resolución 40304 de 2025, lo que evidencia que el componente regulatorio es dinámico y debe incorporarse explícitamente en el diseño de potencia y control desde fases tempranas del proyecto.

Finalmente, en los métodos de congelación**,** diseño de túneles/blast freezers**,** modelación/simulación **y** eficiencia energética, persiste una brecha aplicada cuando se requiere articular en un solo flujo metodológico, primero el cálculo/modelado térmico y de cargas, segundo, el diseño físico del recinto (CAD y selección de aislamientos), tercero, la selección técnica de equipos, y cuarto, el diseño eléctrico normativo (potencia y control) (Cao et al., 2026). Por lo tanto, esta necesidad coincide con el vacío señalado en la propuesta para el contexto regional y sustenta la pertinencia de un proyecto con una metodología replicable para túneles de congelación industriales orientados a productos avícolas y condiciones locales

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. MARCO CONCEPTUAL

El diseño de túneles de congelación industrial involucra conceptos asociados a la transferencia de calor, la refrigeración industrial, el diseño de recintos térmicamente aislados, la selección de equipos frigoríficos y los sistemas eléctricos de potencia y control. Estos conceptos constituyen la base teórica necesaria para comprender los fenómenos físicos y los criterios de ingeniería que intervienen en el proceso de congelación de productos avícolas. En la Tabla 1 se presentan los principales conceptos considerados en el desarrollo de la presente investigación, junto con sus respectivas definiciones y fuentes bibliográficas.

***Tabla 1**. Conceptos asociados al diseño de túneles de congelación industrial*

Concepto	Definición	Fuente
Congelación de alimentos	Proceso de conservación que reduce la temperatura del alimento por debajo de su punto de congelación, disminuyendo la actividad microbiológica, enzimática y química responsable de su deterioro.	(Hong et al., 2026)
Túnel de congelación	Sistema industrial de congelación por aire forzado diseñado para extraer calor del producto de manera rápida y uniforme mediante la circulación controlada de aire a baja temperatura.	(Chen et al., 2026a)
Carga térmica de refrigeración	Cantidad total de calor que debe ser removida de un recinto o proceso para mantener las condiciones de temperatura requeridas durante la operación del sistema frigorífico.	(H. Li et al., 2026)
Carga por transmisión térmica	Ganancia de calor que atraviesa paredes, pisos y techos debido a la diferencia de temperatura entre el ambiente interior y exterior del recinto refrigerado.	(H. Jia et al., 2026)
Carga por infiltración	Ganancia térmica ocasionada por el ingreso de aire externo a través de puertas, uniones constructivas o aperturas operativas del recinto.	(Song et al., 2026)

Capacidad frigorífica	Potencia de refrigeración requerida o suministrada por un sistema para extraer calor de un producto o espacio durante un intervalo determinado de tiempo.	(C. Liu et al., 2026a)
Evaporador	Intercambiador de calor donde el refrigerante absorbe energía térmica del medio refrigerado mediante el proceso de evaporación.	(Hong et al., 2026)
Compresor frigorífico	Equipo encargado de incrementar la presión y temperatura del refrigerante para garantizar la circulación continua dentro del ciclo de refrigeración.	(Zhou et al., 2026)
Refrigerante	Fluido de trabajo utilizado para absorber, transportar y liberar calor durante el funcionamiento de un sistema frigorífico.	(Wu et al., 2026)
Flujo de aire forzado	Movimiento controlado de aire generado por ventiladores con el propósito de mejorar la transferencia de calor entre el producto y el ambiente refrigerado.	(Zhou et al., 2026)
Aislamiento térmico	Material o sistema constructivo diseñado para minimizar la transferencia de calor entre dos ambientes con diferentes temperaturas.	(Zhang et al., 2026)
Eficiencia energética	Relación entre el desempeño térmico obtenido y la energía consumida por el sistema durante su operación.	(C. Liu et al., 2026b)
Sistema eléctrico de potencia	Conjunto de conductores, protecciones y equipos destinados al suministro seguro y confiable de energía eléctrica a la instalación frigorífica.	(Chen et al., 2026b)
Sistema de control	Conjunto de dispositivos y estrategias encargadas de supervisar y regular variables de operación como temperatura, presión y tiempos de funcionamiento.	(M. Sun et al., 2026)
Seguridad en sistemas de refrigeración	Conjunto de criterios técnicos orientados a minimizar riesgos operacionales, eléctricos y ambientales durante la instalación y operación de sistemas frigoríficos industriales.	(H. Li et al., 2026)

Nota: Elaboración propia

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Transferencia de calor y termodinámica aplicada a la congelación de alimentos

La congelación constituye uno de los métodos más eficientes para la conservación de alimentos debido a su capacidad para reducir la actividad microbiológica, enzimática y química responsable de los procesos de deterioro. En productos avícolas, este proceso permite prolongar significativamente la vida útil del alimento, manteniendo sus características nutricionales, sensoriales y sanitarias durante las etapas de almacenamiento y distribución. Desde el punto de vista ingenieril, la congelación consiste en la extracción controlada de energía térmica desde el producto hacia un medio refrigerante hasta alcanzar temperaturas inferiores a su punto inicial de congelación (Araujo Lima da Silva et al., 2024).

El análisis de la congelación se fundamenta en los principios de la termodinámica, particularmente en la Primera Ley de la Termodinámica, la cual establece que la energía no se crea ni se destruye, sino que se transforma. Durante el proceso de congelación, la energía térmica contenida en el producto es transferida hacia el sistema de refrigeración mediante mecanismos de intercambio de calor (Xiang et al., 2023). Esta energía removida puede determinarse a partir de la variación de entalpía del producto, de acuerdo con la Ecuación (1).

$$Q = m\Delta h \qquad \text{Ec. 1}$$

donde:

Q = energía térmica transferida (kJ).

m = masa del producto (kg).

Δh = variación de entalpía específica (kJ/kg).

La variación de entalpía comprende tanto la energía asociada a los cambios de temperatura del producto como la energía requerida para el cambio de fase del agua contenida en sus tejidos. En consecuencia, el proceso de congelación puede dividirse en tres etapas fundamentales: enfriamiento del producto hasta alcanzar su punto inicial de congelación, extracción del calor latente durante la formación de cristales de hielo y enfriamiento posterior del producto congelado hasta la temperatura final de almacenamiento (Yao et al., 2023).

La transferencia de calor durante estas etapas ocurre principalmente mediante conducción y convección. La conducción corresponde al mecanismo mediante el cual la energía térmica se desplaza desde las regiones internas del producto hacia su superficie debido a la existencia de diferencias de temperatura. Este fenómeno adquiere especial importancia en productos avícolas debido a que el enfriamiento se produce desde el exterior hacia el núcleo del alimento (C. Wang et al., 2023). La velocidad de transferencia de calor por conducción puede describirse mediante la Ley de Fourier, expresada en la Ecuación (2).

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \qquad \text{Ec. 2}$$

donde:

q = flujo de calor transferido (W).

k = conductividad térmica del producto (W/m·K).

A = área de transferencia de calor (m²).

$\frac{dT}{dx}$ = gradiente de temperatura en la dirección de transferencia (K/m).

La Ecuación 2 indica que la tasa de transferencia de calor depende directamente de la conductividad térmica del material y de la diferencia de temperatura existente entre dos regiones del producto. Por tanto, materiales con mayor conductividad térmica presentan una respuesta más rápida frente a los procesos de enfriamiento y congelación.

Una vez que el calor alcanza la superficie del producto, este debe ser removido por el aire frío que circula dentro del túnel de congelación. Este intercambio energético ocurre mediante convección forzada, fenómeno que depende de la velocidad del aire, de sus propiedades físicas y de la diferencia de temperatura entre el producto y el medio refrigerante (Lin et al., 2023). La transferencia de calor por convección puede representarse mediante la Ley de Enfriamiento de Newton, mostrada en la siguiente ecuación:

$$q = h\,A\,(T_s - T_\infty) \qquad \text{Ec. 3}$$

donde:

q = flujo de calor transferido por convección (W).

h = coeficiente convectivo de transferencia de calor (W/m²·K).

A = área superficial de transferencia (m²).

T_s = temperatura superficial del producto (°C).

T_∞ = temperatura del aire de congelación (°C).

La Ecuación (3) evidencia que la velocidad de extracción de calor aumenta cuando se incrementa la diferencia de temperatura entre el producto y el aire o cuando se incrementa la velocidad de circulación del aire, situación que favorece

mayores coeficientes convectivos. Por esta razón, los túneles de congelación industrial emplean sistemas de ventilación que permiten generar flujos de aire uniformes y controlados alrededor del producto.

Desde la perspectiva de la conservación de alimentos, la velocidad de congelación constituye uno de los parámetros más relevantes del proceso. Cuando la congelación ocurre rápidamente, se generan cristales de hielo pequeños y distribuidos uniformemente dentro de los tejidos musculares, reduciendo los daños estructurales y preservando la capacidad de retención de agua del producto. Por el contrario, procesos de congelación lentos favorecen la formación de cristales de mayor tamaño que pueden ocasionar ruptura celular, pérdida de textura y disminución de la calidad del alimento después de la descongelación (Komaei et al., 2023).

En los túneles de congelación por aire forzado, la velocidad de congelación depende directamente de variables como la temperatura del aire, la velocidad de circulación, las propiedades termo físicas del producto y su geometría (Lu et al., 2023). La adecuada combinación de estos parámetros permite optimizar la transferencia de calor y reducir los tiempos de proceso, contribuyendo a mejorar tanto la calidad del producto como la eficiencia energética de la instalación.

2.2.2. Cálculo de cargas térmicas y modelado de túneles de congelación

El cálculo de cargas térmicas constituye una de las etapas más importantes en el diseño de sistemas de refrigeración industrial, debido a que permite determinar la cantidad total de calor que debe ser extraída por el sistema frigorífico para mantener las condiciones de temperatura requeridas dentro del túnel de congelación. La precisión de este cálculo influye directamente sobre la selección de los equipos de refrigeración, el consumo energético de la instalación y la estabilidad térmica del proceso (M. Li et al., 2023).

En los túneles de congelación para productos avícolas, la carga térmica total está conformada por diferentes aportes energéticos, siendo el principal la energía asociada al enfriamiento y congelación del producto. Sin embargo, también deben considerarse las ganancias de calor provenientes del ambiente exterior, las infiltraciones de aire, la operación de equipos electromecánicos, la iluminación y la presencia de personal dentro del recinto. La suma de todas estas contribuciones permite establecer la capacidad frigorífica necesaria para garantizar las condiciones de diseño (Zhukovskaya et al., 2023).

La primera contribución corresponde a la carga sensible, la cual representa la energía necesaria para reducir la temperatura del producto desde su condición inicial hasta el punto de congelación (Zhukovskaya et al., 2023). Esta energía puede determinarse mediante la Ecuación 4.

$$Q_s = mC_p\,(T_i - T_f) \qquad \text{Ec. 4}$$

donde:

Q_s = calor sensible removido (kJ).

m = masa del producto (kg).

C_p = calor específico del producto (kJ/kg·K).

T_i = temperatura inicial del producto (°C).

T_f = temperatura final de la etapa de enfriamiento (°C).

Una vez alcanzado el punto de congelación, es necesario extraer la energía asociada al cambio de fase del agua contenida en el producto. Esta energía se

conoce como calor latente de congelación (J. Ma et al., 2023) y puede calcularse mediante la Ecuación 5.

$$Q_L = mL_f \qquad \text{Ec. 5}$$

donde:

Q_L = calor latente de congelación (kJ).

L_f = calor latente de congelación del producto (kJ/kg).

La carga térmica total asociada al producto se obtiene considerando las tres etapas del proceso: enfriamiento inicial, congelación y enfriamiento final del producto congelado (K. Sun et al., 2023). Esta relación puede expresarse mediante la Ecuación 6.

$$Q_{producto} = Q_{s1} + Q_L + Q_{s2} \qquad \text{Ec. 6}$$

donde:

Q_{s1} = carga sensible antes de la congelación.

Q_L= carga latente de congelación.

Q_{s2}= carga sensible posterior a la congelación.

Además de la carga térmica asociada al producto, existen ganancias de calor a través de la envolvente del recinto. Estas cargas dependen de las características constructivas de paredes, techo y piso, así como de la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del túnel (Xiang et al., 2023). La carga por transmisión puede determinarse mediante la Ecuación 7.

$$Q_t = UA\,\Delta T \qquad \text{Ec. 7}$$

donde:

Q_t = carga térmica por transmisión (W).

U = coeficiente global de transferencia de calor (W/m²·K).

A = área de transferencia (m²).

ΔT = diferencia de temperatura entre ambos ambientes (K).

Otra fuente importante de ganancia térmica corresponde a las infiltraciones de aire exterior, las cuales se producen principalmente durante la apertura de puertas y operaciones de carga y descarga (Yuan et al., 2023). Estas ganancias pueden estimarse mediante la Ecuación 8.

$$Q_i = \dot{m}_a(h_e - h_i) \qquad \text{Ec. 8}$$

donde:

Q_i = carga térmica por infiltración (W).

$\dot{m}_a$ = flujo másico de aire infiltrado (kg/s).

h_e = entalpía del aire exterior (kJ/kg).

h_i = entalpía del aire interior (kJ/kg).

Finalmente, la carga térmica total del túnel de congelación se obtiene mediante la suma de todas las contribuciones analizadas. Este valor constituye el parámetro

fundamental para el dimensionamiento del sistema frigorífico y para la selección de los equipos que garantizarán las condiciones operativas requeridas en el proceso de congelación industrial (Xiang et al., 2023).

2.2.3. Propiedades termo físicas y procesos de congelación de productos avícolas

Las propiedades termo físicas de los alimentos constituyen uno de los factores más importantes en el diseño de sistemas de refrigeración y congelación industrial, debido a que determinan la velocidad con la que ocurre la transferencia de calor y la cantidad de energía que debe ser removida durante el proceso. En productos avícolas, estas propiedades están directamente relacionadas con la composición química del tejido muscular, particularmente con el contenido de agua, proteínas, grasas y minerales presentes en la carne (Xiang et al., 2023; Yuan et al., 2023).

La carne de pollo se caracteriza por poseer un elevado contenido de humedad, que normalmente representa entre el 65 % y el 75 % de su composición total. Esta condición convierte al agua en el componente con mayor influencia sobre el comportamiento térmico del producto durante la congelación. A medida que disminuye la temperatura, parte del agua libre contenida en los tejidos comienza a transformarse en hielo, modificando progresivamente las propiedades térmicas del alimento y alterando la velocidad de transferencia de calor (J. Wang et al., 2024).

Durante el proceso de congelación no toda el agua presente en la carne se solidifica a una única temperatura. Debido a la presencia de sales, proteínas y otros solutos disueltos, la formación de cristales de hielo ocurre dentro de un rango de temperaturas, fenómeno que genera una zona de transición térmica en la cual coexisten simultáneamente agua líquida y hielo. Esta región representa una de las etapas más críticas del proceso debido a que concentra una elevada demanda

energética asociada a la extracción del calor latente de congelación (Araujo Lima da Silva et al., 2024).

Entre las propiedades termo físicas más relevantes para el diseño de túneles de congelación se encuentran la densidad, la capacidad calorífica específica, la conductividad térmica y la difusividad térmica. Estas propiedades permiten estimar la energía requerida para enfriar el producto y analizar la velocidad con la que el frío penetra desde la superficie hacia el centro térmico del alimento (Xiang et al., 2023).

La capacidad calorífica específica representa la cantidad de energía necesaria para modificar la temperatura de una unidad de masa del producto. Esta propiedad depende de la composición del alimento y varía con la temperatura, especialmente en la zona de congelación. Por su parte, la conductividad térmica describe la capacidad del material para transferir calor a través de su estructura interna. Generalmente, esta propiedad aumenta a medida que se incrementa la fracción de hielo presente en el producto (M. Li et al., 2023).

La Tabla 2 presenta valores típicos de algunas propiedades termo físicas reportadas para productos avícolas utilizados en aplicaciones de refrigeración y congelación industrial.

Tabla 2. *Propiedades termo físicas típicas de productos avícolas*

Propiedad	Rango típico
Contenido de humedad	65 – 75 %
Densidad	1.020 – 1.100 kg/m³
Capacidad calorífica (producto fresco)	3,0 – 3,8 kJ/kg·K
Conductividad térmica (producto fresco)	0,40 – 0,55 W/m·K
Conductividad térmica (producto congelado)	1,20 – 1,80 W/m·K
Temperatura inicial de congelación	-1 °C a -2,5 °C
Temperatura de almacenamiento congelado	≤ -18 °C

Nota. Elaboración propia. Información tomada de (K. Sun et al., 2023; C. Wang et al., 2023; Xiang et al., 2023)

La velocidad de congelación constituye uno de los parámetros de mayor interés dentro de la industria avícola debido a su influencia directa sobre la calidad final del producto. Cuando el proceso ocurre de manera rápida, los cristales de hielo formados son pequeños y se distribuyen uniformemente en los espacios intracelulares y extracelulares, reduciendo los daños estructurales en los tejidos musculares. Como resultado, el producto conserva mejor su textura, color y capacidad de retención de agua durante la descongelación (Xiang et al., 2023).

Por el contrario, velocidades de congelación bajas favorecen la formación de cristales de hielo de gran tamaño, los cuales pueden provocar ruptura de membranas celulares y deterioro de la estructura interna del alimento. Esta situación genera pérdidas de líquidos durante la descongelación, disminución del rendimiento comercial y alteraciones en las propiedades sensoriales del producto (Wei et al., 2026).

La Tabla 3 resume los principales efectos asociados a la velocidad de congelación sobre la calidad de productos avícolas.

***Tabla 3**. Influencia de la velocidad de congelación sobre la calidad del producto avícola*

Velocidad de congelación	Tamaño de cristal de hielo	Efecto sobre la calidad
Rápida	Pequeño	Mejor conservación de textura, color y jugosidad
Moderada	Intermedio	Conservación aceptable de las propiedades del producto
Lenta	Grande	Mayor daño celular y pérdida de agua durante la descongelación

Nota. Elaboración propia. Información tomada de (K. Sun et al., 2023; C. Wang et al., 2023; Xiang et al., 2023)

La selección de las condiciones de operación de un túnel de congelación debe considerar simultáneamente las propiedades termo físicas del producto y los requerimientos de calidad establecidos para su comercialización (Xiang et al., 2023). En consecuencia, el conocimiento de estas características permite establecer criterios adecuados para el cálculo de cargas térmicas, la selección de equipos frigoríficos y la definición de los parámetros operativos del sistema de congelación industrial.

2.2.4. Ciclo de refrigeración por compresión de vapor y selección de equipos frigoríficos

Los túneles de congelación industrial utilizan principalmente sistemas de refrigeración por compresión mecánica de vapor debido a su capacidad para operar a bajas temperaturas y suministrar las condiciones térmicas requeridas para la conservación de alimentos. Este tipo de sistema permite extraer calor del recinto refrigerado y transferirlo hacia el ambiente exterior mediante un ciclo continuo de circulación de refrigerante (Guan et al., 2023).

El ciclo básico de refrigeración está conformado por cuatro componentes principales: compresor, condensador, dispositivo de expansión y evaporador. El refrigerante circula a través de estos elementos experimentando cambios de presión, temperatura y estado físico que permiten transportar energía térmica desde el interior del túnel hacia el exterior de la instalación (Clark & Ruggi, 2023).

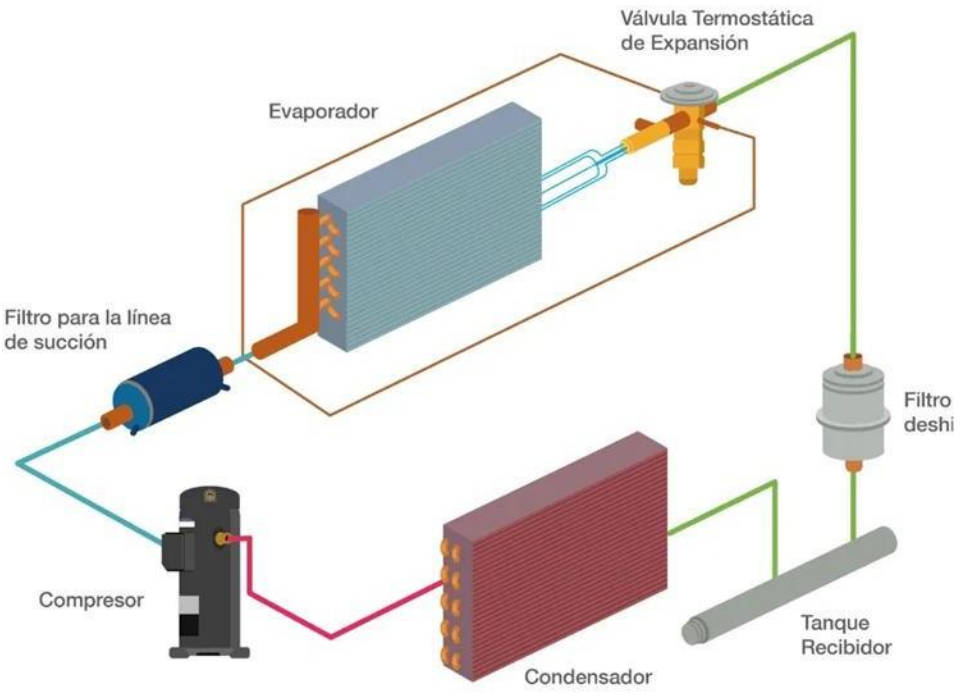
El evaporador constituye el componente encargado de absorber el calor del aire circulante dentro del túnel de congelación. Durante este proceso, el refrigerante cambia de estado líquido a vapor mientras extrae energía térmica del ambiente

refrigerado. Posteriormente, el vapor es aspirado por el compresor, cuya función consiste en incrementar la presión y temperatura del refrigerante para facilitar la liberación de calor en el condensador (Abagnale et al., 2015).

En el condensador, el refrigerante cede calor al ambiente exterior y se transforma nuevamente en líquido. Finalmente, el fluido atraviesa el dispositivo de expansión, donde experimenta una disminución brusca de presión y temperatura antes de ingresar nuevamente al evaporador, completando así el ciclo frigorífico (Jackson et al., 2023).

La Figura 1 presenta un esquema general del ciclo de refrigeración por compresión de vapor empleado en aplicaciones industriales.

Figura 1. Esquema general del ciclo de refrigeración por compresión de vapor



Fuente: Elaboración propia con información tomada de (Jackson et al., 2023)

La selección de los equipos frigoríficos depende directamente de la capacidad de refrigeración requerida por la instalación, las condiciones de operación del túnel y las características del producto procesado. En sistemas de congelación industrial es común utilizar evaporadores de expansión directa o recirculación de refrigerante, ventiladores de alta eficiencia y compresores diseñados para trabajar a bajas temperaturas de evaporación (Jackson et al., 2023).

La Tabla 4 resume las funciones principales de los componentes que integran un sistema de refrigeración por compresión de vapor.

Tabla 4. *Componentes principales del sistema de refrigeración industrial*

Componente	Función principal
Compresor	Incrementar la presión y temperatura del refrigerante para permitir la transferencia de calor.
Condensador	Rechazar el calor absorbido por el sistema hacia el ambiente exterior.
Dispositivo de expansión	Reducir la presión y temperatura del refrigerante antes de ingresar al evaporador.
Evaporador	Absorber calor del recinto refrigerado mediante la evaporación del refrigerante.
Ventiladores	Favorecer la circulación del aire y mejorar la transferencia de calor.

Nota: Elaboración propia. Información tomada de (Jackson et al., 2023; K. Sun et al., 2023)

2.2.5. Diseño físico de túneles de congelación y criterios de eficiencia energética

El diseño físico de un túnel de congelación constituye un factor determinante para garantizar el adecuado desempeño térmico del sistema frigorífico. La configuración geométrica del recinto, la distribución interna de los productos, la ubicación de los evaporadores y las características de los materiales constructivos influyen directamente sobre la uniformidad de la congelación, la estabilidad de las

condiciones de operación y el consumo energético de la instalación (Taylor et al., 2023).

Los túneles de congelación industrial son recintos diseñados para mantener temperaturas controladas mediante la circulación forzada de aire frío alrededor del producto. Su objetivo principal es maximizar la transferencia de calor entre el alimento y el medio refrigerante, permitiendo alcanzar las temperaturas de conservación requeridas en el menor tiempo posible (Abed et al., 2024). Para lograr este propósito, el diseño debe garantizar una distribución homogénea del flujo de aire y evitar zonas de estancamiento que puedan generar diferencias de temperatura dentro del recinto.

Uno de los aspectos más importantes durante el diseño es la definición de las dimensiones del túnel. Estas dependen de factores como la capacidad de procesamiento requerida, el tipo de producto, el sistema de almacenamiento empleado y las condiciones operativas establecidas para el proceso. La disposición de bandejas, estanterías o carros de transporte debe facilitar la circulación uniforme del aire y permitir operaciones seguras de carga y descarga (Bora et al., 2023).

La circulación del aire constituye un elemento fundamental en la eficiencia del proceso de congelación. Los evaporadores y ventiladores deben ubicarse estratégicamente para garantizar que el flujo de aire alcance todas las superficies del producto. Una distribución inadecuada puede generar diferencias en los tiempos de congelación, afectar la calidad del producto y aumentar el consumo energético debido a la necesidad de prolongar los ciclos de operación (Álvarez et al., 2010).

Por otra parte, el aislamiento térmico representa uno de los componentes constructivos más importantes del recinto frigorífico. Su función consiste en minimizar las ganancias de calor provenientes del ambiente exterior, reduciendo la

carga térmica que debe ser compensada por el sistema de refrigeración. Para este tipo de aplicaciones se utilizan comúnmente paneles sándwich con núcleo de poliuretano expandido o polisocianurato, materiales que presentan bajos coeficientes de conductividad térmica y elevada resistencia mecánica (Abed et al., 2024; Bora et al., 2023).

La selección del espesor del aislamiento depende principalmente de la temperatura de operación del recinto, las condiciones ambientales externas y los criterios de eficiencia energética establecidos para la instalación. Un aislamiento adecuado permite disminuir las pérdidas térmicas, reducir la capacidad frigorífica requerida y optimizar el consumo de energía durante la vida útil del sistema (Bora et al., 2023).

La *Tabla 5* presenta algunos criterios generales considerados durante el diseño físico de túneles de congelación para aplicaciones industriales.

Tabla 5. *Criterios generales para el diseño físico de túneles de congelación*

Aspecto de diseño	Consideraciones principales
Dimensiones del recinto	Definidas según capacidad de producción, volumen de almacenamiento y logística operativa.
Distribución del producto	Debe favorecer la circulación uniforme del aire entre las unidades de producto.
Ubicación de evaporadores	Permitir una adecuada cobertura del flujo de aire dentro del túnel.
Aislamiento térmico	Minimizar ganancias de calor y reducir el consumo energético.
Accesos y puertas	Facilitar operaciones de carga y descarga minimizando infiltraciones.
Materiales constructivos	Garantizar resistencia mecánica, higiene y facilidad de limpieza.
Circulación de aire	Evitar zonas muertas y asegurar uniformidad térmica en todo el recinto.

Nota. Elaboración propia a partir de (Bora et al., 2023)

2.3. MARCO LEGAL

El desarrollo de un túnel de congelación industrial para productos avícolas requiere la consideración de la normatividad colombiana vigente relacionada con instalaciones eléctricas, seguridad industrial, inocuidad alimentaria y condiciones sanitarias para el procesamiento y conservación de alimentos. Estas disposiciones establecen los lineamientos técnicos y legales que deben cumplirse para garantizar una operación segura, eficiente y acorde con los requisitos exigidos por las autoridades competentes. En la Tabla 6 se presentan las principales normas aplicables al desarrollo de la presente investigación.

Tabla 6. *Normatividad colombiana aplicable al diseño de un túnel de congelación industrial para productos avícolas*

Norma	Descripción
Ley 9 de 1979 Código Sanitario Nacional	Establece las disposiciones generales para la protección de la salud pública, así como las condiciones sanitarias relacionadas con establecimientos industriales y de alimentos.
Resolución 2400 de 1979	Establece disposiciones sobre vivienda, higiene y seguridad en los establecimientos de trabajo.
Decreto 1500 de 2007	Establece el sistema oficial de inspección, vigilancia y control para la carne y productos cárnicos comestibles destinados al consumo humano.
Resolución 2674 de 2013	Reglamenta las condiciones sanitarias que deben cumplir las actividades de fabricación, procesamiento, almacenamiento, transporte y comercialización de alimentos.
Decreto 1072 de 2015	Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo que integra las disposiciones relacionadas con seguridad y salud en el trabajo.
Resolución 0312 de 2019	Define los estándares mínimos del Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST).

Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) Resolución 40304 de 2025	Establece los requisitos técnicos y medidas de seguridad que deben cumplir las instalaciones eléctricas en Colombia.
NTC 2050 Código Eléctrico Colombiano	Norma técnica basada en el National Electrical Code (NEC), que establece criterios para el diseño seguro de instalaciones eléctricas de baja tensión.

Nota: Elaboración propia a partir de la Ley 9 de 1979, la Resolución 2400 de 1979, el Decreto 1500 de 2007, la Resolución 2674 de 2013, el Decreto 1072 de 2015, la Resolución 0312 de 2019, el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) y la NTC 2050.

2.4. MARCO AMBIENTAL

Los sistemas de refrigeración industrial desempeñan un papel fundamental en la conservación de alimentos; sin embargo, su operación puede generar impactos ambientales asociados principalmente al consumo de energía eléctrica y al uso de refrigerantes con potencial de calentamiento global. En este contexto, el desarrollo de un diseño metodológico para un túnel de congelación industrial debe considerar criterios orientados a la eficiencia energética, la seguridad ambiental y el cumplimiento de la normatividad vigente, con el propósito de minimizar posibles afectaciones sobre los recursos naturales y promover prácticas sostenibles en el sector agroindustrial. En la Tabla 7 se presentan los principales aspectos ambientales asociados al proyecto y las medidas consideradas para su mitigación.

Tabla 7. Consideraciones ambientales asociadas al diseño de un túnel de congelación industrial para productos avícolas

Aspecto ambiental	Posible impacto	Medidas consideradas en el proyecto
Consumo de energía eléctrica	Incremento de la demanda energética y generación indirecta de emisiones de gases de efecto invernadero.	Selección de equipos frigoríficos con criterios de eficiencia energética y adecuado dimensionamiento de la capacidad instalada.
Uso de refrigerantes	Posibles emisiones de sustancias con potencial de calentamiento global en caso de fugas durante la operación del sistema.	Selección de refrigerantes compatibles con las tendencias actuales de reducción del impacto ambiental y cumplimiento de normativas aplicables.
Generación de calor residual	Incremento de la carga térmica en áreas adyacentes debido al funcionamiento de condensadores y equipos auxiliares.	Diseño adecuado del sistema de refrigeración y ubicación estratégica de los equipos para mejorar la disipación térmica.

Uso de materiales aislantes	Consumo de recursos para la fabricación e instalación de paneles y elementos constructivos.	Selección de materiales con propiedades térmicas adecuadas que permitan reducir pérdidas energéticas durante la operación.
Operación de equipos electromecánicos	Consumo continuo de recursos energéticos durante el proceso de congelación.	Optimización de las condiciones de operación mediante cálculos térmicos y selección adecuada de equipos.
Conservación de productos alimentarios	Reducción de pérdidas de alimentos por deterioro y desperdicio.	Diseño de condiciones de congelación que garanticen la conservación y calidad del producto durante el almacenamiento.

Nota: Elaboración propia a partir de (Z. Ma & Xu, 2025; Ofili et al., 2026; Wei et al., 2026)

3. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, dado que emplea cálculos térmicos, criterios de diseño ingenieril y herramientas computacionales para el análisis y dimensionamiento de un túnel de congelación industrial para productos avícolas. El estudio es de tipo descriptivo-aplicado, debido a que busca caracterizar las condiciones térmicas y eléctricas requeridas para el proceso de congelación y aplicar dichos conocimientos en el diseño metodológico de una solución técnica (Hernández Sampieri & Fernandez-Collado, 2014).

El método de investigación corresponde al analítico-deductivo, puesto que parte de fundamentos teóricos relacionados con la transferencia de calor, la refrigeración industrial y el diseño de instalaciones eléctricas para desarrollar una propuesta específica de ingeniería. Como técnicas de investigación se emplean la revisión documental, el modelado térmico, el diseño asistido por computador (CAD), la simulación mediante software especializado y el análisis normativo.

Para el cumplimiento de los objetivos planteados, la investigación se desarrollará mediante cuatro fases metodológicas.

Fase 1. Determinación de las condiciones térmicas del proceso de congelación

Esta fase tiene como finalidad establecer los parámetros térmicos requeridos para garantizar la adecuada congelación de productos avícolas.

Actividad 1.1. Revisión bibliográfica y recopilación de información técnica relacionada con procesos de congelación industrial, características del producto avícola y condiciones operativas requeridas.

Actividad 1.2. Definición de las condiciones de diseño del túnel de congelación, incluyendo temperaturas de operación, capacidad de almacenamiento y requerimientos funcionales del sistema.

Actividad 1.3. Cálculo y modelado de las cargas térmicas mediante software especializado, considerando cargas por producto, transmisión, infiltración y cargas internas.

Fase 2. Diseño del cuarto de congelación mediante herramientas CAD

Esta fase tiene como propósito desarrollar el diseño físico del recinto a partir de los requerimientos térmicos obtenidos.

Actividad 2.1. Elaboración del modelo tridimensional y planos preliminares del cuarto de congelación mediante herramientas CAD.

Actividad 2.2. Definición de la distribución interna, circulación de aire, ubicación de accesos, materiales constructivos y espesores de aislamiento térmico.

Fase 3. Selección y dimensionamiento de los equipos frigoríficos

Esta fase permitirá determinar los componentes principales del sistema de refrigeración requeridos para satisfacer la demanda térmica calculada.

Actividad 3.1. Determinación de la capacidad frigorífica requerida a partir de los resultados obtenidos en el cálculo de cargas térmicas.

Actividad 3.2. Selección y dimensionamiento de compresores, evaporadores, válvulas de expansión y demás componentes mediante software especializado y catálogos técnicos de fabricantes.

Actividad 3.3. Verificación de las condiciones operativas y elaboración de las especificaciones técnicas de los equipos seleccionados.

Fase 4. Diseño del sistema eléctrico de potencia y control

Esta fase busca garantizar que la instalación eléctrica asociada al sistema frigorífico cumpla los requisitos técnicos y normativos establecidos.

Actividad 4.1. Determinación de la demanda eléctrica del sistema y cálculo de conductores, protecciones y dispositivos de maniobra conforme a la normativa aplicable.

Actividad 4.2. Elaboración de diagramas unifilares, esquemas de potencia y control del sistema eléctrico.

Actividad 4.3. Verificación del cumplimiento de los requisitos establecidos en el RETIE y consolidación de la documentación técnica del diseño eléctrico.

4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

4.1. Determinación de las condiciones térmicas del proceso de congelación

4.1.1. Definición de las condiciones de diseño

La determinación de las condiciones de diseño constituye la etapa inicial para el dimensionamiento de un túnel de congelación industrial, debido a que permite establecer los parámetros operativos que servirán como base para el cálculo de cargas térmicas, la selección de equipos frigoríficos y el diseño de la infraestructura requerida. Para el presente proyecto se consideró el procesamiento de productos avícolas, específicamente pollo fresco, el cual debe ser sometido a un proceso de congelación rápida que garantice su adecuada conservación y permita mantener las condiciones de calidad e inocuidad exigidas por la industria alimentaria.

El túnel de congelación fue proyectado para una capacidad aproximada de procesamiento de 5.600 kg de producto por ciclo. El producto ingresa al sistema a una temperatura inicial cercana a 2 °C, correspondiente a las condiciones habituales de almacenamiento refrigerado previas al proceso de congelación. Como condición final de operación se estableció una temperatura de almacenamiento de −18 °C en el centro térmico del producto, valor ampliamente utilizado en la industria para la conservación prolongada de productos cárnicos congelados.

Con el fin de garantizar la calidad del producto y la viabilidad operativa del sistema, se definió un tiempo máximo de congelación de 14 horas por lote. Este criterio permite determinar la capacidad frigorífica requerida y constituye uno de los parámetros fundamentales para el cálculo de la carga térmica asociada al producto.

El espacio disponible para la instalación del túnel de congelación corresponde a un recinto con dimensiones de 6,20 m de longitud, 5,25 m de ancho y 4,00 m de altura. Estas dimensiones permiten disponer adecuadamente el producto,

garantizar la circulación del aire frío y alojar los componentes principales del sistema frigorífico.

La distribución del producto dentro del túnel se estableció mediante una configuración de dos filas, siete columnas de canastas y quince canastas de profundidad, para un total de 210 unidades de almacenamiento. Cada canasta posee una capacidad aproximada de 26,4 kg de producto, obteniéndose una masa total de carga de 5.544 kg de pollo por ciclo de congelación. Esta capacidad resulta coherente con la capacidad nominal de diseño propuesta para la instalación. La Tabla 8 resume las principales condiciones de diseño consideradas para el desarrollo del proyecto.

Tabla 8. *Condiciones generales de diseño del túnel de congelación*

Parámetro	**Valor**
Producto	Pollo
Capacidad de diseño	5.600 kg
Masa real de producto	5.544 kg
Temperatura inicial del producto	2 °C
Temperatura final del producto	−18 °C
Tiempo máximo de congelación	14 h
Longitud del túnel	6,20 m
Ancho del túnel	5,25 m
Altura del túnel	4,00 m
Número de canastas	210
Peso por canasta	26,4 kg

Nota. Elaboración propia.

A partir de estas condiciones de diseño se procedió al cálculo de las cargas térmicas del sistema mediante herramientas computacionales especializadas, con el propósito de determinar la capacidad frigorífica requerida para garantizar el cumplimiento de las condiciones operativas establecidas.

4.1.2. Configuración de almacenamiento del producto

La distribución del producto dentro del túnel de congelación constituye un aspecto fundamental para garantizar una transferencia de calor uniforme y un adecuado desempeño del sistema frigorífico. Una disposición apropiada de las unidades de almacenamiento permite optimizar la circulación del aire frío, reducir diferencias de temperatura entre los productos y asegurar que la congelación se realice de manera homogénea en todo el volumen de carga.

Para el presente diseño se estableció una configuración de almacenamiento compuesta por 210 canastas destinadas al alojamiento del producto avícola. La disposición seleccionada corresponde a dos filas principales, siete columnas y quince canastas de profundidad, permitiendo aprovechar eficientemente el espacio disponible dentro del recinto y facilitando las operaciones de carga y descarga.

Cada canasta posee una capacidad aproximada de 26,4 kg de producto, alcanzando una masa total almacenada de 5.544 kg por ciclo de congelación. Esta configuración fue definida considerando la capacidad de procesamiento requerida y las dimensiones disponibles del túnel, buscando mantener una adecuada relación entre densidad de almacenamiento y circulación de aire.

Uno de los criterios más importantes durante el diseño fue garantizar espacios suficientes entre las filas de producto para permitir el paso uniforme del aire impulsado por los ventiladores del evaporador. En los túneles de congelación por aire forzado, la transferencia de calor depende directamente de la velocidad y distribución del flujo de aire alrededor del producto. Cuando existen obstrucciones o zonas de alta concentración de carga, pueden generarse regiones con menor velocidad de circulación, ocasionando diferencias en los tiempos de congelación y afectando la calidad final del producto.

La distribución adoptada permite que el aire frío circule a través de los espacios existentes entre las canastas, favoreciendo el contacto directo con la superficie del producto y aumentando el coeficiente de transferencia de calor por convección. De esta manera, se promueve una extracción uniforme de energía térmica desde todas las zonas del túnel, reduciendo la posibilidad de puntos calientes y mejorando la eficiencia global del proceso.

Adicionalmente, la configuración seleccionada facilita las actividades operativas relacionadas con la manipulación del producto, inspección visual de las condiciones de almacenamiento y mantenimiento de los equipos frigoríficos. La disposición de las canastas también permite futuras modificaciones en la capacidad de almacenamiento sin afectar significativamente la distribución general del recinto. Por su parte, la Tabla 9 resume las principales características de almacenamiento consideradas durante el diseño.

Tabla 9. *Configuración de almacenamiento del producto*

Parámetro	Valor
Número de filas	2
Número de columnas	7
Canastas por profundidad	15
Número total de canastas	210
Capacidad por canasta	26,4 kg
Masa total almacenada	5.544 kg
Tipo de producto	Pollo
Método de congelación	Aire forzado

Nota. Elaboración propia.

La configuración de almacenamiento definida constituye la base para el modelado térmico posterior, debido a que determina la carga de producto que debe

ser considerada durante el cálculo de las cargas térmicas y el dimensionamiento de los equipos frigoríficos requeridos para el sistema.

4.1.3. Modelado y cálculo de la carga térmica mediante CoolTool

Una vez definidas las condiciones de diseño del túnel de congelación y la configuración de almacenamiento del producto, se procedió a determinar la carga térmica total del sistema mediante el software CoolTool, herramienta especializada para el diseño y análisis de sistemas de refrigeración industrial. Este software permite estimar las ganancias de calor asociadas al producto, las pérdidas por transmisión a través de la envolvente del recinto, las infiltraciones de aire y las cargas internas generadas durante la operación. La interfaz principal del programa utilizada durante el desarrollo del proyecto se presenta en la Figura 2.

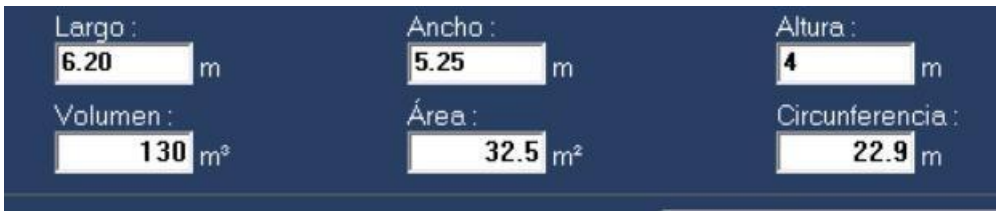
Figura 2. Interfaz principal del software CoolTool

Fuente: Software CoolTool.

Inicialmente se ingresaron las dimensiones físicas del túnel de congelación, correspondientes a una longitud de 6,20 m, un ancho de 5,25 m y una altura de 4,00 m. A partir de estos parámetros, el software calcula automáticamente el volumen interno del recinto, las superficies de transferencia térmica y otros parámetros

geométricos necesarios para el análisis energético. La configuración dimensional implementada en el software se presenta en la Figura 3.

Figura 3. Dimensiones del túnel de congelación ingresadas en CoolTool



Fuente: Elaboración propia mediante software CoolTool.

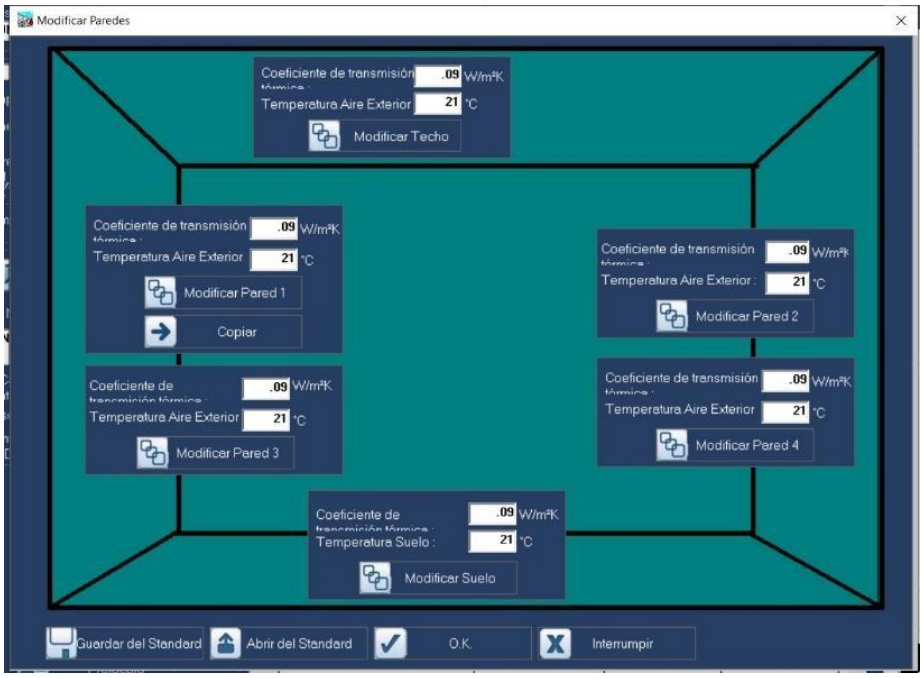
Posteriormente se definieron las condiciones térmicas internas de operación. Para garantizar la congelación del producto hasta una temperatura final de −18 °C, se estableció una temperatura del aire interior de −24 °C. Asimismo, se consideró una diferencia de temperatura entre el aire del recinto y la temperatura de evaporación del refrigerante (ΔTM) de 6 °C, valor utilizado habitualmente en aplicaciones de congelación industrial. El software determina automáticamente otros parámetros complementarios, tales como la diferencia media de temperatura (ΔT1), la temperatura de evaporación y la humedad relativa del recinto. Estos parámetros pueden observarse en la Figura 4.

Figura 4. Parámetros térmicos del aire interior

Fuente: Elaboración propia mediante software CoolTool.

Una vez definidas las condiciones internas del túnel, se procedió a caracterizar la envolvente térmica del recinto. El software permite calcular los coeficientes globales de transferencia de calor para paredes, techo y piso, considerando tanto las propiedades de los materiales de construcción como las condiciones ambientales exteriores. Esta configuración se presenta en la *Figura 5*.

***Figura 5**. Configuración de paredes y superficies de transferencia térmica*

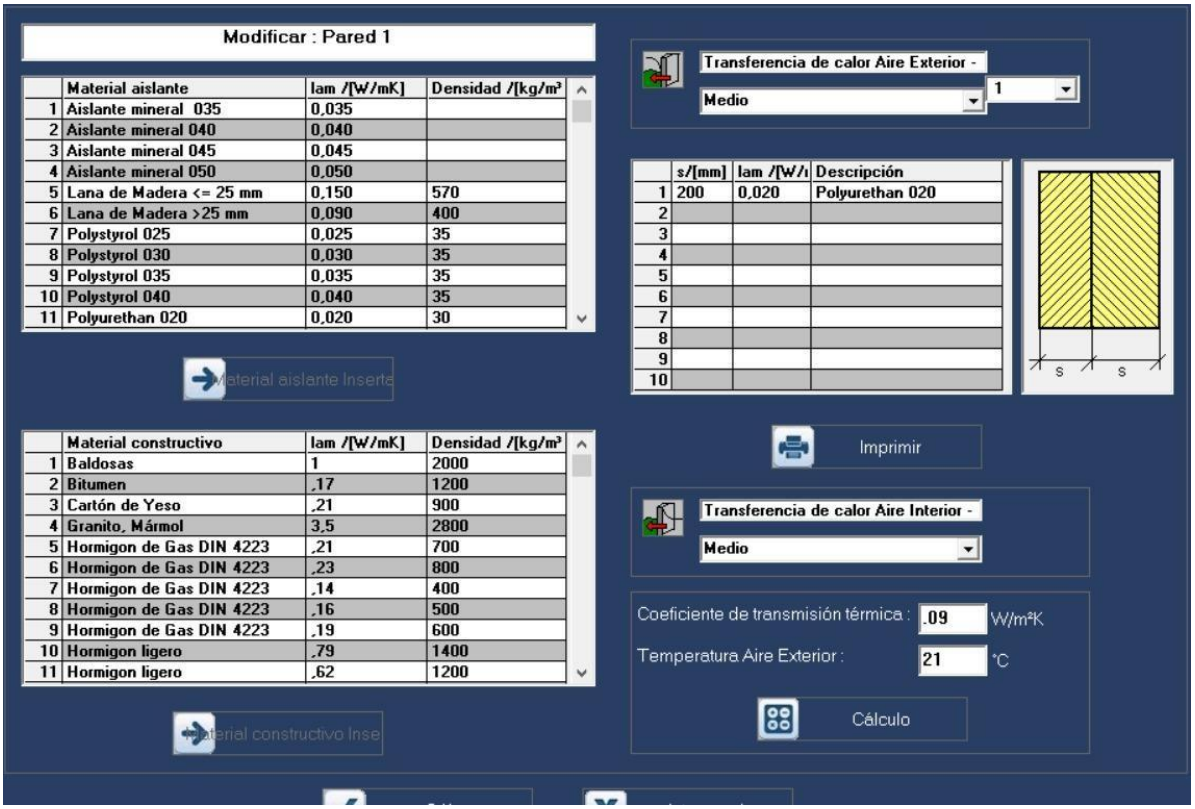


Fuente: Elaboración propia mediante software CoolTool.

Para minimizar las ganancias de calor desde el ambiente exterior, se seleccionó como material de aislamiento paneles de poliuretano, ampliamente utilizados en la industria de refrigeración debido a su baja conductividad térmica y elevada resistencia mecánica. El aislamiento seleccionado corresponde a poliuretano tipo 020, el cual proporciona un adecuado desempeño térmico para aplicaciones de

congelación industrial. La configuración del aislamiento dentro del software se muestra en la Figura 6.

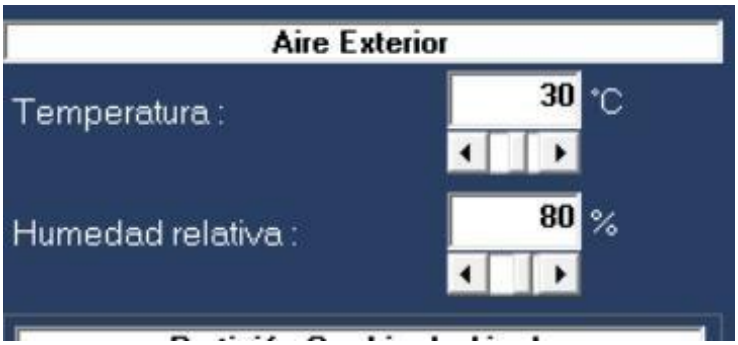
Figura 6. Selección del aislamiento térmico



Fuente: Elaboración propia mediante software CoolTool.

De igual forma, se definió la temperatura ambiente exterior a la cual estará expuesto el túnel de congelación, ya que esta variable influye directamente en las cargas térmicas por transmisión a través de paredes, techo y piso. La parametrización de esta condición se presenta en la Figura 7.

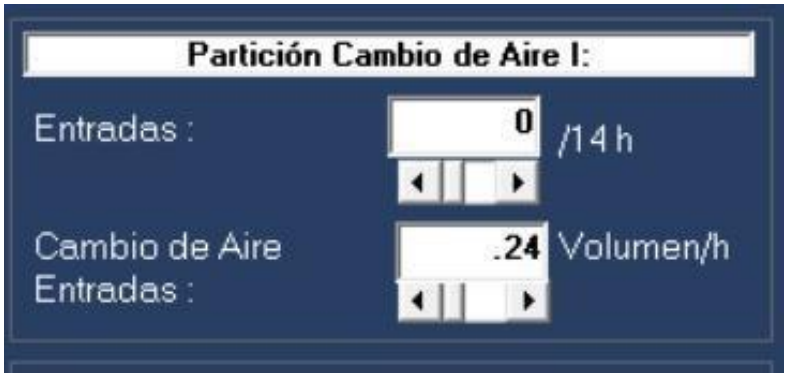
Figura 7. Configuración de la temperatura exterior de diseño



Fuente: Elaboración propia mediante software CoolTool.

Además de las cargas por transmisión, fue necesario considerar las ganancias de calor asociadas a la infiltración de aire exterior. Estas infiltraciones se producen principalmente durante las operaciones de carga y descarga del producto y dependen de las características constructivas del acceso al túnel. En la Figura 8 se presenta la configuración correspondiente al intercambio de aire con el ambiente exterior.

Figura 8. Parámetros de infiltración de aire exterior

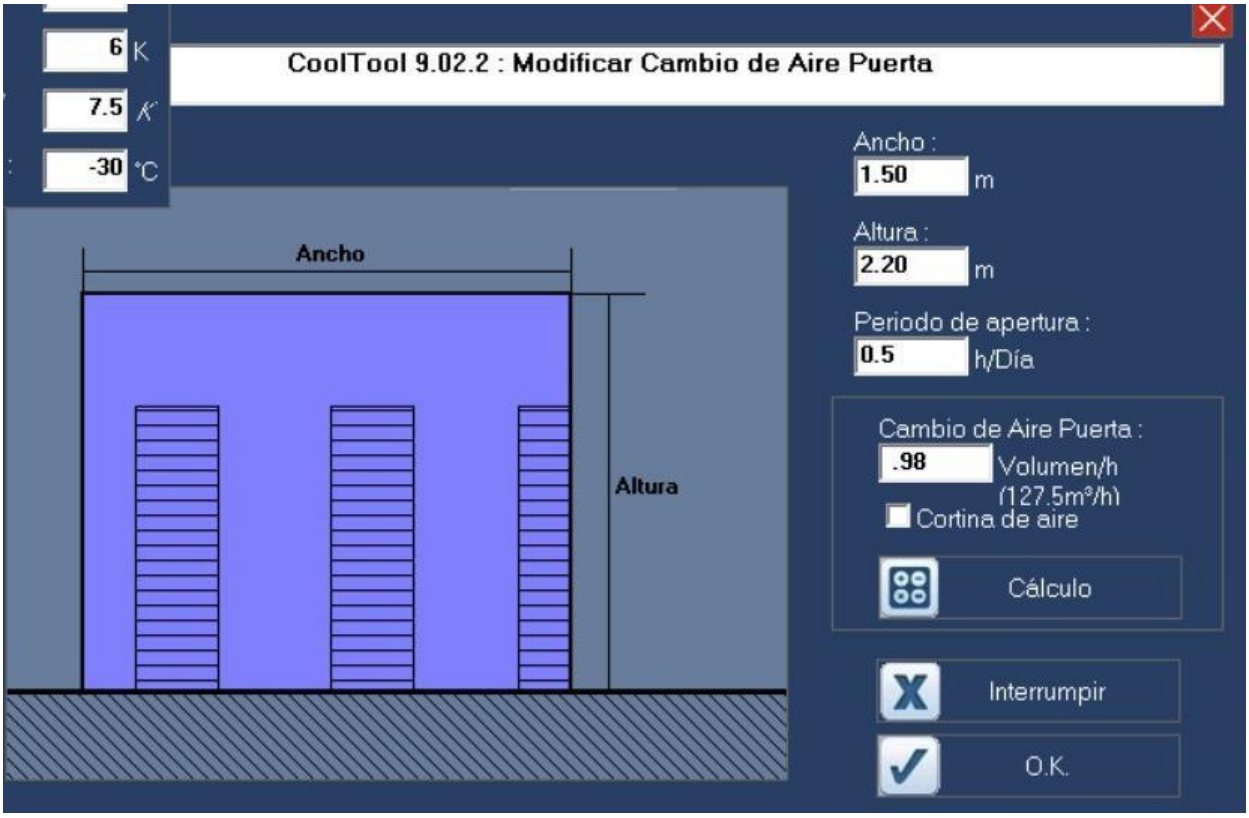


Fuente: Elaboración propia mediante software CoolTool.

El cálculo de las infiltraciones también requiere definir las dimensiones de la puerta de acceso y las condiciones de apertura durante la operación. Estas

variables influyen directamente sobre la cantidad de aire caliente y húmedo que ingresa al recinto refrigerado, afectando la carga térmica total del sistema. Los parámetros considerados para este análisis se muestran en la Figura 9.

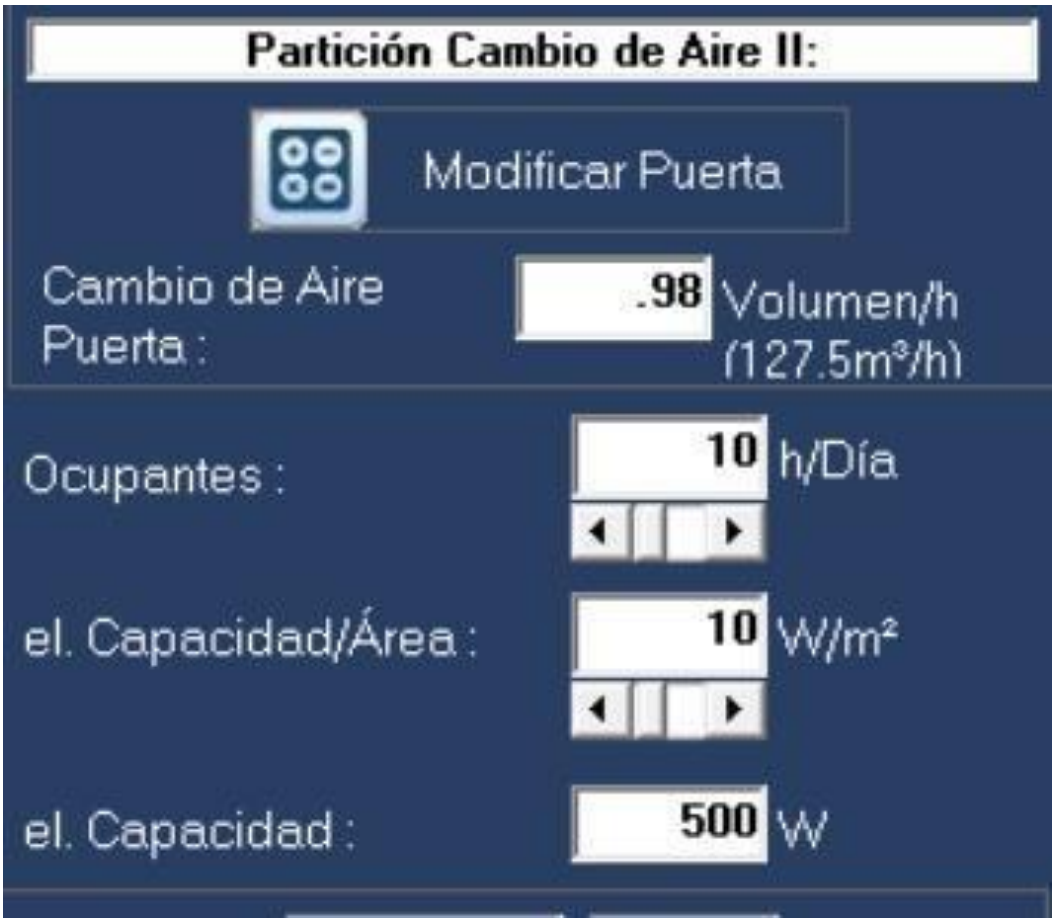
Figura 9. Configuración de las condiciones de apertura de puerta



Fuente: Elaboración propia mediante software CoolTool.

Posteriormente se incorporaron las cargas térmicas internas asociadas a la presencia de personal, sistemas de iluminación y elementos auxiliares de la instalación. Estas contribuciones representan fuentes adicionales de calor que deben ser removidas por el sistema frigorífico para mantener las condiciones de operación requeridas. La configuración correspondiente se presenta en la Figura 10.

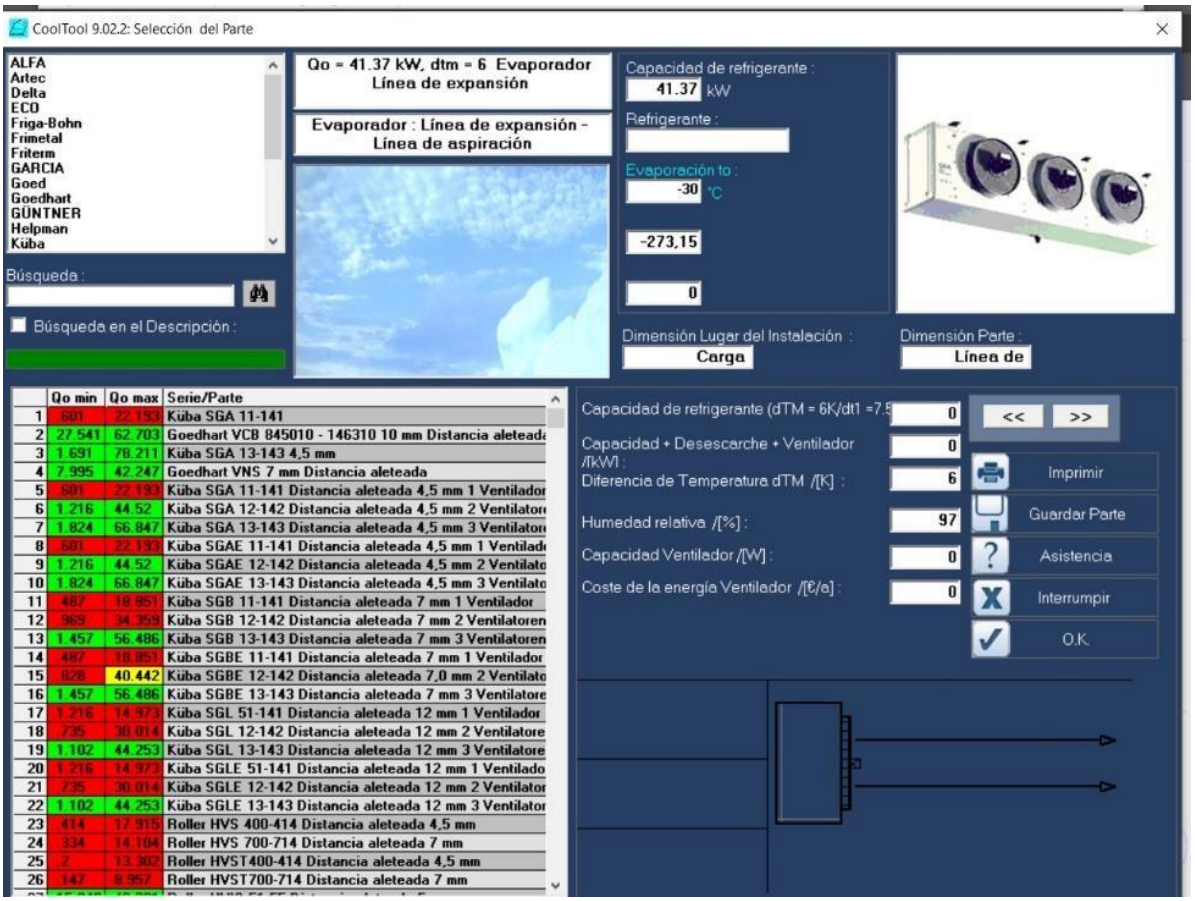
Figura 10. Definición de cargas térmicas internas



Fuente: Elaboración propia mediante software CoolTool.

Con las condiciones anteriores definidas, el software realizó una primera estimación de la capacidad frigorífica requerida y solicitó la selección de un evaporador adecuado para el sistema. En esta etapa se obtuvo una capacidad preliminar de 41,37 kW, la cual permitió seleccionar un evaporador de la base de datos del programa para continuar con el análisis de cargas adicionales asociadas al funcionamiento de ventiladores y sistemas de desescarche. Este procedimiento se observa en la Figura 11.

Figura 11. Selección preliminar del evaporador



Fuente: Elaboración propia mediante software CoolTool.

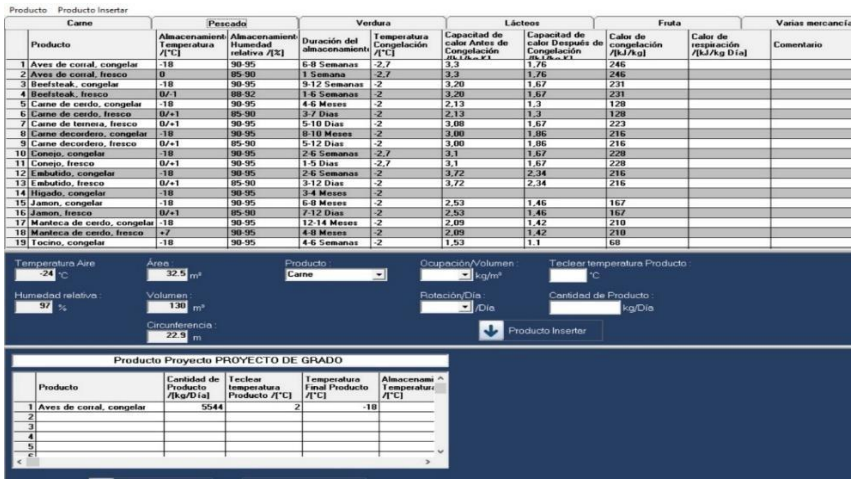
Una vez seleccionado el evaporador, el software incorporó automáticamente las cargas térmicas generadas por los motores de los ventiladores y por el sistema de desescarche, las cuales constituyen aportes adicionales que deben ser considerados dentro del balance energético global del túnel. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 12.

Figura 12. Cargas térmicas asociadas al evaporador

Fuente: Elaboración propia mediante software CoolTool.

Posteriormente se procedió a ingresar la información correspondiente al producto. Dentro de la base de datos del software se seleccionó la categoría "Ave de corral – Congelar", especificando una masa total de 5.544 kg, una temperatura inicial de 2 °C y una temperatura final de −18 °C. A partir de estos datos, el programa determinó la energía requerida para el enfriamiento, congelación y almacenamiento del producto. La configuración utilizada se presenta en la Figura 13.

Figura 13. Parámetros del producto a congelar



Producto Producto Insertar

	Carne	Pescado		Verdura		Lácteos		Fruta		Varias mercancía
	Producto	Almacenamient Temperatura /[°C]	Almacenamient Humedad relativa /[%]	Duración del almacenamient	Temperatura Congelación /[°C]	Capacitad de calor Antes de Congelación	Capacitad de calor Después de Congelación	Calor de congelación /[kJ/kg]	Calor de respiración /[kJ/kg Día]	Comentario
1	Aves de corral, congelar	-18	90-95	6-8 Semanas	-2,7	3,3	1,76	246		
2	Aves de corral, fresco	0	85-90	1 Semana	-2,7	3,3	1,76	246		
3	Beefsteak, congelar	-18	90-95	9-12 Semanas	-2	3,20	1,67	231		
4	Beefsteak, fresco	0/-1	88-92	1-6 Semanas	-2	3,20	1,67	231		
5	Carne de cerdo, congelar	-18	90-95	4-6 Meses	-2	2,13	1,3	128		
6	Carne de cerdo, fresco	0/+1	85-90	3-7 Dias	-2	2,13	1,3	128		
7	Carne de ternera, fresco	0/+1	90-95	5-10 Dias	-2	3,08	1,67	223		
8	Carne decordero, congelar	-18	90-95	8-10 Meses	-2	3,00	1,86	216		
9	Carne decordero, fresco	0/+1	85-90	5-12 Dias	-2	3,00	1,86	216		
10	Conejo, congelar	-18	90-95	2-6 Semanas	-2,7	3,1	1,67	228		
11	Conejo, fresco	0/+1	90-95	1-5 Dias	-2,7	3,1	1,67	228		
12	Embutido, congelar	-18	90-95	2-6 Semanas	-2	3,72	2,34	216		
13	Embutido, fresco	0/+1	85-90	3-12 Dias	-2	3,72	2,34	216		
14	Higado, congelar	-18	90-95	3-4 Meses	-2					
15	Jamon, congelar	-18	90-95	6-8 Meses	-2	2,53	1,46	167		
16	Jamon, fresco	0/+1	85-90	7-12 Dias	-2	2,53	1,46	167		
17	Manteca de cerdo, congelar	-18	90-95	12-14 Meses	-2	2,09	1,42	210		
18	Manteca de cerdo, fresco	+/	90-95	4-8 Meses	-2	2,09	1,42	210		
19	Tocino, congelar	-18	90-95	4-6 Semanas	-2	1,53	1,1	68		

Temperatura Aire: -24 °C
Área: 32,5 m²
Producto: Carne
Ocupación/Volumen: kg/m³
Teclear temperatura Producto: °C
Humedad relativa: 97 %
Volumen: 130 m³
Rotación/Día: /Día
Cantidad de Producto: kg/Día
Circunferencia: 22,9 m
Producto Insertar

Producto Proyecto PROYECTO DE GRADO

	Producto	Cantidad de Producto /[kg/Día]	Teclear temperatura Producto /[°C]	Temperatura Final Producto /[°C]	Almacenami Temperatura /[°C]
1	Aves de corral, congelar	5544	2	-18	
2					
3					
4					
5					

Fuente: Elaboración propia mediante software CoolTool.

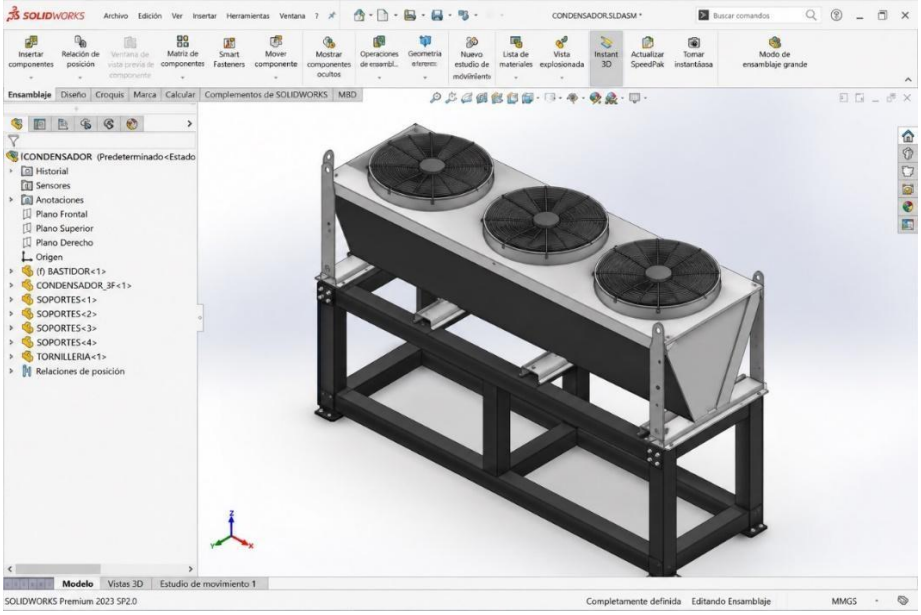
Finalmente, una vez integradas todas las contribuciones térmicas asociadas al producto, transmisión, infiltración y cargas internas, el software calculó la carga frigorífica total requerida para el túnel de congelación. El resultado obtenido fue una potencia frigorífica equivale a 42,28 kW, correspondiente a 144.301 BTU/h o 12,02 toneladas de refrigeración (TR). Este valor será utilizado en las etapas posteriores para el dimensionamiento de compresores, evaporadores, válvulas de expansión y demás componentes que conforman el sistema de refrigeración del túnel de congelación.

4.2. Diseño del cuarto de congelación mediante herramienta CAD

4.2.1. Modelado CAD 3D del túnel de congelación

Una vez establecidas las condiciones de diseño y los requerimientos térmicos y operativos del sistema, se desarrolló el modelado tridimensional del túnel de congelación mediante el software SolidWorks. El proceso permitió representar geométricamente el recinto, la zona técnica y los principales componentes del sistema frigorífico, integrándolos progresivamente en un ensamblaje general. El desarrollo del modelo CAD se realizó a partir de componentes y subconjuntos independientes, facilitando su posicionamiento, modificación y posterior integración.

Figura 14. Ensamblaje CAD 3D general del túnel de congelación y sistema frigorífico.

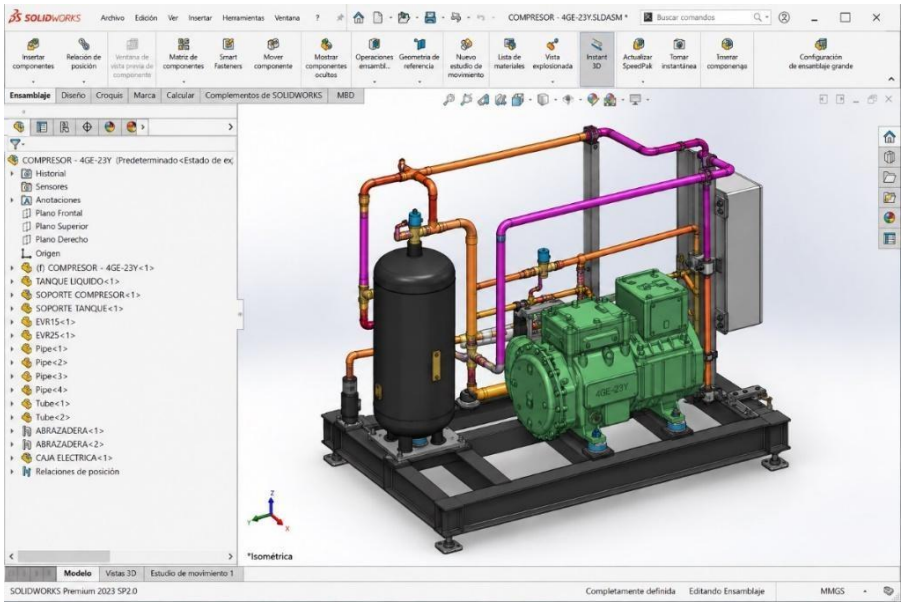


Fuente: Elaboración propia mediante SolidWorks.

Inicialmente, se consolidó el ensamblaje general con el propósito de establecer la relación espacial entre el cuarto de congelación y la zona técnica exterior. En el modelo se incorporaron los cerramientos laterales, la cubierta, el acceso principal, la base estructural y el espacio destinado a los equipos frigoríficos. De esta manera, fue posible visualizar la configuración global de la instalación y disponer de una referencia tridimensional para la ubicación posterior de cada uno de los componentes del sistema.

A partir del ensamblaje general, se desarrollaron los diferentes subconjuntos que conforman el sistema de refrigeración. Uno de ellos correspondió al condensador, cuyo modelo se integró con una estructura metálica de soporte diseñada para proporcionar una base independiente al equipo. La representación CAD incluyó el cuerpo principal del condensador, los tres ventiladores dispuestos en su parte superior y los elementos estructurales requeridos para su instalación, permitiendo establecer su configuración geométrica dentro de la zona técnica.

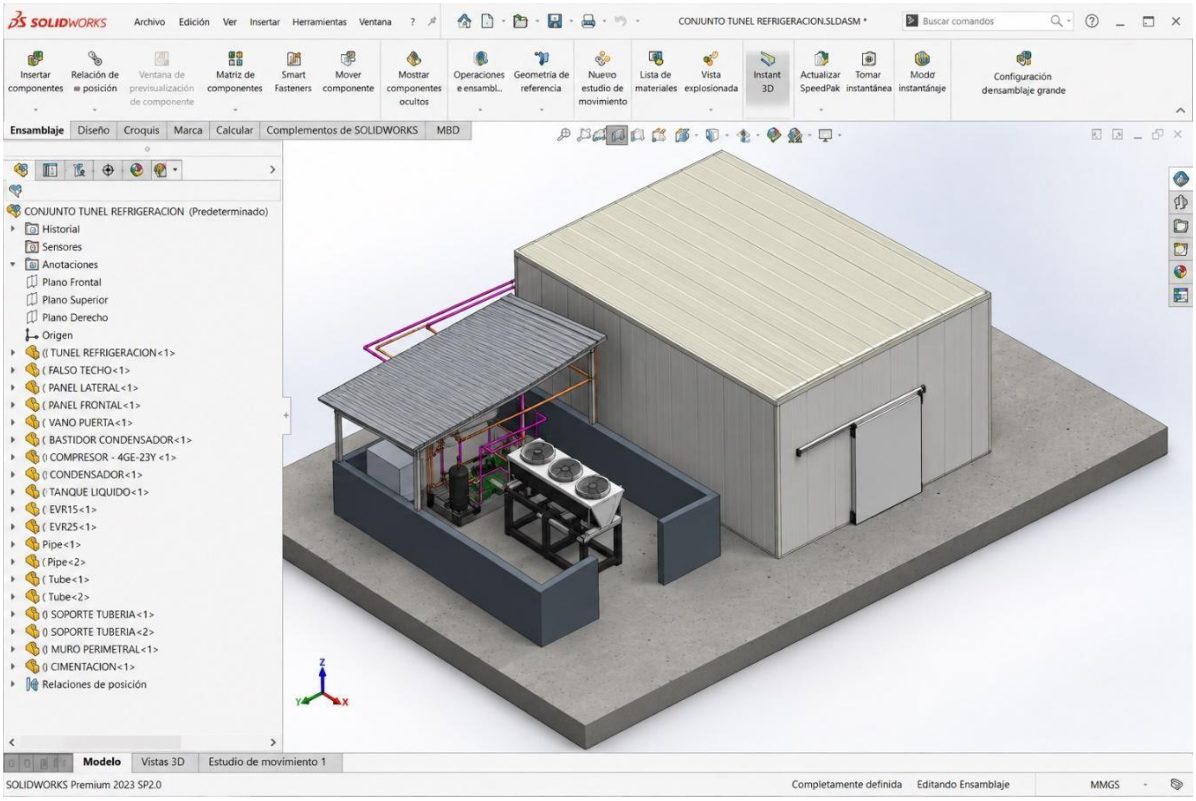
Figura 15. Modelado CAD del condensador y estructura de soporte.



Fuente: Elaboración propia mediante SolidWorks.

Posteriormente, se desarrolló el subconjunto correspondiente a la etapa de compresión y sus elementos auxiliares. En este ensamblaje se incorporaron el compresor, el recipiente de líquido, la estructura de soporte, las tuberías, válvulas, accesorios y elementos de conexión que conforman esta sección del circuito frigorífico. La representación individual de estos componentes permitió definir sus posiciones relativas y establecer los recorridos de las líneas de conexión antes de integrar el subconjunto al modelo general del túnel.

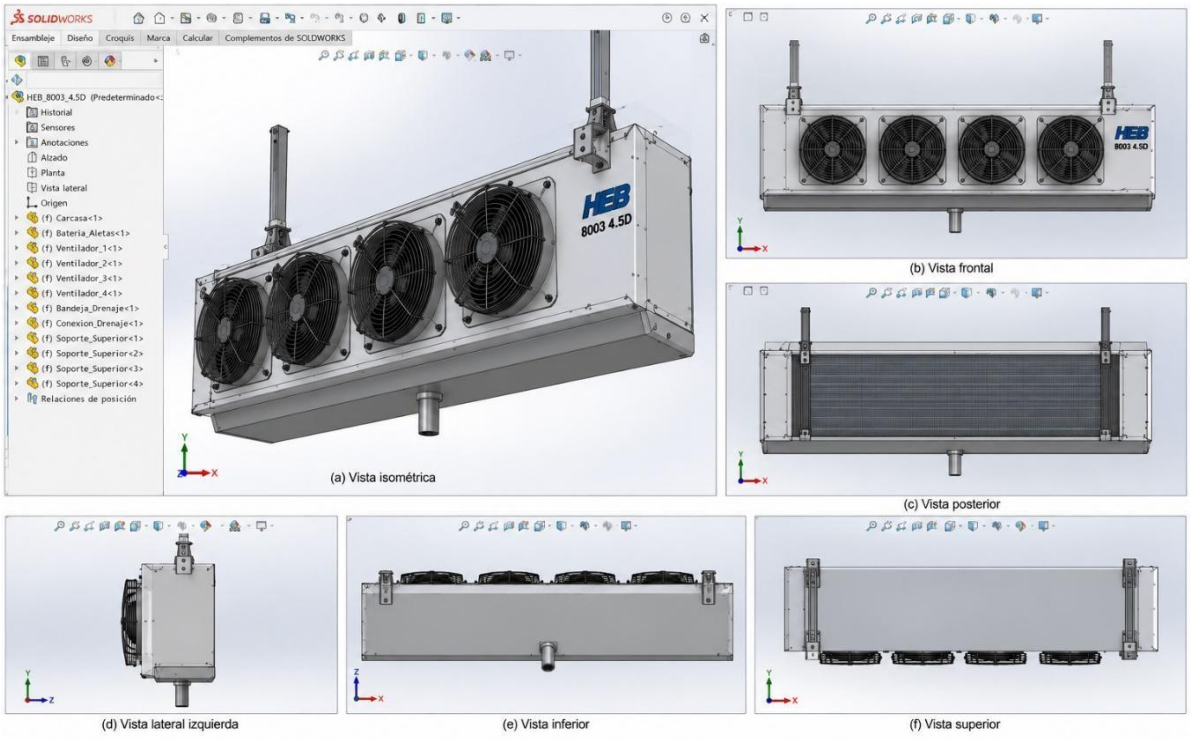
Figura 16. Modelado CAD del conjunto de compresión y elementos auxiliares del sistema frigorífico.



Fuente: Elaboración propia mediante SolidWorks.

Como parte de la definición de la circulación de aire en el interior del túnel, se incorporó al modelo CAD el evaporador HEB 8003 4.5D, dispuesto en la zona superior del recinto y soportado mediante elementos de fijación a la estructura. El modelado contempló la carcasa, la batería aleteada, el conjunto de ventiladores, la bandeja y conexión de drenaje y los soportes superiores, permitiendo establecer su posición con respecto al volumen destinado al almacenamiento del producto. La orientación del conjunto de ventiladores se consideró para mantener una trayectoria de impulsión de aire libre de obstrucciones hacia la zona de congelación y facilitar posteriormente su retorno a través de la batería del evaporador. La Figura 17 presenta el modelo tridimensional y las diferentes vistas utilizadas para verificar la disposición geométrica del equipo dentro del diseño.

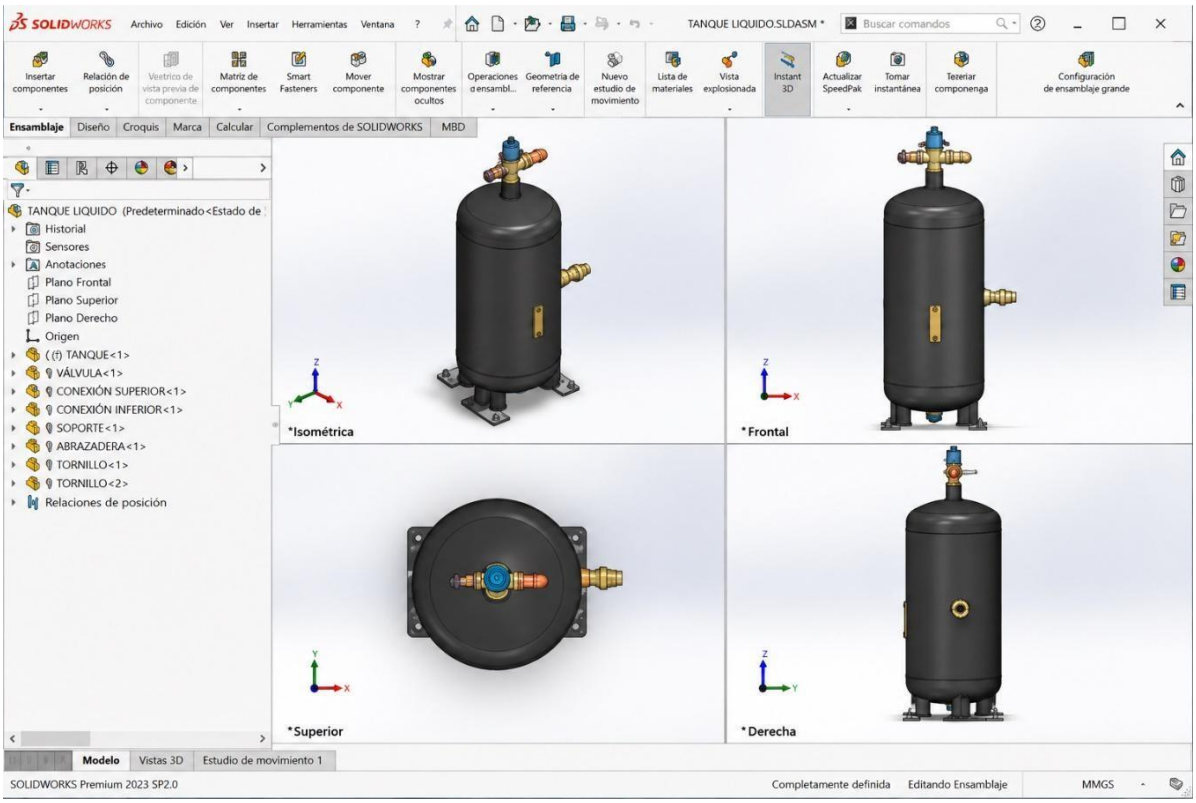
Figura 17. Modelado CAD del evaporador HEB 8003 4.5D y sus elementos de soporte.



Fuente: Elaboración propia mediante SolidWorks.

Como parte del desarrollo detallado de los componentes auxiliares, se realizó igualmente el modelado del recipiente de líquido. Para este elemento se definieron el cuerpo cilíndrico, los apoyos inferiores y los elementos de conexión requeridos para su incorporación al circuito frigorífico. La geometría obtenida se verificó mediante las vistas isométrica, frontal, superior y lateral, permitiendo comprobar la disposición de sus conexiones y su configuración antes de incorporarlo al conjunto de compresión.

Figura 18. Modelado CAD del recipiente de líquido y sus elementos de conexión.



Fuente: Elaboración propia mediante SolidWorks.

Finalmente, los subconjuntos desarrollados fueron integrados dentro del ensamblaje general, estableciendo la disposición espacial del condensador, el conjunto de compresión, el recipiente de líquido y las líneas frigoríficas con respecto al cuarto de congelación. El uso del entorno CAD permitió revisar visualmente la compatibilidad geométrica entre los componentes, sus estructuras de soporte y las áreas disponibles para su instalación, obteniéndose así el modelo tridimensional que constituye la base geométrica del diseño propuesto.

4.2.2. Desarrollo de la distribución interna, circulación de aire, ubicación de accesos, materiales constructivos y espesores de aislamiento térmico

Una vez definido el modelo tridimensional del túnel de congelación, se procedió a establecer los criterios correspondientes a la distribución interna del recinto, la circulación del aire, la ubicación de los accesos y la configuración de la envolvente térmica. Estos aspectos se desarrollaron de manera articulada con las condiciones de diseño establecidas previamente, procurando mantener correspondencia entre la configuración geométrica del modelo CAD y los parámetros empleados para el cálculo de la carga frigorífica.

La distribución interna se estableció tomando como referencia la configuración de almacenamiento definida para el producto avícola. Para ello, se consideró el espacio requerido para su disposición dentro del recinto y la necesidad de conservar áreas libres que permitieran las operaciones de ingreso, retiro y manipulación. Asimismo, se contemplaron separaciones entre el producto, los cerramientos y los equipos instalados en el interior, evitando ocupar completamente el volumen disponible y conservando espacios destinados al desplazamiento del aire frío.

En relación con la circulación de aire, se consideró el principio de convección forzada característico de los túneles de congelación, en los cuales los ventiladores asociados al evaporador generan el movimiento del aire a baja temperatura a través del recinto. La distribución del producto se planteó procurando no obstruir directamente las zonas de impulsión y retorno del evaporador, de manera que existiera un recorrido disponible para el aire alrededor de la carga almacenada. Esta consideración corresponde a un criterio de diseño geométrico y operativo, sin constituir una validación de la uniformidad del campo de velocidades o temperaturas mediante simulación de dinámica de fluidos.

La ubicación del acceso principal se definió considerando las operaciones previstas para el ingreso y retiro del producto y su compatibilidad con la distribución interna del túnel. Adicionalmente, la presencia de la puerta fue incorporada dentro del análisis térmico debido a que su apertura representa una fuente de infiltración de aire exterior. En el procedimiento desarrollado mediante CoolTool se contemplaron tanto los parámetros de infiltración como las condiciones asociadas a la apertura de la puerta.

Posteriormente, se estableció la configuración constructiva de la envolvente térmica, considerando las paredes, cubierta, piso y puerta como elementos que separan el ambiente refrigerado de las condiciones exteriores. Para su definición se tuvieron en cuenta las características de los cerramientos y del material aislante, debido a que estos parámetros intervienen directamente en la transferencia de calor hacia el interior del túnel. El procedimiento de cálculo desarrollado previamente incluyó específicamente la configuración de las paredes y superficies de transferencia térmica, así como la selección del aislamiento.

El espesor del aislamiento térmico se incorporó como un parámetro del diseño de la envolvente y se relacionó con las condiciones de temperatura consideradas para el interior y exterior del recinto. De esta manera, las características constructivas utilizadas en el análisis térmico fueron consideradas también durante la definición geométrica del túnel, manteniendo consistencia entre el modelo empleado para calcular la carga frigorífica y la propuesta física desarrollada mediante CAD.

4.3. Selección y dimensionamiento de los equipos frigoríficos

4.3.1. Determinación de la capacidad frigorífica requerida a partir de los resultados obtenidos en el cálculo de cargas térmicas

Una vez finalizado el modelado térmico del túnel de congelación mediante el software CoolTool, se procedió a determinar la capacidad frigorífica requerida para satisfacer las condiciones de operación establecidas durante el diseño. Esta capacidad constituye el parámetro principal para la selección de los equipos que conforman el sistema de refrigeración, ya que permite garantizar la extracción de calor necesaria para alcanzar y mantener las temperaturas requeridas durante el proceso de congelación de productos avícolas.

Como resultado del análisis térmico desarrollado en la fase anterior, se obtuvo una carga frigorífica total de 42,28 kW, equivalente a 144.301 BTU/h o aproximadamente 12,02 toneladas de refrigeración (TR). Este valor incorpora las cargas asociadas al enfriamiento y congelación del producto, las ganancias térmicas por transmisión a través de la envolvente del recinto, las infiltraciones de aire exterior y las cargas internas generadas por iluminación, personal y equipos auxiliares.

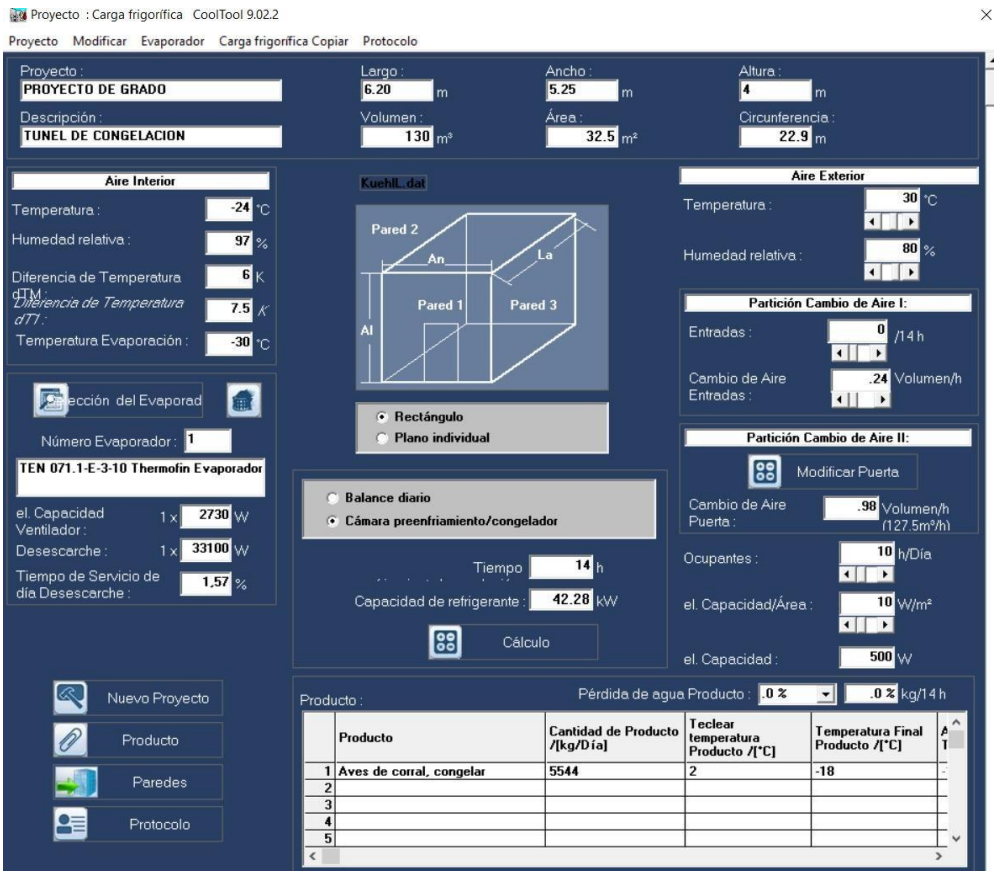
La capacidad frigorífica calculada fue adoptada como criterio de diseño para el dimensionamiento de los equipos frigoríficos principales. Debido a la magnitud de la carga térmica requerida y con el propósito de mejorar la flexibilidad operativa del sistema, se optó por distribuir la capacidad frigorífica total en dos circuitos de refrigeración de capacidad equivalente. De esta manera, cada circuito debe suministrar aproximadamente 21,14 kW de potencia frigorífica.

Esta configuración permite mejorar la continuidad operativa del sistema, facilitar labores de mantenimiento y reducir el impacto de eventuales fallas sobre el proceso

de congelación. Adicionalmente, la utilización de dos unidades de capacidad similar favorece la disponibilidad comercial de los equipos y simplifica los procesos de selección y adquisición.

A partir de la capacidad frigorífica determinada se procedió a la selección y dimensionamiento de los compresores, evaporadores, válvulas de expansión y demás componentes requeridos para el funcionamiento del sistema de refrigeración industrial. La Figura 19 presenta el resultado de la capacidad frigorífica de diseño obtenida mediante CoolTool descrito en la sección 4.1.

Figura 19. Resultado de la carga frigorífica total



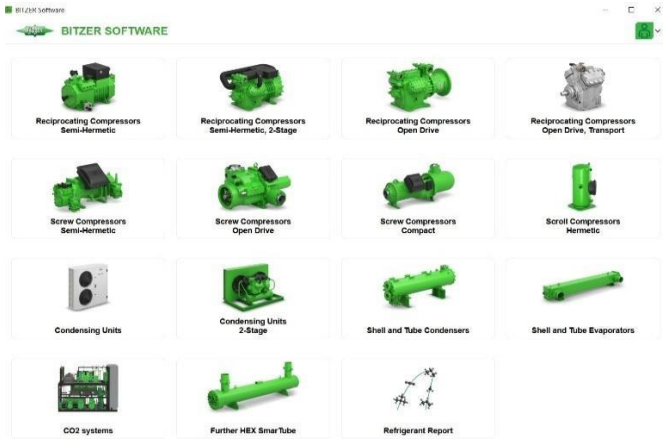
Fuente: Elaboración propia mediante software CoolTool.

4.3.2. Desarrollo de la distribución interna, circulación de aire, ubicación de accesos, materiales constructivos y espesores de aislamiento térmico

Una vez determinada la capacidad frigorífica requerida para el túnel de congelación, se procedió a la selección y dimensionamiento de los componentes principales del sistema de refrigeración. Para esta actividad se utilizaron herramientas computacionales especializadas y catálogos técnicos de fabricantes reconocidos en el sector de la refrigeración industrial. El proceso de selección se desarrolló considerando las condiciones de operación establecidas previamente, tales como la capacidad frigorífica requerida, las temperaturas de evaporación y condensación, así como el refrigerante seleccionado para el sistema.

Inicialmente se realizó la selección de los compresores mediante el software BITZER, herramienta de libre acceso ampliamente utilizada para el dimensionamiento de sistemas de refrigeración industrial. Este software permite evaluar diferentes configuraciones de compresores en función de la capacidad frigorífica requerida y las condiciones termodinámicas de operación.

Figura 20. *Interfaz principal del software BITZER.*

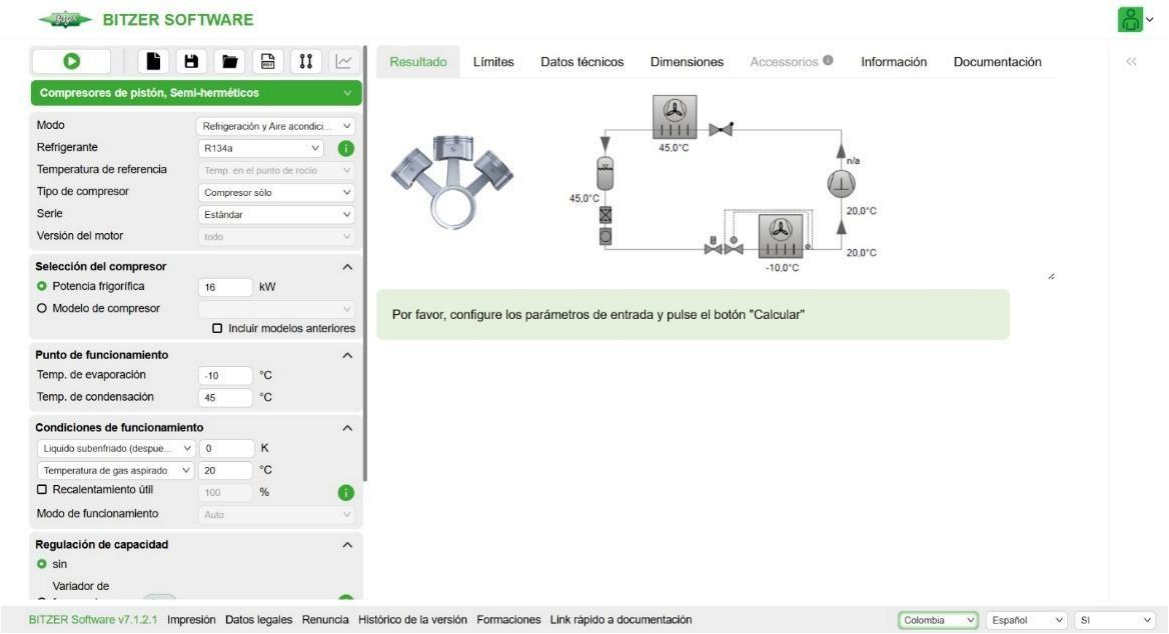


Fuente: Elaboración propia mediante software BITZER.

La Figura 20 presenta la interfaz principal del software BITZER, donde se configuran los parámetros de selección del sistema frigorífico. A través de esta herramienta es posible definir el tipo de compresor, el refrigerante de trabajo, las temperaturas de evaporación y condensación, así como la capacidad frigorífica requerida para la aplicación.

Debido a que la carga frigorífica total obtenida para el túnel de congelación fue de 42,28 kW, se optó por distribuir la capacidad requerida en dos circuitos frigoríficos de igual capacidad. Esta decisión permite mejorar la flexibilidad operativa del sistema, facilitar las labores de mantenimiento y garantizar una mayor confiabilidad durante la operación del túnel de congelación.

Figura 21. Parámetros de selección del compresor en el software BITZER.



Fuente: Elaboración propia mediante software BITZER.

Como se observa en la Figura 21, se seleccionaron compresores reciprocantes semiherméticos, debido a que constituyen una de las tecnologías más utilizadas y comercialmente disponibles en el mercado colombiano para aplicaciones de refrigeración industrial. Asimismo, se definió el refrigerante R507A y una temperatura de condensación de 45 °C, parámetros acordes con las condiciones de diseño consideradas para el proyecto. Posteriormente se ejecutó la simulación correspondiente dentro del software, obteniendo la capacidad frigorífica requerida para cada circuito de refrigeración.

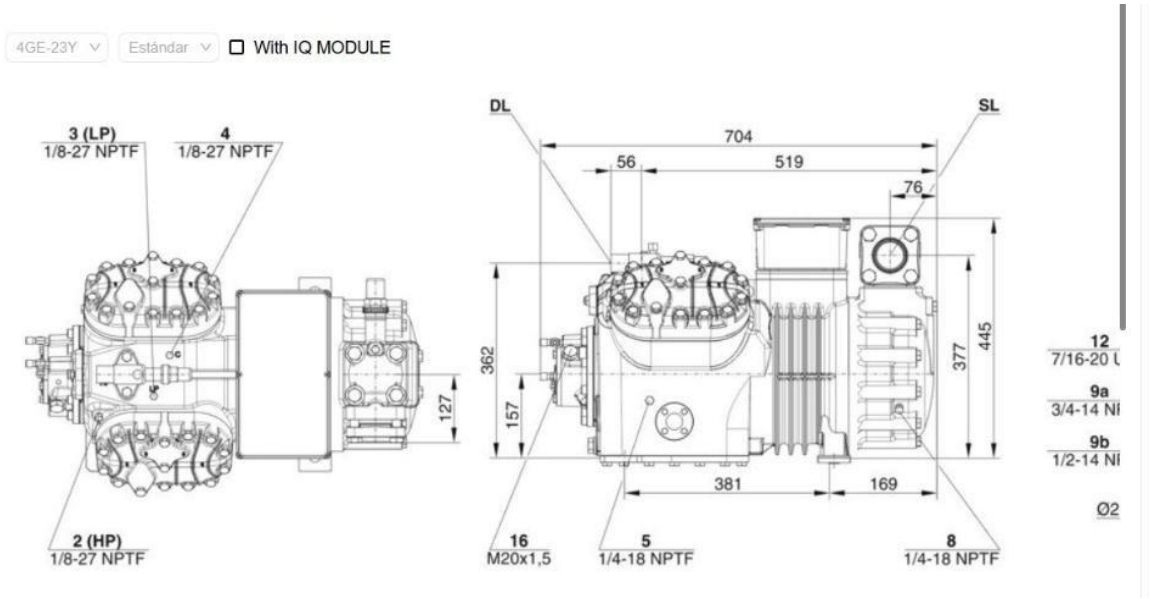
La Figura 22 presenta los resultados obtenidos a partir de la simulación realizada. El software determinó que para suministrar una capacidad frigorífica de 21,14 kW por circuito se requiere un compresor BITZER referencia 4GE-23Y-20P. Considerando que la carga frigorífica total del sistema corresponde a 42,28 kW, se seleccionaron dos compresores de esta referencia para satisfacer la demanda térmica calculada durante la fase de modelado térmico.

Figura 22. Resultado de selección del compresor mediante BITZER.

Fuente: Elaboración propia mediante software BITZER.

Una vez definido el modelo de compresor, se verificaron sus características dimensionales con el propósito de garantizar la compatibilidad con el espacio disponible dentro de la instalación y facilitar futuras labores de montaje y mantenimiento. La Figura 23 muestra las dimensiones físicas del compresor seleccionado, información suministrada por el fabricante y utilizada para la integración mecánica del sistema frigorífico dentro del diseño general del túnel de congelación.

Figura 23. Dimensiones generales del compresor seleccionado.

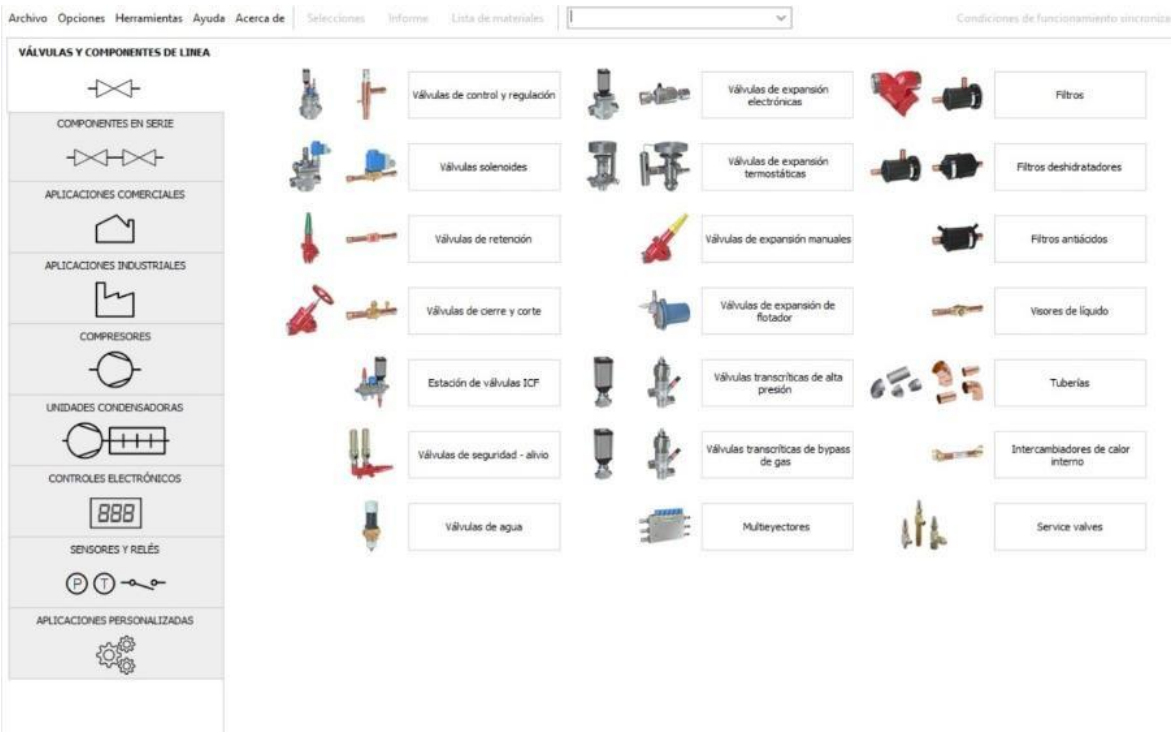


Fuente: Elaboración propia mediante software BITZER.

Posteriormente se realizó la selección de los dispositivos de expansión y de las tuberías del sistema mediante el software Coolselector® de Danfoss. Esta herramienta permite dimensionar componentes hidráulicos y frigoríficos a partir de las condiciones reales de operación del sistema.

La Figura 24 presenta la interfaz principal del software utilizado para la selección de válvulas de expansión, tuberías y demás accesorios requeridos para la instalación frigorífica. El programa permite ingresar variables como capacidad frigorífica, refrigerante, temperaturas de evaporación y condensación, obteniendo recomendaciones de diseño basadas en criterios técnicos del fabricante.

Figura 24. Interfaz principal del software Danfoss Coolselector®.



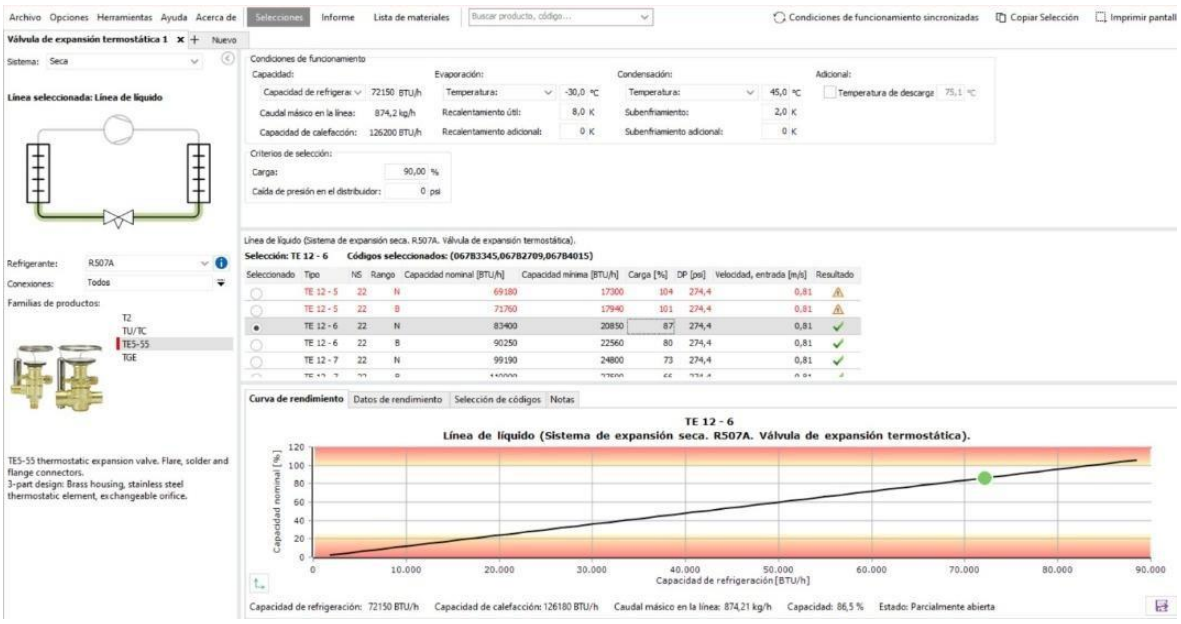
Fuente: Elaboración propia mediante software Coolselector®.

Para el dimensionamiento de la válvula de expansión termostática se ingresaron las condiciones de operación previamente establecidas, incluyendo la capacidad frigorífica requerida para cada circuito de refrigeración. referencia TE12-6, con una capacidad nominal de 83.400 BTU/h y un porcentaje de utilización cercano al 87 %. Este nivel de utilización se encuentra dentro de los rangos recomendados por el

fabricante, garantizando un funcionamiento estable y eficiente del sistema de expansión del refrigerante.

De acuerdo con los resultados obtenidos y mostrados en la Figura 25, el software recomendó la utilización de una válvula de expansión termostática Danfoss Adicionalmente, se efectuó el dimensionamiento de las líneas de refrigerante correspondientes a las tuberías de líquido y de succión.

Figura 25. Selección de válvula de expansión termostática.

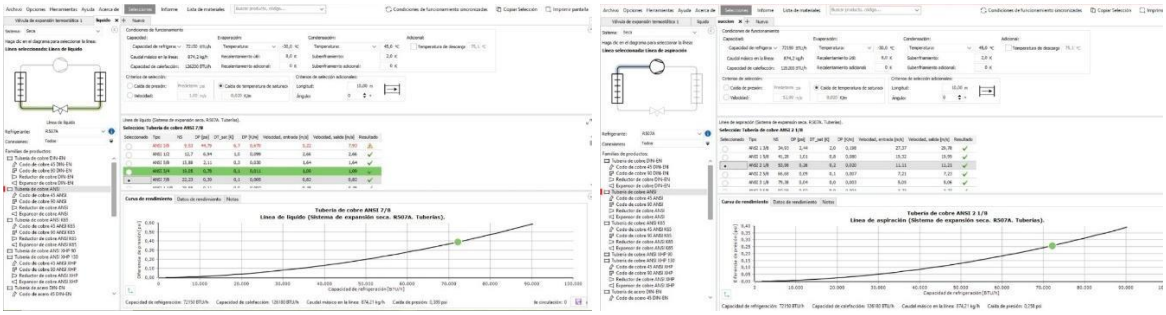


Fuente: Elaboración propia mediante software Coolselector®.

La Figura 26 presenta los resultados obtenidos para el dimensionamiento de las líneas de refrigerante. Para la línea de líquido, el software recomendó una tubería de cobre de 3/4 in; sin embargo, debido a consideraciones de disponibilidad comercial, se seleccionó una tubería de 7/8 in. Para la línea de succión, el programa recomendó una tubería de cobre de 2 1/8 in, la cual satisface las condiciones de

velocidad y pérdida de carga requeridas para la correcta operación del sistema frigorífico.

Figura 26. Selección de tuberías del sistema frigorífico.



Fuente: Elaboración propia mediante software Coolselector®.

Finalmente, se procedió a la selección del evaporador, componente encargado de absorber la carga térmica generada dentro del túnel de congelación y el condensador el cual rechaza todo el calor que absorbió el refrigerante en la evaporación y compresión. Para ello se consultaron los catálogos técnicos suministrados por la empresa HISPANIA, fabricante especializado en equipos para refrigeración industrial y representado en Colombia por DANVAL S.A.S.

Por su parte, la Figura 27 presenta el procedimiento de selección realizado a partir del catálogo técnico del fabricante. Considerando la capacidad frigorífica requerida para el sistema, las condiciones de evaporación y la configuración de doble circuito frigorífico adoptada en el diseño, se seleccionó un evaporador de doble serpentín que satisface los requerimientos operativos establecidos.

Figura 27. Evaporador seleccionado modelo HEB 8003 439 4.5D.

INDUSTRIAL CUBIC EVAPORATORS
EVAPORADORES CUBICOS INDUSTRIAL

HFC/HFO/(HCFC)*

EVAPORATORS/ EVAPORADORES

FIN SPACING 4.5 mm, with electrical defrost. Rt>=0ºC
SEPARACIÓN ALETAS 4.5 mm, con desescarche eléctrico. Rt>=0ºC

Model / Modelo	Capacity / Capacidad R404A (Btu/h)		Capacity / Capacidad R448A/R449A (Btu/h)		Superficie/ Surface (m^2)	Tube Volume/ Volumen Interno (dm^3)	Bobina Filas Coil Rows	N.W/ Peso Neto (kg)	Connection/ Conexión (ø mm)	
	t_e= -8ºC	t_e= -25ºC	t_e= -8ºC	t_e= -25ºC					Inlet/ Entrada	Outlet/ Salida
	DT1=8K	DT1=7K	DT1=8K	DT1=7K						
HEB 8002 291 4.5D	158180	122389	160824	128123	290.7	42.0	4	368	22	54
HEB 8002 436 4.5D	212881	163547	215405	169731	436.1	63.1	6	447	28	67
HEB 8002 597 4.5D	244862	174721	253047	186329	581.5	84.1	8	522	28	76
HEB 8003 439 4.5D	238944	184933	242863	193483	439.0	63.5	4	534	2×22	2×54
HEB 8003 658 4.5D	299479	204990	316510	225139	658.4	95.2	6	651	2×22	2×54
HEB 8003 902 4.5D	359405	248283	376272	269058	877.9	127.0	8	762	2×22	2×67

Fuente: Catalogo de Hispania 60Hz..

Como resultado del proceso de dimensionamiento, se seleccionó el evaporador HISPANIA referencia HEB 8003 439 4.5D, el cual cumple con los requerimientos de capacidad frigorífica establecidos para el túnel de congelación y garantiza una adecuada distribución del aire frío dentro del recinto, favoreciendo la transferencia de calor y la uniformidad del proceso de congelación del producto avícola.

Por otra parte, se selecciona el condensador el cual es el encargado de rechazar todo el calor que absorbió el refrigerante dentro del túnel y en la parte de compresión, con un factor de seguridad de 15% para compensar posibles variaciones en las condiciones de operación y garantizar el optimo desempeño del sistema de refrigeración.

Figura 28. Condensador seleccionado modelo HCV 5003 182-4D.

Model / Modelo	Capacity / Capacidad (Btu/h)		Sound Pressure Level	Espacio entre aletas/ Fin Spacing (mm)	Superficie/ Surface (m²)	Tube Volume/ Volumen Interno (dm³)	Ventilador Ventilator					Connection/ Conexión (ø mm)		N.W/ Peso Neto (kg)
	R404A	R448A/ R449A	dist=10m				N° × ⊙ (mm)	Pole connection Conexión de polos	Power/ Potencia (W)	Current/ Intensidad (A)	Volumen de Aire Air Flow (m3/h)	Inlet/ Entrada	Outlet/ Salida	
	DT1=15K	DT1=15K	dBA											
HCV 5002 121-4D	200432	202221	54	2.1	121.0	16.0	2 × 630	4P-Δ	2200	6.6	17518	2×28	2×22	161
HCV 5002 151-4D	216816	218473	54	2.1	151.3	20.0	2 × 630	4P-Δ	2200	6.6	16957	2×28	2×22	161
HCV 5003 182-4D	302123	304750	55	2.1	182.9	24.2	3 × 630	4P-Δ	3300	9.9	26322	2×28	2×22	233
HCV 5003 227-4D	326709	329144	55	2.1	228.7	30.2	3 × 630	4P-Δ	3300	9.9	25486	2×28	2×22	233
HCV 5004 242-4D	397928	402611	60	2.1	244.8	32.3	4 × 630	4P-Δ	4400	13.2	35126	2×35	2×28	304
HCV 5004 303-4D	432146	436396	60	2.1	306.0	40.4	4 × 630	4P-Δ	4400	13.2	34015	2×35	2×28	304

Fuente: Catalogo de Hispania 60Hz.

4.3.3. Desarrollo de la distribución interna, circulación de aire, ubicación de accesos, materiales constructivos y espesores de aislamiento térmico

Una vez finalizado el proceso de selección y dimensionamiento de los componentes principales del sistema frigorífico, se realizó la verificación de las condiciones operativas con el propósito de garantizar que los equipos seleccionados fueran capaces de satisfacer la demanda térmica calculada para el túnel de congelación. Esta actividad permitió validar la compatibilidad entre los diferentes componentes del sistema y comprobar que sus características técnicas se ajustaran a las condiciones de diseño establecidas para la congelación de productos avícolas.

La verificación se efectuó tomando como referencia la carga frigorífica total obtenida durante el modelado térmico, correspondiente a 42,28 kW. Debido a que esta capacidad fue distribuida en dos circuitos frigoríficos equivalentes, cada compresor seleccionado debía suministrar aproximadamente 21,14 kW de

capacidad frigorífica. Los resultados obtenidos mediante el software BITZER confirmaron que los compresores seleccionados operan adecuadamente bajo las condiciones de evaporación, condensación y refrigerante establecidas para el proyecto.

Asimismo, se verificó la compatibilidad de la válvula de expansión termostática con la capacidad frigorífica requerida por cada circuito. El análisis realizado mediante el software Danfoss Coolselector permitió comprobar que la válvula seleccionada opera dentro de los rangos recomendados por el fabricante, garantizando un adecuado control del flujo de refrigerante hacia el evaporador y una correcta regulación del sobrecalentamiento durante la operación.

De igual forma, se revisó el dimensionamiento de las tuberías de líquido y succión con el fin de garantizar velocidades de circulación adecuadas y minimizar pérdidas de presión dentro del sistema. La selección de los diámetros comerciales adoptados permite mantener condiciones apropiadas de transporte del refrigerante y asegurar el correcto retorno de aceite hacia los compresores.

Posteriormente, se verificó que el evaporador seleccionado cumpliera con la capacidad frigorífica requerida para el túnel de congelación. La revisión de las especificaciones técnicas suministradas por el fabricante permitió confirmar que el equipo seleccionado posee la capacidad necesaria para absorber la carga térmica calculada y proporcionar una adecuada distribución del aire frío dentro del recinto, favoreciendo la uniformidad del proceso de congelación.

Con el propósito de consolidar la información técnica generada durante el proceso de selección, se elaboró una ficha resumen de los principales componentes del sistema frigorífico. Esta información constituye la base para el posterior diseño

del sistema eléctrico de potencia y control, así como para la elaboración de la documentación técnica asociada al proyecto.

***Tabla 10**. Especificaciones técnicas de los equipos frigoríficos seleccionados.*

Equipo	Referencia seleccionada	Cantidad	Refrigerante	Capacidad
Compresor reciprocante semihermético	BITZER 4GE-23Y-20P	2	R507A	21,14 kW por unidad
Evaporador	HEB 8003 439 4.5D	1	R507A	144.301 BTU/h
Condensador	HCV 5003 182-4D		R507A	302,123 BUT/h
Válvula de expansión termostática	Danfoss TE12-6	2	R507A	83.400 BTU/h
Línea de líquido	Tubería de cobre 7/8 in	1 circuito	R507A	Según dimensionamiento
Línea de succión	Tubería de cobre 2 1/8 in	1 circuito	R507A	Según dimensionamiento

Nota: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos mediante BITZER Software, Danfoss Coolselector y catálogos técnicos de HISPANIA.

Por último, la información presentada en la Tabla 10 permitió verificar la compatibilidad entre los diferentes componentes seleccionados y las condiciones de operación establecidas para el sistema frigorífico. Adicionalmente, las especificaciones técnicas consolidadas constituyen el punto de partida para el dimensionamiento de los circuitos eléctricos de potencia y control, actividad que se desarrolla en la siguiente fase metodológica del proyecto.

4.4. Diseño del sistema eléctrico de potencia y control

4.4.1. Determinación de la demanda eléctrica del sistema y cálculo de conductores, protecciones y dispositivos de maniobra conforme a la normativa aplicable

El dimensionamiento del sistema eléctrico inició con la identificación y caracterización de las cargas asociadas al túnel de congelación. Para cada componente se consideraron la cantidad de unidades instaladas, potencia eléctrica nominal, tensión de alimentación, corriente nominal y función dentro del proceso. Los datos fueron obtenidos de las características técnicas de los equipos seleccionados durante el diseño frigorífico y de la información utilizada para la elaboración de los planos eléctricos.

Los compresores constituyen las principales cargas eléctricas del sistema. La configuración frigorífica contempla dos compresores BITZER 4GE-23Y-20P, uno para cada circuito de refrigeración. Cada unidad presenta una potencia eléctrica absorbida de 14,88 kW y una corriente nominal de 43,5 A. La potencia instalada correspondiente al conjunto de compresores se determinó mediante:

$$P_{com} = n_{comp} P_{unit} \qquad \text{Ec. 9}$$

donde P_{com} corresponde a la potencia instalada asociada a los compresores, n_{comp}al número de unidades y P_{unit} a la potencia eléctrica absorbida por cada compresor. Para las dos unidades seleccionadas:

$$P_{com} = 2\,(14.88) = 29.76\,kW$$

Por lo tanto, los dos compresores representan una potencia eléctrica instalada de 29,76 kW. Este valor corresponde únicamente al proceso de compresión y no representa la demanda eléctrica total del túnel, debido a que deben incorporarse las cargas correspondientes a ventiladores y demás equipos auxiliares.

Para determinar la potencia total instalada se consideró la suma de las potencias individuales de todos los equipos eléctricos identificados en el sistema. Esta relación se expresó mediante:

$$P_{ints} = \sum_{i=1}^{n} n_i P_i \qquad \text{Ec. 10}$$

donde P_{ints} corresponde a la potencia eléctrica total instalada, P_i a la potencia nominal de cada tipo de carga, n_i al número de unidades de dicha carga y n al número total de tipos de cargas considerados. Esta expresión permitió integrar los compresores, ventiladores y equipos auxiliares en un cuadro general de cargas.

Para aquellas cargas trifásicas en las que se dispone de la tensión de alimentación, corriente y factor de potencia, la potencia activa se relacionó mediante:

$$P = \sqrt{3}\, V_L I_L \cos\varphi \qquad \text{Ec. 11}$$

donde P representa la potencia activa en Watts, V_L la tensión entre líneas en V, $I_L$la corriente de línea en A y $\cos\ \varphi$ el factor de potencia. Cuando el dato disponible corresponde a la potencia útil o nominal del motor y se requiere determinar la corriente considerando su eficiencia, se empleó la relación:

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3}\, V_L \cos\varphi} \qquad \text{Ec. 12}$$

donde η\eta corresponde a la eficiencia del equipo expresada en forma decimal. No obstante, cuando el fabricante proporciona directamente la corriente nominal bajo las condiciones de alimentación especificadas, se utilizó este valor como referencia para el dimensionamiento del circuito. Este fue el criterio aplicado a los compresores, para los cuales se dispone directamente de una corriente nominal de 43,5 A por unidad, evitando introducir valores supuestos de eficiencia o factor de potencia.

Como parámetro complementario para la caracterización de las cargas trifásicas, la potencia aparente se estableció mediante:

$$S = \sqrt{3}\, V_L I_L \qquad \text{Ec. 13}$$

donde S representa la potencia aparente en VA, V_L la tensión entre líneas e $I_L$la corriente de línea. Una vez identificadas las corrientes correspondientes a cada carga, se procedió al dimensionamiento de los conductores de los circuitos derivados. Para su selección se verificó que la capacidad admisible de corriente del conductor fuera compatible con la corriente de diseño y con el dispositivo de protección asociado. La coordinación entre estos tres parámetros se estableció mediante:

$$I_B \leq I_N \leq I_Z \qquad \text{Ec. 14}$$

donde I_B representa la corriente de diseño del circuito, I_N la corriente nominal o de ajuste del dispositivo de protección e I_Z la capacidad admisible de corriente del conductor bajo las condiciones consideradas para la instalación. Debido a que las principales cargas eléctricas corresponden a motores empleados en compresores y ventiladores, el dimensionamiento de los circuitos consideró su comportamiento electromecánico. En consecuencia, la selección de conductores, dispositivos de protección y elementos de maniobra se efectuó considerando tanto la corriente

durante el funcionamiento normal como las condiciones transitorias asociadas al arranque de los motores.

Además de la capacidad de conducción de corriente, se contempló la verificación de la caída de tensión en los circuitos. Para un sistema trifásico, la caída de tensión puede determinarse mediante:

$$\Delta V = \sqrt{3}\, I_L (R \cos\varphi + X \sin\varphi)\, L \qquad \text{Ec. 15}$$

donde ΔV representa la caída de tensión en V, I_L la corriente de línea en A, R la resistencia del conductor por unidad de longitud, X su reactancia por unidad de longitud y L la longitud del circuito. A partir del valor obtenido, la caída de tensión porcentual se determinó mediante:

$$\Delta V\,\% = \frac{\Delta V}{V_L}\, x\, 100 \qquad \text{Ec. 16}$$

Esta comprobación permitió complementar la selección del conductor, verificando no solamente su capacidad para transportar la corriente requerida, sino también el nivel de tensión disponible en los terminales de las cargas. La aplicación numérica de este criterio depende de las longitudes de los circuitos y de las características definitivas de los conductores establecidas en los planos.

Posteriormente, se seleccionaron los dispositivos destinados a proteger los circuitos ante condiciones de sobrecorriente y cortocircuito. Para cada carga se estableció una protección coordinada con la corriente nominal del equipo y la capacidad admisible del conductor correspondiente. En el caso de los motores eléctricos, se contemplaron adicionalmente dispositivos de protección frente a sobrecargas, cuyo rango de operación se relacionó con la corriente nominal del motor protegido.

La configuración de dos circuitos frigoríficos independientes se mantuvo en el diseño eléctrico. Por esta razón, cada compresor cuenta con su propio circuito de potencia, protección y maniobra. Esta disposición permite independizar eléctricamente las dos unidades y facilita las actividades de operación, mantenimiento y aislamiento de un circuito ante la presencia de una condición anormal.

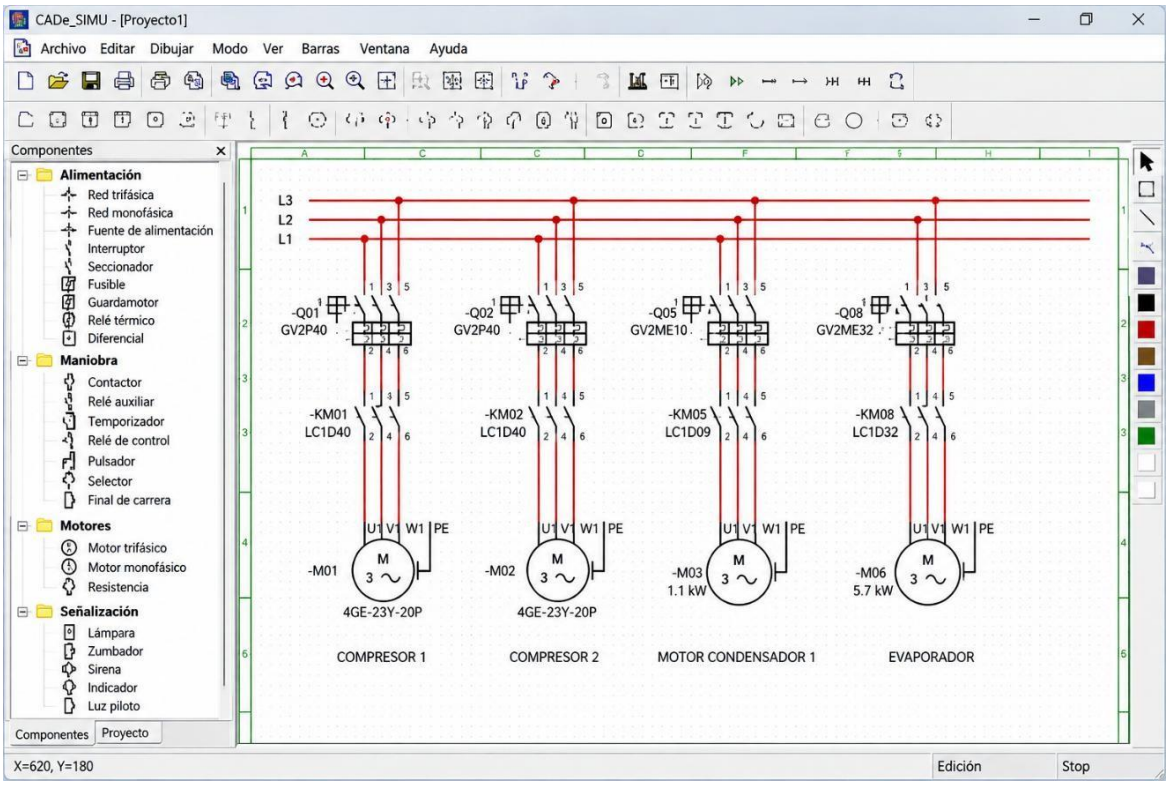
Para realizar la conexión y desconexión de las cargas motorizadas se contemplaron dispositivos de maniobra electromagnéticos. Los contactores permiten accionar las cargas de potencia a partir de señales procedentes del circuito de control, evitando que las corrientes principales de los motores circulen directamente a través de los elementos de mando. De esta manera, la configuración funcional adoptada para los circuitos motorizados responde al siguiente esquema:

4.4.2. Elaboración de diagramas unifilares, esquemas de potencia y control del sistema eléctrico

Una vez determinadas las cargas eléctricas y seleccionados los conductores, protecciones y dispositivos de maniobra, se procedió con la elaboración de los diagramas eléctricos del túnel de congelación. Para este propósito se utilizó el software CADe SIMU, el cual permitió representar y organizar los circuitos de potencia y control mediante elementos eléctricos normalizados.

El circuito de potencia se estructuró a partir del cuadro de cargas previamente definido, estableciendo ramales independientes para los compresores, motoventiladores del condensador, ventiladores del evaporador y resistencias de deshielo. En cada circuito se incorporaron los dispositivos de protección y maniobra seleccionados de acuerdo con las características eléctricas de las cargas.

Figura 29. Interfaz de CADe SIMU utilizada para la elaboración de los esquemas eléctricos del túnel de congelación.



Fuente: elaboración propia mediante CADe SIMU.

La representación de los circuitos se realizó manteniendo una identificación individual de los elementos de protección, contactores y cargas, con el propósito de facilitar la interpretación de las conexiones y establecer la correspondencia entre cada dispositivo y el equipo asociado. Asimismo, se consideró la alimentación trifásica de las cargas principales y la separación de los circuitos auxiliares requeridos para la operación del sistema.

Posteriormente, se desarrolló el circuito de control para establecer la lógica de operación de los equipos. En este se integraron los elementos de mando, controladores, contactos auxiliares, válvulas solenoides, dispositivos de protección

y elementos de señalización necesarios para supervisar los principales estados de funcionamiento y falla del sistema.

La elaboración del esquema de control se realizó considerando la interacción entre los dispositivos de mando y los contactores asociados al circuito de potencia. De esta manera, se establecieron las señales necesarias para habilitar o interrumpir el funcionamiento de los compresores, ventiladores y resistencias de deshielo, así como para representar las condiciones de operación y alarma contempladas en el diseño.

4.4.3. Verificación del cumplimiento de los requisitos establecidos en el RETIE y consolidación de la documentación técnica del diseño eléctrico

Una vez definidos los circuitos de potencia y control, se realizó la verificación del diseño eléctrico tomando como referencia los requisitos aplicables del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), vigente para el periodo de desarrollo del proyecto, y los criterios técnicos complementarios considerados para instalaciones eléctricas de baja tensión. El análisis se orientó a comprobar que la configuración propuesta incorporara condiciones básicas de seguridad para la alimentación, protección, maniobra y operación de las cargas asociadas al túnel de congelación.

La revisión consideró la correspondencia entre las corrientes nominales de las cargas y la selección de conductores, la incorporación de protecciones contra sobrecorriente y condiciones anormales de operación, la utilización de dispositivos de maniobra para motores y resistencias, la identificación de los circuitos y la incorporación del conductor de protección. Asimismo, se verificó la separación funcional entre los circuitos de potencia y control, así como la presencia de

elementos de supervisión y señalización para las principales condiciones de operación y falla.

Para organizar la verificación se estableció una matriz de cumplimiento en la cual se relacionaron los principales criterios técnicos aplicables con los elementos incorporados en el diseño. Esta revisión permitió identificar los aspectos considerados durante la etapa de diseño y aquellos que deberán ser comprobados durante una eventual etapa de construcción, montaje, pruebas e inspección de la instalación.

Finalmente, se consolidó la documentación técnica del sistema eléctrico mediante el cuadro de cargas, la selección de conductores, protecciones y dispositivos de maniobra, y los planos de potencia y control desarrollados. Esta información constituye el soporte documental del diseño eléctrico propuesto y la base para la evaluación de los resultados presentada en la sección 5.4.3.

5. RESULTADOS

5.1. Resultados de la determinación de las condiciones térmicas del proceso de congelación

5.1.1. Resultado de la definición de las condiciones de diseño

Como resultado de la definición de las condiciones de diseño, se establecieron los parámetros térmicos, operativos y geométricos que constituyen la base para el dimensionamiento del túnel de congelación industrial. La configuración adoptada considera el procesamiento de pollo fresco mediante operación por lotes, con una capacidad nominal de 5.600 kg por ciclo, una temperatura inicial del producto de 2 °C y una temperatura final de −18 °C en su centro térmico. De esta manera, el proceso requiere una reducción total de temperatura de 20 °C, dentro de un tiempo máximo de congelación establecido en 14 horas.

La configuración de almacenamiento definida permitió disponer un total de 210 canastas, organizadas en dos filas, siete columnas y quince canastas de profundidad. Considerando una capacidad aproximada de 26,4 kg por canasta, se obtuvo una masa efectiva de producto de 5.544 kg por ciclo. Al comparar este valor con la capacidad nominal de 5.600 kg, se obtiene un aprovechamiento del 99 % de la capacidad de diseño, con una diferencia de únicamente 56 kg. Este resultado evidencia la correspondencia entre la disposición física propuesta para las canastas y la capacidad de procesamiento establecida para el túnel.

Respecto a las condiciones geométricas, se definió un recinto de 6,20 m de longitud, 5,25 m de ancho y 4,00 m de altura, dimensiones que representan un volumen interior de referencia de 130,2 m³. Este espacio constituye la geometría base para la disposición de la carga, la circulación del aire frío y la instalación de los componentes requeridos en el interior del recinto. Asimismo, las dimensiones

establecidas permiten determinar las superficies de transferencia de calor necesarias para la evaluación posterior de las ganancias térmicas a través de la envolvente.

La relación entre la masa efectiva almacenada, el tiempo máximo establecido y las temperaturas inicial y final permitió consolidar las principales condiciones de operación del proceso de congelación. En particular, la diferencia térmica de 21 °C representa el intervalo de temperatura que debe recorrer el producto desde su ingreso hasta alcanzar la condición final establecida, mientras que las 14 horas disponibles por ciclo determinan el periodo máximo en el cual el sistema frigorífico debe extraer la energía térmica asociada al producto y compensar simultáneamente las demás ganancias de calor presentes en el recinto. La Tabla 11 consolida los resultados obtenidos para las condiciones definitivas de diseño y presenta adicionalmente los parámetros derivados de la configuración seleccionada.

Tabla 11. *Especificaciones técnicas de los equipos frigoríficos seleccionados.*

Parámetro	Resultado
Producto procesado	Pollo
Capacidad nominal de diseño	5.600 kg/ciclo
Masa efectiva de producto	5.544 kg/ciclo
Aprovechamiento de la capacidad nominal	99 %
Diferencia respecto a la capacidad nominal	56 kg
Temperatura inicial del producto	2 °C
Temperatura final del producto	−18 °C
Diferencia de temperatura del producto	20 °C
Tiempo máximo de congelación	14 h
Longitud del túnel	6,20 m
Ancho del túnel	5,25 m
Altura del túnel	4,00 m
Volumen interior de referencia	130,2 m³

Número total de canastas	210
Capacidad aproximada por canasta	26,4 kg
Configuración de almacenamiento	2 filas × 7 columnas × 15 canastas

Nota. Elaboración propia.

5.1.2. Resultado de la definición de las condiciones de diseño

Como resultado del dimensionamiento del sistema de almacenamiento, se estableció una configuración compuesta por 210 canastas para producto avícola, organizadas en dos filas principales, siete columnas y quince canastas de profundidad. Esta distribución permitió alcanzar una capacidad efectiva de 5.544 kg de producto por ciclo, manteniendo correspondencia con la capacidad nominal de 5.600 kg establecida como condición inicial de diseño.

La configuración seleccionada representa un aprovechamiento del 99 % de la capacidad nominal, con una diferencia de 56 kg respecto al valor máximo previsto. Considerando una distribución equivalente de la carga entre las dos filas principales, cada una concentra aproximadamente 2.772 kg de producto, correspondientes a 105 canastas. Asimismo, cada columna agrupa 30 canastas (15 por cada fila), equivalentes a aproximadamente 792 kg de producto. Estos resultados permitieron distribuir la masa almacenada de manera simétrica dentro de la configuración planteada.

Desde el punto de vista del funcionamiento térmico, la disposición en dos filas principales fue seleccionada para conservar espacios de circulación alrededor de las unidades de almacenamiento y permitir el paso del aire impulsado por el evaporador. La configuración resultante evita concentrar la totalidad de la carga en un único bloque y establece trayectorias disponibles para el desplazamiento del aire a través y alrededor de las canastas. Sin embargo, dado que el alcance del proyecto no contempla una simulación mediante dinámica de fluidos computacional, esta

disposición corresponde a un criterio geométrico y funcional de diseño para favorecer la circulación del aire, sin representar una validación cuantitativa de la uniformidad de velocidades o temperaturas en el interior del túnel. La relación entre la capacidad de cada canasta y la distribución seleccionada permitió obtener los resultados derivados que se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Resultados de la configuración de almacenamiento del producto

Parámetro	Resultado
Configuración general	2 filas × 7 columnas × 15 canastas
Canastas por fila principal	105
Masa almacenada por fila principal	2.772 kg
Canastas por columna	30
Masa almacenada por columna	792 kg
Número total de canastas	210
Capacidad por canasta	26,4 kg
Masa efectiva almacenada	5.544 kg
Capacidad nominal del túnel	5.600 kg
Diferencia respecto a la capacidad nominal	56 kg
Aprovechamiento de la capacidad nominal	99 %
Método de congelación	Aire forzado

Nota. Elaboración propia.

La configuración obtenida permitió, por tanto, compatibilizar la capacidad nominal del túnel con una distribución física definida del producto, alcanzando prácticamente la totalidad de la carga prevista y manteniendo espacios destinados al desplazamiento del aire frío. Además, la organización simétrica de la carga constituye una referencia para la disposición física desarrollada posteriormente mediante el modelo CAD y para la ubicación del evaporador respecto al volumen ocupado por el producto.

Finalmente, la masa efectiva de 5.544 kg obtenida a partir de esta configuración fue adoptada como la carga real de producto para el modelado térmico, permitiendo calcular la energía que debe extraerse durante el periodo máximo de congelación y, conjuntamente con las cargas por transmisión, infiltración e internas, determinar la capacidad frigorífica requerida por el sistema.

5.1.3. Resultado de la definición de las condiciones de diseño

El modelado térmico desarrollado mediante CoolTool permitió integrar las condiciones geométricas del recinto, las temperaturas de operación, las características de la envolvente, la infiltración de aire, las cargas internas y la carga térmica asociada al producto. Como resultado de esta integración se determinó la capacidad frigorífica necesaria para mantener las condiciones de congelación establecidas para el túnel.

La geometría ingresada, correspondiente a 6,20 m de longitud, 5,25 m de ancho y 4,00 m de altura, generó en el software un volumen aproximado de 130 m³ y un área de planta de 32,5 m². Estos resultados son consistentes con las dimensiones definidas previamente y permitieron establecer las superficies requeridas para cuantificar las ganancias térmicas a través de la envolvente del recinto.

Para las condiciones internas de operación se obtuvo una temperatura de aire de −24 °C, con una humedad relativa del 97 %. La diferencia de temperatura establecida entre el aire interior y la evaporación fue de 6 K, obteniéndose una temperatura de evaporación de −30 °C. Estas condiciones definieron el régimen térmico utilizado por el programa para efectuar el cálculo de la capacidad frigorífica requerida.

En cuanto a la envolvente, la configuración implementada presentó un coeficiente global de transmisión térmica de 0,09 W/m²K para las superficies consideradas en

el modelo. El aislamiento seleccionado correspondió a poliuretano tipo 020, mientras que para las condiciones ambientales exteriores se estableció una temperatura de 30 °C y una humedad relativa del 80 %. Estos parámetros permitieron incorporar al balance las ganancias de calor asociadas a la diferencia de temperatura existente entre el ambiente exterior y el interior del túnel.

El modelado de la infiltración consideró adicionalmente el intercambio de aire producido durante la apertura de la puerta. Para un acceso de 1,50 m de ancho y 2,20 m de altura, con un periodo de apertura de 0,5 h/día, el programa determinó un cambio de aire por puerta de 0,98 volúmenes por hora, equivalente aproximadamente a 127,5 m^3/h. Asimismo, dentro de las cargas internas se consideraron 10 h/día asociadas a ocupación y una carga eléctrica de 10 W/m^2, además de una capacidad eléctrica complementaria de 500 W.

La incorporación de estas condiciones produjo inicialmente una capacidad frigorífica de 41,37 kW. Este valor constituyó la demanda preliminar utilizada por CoolTool para realizar la selección inicial del evaporador y posteriormente incorporar al balance las cargas adicionales relacionadas con sus ventiladores y el sistema de desescarche.

Para la carga correspondiente al producto se ingresaron 5.544 kg de ave de corral destinada a congelación, con una temperatura final de −18 °C. De esta manera, el software incorporó al balance energético el calor asociado al producto junto con las ganancias por transmisión, infiltración, cargas internas y funcionamiento de los componentes del sistema. Una vez integradas todas las contribuciones consideradas en el modelo, se obtuvo una carga frigorífica total de 42,28 kW. Este resultado equivale aproximadamente a 144.301 BTU/h y 12,02 TR, constituyéndose en la capacidad térmica de referencia para las etapas posteriores de selección y

dimensionamiento de los componentes del sistema frigorífico. La Tabla 13 presenta los principales resultados obtenidos mediante el modelado realizado en CoolTool.

Tabla 13. Resultados de la configuración de almacenamiento del producto

Parámetro	Resultado
Longitud del recinto	6,20 m
Ancho del recinto	5,25 m
Altura del recinto	4,00 m
Volumen calculado por CoolTool	130 m³
Área de planta	32,5 m²
Temperatura del aire interior	−24 °C
Humedad relativa interior	97 %
Diferencia de temperatura de evaporación (ΔTM)	6 K
Temperatura de evaporación	−30 °C
Coeficiente global de transmisión térmica	0,09 W/m²K
Aislamiento considerado	Poliuretano 020
Temperatura exterior	30 °C
Humedad relativa exterior	80 %
Dimensiones de la puerta	1,50 × 2,20 m
Periodo de apertura de puerta	0,5 h/día
Cambio de aire por puerta	0,98 volúmenes/h
Caudal equivalente por apertura	127,5 m³/h
Carga eléctrica por área	10 W/m²
Carga eléctrica adicional	500 W
Masa de producto	5.544 kg
Temperatura final del producto	−18 °C
Capacidad frigorífica preliminar	41,37 kW
Capacidad frigorífica total	42,28 kW
Capacidad frigorífica total	144.301 BTU/h
Capacidad frigorífica total	12,02 TR

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos mediante CoolTool 9.02.

Al comparar la capacidad preliminar de 41,37 kW con la capacidad final de 42,28 kW, se observa un incremento de 0,91 kW, equivalente aproximadamente al 2,2 %. Este aumento corresponde a la actualización del balance térmico después de incorporar las cargas adicionales consideradas por el software durante la configuración del sistema, incluyendo las asociadas al evaporador.

Por lo tanto, el valor de 42,28 kW se adoptó como la demanda frigorífica de diseño resultante del modelado térmico. Esta capacidad constituye el principal resultado de la primera fase del proyecto, debido a que establece el requerimiento térmico que debe ser atendido por el sistema de refrigeración y proporciona la base cuantitativa para la posterior selección y dimensionamiento del evaporador, compresor, condensador, dispositivo de expansión y demás componentes frigoríficos.

5.2. Resultados del diseño del cuarto de congelación mediante herramienta CAD 3D

5.2.1. Resultado del modelado CAD 3D del túnel de congelación

Como resultado del proceso de diseño asistido por computador se obtuvo el modelo tridimensional integrado del túnel de congelación y del sistema frigorífico asociado. La configuración final permitió representar conjuntamente el recinto de congelación, la zona técnica exterior, las estructuras de soporte y los principales componentes del circuito de refrigeración, consolidando en un único ensamblaje la propuesta desarrollada durante la etapa de modelado.

El resultado general del diseño permitió establecer la disposición espacial de los equipos frigoríficos con respecto al cuarto de congelación. En la zona técnica exterior se integraron el condensador, el conjunto de compresión, el recipiente de líquido, las líneas frigoríficas y los elementos auxiliares, mientras que la

infraestructura del túnel quedó definida mediante sus cerramientos, cubierta, acceso y elementos estructurales. Esta configuración proporciona una representación integral de la solución planteada y permite identificar visualmente la relación entre los diferentes subsistemas.

Con el propósito de complementar la representación técnica obtenida en el entorno CAD, se generaron renderizados del modelo tridimensional. Estas representaciones permiten observar con mayor claridad la geometría, disposición y relación espacial de los componentes, facilitando la interpretación de la propuesta final sin modificar las características geométricas definidas durante el proceso de modelado.

Figura 30. Renderizado general del túnel de congelación y sistema frigorífico.

Fuente: Generado mediante renderizado de SolidWorks.

La configuración final del condensador corresponde a una unidad de tres ventiladores instalada sobre una estructura metálica independiente. Su ubicación dentro de la zona técnica permite visualizar la relación del equipo con el conjunto de compresión y con las líneas frigoríficas que comunican los diferentes componentes del sistema. La estructura de soporte forma parte del diseño tridimensional y permite representar las condiciones previstas para el montaje del equipo.

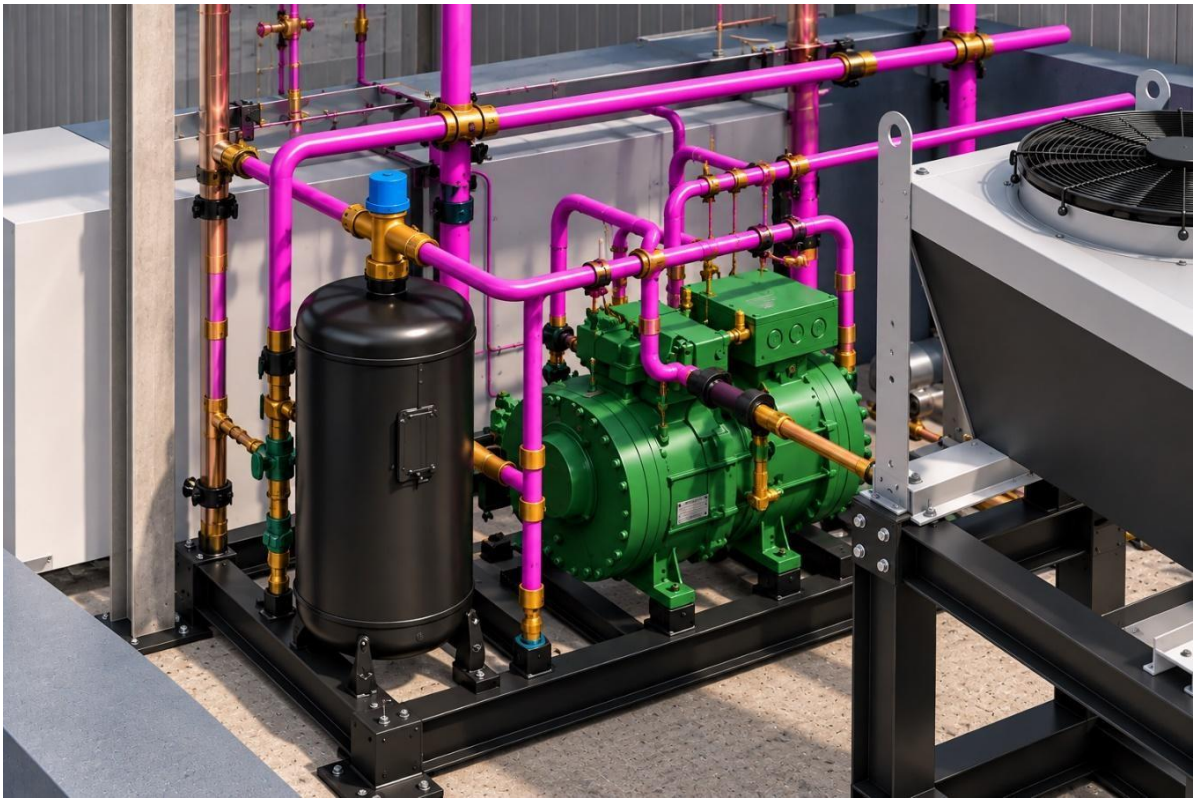
Figura 31. Renderizado del condensador y estructura de soporte.

Fuente: Generado mediante renderizado de SolidWorks.

De manera complementaria, el resultado del modelado del conjunto de compresión permitió integrar en una misma configuración el compresor, el recipiente

de líquido, las válvulas, las tuberías y los demás elementos auxiliares. La representación renderizada facilita la identificación de cada componente y permite observar el recorrido y la distribución espacial de las conexiones frigoríficas dentro de la zona técnica.

Figura 32. Renderizado del conjunto de compresión y elementos auxiliares del sistema frigorífico.



Fuente: Generado mediante renderizado de SolidWorks.

Por otro lado, como resultado de la configuración definida para la circulación de aire, se obtuvo la representación final del evaporador HEB 8003 4.5D instalado en la zona superior del túnel de congelación. El renderizado permite visualizar la disposición del equipo suspendido mediante soportes estructurales, así como la orientación de sus cinco ventiladores hacia el volumen destinado al almacenamiento

del producto. Esta ubicación mantiene despejada la zona frontal de impulsión y permite integrar el evaporador con el espacio útil del recinto sin interferir con las operaciones de almacenamiento. Asimismo, se observa la bandeja inferior y la conexión destinada al drenaje del condensado generado durante la operación y los ciclos de deshielo. La configuración obtenida complementa el diseño de la distribución interna y establece la posición definitiva del evaporador dentro de la propuesta del túnel de congelación.

Figura 33. Renderizado del evaporador HEB 8003 4.5D instalado en el túnel de congelación.

Fuente: Generado mediante renderizado de SolidWorks.

El recipiente de líquido se representó adicionalmente de manera independiente con el propósito de visualizar con mayor detalle su geometría, elementos de soporte y puntos de conexión. Este componente quedó integrado al conjunto frigorífico y relacionado con las correspondientes líneas del circuito mediante los accesorios definidos durante el desarrollo del modelo.

Figura 34. Renderizado del recipiente de líquido y los elementos de conexión.

Fuente: Generado mediante renderizado de SolidWorks.

En este contexto, el resultado obtenido consolida la configuración tridimensional propuesta para el túnel de congelación, permitiendo visualizar tanto la infraestructura general como la disposición de los principales equipos y elementos

auxiliares del sistema frigorífico. El modelo constituye, además, la base para la documentación técnica del diseño, a partir de la cual se elaboraron los planos correspondientes al ensamblaje y a sus componentes principales.

Por último, los planos técnicos derivados del modelado CAD se presentan en el Anexo A, donde se incluyen las representaciones necesarias para documentar las características geométricas y constructivas del diseño propuesto. De esta manera, el modelo tridimensional presentado en esta sección se complementa con la documentación gráfica requerida para su interpretación técnica y eventual fabricación o montaje.

5.2.2. Resultado de la distribución interna, circulación de aire, accesos y configuración constructiva

Como resultado del proceso de diseño se consolidó la distribución física del túnel de congelación, integrando el espacio destinado al almacenamiento del producto, la ubicación de los equipos frigoríficos, las zonas de circulación y el acceso principal. La configuración obtenida mantiene la separación entre el recinto refrigerado y la zona técnica exterior, en la cual se localizaron los grupos de compresión, el condensador, el tablero de potencia y control y los elementos auxiliares del circuito frigorífico. Esta disposición permitió concentrar los equipos que no requieren instalación dentro del ambiente refrigerado en un área independiente y contigua al túnel.

La distribución interna se estableció para una capacidad nominal de aproximadamente 5.600 kg de producto por ciclo, utilizando 210 canastas con una capacidad aproximada de 26,4 kg cada una, equivalente a una masa efectiva de 5.544 kg por ciclo. Las canastas se organizaron según la configuración definida previamente de dos filas principales, siete columnas y quince unidades de

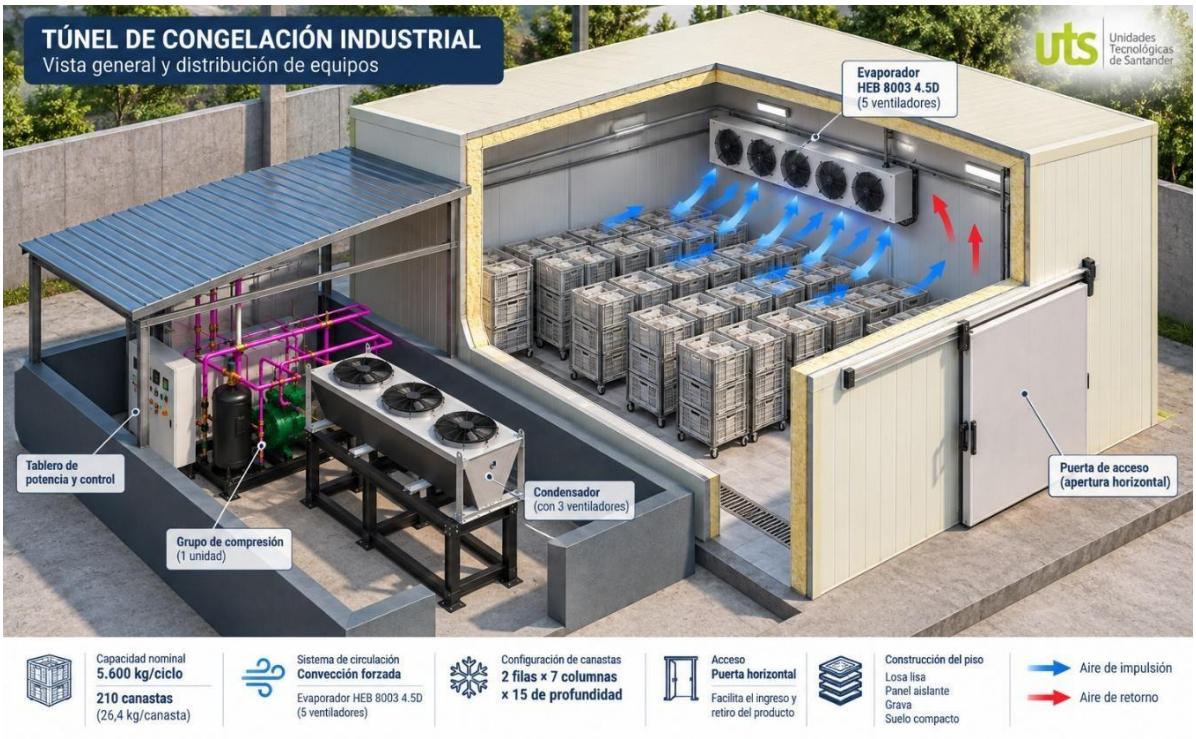
profundidad, relacionando la capacidad de almacenamiento con las dimensiones disponibles del recinto.

La circulación interna se configuró mediante convección forzada, incorporando el evaporador HEB 8003 4.5D en la parte superior del recinto. La disposición adoptada mantiene la zona de descarga de los ventiladores orientada hacia el volumen destinado al producto y evita que el equipo ocupe el área útil de almacenamiento. De esta manera, el aire impulsado por el evaporador dispone de una trayectoria hacia la zona ocupada por las canastas y de espacios para su posterior retorno hacia la batería del equipo. Esta configuración corresponde al criterio geométrico adoptado para la circulación del aire y no representa una validación mediante simulación CFD.

Como resultado de esta configuración, se obtuvo la representación final del evaporador instalado en la zona superior del túnel de congelación. El renderizado permite visualizar la disposición suspendida del equipo mediante soportes estructurales, así como la orientación de sus cinco ventiladores hacia el volumen destinado al almacenamiento del producto. Asimismo, se identifica la bandeja inferior y la conexión destinada al drenaje del condensado generado durante la operación y los ciclos de deshielo.

El acceso al recinto quedó definido mediante una puerta principal de apertura horizontal, localizada en uno de los cerramientos laterales del túnel y comunicada directamente con el área exterior. Su disposición proporciona el espacio requerido para las operaciones de ingreso y retiro del producto sin interferir con la zona técnica exterior. Desde el punto de vista térmico, este acceso fue considerado dentro del cálculo realizado en CoolTool mediante los parámetros correspondientes a apertura de puerta e infiltración de aire exterior.

Figura 35. Renderizado del evaporador HEB 8003 4.5D instalado en el túnel de congelación.



Fuente: Elaboración propia. Renderizado realizado en Solidworks por los autores y modificado a través del uso de inteligenciá artificial chatGPT.

En cuanto a la configuración constructiva, el diseño final considera una envolvente aislada para separar térmicamente el recinto de congelación de las condiciones ambientales exteriores. Los cerramientos verticales y la cubierta se plantearon mediante paneles aislados, mientras que para el piso se estableció una solución multicapa acorde con el detalle constructivo desarrollado. El plano correspondiente muestra la disposición sucesiva de losa lisa, panel aislante, capa de grava y suelo compacto, conformando la base sobre la cual se instala el recinto frigorífico. La configuración general obtenida se resume en la Tabla 14.

Tabla 14. Configuración física y funcional resultante del túnel de congelación.

Parámetro	Resultado
Capacidad nominal de diseño	5.600 kg/ciclo
Masa efectiva de producto	5.544 kg/ciclo
Número de canastas	210
Capacidad aproximada por canasta	26,4 kg
Configuración de almacenamiento	2 filas × 7 columnas × 15 canastas
Sistema de circulación de aire	Convección forzada
Evaporador	HEB 8003 4.5D
Número de ventiladores del evaporador	5
Ubicación del evaporador	Zona superior interior del túnel
Acceso	Puerta principal de apertura horizontal
Ubicación de equipos de condensación y compresión	Zona técnica exterior
Configuración del piso	Losa lisa + panel aislante + grava + suelo compacto
Cerramientos	Paneles térmicamente aislados

Nota: Elaboración propia.

5.3. Resultados de la selección y dimensionamiento de equipos frigoríficos

5.3.1. Resultado de la determinación de la capacidad frigorífica requerido

El cálculo de cargas térmicas permitió establecer una capacidad frigorífica total requerida de 42,28 kW para atender las condiciones de operación definidas para el túnel de congelación. Este valor corresponde a la demanda térmica resultante de la integración de las diferentes contribuciones consideradas en el modelo y constituye el requerimiento de referencia para el dimensionamiento del sistema frigorífico.

La capacidad obtenida equivale a aproximadamente 144.301 BTU/h y 12,02 TR. Para la configuración propuesta se estableció la distribución de esta capacidad

total entre dos circuitos de refrigeración de capacidad equivalente, por lo que el requerimiento frigorífico de referencia para cada circuito corresponde a 21,14 kW.

La distribución adoptada representa el 50 % de la capacidad frigorífica total para cada circuito. En unidades equivalentes, cada uno debe atender aproximadamente 72.150 BTU/h, correspondientes a 6,01 TR. De esta manera, la suma de las capacidades individuales permite cubrir el requerimiento térmico total determinado para el túnel (ver Tabla 15).

Tabla 15. Distribución de la capacidad frigorífica requerida.

Parámetro	Sistema total	Circuito 1	Circuito 2
Capacidad frigorífica	42,28 kW	21,14 kW	21,14 kW
Capacidad equivalente	144.301 BTU/h	≈72.150 BTU/h	≈72.150 BTU/h
Capacidad equivalente	12,02 TR	≈6,01 TR	≈6,01 TR
Participación en la capacidad total	100 %	50 %	50 %
Temperatura del aire interior	−24 °C	−24 °C	−24 °C
Temperatura de evaporación de referencia	−30 °C	−30 °C	−30 °C
Diferencia de temperatura ΔTM	6 K	6 K	6 K

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos mediante CoolTool 9.02.

La distribución de la capacidad frigorífica en dos circuitos establece, por tanto, un requerimiento mínimo de referencia de 21,14 kW por circuito bajo las condiciones de operación consideradas. Este valor constituye el parámetro térmico utilizado para la selección de los componentes principales, debido a que los equipos seleccionados deben proporcionar una capacidad compatible con la demanda frigorífica correspondiente a cada circuito.

Adicionalmente, la configuración propuesta permite distribuir la demanda térmica total entre dos unidades de capacidad equivalente. Desde el punto de vista del diseño, esta disposición facilita la selección individual de los componentes y permite

estructurar el sistema frigorífico en dos circuitos con condiciones nominales de operación similares.

5.3.2. Resultado de la selección y dimensionamiento de los componentes del sistema frigorífico

A partir del requerimiento de 21,14 kW establecido para cada uno de los dos circuitos frigoríficos, se obtuvieron los componentes principales necesarios para conformar el sistema de refrigeración del túnel de congelación. La selección se realizó considerando como condiciones de referencia el refrigerante R507A, una temperatura de evaporación de −30 °C y una temperatura de condensación de 45 °C.

Para la etapa de compresión se seleccionaron dos compresores reciprocantes semiherméticos BITZER referencia 4GE-23Y-20P, uno para cada circuito frigorífico. De acuerdo con los resultados obtenidos mediante BITZER Software, cada unidad proporciona una potencia frigorífica de 21,8 kW bajo las condiciones de operación establecidas, valor superior al requerimiento de 21,14 kW por circuito.

La comparación entre la capacidad requerida y la proporcionada por cada compresor muestra una diferencia de 0,66 kW, correspondiente aproximadamente al 3,1 % de la demanda individual. Al considerar las dos unidades, la capacidad frigorífica disponible asciende a 43,6 kW frente a los 42,28 kW requeridos por el túnel, obteniéndose un margen conjunto de 1,32 kW. De esta manera, la capacidad seleccionada cubre el requerimiento frigorífico establecido sin generar un sobredimensionamiento elevado.

Los resultados del software indican adicionalmente una potencia absorbida de 14,88 kW y una corriente de operación de 43,5 A para cada compresor, considerando una alimentación de 200–230 V. Estos parámetros constituyen

información de entrada para el posterior dimensionamiento del sistema eléctrico de potencia, incluyendo conductores, protecciones y elementos de maniobra.

Para el control de la alimentación de refrigerante hacia el evaporador se seleccionó, mediante Danfoss Coolselector®, una válvula de expansión termostática TE 12-6 para cada circuito. Bajo las condiciones de cálculo introducidas en el programa, correspondientes a una capacidad requerida de 72.150 BTU/h por circuito, evaporación a −30 °C y condensación a 45 °C, la válvula presenta una capacidad nominal de 83.400 BTU/h y una utilización aproximada del 87 %. El resultado obtenido permite disponer de capacidad suficiente para regular el flujo de refrigerante requerido por cada circuito.

En cuanto a las tuberías, el dimensionamiento realizado mediante Coolselector® permitió establecer los diámetros requeridos para las líneas de líquido y aspiración. Para la línea de líquido se adoptó finalmente tubería de cobre de 7/8 in, mientras que para la línea de aspiración se seleccionó tubería de cobre de 2 1/8 in. En las condiciones simuladas, el software muestra para la línea de 7/8 in una velocidad aproximada de 0,82 m/s y para la línea de aspiración de 2 1/8 in una velocidad cercana a 11,21 m/s, valores utilizados como referencia para comprobar el comportamiento de las líneas frigoríficas.

Finalmente, para el intercambio térmico dentro del recinto se seleccionó el evaporador industrial HISPANIA referencia HEB 8003 439 4.5D. La selección se efectuó a partir del catálogo técnico del fabricante y de las condiciones de capacidad requeridas para el túnel. El equipo pertenece a la serie de evaporadores cúbicos industriales con separación de aletas de 4,5 mm y desescarche eléctrico.

De acuerdo con la información del catálogo consultado, el modelo HEB 8003 439 4.5D presenta una superficie de intercambio de 439,0 m², un volumen interno de

63,5 dm³, cuatro filas de serpentín, un peso neto de 534 kg y conexiones de entrada de 2 × 22 mm y salida de 2 × 54 mm. La configuración de conexiones permite su integración con la arquitectura frigorífica considerada en el proyecto. La Tabla 16 consolida los principales resultados obtenidos durante la selección y dimensionamiento de los componentes frigoríficos.

Tabla 16. Componentes seleccionados para el sistema frigorífico

Componente	**Resultado de selección**	**Cantidad / condición principal**
Refrigerante	R507A	Sistema
Capacidad frigorífica total requerida	42,28 kW	12,02 TR
Número de circuitos	2	50 % de la carga por circuito
Capacidad requerida por circuito	21,14 kW	72.150 BTU/h aprox.
Compresor	BITZER 4GE-23Y-20P	2 unidades
Capacidad frigorífica por compresor	21,8 kW	A −30/45 °C
Capacidad instalada en compresión	43,6 kW	2 × 21,8 kW
Margen de capacidad en compresión	1,32 kW	≈3,1 %
Potencia absorbida por compresor	14,88 kW	Por unidad
Corriente por compresor	43,5 A	230 V
Válvula de expansión	Danfoss TE 12-6	Una por circuito
Capacidad nominal de la válvula	83.400 BTU/h	Por circuito
Utilización de la válvula	≈87 %	Por circuito
Línea de líquido adoptada	Cobre 7/8 in	Por circuito
Velocidad en línea de líquido	≈0,82 m/s	Resultado Coolselector®
Línea de aspiración	Cobre 2 1/8 in	Por circuito
Velocidad en línea de aspiración	≈11,21 m/s	Resultado Coolselector®

Evaporador	HISPANIA HEB 8003 439 4.5D	1 unidad
Condensador	HCV 5003 182-4D	1 unidad
Separación de aletas	4,5 mm	Catálogo
Superficie del evaporador	439,0 m²	Catálogo
Volumen interno	63,5 dm³	Catálogo
Filas del serpentín	4	Catálogo
Peso neto	534 kg	Catálogo
Conexión de entrada	2 × 22 mm	Catálogo
Conexión de salida	2 × 54 mm	Catálogo

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos mediante BITZER Software, Danfoss Coolselector® y el catálogo técnico de HISPANIA.

5.3.3. Resultado de la verificación de las condiciones operativas y especificaciones técnicas

La verificación de las condiciones operativas permitió comprobar la correspondencia entre la demanda frigorífica calculada para el túnel de congelación y las características técnicas de los principales componentes seleccionados. Para esta evaluación se consideró una capacidad frigorífica total requerida de 42,28 kW, distribuida entre dos circuitos equivalentes de 21,14 kW, utilizando R507A como refrigerante y temperaturas de evaporación y condensación de −30 °C y 45 °C, respectivamente.

Para la etapa de compresión, cada unidad BITZER 4GE-23Y-20P proporciona una capacidad frigorífica de 21,8 kW bajo las condiciones de operación consideradas. Frente al requerimiento de 21,14 kW por circuito, cada compresor dispone de una diferencia de capacidad de 0,66 kW, equivalente aproximadamente al 3,1 %. En conjunto, los dos compresores proporcionan 43,6 kW, superando en

1,32 kW la demanda frigorífica total calculada de 42,28 kW. La relación entre la capacidad instalada y la requerida puede expresarse mediante:

$$Cobertura = \frac{43.6}{42.28} * 100 = 103.1\ \% \qquad \text{Ec. 17}$$

Por tanto, la capacidad de compresión seleccionada corresponde aproximadamente al 103,1 % del requerimiento frigorífico calculado, quedando un margen cercano al 3,1 % respecto a la condición de diseño.

En el sistema de expansión, la válvula termostática Danfoss TE 12-6 presenta una capacidad nominal de 83.400 BTU/h frente a un requerimiento aproximado de 72.150 BTU/h por circuito. La selección obtenida mediante Coolselector® presenta una utilización cercana al 87 %, permitiendo establecer correspondencia entre la capacidad de la válvula y la demanda frigorífica de cada circuito bajo las condiciones utilizadas para su dimensionamiento.

Respecto a las líneas frigoríficas, para la línea de líquido se adoptó una tubería de cobre de 7/8 in, mientras que para la línea de aspiración se seleccionó un diámetro de 2 1/8 in. Los resultados obtenidos mediante Coolselector® indicaron velocidades aproximadas de 0,82 m/s y 11,21 m/s, respectivamente, para las condiciones consideradas en el dimensionamiento. Estos diámetros fueron incorporados como especificaciones de las líneas de refrigerante del sistema propuesto.

Para el intercambio térmico en el interior del túnel se estableció el evaporador HISPANIA HEB 8003 439 4.5D. La configuración seleccionada presenta doble conexión de entrada y salida, con valores de 2 × 22 mm y 2 × 54 mm,

respectivamente, característica compatible con la configuración de dos circuitos frigoríficos adoptada en el diseño. El equipo cuenta además con una superficie de intercambio de 439,0 m², volumen interno de 63,5 dm³, cuatro filas de serpentín y separación entre aletas de 4,5 mm.

La verificación conjunta permitió consolidar las especificaciones técnicas principales del sistema frigorífico, las cuales se presentan en la Tabla 17. En términos generales, los resultados consolidados muestran que la capacidad frigorífica proporcionada por los compresores seleccionados es superior a la demanda calculada para el túnel, mientras que las válvulas de expansión y las líneas de refrigerante fueron dimensionadas de acuerdo con la capacidad correspondiente a cada circuito. Asimismo, el evaporador seleccionado incorpora una configuración de conexiones que permite su integración con los dos circuitos frigoríficos definidos para el sistema.

Tabla 17. Verificación de las especificaciones técnicas del sistema frigorífico

Componente / parámetro	Requerimiento de diseño	Selección o resultado	Verificación
Capacidad frigorífica total	42,28 kW	43,6 kW	103,1 % de cobertura
Capacidad por circuito	21,14 kW	21,8 kW por compresor	Margen ≈ 3,1 %
Compresor	2 circuitos	BITZER 4GE-23Y-20P	2 unidades
Refrigerante	R507A	R507A	Compatible
Temperatura de evaporación	−30 °C	−30 °C	Coincidente
Temperatura de condensación	45 °C	45 °C	Coincidente
Válvula de expansión	≈72.150 BTU/h por circuito	Danfoss TE 12-6, 83.400 BTU/h	Utilización ≈87 %

Línea de líquido	Según Coolselector®	Cobre 7/8 in	0,82 m/s aprox.
Línea de aspiración	Según Coolselector®	Cobre 2 1/8 in	11,21 m/s aprox.
Evaporador	Aplicación industrial, doble circuito	HISPANIA HEB 8003 439 4.5D	Configuración 2 × 22 / 2 × 54 mm
Superficie del evaporador	Según selección	439,0 m²	Catálogo
Separación de aletas	Aplicación de congelación	4,5 mm	Catálogo

Nota. Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos mediante BITZER Software, Danfoss Coolselector® y el catálogo técnico de HISPANIA.

5.4. Diseño del sistema eléctrico de potencia y control

5.4.1. Determinación de la demanda eléctrica del sistema y dimensionamiento de conductores, protecciones y dispositivos de maniobra

A partir de las características nominales de los equipos seleccionados para el túnel de congelación y de la configuración establecida en los planos eléctricos, se consolidaron las cargas correspondientes a los sistemas de compresión, condensación, evaporación y deshielo. Esta información permitió establecer las corrientes de referencia de los diferentes circuitos y definir los conductores, elementos de protección y dispositivos de maniobra requeridos para su operación.

El sistema de compresión está constituido por dos compresores BITZER 4GE-23Y-20P, seleccionados para atender los dos circuitos frigoríficos definidos durante el dimensionamiento. Cada unidad presenta una potencia eléctrica absorbida de 14,88 kW y una corriente nominal de 43,5 A, para una potencia conjunta de 29,76 kW. La utilización de dos unidades es consistente con la división de la carga frigorífica total de 42,28 kW en dos circuitos de aproximadamente 21,14 kW cada uno.

Para la circulación de aire en el interior del túnel se seleccionó el evaporador industrial Hispania HEB 8003 439 4.5, equipado con tres motoventiladores axiales de 800 mm. La ficha técnica establece para este conjunto una potencia eléctrica de 5,70 kW y una corriente total de 19,8 A a 230 V trifásicos.

Por su parte, el sistema de condensación incorpora un condensador remoto Hispania HCV 5003 182-4D, constituido por tres motoventiladores. Para el conjunto se estableció una potencia eléctrica de 3,30 kW y una corriente nominal aproximada de 9,9 A. En los planos de potencia estos motores fueron dispuestos en circuitos independientes, permitiendo efectuar individualmente su protección y maniobra.

Las cargas principales asociadas al funcionamiento frigorífico representan, por tanto, una potencia eléctrica de 38,76 kW, distribuida en 29,76 kW correspondientes a los compresores, 5,70 kW asociados a la ventilación del evaporador y 3,30 kW correspondientes a los ventiladores del condensador. A estas cargas se adicionan los elementos destinados al proceso de deshielo y drenaje representados en los planos eléctricos.

En particular, el plano de potencia contempla dos bancos de resistencias de 15,47 kW cada uno, destinados al sistema de deshielo, equivalentes a una potencia instalada adicional de 30,94 kW. Asimismo, se incorporó un circuito independiente para la resistencia de drenaje. Sin embargo, la potencia de esta última no se encuentra especificada en la documentación técnica disponible, por lo cual se conserva como carga auxiliar independiente sin asignarle un valor de potencia no respaldado por las fuentes del proyecto.

De esta manera, considerando únicamente las cargas cuya potencia se encuentra identificada, la potencia instalada conocida del sistema asciende a 69,70 kW, correspondiente a 38,76 kW de cargas principales de refrigeración y 30,94 kW

asociados al deshielo. Este valor no debe interpretarse directamente como la demanda máxima simultánea del túnel, debido a que el funcionamiento de las resistencias de deshielo se establece en una condición operativa diferente al ciclo normal de refrigeración. Por consiguiente, la demanda eléctrica efectiva depende de la secuencia de funcionamiento implementada mediante el sistema de control.

Tabla 18. Cuadro de cargas eléctricas principales del túnel de congelación

Circuito	Carga	Cant.	Potencia total	Alimentación	Corriente nominal/ref.	Observación
C1	Compresor 1 BITZER 4GE-23Y-20P	1	14,88 kW	200–230 V, 3Φ	43,5 A	Circuito frigorífico 1
C2	Compresor 2 BITZER 4GE-23Y-20P	1	14,88 kW	200–230 V, 3Φ	43,5 A	Circuito frigorífico 2
C3	Ventiladores evaporador HEB 8003 439 4.5	3	5,70 kW	230 V, 3Φ	19,8 A	Conjunto de ventiladores
C4	Ventiladores condensador HCV 5003 182-4D	3	3,30 kW	230 V, 3Φ	9,9 A	Tres motores independientes
C5	Resistencia de deshielo 1	1	15,47 kW	220–230 V, 3Φ	≈ 38,9 A*	Deshielo
C6	Resistencia de deshielo 2	1	15,47 kW	220–230 V, 3Φ	≈ 38,9 A*	Deshielo

C7	Resistencia de drenaje Potencia instalada conocida	1	No especificada 69,70 kW	Según plano	No especificada	Circuito auxiliar Excluye resistencia de drenaje y control

Nota: elaboración propia a partir de las fichas técnicas de los equipos seleccionados y los planos eléctricos del sistema. * Valor de referencia coherente con la distribución en dos bancos de la potencia de deshielo. La ficha HEB consultada reporta para la configuración eléctrica equivalente una potencia total de deshielo de 30,94 kW y una corriente total de 77,8 A a 230 V trifásicos.

La disposición anterior permite diferenciar dos condiciones principales de operación. Durante el ciclo de refrigeración, las cargas predominantes corresponden a los compresores y sistemas de ventilación, mientras que durante el ciclo de deshielo las resistencias eléctricas adquieren la mayor participación. Esta diferenciación resulta relevante para el establecimiento de la demanda, debido a que la potencia instalada representa la suma de las cargas existentes, mientras que la demanda depende de aquellas que pueden operar simultáneamente de acuerdo con la lógica de control.

Con base en las corrientes nominales y en la arquitectura establecida en los planos de potencia, se efectuó posteriormente la selección de los conductores, protecciones y dispositivos de maniobra. Los resultados se presentan en la Tabla 19.

Tabla 19. Selección de conductores, protecciones y dispositivos de maniobra

Ref.	Equipo/circuito	Corriente de referencia	Conductor seleccionado*	Protección representada	Dispositivo de maniobra

Q01–Q02 / KM01–KM02	Compresor 1 – BITZER 4GE-23Y-20P	43,5 A nominal motor**	8 AWG Cu + PE 10 AWG	2 × GV2P40	2 × LC1D40
Q03–Q04 / KM03–KM04	Compresor 2 – BITZER 4GE-23Y-20P	43,5 A nominal motor**	8 AWG Cu + PE 10 AWG	2 × GV2P40	2 × LC1D40
Q05 / KM05	Motor condensador 1	≈3,3 A***	14 AWG Cu + PE 14 AWG	GV2ME10	LC1D09
Q06 / KM06	Motor condensador 2	≈3,3 A***	14 AWG Cu + PE 14 AWG	GV2ME10	LC1D09
Q07 / KM07	Motor condensador 3	≈3,3 A***	14 AWG Cu + PE 14 AWG	GV2ME10	LC1D09
Q08 / KM08	Ventiladores evaporador	19,8 A	10 AWG Cu + PE 10 AWG	GV2ME32	LC1D32
FU02 / KM09	Resistencia de deshielo 1	≈38,9 A	8 AWG Cu + PE 10 AWG	EZC100N, 60 A**	Contactor KM09
FU03 / KM10	Resistencia de deshielo 2	≈38,9 A	8 AWG Cu + PE 10 AWG	EZC100N, 60 A**	Contactor KM10
FU04	Resistencia de drenaje	No especificada	Por definir según potencia nominal	Protección independiente según plano	Según circuito de control

Nota: elaboración propia a partir de los planos eléctricos y fichas técnicas de los equipos.

* Los calibres de los conductores se establecen como selección de diseño coherente con las corrientes de las cargas; su implementación definitiva requiere verificar ampacidad según método de instalación, temperatura, agrupamiento, aislamiento y demás factores de corrección aplicables. ** Los 43,5 A corresponden a la corriente nominal del compresor completo y no a la corriente individual de cada rama del sistema de arranque. *** Valor aproximado obtenido a partir de los 9,9 A correspondientes al conjunto de tres motos ventiladores equivalentes. El ajuste definitivo del guardamotor debe realizarse utilizando la corriente de placa de cada motor. **** Referencia interpretada a partir de la identificación

incorporada en el plano eléctrico; debe verificarse contra la referencia definitiva del dispositivo instalado.

Para los dos compresores se establecieron circuitos independientes de potencia. En el plano se identifican los dispositivos Q01–Q04 y los contactores KM01–KM04, organizados en dos ramas por cada compresor. Esta configuración es coherente con la representación de los seis terminales de los motores y con el sistema de arranque previsto en el diseño. La corriente de 43,5 A corresponde a la corriente nominal de cada compresor completo, por lo que no debe atribuirse individualmente a cada una de las dos ramas del arranque.

La utilización de circuitos independientes para ambos compresores permite aislar cada unidad ante una falla o durante actividades de mantenimiento, manteniendo separadas las funciones de protección y maniobra correspondientes a los dos circuitos frigoríficos.

En el condensador remoto, los tres motoventiladores fueron igualmente independizados. Los circuitos Q05, Q06 y Q07 incorporan dispositivos de protección de la familia GV2ME10, mientras que la maniobra se realiza mediante los contactores KM05, KM06 y KM07, respectivamente. Esta configuración permite la protección individual de cada ventilador y facilita su aislamiento ante una condición de falla o mantenimiento.

Para los ventiladores del evaporador se estableció el circuito Q08/KM08. La protección se realiza mediante un dispositivo GV2ME32 y la maniobra mediante un contactor LC1D32. El conjunto corresponde a los tres ventiladores de 800 mm del evaporador seleccionado, cuya ficha técnica establece una potencia total de 5,70 kW y una corriente de 19,8 A a 230 V trifásicos.

Los dos bancos de resistencias utilizados para el deshielo se dispusieron también en ramales independientes. En los planos estos circuitos se encuentran identificados mediante FU02 y FU03, con maniobra a través de KM09 y KM10, respectivamente. La separación en dos bancos de aproximadamente 15,47 kW permite distribuir la potencia de calentamiento y realizar su accionamiento desde el circuito de control sin conducir directamente la corriente de las resistencias a través de los dispositivos de regulación.

Por su parte, la resistencia destinada al drenaje dispone de la protección FU04. Debido a que la potencia nominal de esta carga no se encuentra especificada en las fichas técnicas ni puede determinarse inequívocamente a partir del plano, no se asignó un calibre de conductor ni una corriente nominal definitiva. Esta información deberá definirse a partir de la potencia de la resistencia seleccionada antes de la implementación física del sistema.

Finalmente, la distribución obtenida evidencia una separación funcional entre los circuitos de potencia, protección y maniobra. Los dispositivos Q01–Q08 y FU02–FU04 realizan las funciones de protección correspondientes a las diferentes cargas, mientras que los contactores KM01–KM10 permiten que las cargas de potencia sean gobernadas mediante el circuito de control. Esta arquitectura constituye la base para los diagramas unifilares y los esquemas de potencia y control presentados en la sección siguiente.

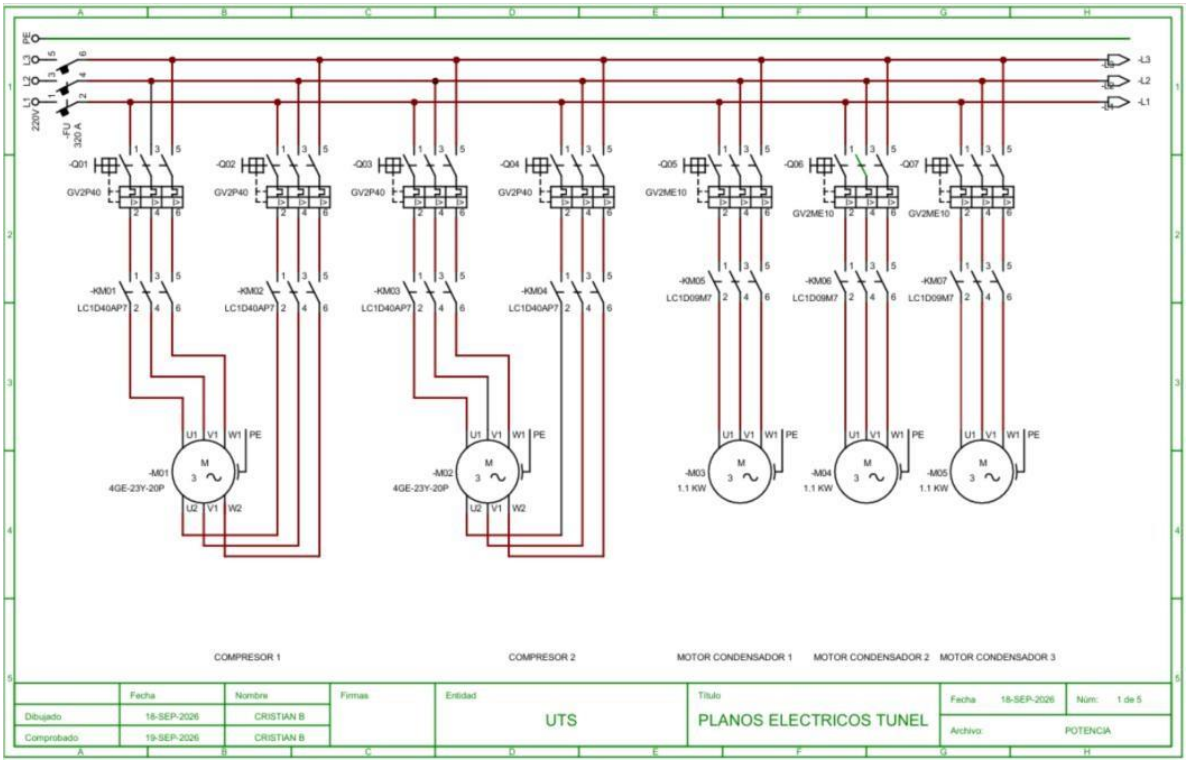
5.4.2. Diagramas unifilares, esquemas de potencia y control del sistema eléctrico

Como resultado del diseño eléctrico se obtuvieron los planos de potencia y control requeridos para integrar los equipos del túnel de congelación. Los diagramas desarrollados establecen la distribución de la alimentación, los dispositivos de

protección y maniobra, las cargas principales y la lógica de control asociada a la operación del sistema frigorífico.

En la Figura 36 se presenta la primera sección del circuito de potencia, correspondiente a los dos compresores y a los motoventiladores del condensador. Los compresores M01 y M02 se encuentran asociados a los dispositivos de protección Q01–Q04 y a los contactores KM01–KM04. Asimismo, los motores M03, M04 y M05, correspondientes a los tres ventiladores del condensador, disponen de ramales independientes mediante Q05–Q07 y KM05–KM07. Esta configuración permite efectuar de manera independiente la protección y maniobra de las principales cargas del sistema de compresión y condensación.

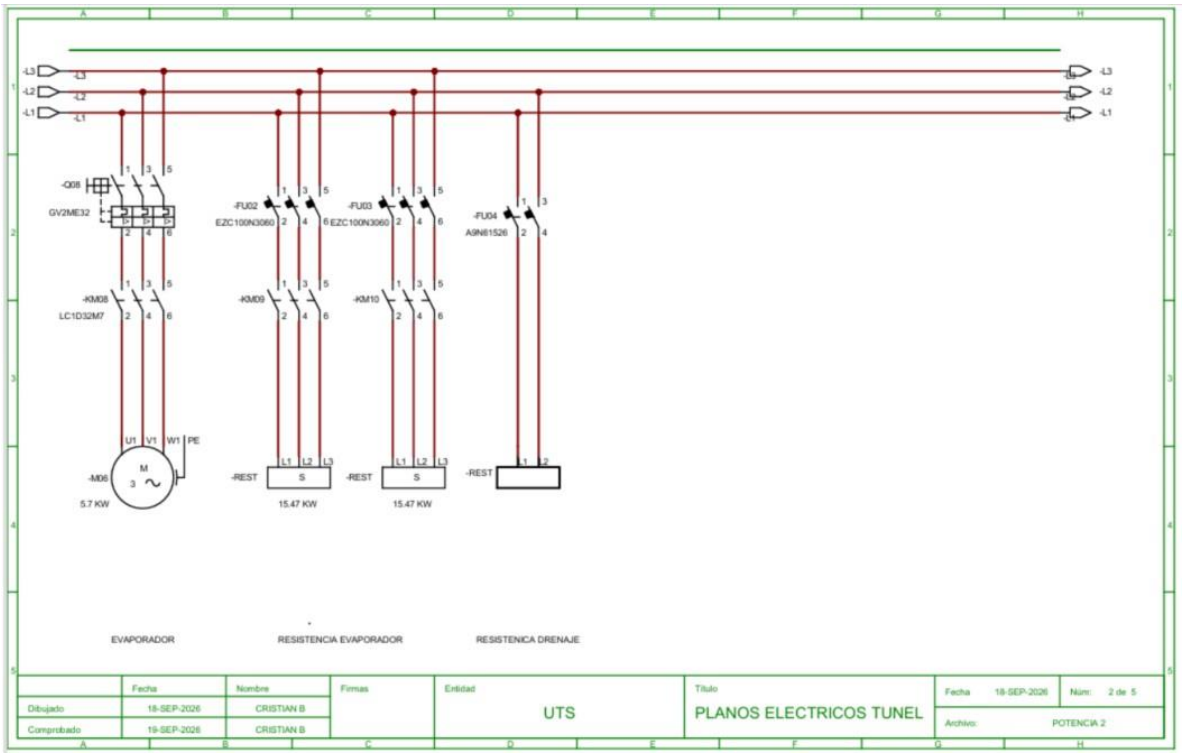
Figura 36. Circuito de potencia de compresores y motoventiladores del condensador.



Fuente: elaboración propia mediante CADe_SIMU.

La segunda sección del circuito de potencia, presentada en la Figura 37, incorpora el evaporador y los elementos destinados al deshielo. El conjunto de ventiladores del evaporador se encuentra representado mediante el motor M06 y el circuito Q08/KM08. Adicionalmente, se observan dos bancos de resistencias de 15,47 kW, accionados mediante KM09 y KM10, junto con el circuito independiente correspondiente a la resistencia de drenaje. Con esta distribución se integraron en el diseño tanto las cargas utilizadas durante la refrigeración como aquellas requeridas durante el proceso de deshielo.

Figura 37. Circuito de potencia del evaporador y sistema de deshielo.

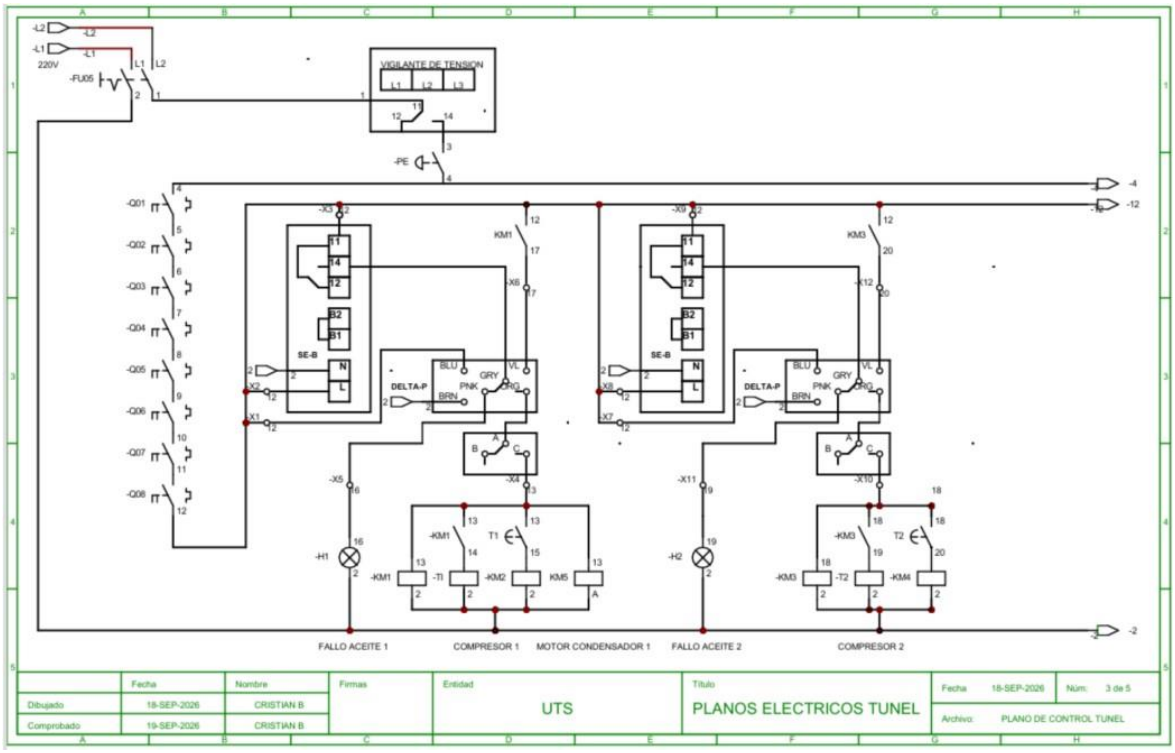


Fuente: elaboración propia mediante CADe_SIMU.

Una vez establecidos los circuitos de potencia, se desarrolló el sistema de control. En la Figura 38 se presenta la sección asociada principalmente al accionamiento y

protección de los compresores y ventiladores del condensador. El circuito incorpora la supervisión de la alimentación trifásica mediante un vigilante de tensión y diferentes contactos de protección que condicionan la habilitación de las cargas. Para los compresores se integraron además los dispositivos de protección y supervisión representados en el plano, incluyendo los módulos SE-B y DELTA-P, así como elementos de temporización y señalización de falla.

Figura 38. Circuito de control y protección de compresores y motoventiladores del condensador.

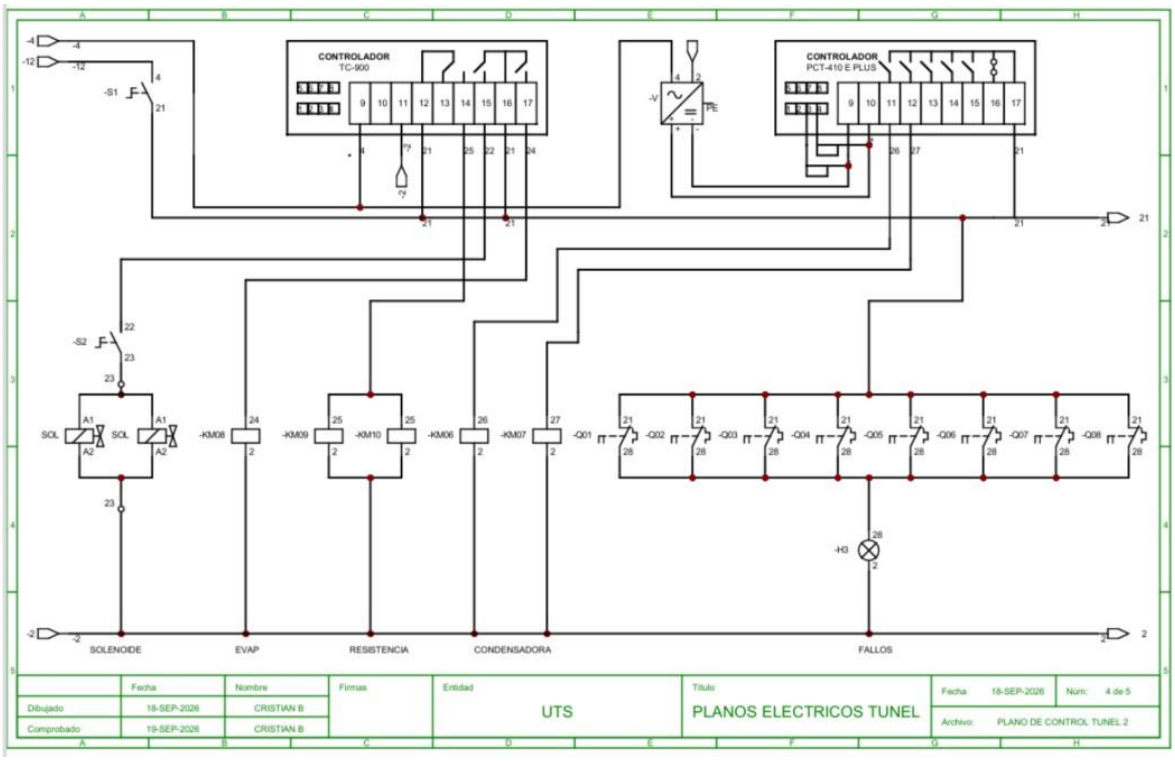


Fuente: elaboración propia mediante CADe_SIMU.

En la Figura 39 se muestra la continuación del circuito de control, donde se integran los controladores TC-900 y PCT-410 E Plus con los elementos de maniobra del sistema. Las salidas de estos dispositivos se relacionan con las válvulas solenoides, el evaporador, las resistencias de deshielo y los equipos de

condensación. Asimismo, se incorporaron contactos asociados a los dispositivos de protección de los motores, permitiendo concentrar las señales de falla dentro del circuito de supervisión.

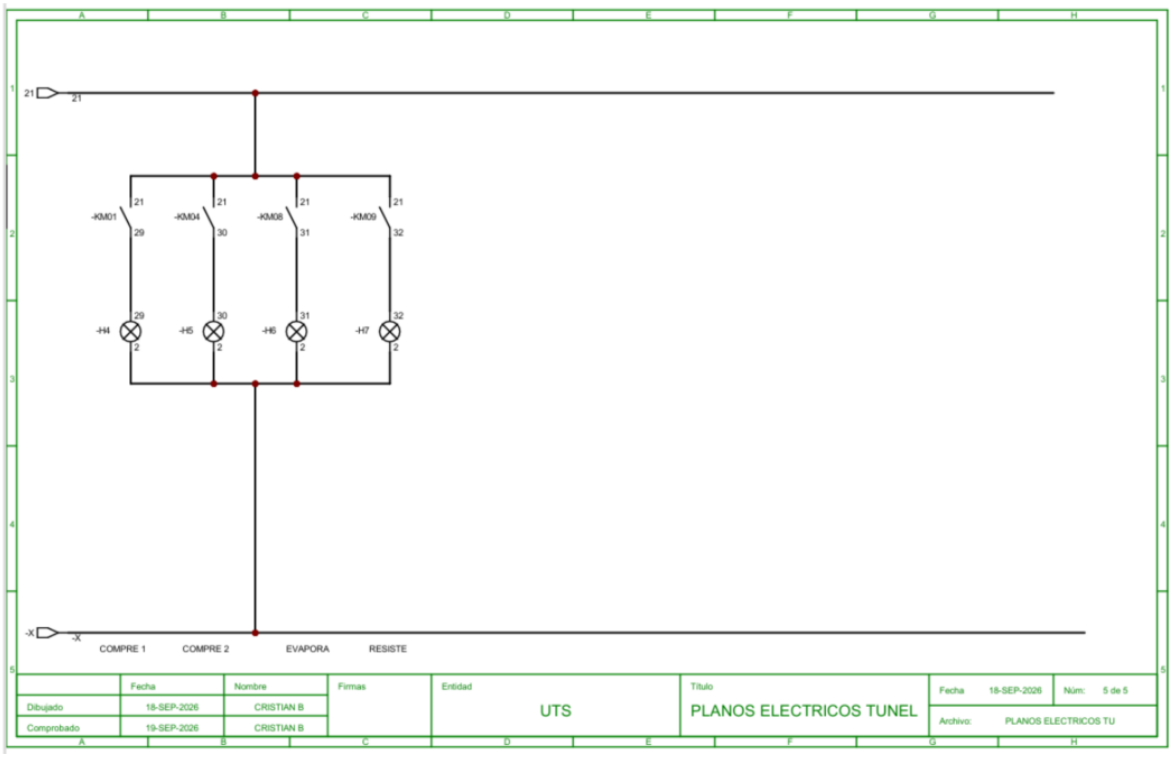
Figura 39. Circuito de control de temperatura, deshielo, ventilación y señalización de fallas.



Fuente: elaboración propia mediante CADe_SIMU.

Finalmente, la Figura 40 presenta el circuito destinado a la señalización de los principales estados operativos. Mediante contactos auxiliares asociados a los contactores de potencia se establecieron indicadores para identificar el funcionamiento de los compresores, el evaporador y las resistencias. Esta sección complementa el sistema de control al proporcionar una referencia visual del estado de las cargas durante la operación del túnel.

Figura 40. Circuito de señalización de estados operativos del sistema eléctrico.



Fuente: elaboración propia mediante CADe SIMU.

En conjunto, los cinco planos obtenidos integran la alimentación y distribución de potencia con las funciones de maniobra, protección, control y señalización requeridas para el túnel de congelación. La separación de los circuitos permite identificar individualmente las cargas y sus dispositivos asociados, mientras que la integración del circuito de control establece la interacción necesaria entre los compresores, sistemas de ventilación, válvulas solenoides y elementos de deshielo.

5.4.3. Verificación de los requisitos aplicables del RETIE y documentación técnica del diseño eléctrico

A partir del dimensionamiento desarrollado en la sección 5.4.1 y de los planos eléctricos presentados en la sección 5.4.2, se realizó la verificación de los principales criterios de seguridad eléctrica considerados en el diseño del túnel de congelación. Para ello se relacionaron las características de los circuitos con los requisitos aplicables a instalaciones eléctricas de uso final establecidos en el RETIE vigente.

La Tabla 20 presenta la matriz de verificación utilizada para consolidar los resultados del análisis. La evaluación se realizó sobre el diseño propuesto y, por tanto, diferencia los requisitos verificables documentalmente de aquellos que dependen de las condiciones reales de construcción, montaje y puesta en servicio.

Tabla 20. Verificación de criterios técnicos aplicables al diseño eléctrico

Criterio de verificación	Aplicación en el diseño	Resultado
Dimensionamiento de conductores	Los calibres fueron seleccionados de acuerdo con las corrientes de las cargas y se estableció conductor de protección en los circuitos correspondientes.	Considerado en diseño
Protección contra sobrecorriente	Se incorporaron dispositivos de protección independientes para compresores, ventiladores, evaporador y resistencias.	Considerado en diseño
Protección de motores	Los motores cuentan con dispositivos de protección asociados a sus respectivos circuitos de potencia.	Considerado en diseño
Maniobra de cargas	Se incorporaron contactores independientes para el accionamiento de las principales cargas.	Considerado en diseño

Separación potencia/control	Los planos diferencian los circuitos destinados a alimentación de cargas de aquellos correspondientes al mando y supervisión.	Considerado en diseño
Protección ante condiciones anormales	El circuito de control incorpora elementos para supervisión de tensión y condiciones de protección asociadas a los compresores.	Considerado en diseño
Identificación de circuitos	Los dispositivos y cargas se encuentran identificados mediante referencias Q, FU, KM, M y elementos auxiliares.	Considerado en diseño
Señalización	Se incorporaron indicadores para representar estados de operación y condiciones de falla.	Considerado en diseño
Conductor de protección y puesta a tierra	Se contempla conductor de protección en los circuitos derivados; la implementación del sistema de puesta a tierra deberá verificarse durante la instalación.	Verificación en implementación
Condiciones de montaje	Canalizaciones, distancias, conexiones, encerramientos y condiciones físicas dependen de la instalación definitiva.	Verificación en implementación
Pruebas eléctricas	Continuidad, aislamiento, puesta a tierra y demás comprobaciones requieren la instalación físicamente ejecutada.	Verificación en puesta en servicio
Evaluación de conformidad	Depende del alcance definitivo de la instalación y del procedimiento de evaluación que resulte aplicable.	Etapa posterior

Nota: elaboración propia con base en el diseño eléctrico desarrollado y los criterios aplicables del RETIE.

Los resultados muestran que el diseño incorpora los principales elementos de seguridad considerados durante la etapa de ingeniería, entre ellos la protección individual de las cargas, la maniobra mediante contactores, la separación funcional de los circuitos de potencia y control y la identificación de los dispositivos eléctricos. Asimismo, el circuito de control complementa las protecciones eléctricas mediante

elementos de supervisión y señalización asociados al funcionamiento del sistema frigorífico.

La verificación permitió además diferenciar los aspectos que pueden ser comprobados durante el diseño de aquellos que requieren una instalación físicamente construida. Entre estos últimos se encuentran las condiciones definitivas de montaje, la ejecución del sistema de puesta a tierra, las características de las canalizaciones, las pruebas eléctricas y la eventual evaluación de conformidad. Por esta razón, los resultados obtenidos corresponden a una verificación documental del diseño y no sustituyen los procedimientos de inspección y certificación que puedan resultar aplicables a una instalación ejecutada.

6. CONCLUSIONES

El análisis térmico permitió establecer que el dimensionamiento de un túnel de congelación para productos avícolas no puede fundamentarse únicamente en la cantidad de producto procesado, debido a que las ganancias por transmisión, infiltración y cargas internas también influyen en la demanda frigorífica. La integración de estas variables permitió definir una capacidad de refrigeración acorde con las condiciones reales de operación y reducir el riesgo de seleccionar equipos insuficientes o excesivamente sobredimensionados.

La configuración física del túnel evidenció que la capacidad de almacenamiento debe analizarse conjuntamente con la circulación del aire frío. La distribución adoptada permitió conservar espacios para el flujo de aire entre las unidades de producto y mantener una disposición compatible con las dimensiones disponibles del recinto. De esta manera, el diseño CAD permitió resolver la interacción entre capacidad de almacenamiento, ubicación de equipos, accesibilidad y requerimientos de circulación de aire, aspectos que condicionan el desempeño térmico del sistema.

La selección de los componentes frigoríficos demostró la importancia de evaluar los equipos como un sistema integrado y no de manera independiente. La división de la demanda frigorífica entre circuitos permitió seleccionar compresores compatibles con las condiciones de evaporación y condensación establecidas y, posteriormente, relacionarlos con el evaporador, condensador, dispositivo de expansión y tuberías. Este procedimiento permitió solucionar las diferencias existentes entre las capacidades comerciales disponibles y la demanda calculada, manteniendo una configuración técnicamente compatible con las condiciones de operación propuestas.

El diseño eléctrico evidenció que las características eléctricas de los equipos frigoríficos determinan directamente la arquitectura de los circuitos de potencia y control. La separación de las cargas en ramales independientes, junto con la incorporación de dispositivos de protección, maniobra, supervisión y señalización, permitió establecer una configuración en la que cada componente puede ser controlado y protegido de acuerdo con su función dentro del proceso. La integración entre los circuitos de potencia y control permite, además, responder ante condiciones anormales de funcionamiento sin depender únicamente de la actuación manual del operador.

Finalmente, la integración metodológica de los componentes térmico, mecánico y eléctrico permitió establecer una propuesta de diseño en la que las decisiones tomadas en cada etapa se encuentran relacionadas entre sí. La principal dificultad del proceso consistió en compatibilizar la demanda térmica calculada con las capacidades comerciales de los equipos y, posteriormente, con sus requerimientos eléctricos y de control. Esta condición se resolvió mediante un proceso progresivo de dimensionamiento, selección y verificación técnica, obteniendo una documentación de ingeniería que puede servir como base para una futura etapa de implementación. No obstante, las condiciones definitivas de montaje, puesta a tierra, pruebas eléctricas y evaluación de conformidad deberán verificarse sobre la instalación físicamente ejecutada.

7. RECOMENDACIONES

Para una futura implementación del túnel de congelación, se recomienda realizar una etapa de validación experimental que permita contrastar las condiciones térmicas obtenidas mediante el modelado con el comportamiento real del sistema. Esta validación debería considerar el seguimiento de la temperatura del producto en diferentes posiciones dentro del túnel, así como la temperatura y velocidad del aire, con el propósito de identificar posibles diferencias asociadas a la distribución del flujo y realizar los ajustes requeridos antes de establecer las condiciones definitivas de operación.

Se recomienda complementar el diseño mediante un análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD), orientado a estudiar con mayor detalle la distribución del aire frío alrededor de las canastas. Este análisis permitiría identificar zonas de baja circulación, recirculaciones o trayectorias preferenciales del flujo y evaluar modificaciones en la ubicación del evaporador, disposición del producto o incorporación de elementos direccionadores de aire que contribuyan a mejorar la uniformidad del proceso de congelación.

En una etapa posterior se recomienda realizar un análisis energético y económico del sistema, considerando el comportamiento de los equipos bajo diferentes condiciones de carga y estrategias de operación. Este estudio permitiría establecer indicadores de consumo energético, costos de operación y oportunidades de optimización, así como comparar la configuración propuesta con alternativas tecnológicas que puedan mejorar el desempeño global del túnel.

Para la implementación del sistema eléctrico se recomienda desarrollar la ingeniería de detalle a partir de los planos y criterios establecidos en el presente trabajo, complementándola con las condiciones reales del sitio de instalación. En

esta etapa deberán definirse aspectos como canalizaciones, tableros, sistema de puesta a tierra, características de montaje y demás elementos que dependan de la infraestructura definitiva. Asimismo, deberán realizarse las pruebas y procedimientos de evaluación de conformidad que resulten aplicables antes de la puesta en servicio de la instalación.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abagnale, C., Cardone, M., Iodice, P., Strano, S., Terzo, M., & Vorraro, G. (2015). Model-based Control for an Innovative Power-assisted Bicycle. *Energy Procedia, 69th Conference of the Italian Thermal Engineering Association, ATI 2014*, *81*, 606-617. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.045

Abed, A. F., Alshukri, M. J., & Hachim, D. M. (2024). Improving solar still performance via the integration of nanoparticle-enhanced phase change materials: A novel pyramid-shaped design with a numerical simulation approach. *Journal of Energy Storage*, *97*, 112980. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112980

Alonso, M. J., Andresen, T., Frydenlund, F., & Widell, K. N. (2011). Improvements of air flow distribution in a freezing tunnel using Airpak. *Procedia Food Science*, *1*, 1231-1238. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.profoo.2011.09.183

Álvarez, G., Chagolla, M. A., Xamán, J. P., Jiménez, M. J., Suárez, S., & Heras, M. R. (2010). *A trnsys simulation and experimental comparison of the thermal behavior of a building located in desert climate*. *2*, 349-356. Scopus. https://doi.org/10.1115/ES2010-90272

Araujo Lima da Silva, G., de Barros, D. R., Rafael, C. F., Pio, D. M., Hefazi, H., & Pimenta, M. de M. (2024). Numerical Simulation of Coupled Heat and Mass Transfer for Airfoil Ice Protection Systems. En *Handbook of Numerical Simulation of In-Flight Icing* (pp. 879-970). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33845-8_15

Bolaji, D. O., Bolaji, B. O., Bello, K. A., & Ogundana, T. O. (2025). *An Overview of Techniques for Enhancing the Performance of Refrigeration Systems*. *74*, 235-249.

Bora, V. R., Gallia, M., Knop, I., & Guardone, A. (2023). *Investigation of the Influence of Aero-Thermal Non-equilibrium Conditions of an SLD Cloud on Airfoil Icing*. SAE International. International Conference on Icing of Aircraft, Engines, and Structures. https://doi.org/10.4271/2023-01-1406

Cao, Q., Zhang, L., Dai, B., Huang, Z., & Xie, N. (2026). Conceptual design of a novel tunnel cooling system based on the TBM waste heat recovery during the tunneling process. *Applied Thermal Engineering*, *292*, 130360. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.130360

Chang, J., Gong, X., Chu, Y., Li, X., Sui, C., & Li, X. (2026). Characteristics and Protein Microstructural Responses to Ultrasound-assisted Immersion Freezing of Metapenaeus Ensis. *Applied Food Research*, 101931. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.afres.2026.101931

Chen, J., Park, Y. J., & Wang, S. (2026a). From condensation to mature frost growth-an advanced model to predict surface wettability and edge effects on frosting. *Applied Thermal Engineering*, *300*, 131303. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.131303

Chen, J., Park, Y. J., & Wang, S. (2026b). From condensation to mature frost growth-an advanced model to predict surface wettability and edge effects on frosting. *Applied Thermal Engineering*, *300*, 131303. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.131303

Clark, C., & Ruggi, M. (2023). *Design, Characterization and Initial Testing of a Vertical Stabilizer Common Research Model for Aircraft Ground Icing Testing*. SAE

International. International Conference on Icing of Aircraft, Engines, and Structures. https://doi.org/10.4271/2023-01-1439

Enrique, E., & Muriel, S. (2025). *Análisis de Equivalencias en el Consumo y Generación de Gases de Efecto Invernadero: Un Enfoque Integrado para la Mitigación del Cambio Climático , en la Unidad Nacional de Protección .*

Garvin, M., & Kirchhefer, A. (2025). Design and performance of an open-circuit marine icing wind tunnel. *Applied Ocean Research*, *157*, 104510. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apor.2025.104510

Gaukel, V. B. T.-R. M. in F. S. (2016). *Cooling and Freezing of Foods*. Elsevier. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.03415-6

Gheshlaghi, A., Ziabasharhagh, M., Jalaledin Abyaneh, M. H., & Soltani, M. (2025). Energy, exergy and economic analysis of a combined power and subzero cooling cycle using ammonia absorption refrigeration system. *Results in Engineering*, *28*(September), 107463. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107463

Guan, P., Li, S., Jiang, H., & Xiang, P. (2023). Study on Temperature Field Distribution Law and Mechanical Properties of Hydraulic Tunnel-Surrounding Rock under the Action of Large Temperature Differences. *Symmetry*, *15*(7), 1386. https://doi.org/10.3390/sym15071386

Hernández Sampieri, R., & Fernandez-Collado, C. F. (2014). *Metodología de la investigación* (P. Baptista Lucio, Ed.; Sexta edición). McGraw-Hill Education.

Hoang, D. K., & Carson, J. K. (2024). 6—Air blast freezing in the food industry. En S. M. Jafari & H. B. T.-L.-T. P. of F. P. Rostamabadi (Eds.), *Unit Operations and*

Processing Equipment in the Food Industry (pp. 117-146). Woodhead Publishing. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818733-3.00004-7

Hong, R., Cai, H., & Yao, Y. (2026). Three–dimensional deformation of strata that are rich with water during construction of a plane skew connecting channel using artificial ground freezing technique. *Scientific Reports*, *16*(1), 2680. https://doi.org/10.1038/s41598-025-32397-w

Jaafar, M. N., Rosli, M. I., Nordin, D., & Buhari, J. (2025). Systematic literature review on the risk assessment of ammonia refrigeration systems in the food industry. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *96*, 105629. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jlp.2025.105629

Jackson, D., Anderson, K., & Heuer, W. (2023). *Liquid Water Detection Algorithm for the Magnetostrictive Ice Detector*. SAE International. International Conference on Icing of Aircraft, Engines, and Structures. https://doi.org/10.4271/2023-01-1430

James, S. J., & James, C. (2023). *Chapter 23—Chilling and Freezing* (V. Andersen, H. Lelieveld, & Y. B. T.-F. S. M. (Second E. Motarjemi, Eds.; pp. 453-474). Academic Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820013-1.00005-X

Jia, G., Chen, Y., Luan, W., & Wang, X. (2025). Study of the freezing process and ice crystal growth during freezing and storage of pork. *LWT*, *225*, 117921. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117921

Jia, H., Xiao, K., Hao, Y., Jin, L., Wei, Y., & Tan, X. (2026). Moisture migration within the melting laps during construction controls frost heaving damage of lining in permafrost tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *167*, 107107. https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.107107

Jiang, L., Liu, D., Wang, W., Lv, R., Yu, S., & Zhou, J. (2025). Advancements and perspectives of novel freezing and thawing technologies effects on meat: A review. *Food Research International*, *204*, 115942. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.115942

Kahandage, P. D., Senevirathne, N. S. L., Kosgollegedara, E. J., & Dharmarathna, H. B. S. S. R. (2026). An IoT-Assisted Dual Supply Solar Food Drying System for Tropical Agricultural Conditions. En T. Ahamed (Ed.), *IoT and AI in Agriculture: Strategies to Develop Smart Agricultural Space for In-field and In-house Crop Production* (pp. 291-310). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-95-5218-4_20

Komaei, A., Soroush, A., Fattahi, S. M., & Ghanbari, H. (2023). Influence of environmental stresses on the durability of slag-based alkali-activated cement crusts for wind erosion control. *Science of The Total Environment*, *902*, 166576. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166576

Lee, A. J., Sharma, V., Luo, J., Cheekatamarla, P., & Shen, B. (2026). Next-Generation Refrigerants and Energy Efficiency in Walk-In Coolers and Freezers in the U.S. *International Journal of Refrigeration*, 106912. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2026.106912

Lee, K. H., Jeong, J. H., & Ko, J. (2026). Development and evaluation of a dual-loop vapor compression refrigerator-freezer for improved energy efficiency. *Applied Thermal Engineering*, *282*, 128912. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128912

Li, H., Wang, T., Zhou, G., Cao, J., Song, Y., & Chen, K. (2026). Impact of uncertainty in cross-correlation structures of thermal properties on stochastic hydro-thermal

processes in artificial ground freezing. *Computers and Geotechnics*, *197*, 108276. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2026.108276

Li, L., Mu, Y., Zhu, X., Ma, W., Zhang, L., Zhang, K., & Yang, X. (2025). Assessment of the Frost Damage Susceptibility of Highway Tunnels in Plateau Transition Regions: Example Taken from Gansu Province in Northwest China. *Journal of Cold Regions Engineering*, *39*(4), 04025039. https://doi.org/10.1061/JCRGEI.CRENG-1030

Li, M., Yu, H., Zhang, J., Lin, G., Zhang, L., Chen, Y., Zhu, F., Mao, Y., Chen, H., Ding, Z., & Liang, Y. (2023). Study on dynamic mechanical response characteristics and fracture energy dissipation mechanism of sandstones with different saturations under real-time low temperature. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, *9*(1), 77. https://doi.org/10.1007/s40948-023-00622-3

Lin, Z., Xia, C., Zhou, S., & Du, S. (2023). Experimental investigation of the temperature field of a frost-penetration tunnel based on a whole life cycle laboratory test. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *142*, 105378. https://doi.org/10.1016/j.tust.2023.105378

Liu, C., Li, Z., Li, Z., Jiang, Y., & Li, G. (2026a). Freeze–Thaw Impact on the Mechanical Properties and Microstructure Changes of Sandstone with Varying Water Saturations. *Journal of Cold Regions Engineering*, *40*(2), 04026016. https://doi.org/10.1061/JCRGEI.CRENG-1074

Liu, C., Li, Z., Li, Z., Jiang, Y., & Li, G. (2026b). Freeze–Thaw Impact on the Mechanical Properties and Microstructure Changes of Sandstone with Varying Water Saturations. *Journal of Cold Regions Engineering*, *40*(2), 04026016. https://doi.org/10.1061/JCRGEI.CRENG-1074

Liu, F., Wang, S., Hu, Y., Tian, C., & Feng, Y. (2026). Research progress on the combined method of metro jet system and artificial ground freezing. *International Conference on Computer Application and Information Security (ICCAIS 2025)*, *14170*, 813. https://doi.org/10.1117/12.3111892

Lu, H., Bao, W., Yin, Y., Sun, X., Li, H., Pan, Z., & Che, B. (2023). Experimental study on multi-scale damage and deterioration mechanism of carbonaceous slate under freeze-thaw cycles. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *82*(12), 458. https://doi.org/10.1007/s10064-023-03493-w

Ma, J., Huang, K., Zou, B., Li, X., & Deng, Y. (2023). The influence of tunnel insulation measures on the temperature spatiotemporal variation of frozen soil during artificial ground freezing. *Cold Regions Science and Technology*, *214*, 103942. https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2023.103942

Ma, Z., & Xu, P. (2025). Tunnel anti-freezing defence method based on daily temperature cycle. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, *179*(4), 283-293. https://doi.org/10.1680/jtran.25.00058

Nikic, D., Severson, M. D., & Galgana, M. L. (2026). First Evidence of Angle-of-Attack Measurement Using a Plasma Source. *AIAA Journal*, *64*(4), 2103-2110. https://doi.org/10.2514/1.J065999

Ofili, S., Alimohammadi, H., Krupenski, I., Sameti, M., Li, Z., Sukumaran, S., Lepiksaar, K., Ledvanov, A., & Volkova, A. (2026). Feasibility analysis of geothermal energy utilization in ultra-low temperature district heating networks: Effect of heat distribution in underground tunnels. *Renewable Energy*, *270*, 125920. https://doi.org/10.1016/j.renene.2026.125920

Palacz, M., Piechnik, E., Halski, M., Stebel, M., Adamczyk, W., Eikevik, T. M., & Smolka, J. (2021). Experimental analysis of freezing process of stationary food samples inside a hydrofluidisation freezing chamber. *International Journal of Refrigeration*, *131*, 68-77. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.06.034

Refahi, A., Habibollahniavarani, B., Sanaye, S., & Amani, M. (2025). Design and optimization of a novel hybrid ejector-based refrigeration system for enhanced energy and cost efficiency. *International Journal of Refrigeration*, *176*, 345-358. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2025.04.023

Restrepo-Díaz, C., Presiga-Posada, N., Velasquez, S., Gil, L., & Muñoz, D. A. (2025). Container design optimization for efficient industrial freezing process of coffee extracts. *Food and Bioproducts Processing*, *154*(April), 13-20. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2025.08.002

Saeed, M. Z. (2020). *Energy efficient and climate friendly cooling, freezing and heating onboard fishing vessels*. (June), 115.

Song, Y., Cai, H., Yang, Z., & Pang, C. (2026). Optimization of Liquid Nitrogen Freezing in a Water-Rich Sand Stratum with High-Velocity Seepage Based on the PSO Algorithm. *International Journal of Geomechanics*, *26*(2), 04025339. https://doi.org/10.1061/IJGNAI.GMENG-12159

Sun, K., Qin, J., Wei, Y., Jia, J., Zheng, Y., Zhang, Y., Hong, Y., & Hou, Z. (2023). Prediction of freezing damage in high-speed railway tunnels under airflow influence in cold regions. *Thermal Science and Engineering Progress*, *43*, 101995. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.101995

Sun, M., Yan, Q., Liu, J., Zhang, L., Zhang, J., & Chen, W. (2026). Thermo-hydro-mechanical modeling for long-term performance estimation of cold-region tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *172*, 107519. https://doi.org/10.1016/j.tust.2026.107519

Taylor, A., Slane, C., Hu, J., & Botura, G. (2023). *Development of a Robust Surface Ply for Pneumatic Deicers*. SAE International. International Conference on Icing of Aircraft, Engines, and Structures. https://doi.org/10.4271/2023-01-1403

Wadawa, B., Effa, J. Y., Obbadi, A., Sahnoun, S., & Errami, Y. (2025). New optimal sizing and accelerated testing to reliably and cost-effectively improve and predict freezer energy performance. *Next Energy*, *9*, 100445. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nxener.2025.100445

Wang, C., Yang, C., Qin, H., & Wang, Y. (2023). Examination of Determinants and Predictive Modeling of Artificially Frozen Soil Strength Utilizing the XGBoost Algorithm. *Applied Sciences*, *13*(24), 13170. https://doi.org/10.3390/app132413170

Wang, J., Wang, J., Xie, L., Peng, F., & Shi, L. (2024). Analysis of frost layer growth behavior on cryogenic surfaces in ultralow dew point environments by experimental tests and numerical simulations. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *154*, 107415. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107415

Wang, R., Fang, Z., Wang, D., Zhu, Z., Li, H., Wu, P., Xu, Q., & Han, Y. (2025). Theoretical solution research on air curtain thermal insulation technology at tunnel portal in cold area. *Scientific Reports*, *15*(1), 8780. https://doi.org/10.1038/s41598-025-91433-x

Wang, Y., Ren, Y., Zhang, Y., Yang, Z., Ma, Z., Chen, J., Chen, X., Qiu, Z., Tian, J., Pu, A., Yin, J., Guo, M., Song, Y., Guo, J., Feng, Y., & Liu, G. (2025). Innovative electromagnetic wave assisted freezing (EWAF) for improving frozen food quality: Principles, influencing factors, modelling, applications, and prospects. *Trends in Food Science & Technology*, *156*, 104813. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tifs.2024.104813

Wei, Y., Sun, K., Zheng, T., Qin, J., Liu, C., & Peng, L. (2026). Experimental and numerical study on the active regulation effect of hot air curtains on the thermal environment of cold-region tunnels. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, *175*, 111134. https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2026.111134

Wu, L.-M., Gao, F., Huang, H.-X.-T., Luo, W.-J., & Liu, G.-N. (2026). An Experimental Investigation of Constitutive Models for Steel Fiber-Reinforced Concrete Tunnel Linings Subjected to Freeze–Thaw Cycles. *Buildings*, *16*(5), 957. https://doi.org/10.3390/buildings16050957

Xia, C., Wang, S., Ying, Y., Lin, Z., Yuan, M., & Zhao, D. (2025). Advances in indicators for defining cold levels within tunnels: Current state and future perspectives. *Cold Regions Science and Technology*, *235*, 104477. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2025.104477

Xiang, H., Zhang, G., Cheng, P., Hu, J., Wang, Z., & Zeng, D. (2023). Analyses of the Ground Surface Displacement under Reinforcement Construction in the Shield Tunnel End Using the Artificial Ground Freezing Method. *Applied Sciences*, *13*(14), 8508. https://doi.org/10.3390/app13148508

Yan, H., Zhu, Z., Ding, Y., Zhu, Y., Gao, Y., & Han, Z. (2026). Micro-macro fracture mechanism of progressive failure with ice strengthening effect in frozen concrete of cold region tunnels. *Engineering Fracture Mechanics*, *331*, 111720. https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2025.111720

Yao, Y., Zhu, Y., Shen, D., Zhang, Z., & Wang, W. (2023). Fuzzy random evaluation of creep model of frozen soft soil in metro tunnel construction using artificial ground freezing technique. *Scientific Reports*, *13*(1), 9468. https://doi.org/10.1038/s41598-023-36322-x

Ye, T., Hu, J., Zhou, J., Gan, H., Huang, L., & Shang, X. (2025). Analysis of temperature field evolution in ground freezing construction of twin tunnels in a coastal urban area. *Scientific Reports*, *15*(1), 29018. https://doi.org/10.1038/s41598-025-14000-4

Yuan, P., Ma, C., Liu, Y., Qiu, J., Liu, T., Luo, Y., & Chen, Y. (2023). Recent Progress in the Cracking Mechanism and Control Measures of Tunnel Lining Cracking under the Freeze–Thaw Cycle. *Sustainability*, *15*(16), 12629. https://doi.org/10.3390/su151612629

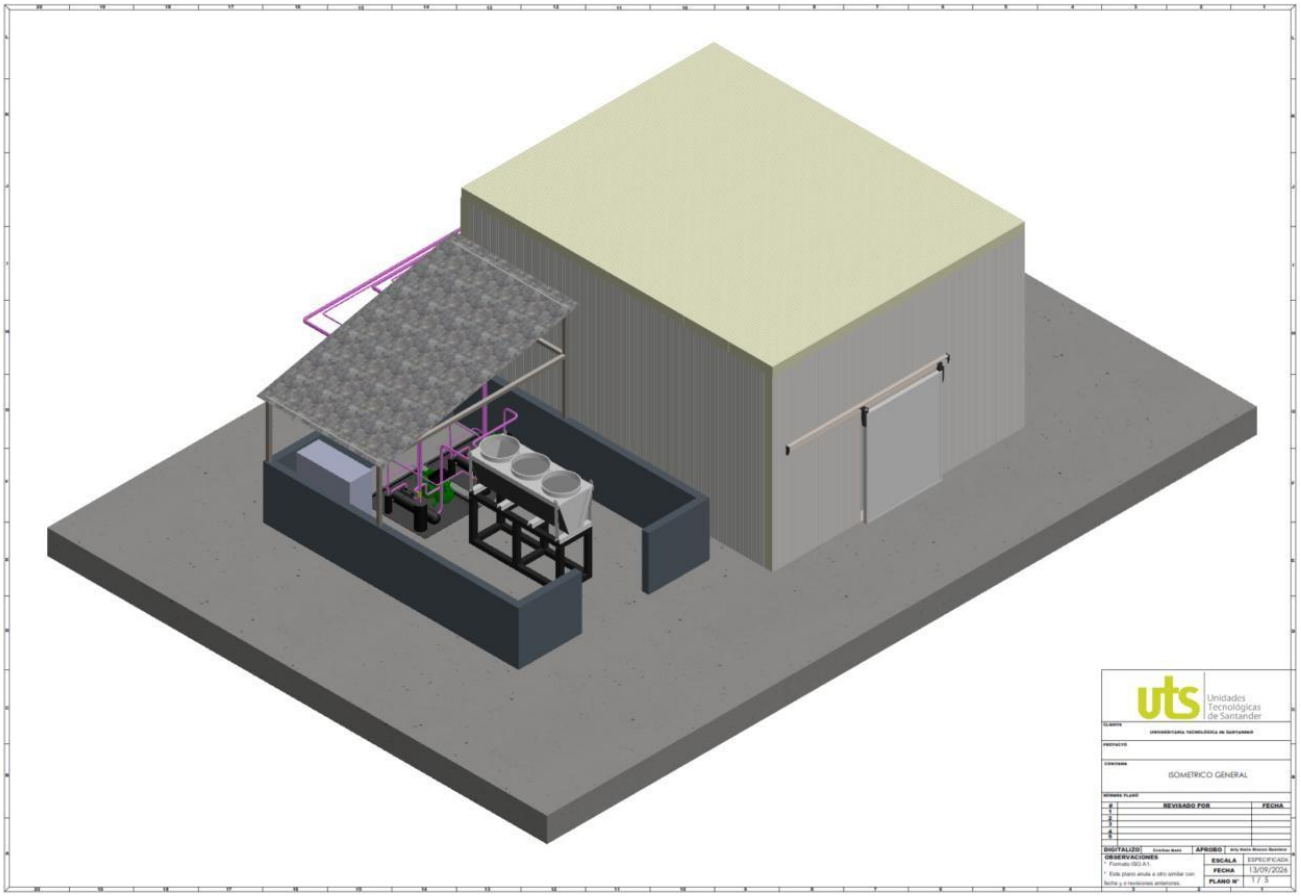
Zhang, K., Zhang, Z., & Zhang, Z. (2026). Numerical investigation on the upstream–downstream thermal interactions during sequential artificial ground freezing (SAGF) of metro twin tunnels in high-seepage ground. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *171*, 107484. https://doi.org/10.1016/j.tust.2026.107484

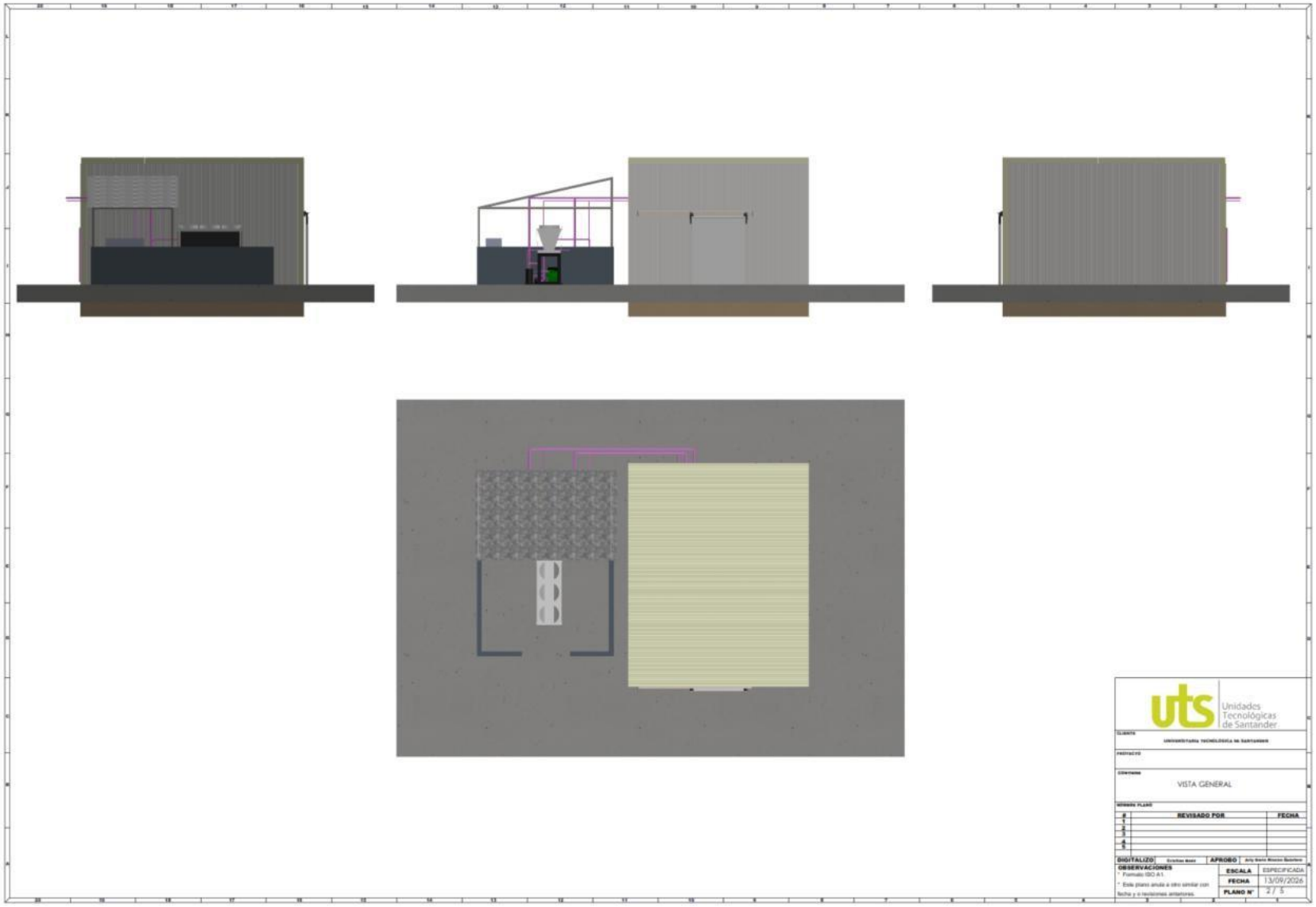
Zhou, J., Long, Q., Zhou, H., Liu, C., Ban, C., & Shang, H. (2026). Evolution and Applicability Analysis of Soil Thermal Conductivity Based on TPS and TLS Methods: A Case Study of the First Tunnel Freezing Repair Project in Bangkok, Thailand. *International Journal of Thermophysics*, *47*(4), 57. https://doi.org/10.1007/s10765-026-03731-9

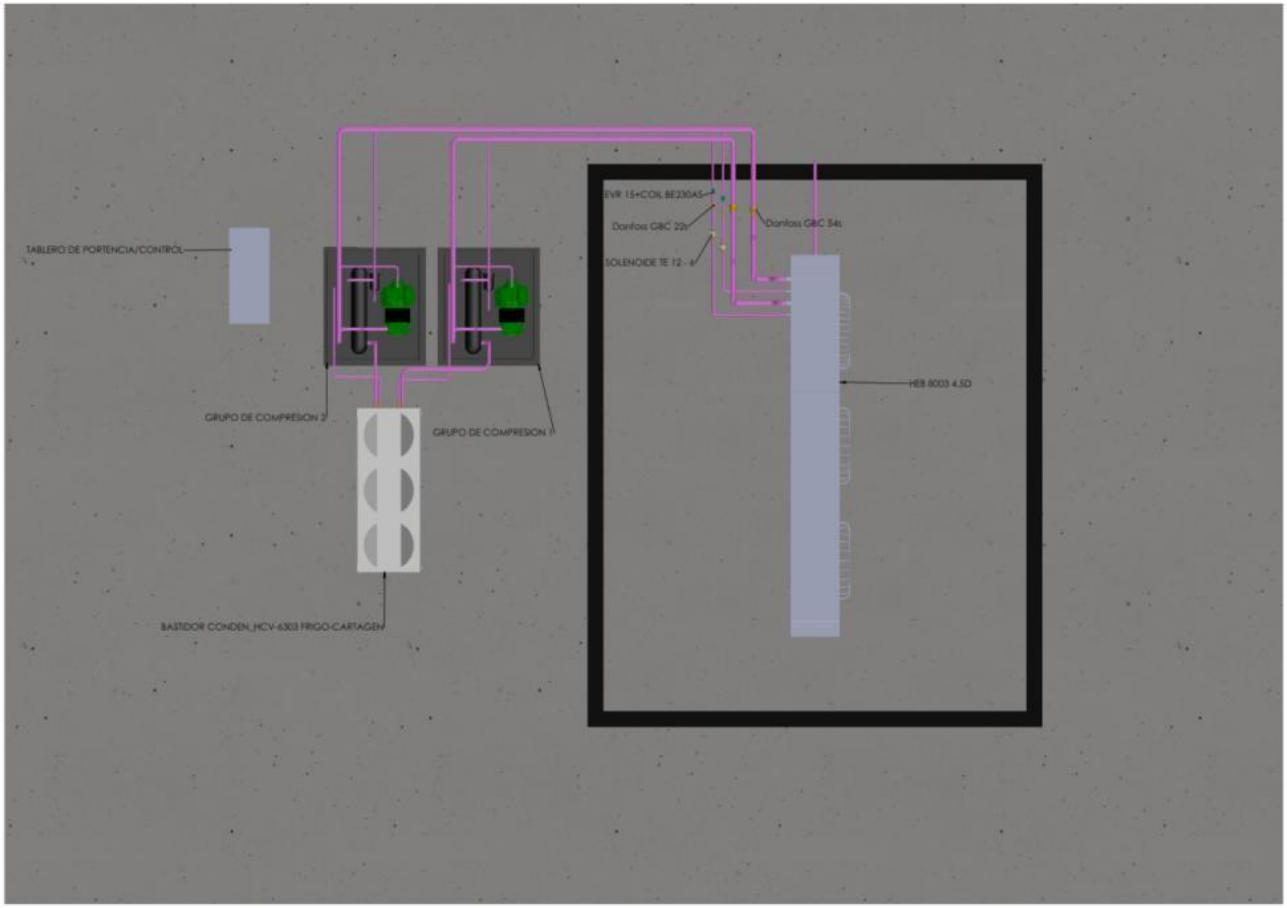
Zhukovskaya, M. I., Selitskaya, O. G., Schenikova, A. V., Miltsyn, A. A., Grushevaya, I. V., Kononchuk, A. G., & Frolov, A. N. (2023). Reaction of Imagos of the Adzuki Bean Borer Ostrinia Scapulalis to Light Stimuli in a Wind Tunnel. *Neuroscience and Behavioral Physiology*, *53*(9), 1635-1640. https://doi.org/10.1007/s11055-023-01558-7

9. ANEXOS

9.1. ANEXO A-PLANOS




Unidades Tecnológicas de Santander
VISTA GENERAL
REVISADO POR
FECHA
DIGITALIZÓ
APROBÓ
OBSERVACIONES
ESCALA
ESPECIFICADA
FECHA
13/09/2026
PLANO N°
2 / 5



Unidades Tecnológicas de Santander

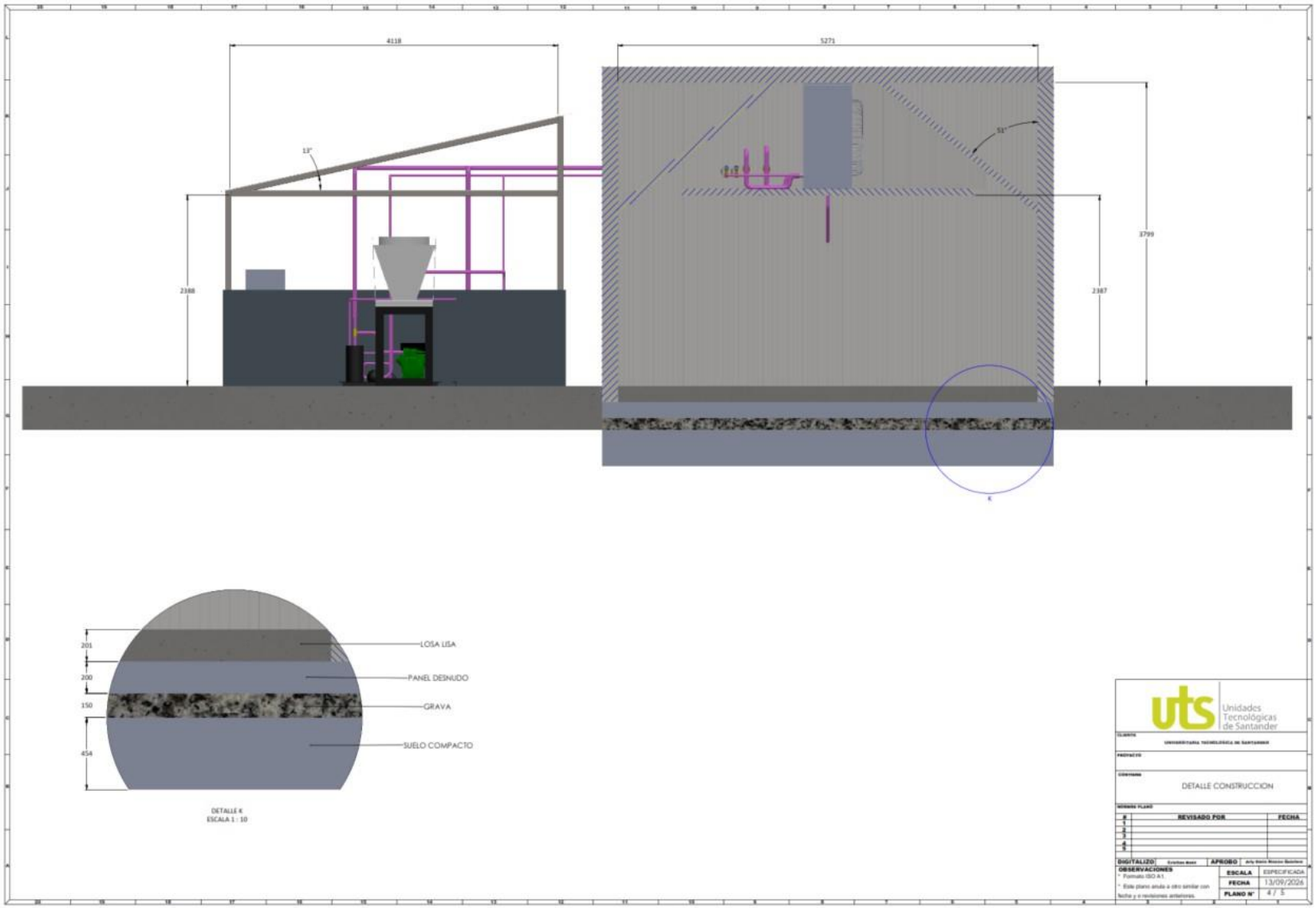
CLIENTE: UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE SANTANDER

PROYECTO:

CONTENIDO: DISTRIBUCION DE EQUIPOS

#	REVISADO POR	FECHA
1		
2		
3		
4		
5		

DIGITALIZÓ	Cristian Amin	APROBÓ	Arly Dario Rincon Gelviez
OBSERVACIONES: * Formato ISO A1 * Este plano anula a otro similar con fecha y o revisiones anteriores.		ESCALA	ESPECIFICADA
		FECHA	13/09/2026
		PLANO N°	3 / 3


4118
5271
13°
51°
2388
2387
1799
K
201
200
150
454
LOSA LISA
PANEL DESNUDO
GRAVA
SUELO COMPACTO
DETALLE K
ESCALA 1 : 10
Unidades Tecnológicas de Santander
DETALLE CONSTRUCCION
REVISADO POR
FECHA
DIGITALIZO
APROBO
OBSERVACIONES
* Formato ISO A1
* Este plano anula a otro similar con fecha y o revisiones anteriores.
ESCALA
ESPECIFICADA
FECHA
13/09/2026
PLANO N°
4 / 5