

Estudio de Viabilidad para la Creación de un Sistema de Refrigeración como Medida de
Prevención de Plagas y Degradación de Grano en Silos de Almacenamiento de Arroz para una
Planta Arrocería en Bucaramanga

David Fernando Pinilla Rojas

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero Mecánico

Director

David Alfredo Fuentes Díaz

Doctor en Tecnología Energética

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica
Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Primeramente, a mi madre Rosalba Rojas y a mi padre Pedro Pinilla, quienes con su amor incondicional y su ejemplo de vida han sido mi guía y mi fortaleza a lo largo de este proceso. A mis dos hermanas, Irma Rocío y Andrea Cristina quienes con su cariño y apoyo han llenado mi camino de inspiración y alegría.

A mi familia, por ser mi refugio y mi fuerza; y a mis amigos, por las risas compartidas, su compañía y complicidad, que han hecho de este viaje mucho más llevadero y significativo.

A mi hermosa novia, Gysselis, que con su amor, paciencia y apoyo ha sido mi compañera inseparable, dándome ánimo en cada desafío y celebrando cada logro a mi lado.

Con especial cariño, dedico un espacio en mi corazón a mis compañeros de vida peludos: a Haku, mi fiel amigo y compañero presente, y a Toby, que dejó su huella en mi vida y sus recuerdos siguen iluminando mis días.

David Fernando Pinilla Rojas

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi director de proyecto, Dr. David Alfredo Fuentes Díaz, por su valiosa orientación, compromiso y apoyo constante durante el desarrollo de este trabajo. Su acompañamiento fue clave para llevar a cabo este proceso de manera clara y estructurada.

A la empresa que me permitió desarrollar este proyecto en su entorno laboral, por brindarme acceso a la información necesaria y por facilitar un espacio de aprendizaje práctico que enriqueció significativamente mi formación profesional.

Contenido

Introducción	12
1. Planteamiento Del Problema	13
2. Objetivos	15
2.1 Objetivo general.....	15
3. Marco Teórico	16
3.1 Antecedentes	16
3.2 Referentes teóricos	17
3.2.1 Almacenamiento óptimo	17
3.2.2 Determinación de las cargas térmicas del sistema.....	17
3.3.3 Dimensionamiento de equipos y parámetros de funcionamiento	18
4. Diseño Conceptual	18
4.1 Matriz de la calidad (QFD) por subsistemas.....	18
4.2 Alternativas	19
4.2.1 Subsistema del enfriador.....	19
4.2.2 Subsistema de suministro y extracción	20
4.3 Matriz de la calidad (QFD) por alternativas	22
5. Cálculo De Cargas Térmicas	23
5.1 Consideraciones previas	23
5.2 Cargas térmicas internas	26
5.2.1 Carga de enfriamiento del arroz.....	26
5.2.2 Carga por generación de calor biológico del arroz.....	29
5.3 Cargas térmicas externas	29
5.3.1 Carga por paredes y techos (de transferencia)	30
5.4 Sumatoria de cargas térmicas.....	67
6. Dimensionamiento De Equipos Y Parámetros De Funcionamiento	70
6.1 Selección del equipo de refrigeración.....	70
6.1.1 Equipo marca Tailor Made Solutions (TMS) referencia TKS100	71
6.1.2 Equipo marca COOLSEED referencia GCH20	73
6.1.3 Equipo marca FRIGORTEC referencia GRANIFRIGOR GC140.....	76
6.1.4 Matriz de selección de equipo de refrigeración	78
6.2 Sistema de extracción.....	79

6.3 Sistema de distribución externo de aire frío.....	80
6.4 Sistema de suministro interno de aire frío.....	85
6.4.1 Suelo perforado completo.....	85
6.4.2 Canal semicircular perforado	86
6.4.3 Canaletas perforadas.....	87
6.4.4 Selección sistema de distribución interna de aire frío.....	89
6.5 Sistema de termometría en silo.....	90
7. Viabilidad Técnica	92
7.1 Descripción del sistema seleccionado.....	93
7.2 Requerimientos técnicos y operativos	93
7.3 Conclusión técnica	94
8. Viabilidad Económica	94
8.1 Costos operativos actuales.....	94
8.1.1 Costo de fumigación preventiva.....	95
8.1.2 Costo de operación de soplador	95
8.1.3 Costo de fumigación correctiva	96
8.2 Pérdidas existentes	97
8.2.1 Pérdida de masa seca por respiración.....	97
8.2.2 Pérdida por infestación de gorgojo	100
8.2.3 Pérdidas reflejadas en dinero.....	101
8.3 Costos de adquisición.....	104
8.4 Costos de operación y mantenimiento proyectados.....	105
8.4.1 Consumo energético del sistema.....	106
8.4.2 Costo de calibración periódica de sensores	108
8.4.3 Costo de mantenimiento del refrigerador	109
8.4.4 Sumatoria de costos de operación y mantenimiento.	109
8.5 Resumen de supuestos económicos	110
8.6 Tasa Interna de Retorno (TIR).....	110
8.7 Periodo de Recuperación (PR o Payback).....	113
9. Conclusiones.....	114
Referencias Bibliográficas	115

Lista de Figuras

Figura 1. Sistema de aireación Push-Pull.	20
Figura 2. Sistema de aireación por flujo cruzado.	21
Figura 3. Sistema de aireación por pedestal.	21
Figura 4. Silos de almacenamiento de arroz.	24
Figura 5. Termómetro utilizado para temperaturas exteriores.....	32
Figura 6. Ubicación de los silos.....	34
Figura 7. Tabla de factor U y CTS según tipo de pared.	36
Figura 8. Tabla explicativa de codificación de capas en paredes y techos.....	37
Figura 9. Coeficientes de transferencia de calor y resistencias de distintas superficies.	38
Figura 10. Coeficientes de emisividad de distintas superficies.	39
Figura 11. Coeficientes de absorción de distintas superficies.....	40
Figura 12. Interfaz PosSolar con los datos diligenciados de la pared frontal.	41
Figura 13. Resultados de coeficientes de radiación y ángulo de incidencia de la pared frontal. Hora 1-12	42
Figura 14. Resultados de coeficientes de radiación y ángulo de incidencia de la pared frontal. Hora 13-24	42
Figura 15. Interfaz PosSolar con los datos diligenciados de la pared lateral.....	43
Figura 16. Resultados de coeficientes de radiación y ángulo de incidencia de la pared lateral. Hora 1-12	43
Figura 17. Resultados de coeficientes de radiación y ángulo de incidencia de la pared lateral. Hora 13-24	44
Figura 18. Factores RTS según tipo de construcción.	51
Figura 19. Especificaciones de cada tipo de construcción para cálculo de RTS.	51
Figura 20. Fracciones recomendadas para convección y radiación.	52
Figura 21. Código en macro para cálculo de carga térmica.....	54
Figura 22. Factor U y CTS según tipo de techo.....	61
Figura 23. Interfaz PosSolar con los datos diligenciados de la cubierta del techo.	64
Figura 24. Resultados de coeficientes de radiación y ángulo de incidencia de la cubierta del techo. Hora 1-12.....	65
Figura 25. Resultados de coeficientes de radiación y ángulo de incidencia de la cubierta del techo. Hora 13-24.....	65
Figura 26. Especificaciones equipo TKS100.....	72
Figura 27. Cotización formal equipo TKS100.....	72
Figura 28. Especificaciones equipo GCH20.....	74
Figura 29. Cotización formal equipo GCH20.....	75
Figura 30. Especificaciones equipo GC140 Europe.	77
Figura 31. Cotización formal equipo GC140 Europe.	77
Figura 32. Plano del sistema de distribución externa de los silos.....	81
Figura 33. Plano del sistema de distribución externa incluyendo el equipo de refrigeración. ...	82
Figura 34. Cotización sistema de distribución externa de los silos.	83
Figura 35. Aislamiento térmico para las tuberías.	84
Figura 36. Cotización aislamiento térmico para las tuberías.	84

Figura 37. Suelo perforado. 86

Figura 38. Semiducto perforado. 87

Figura 39. Canaletas perforadas rectangulares. 88

Figura 40. Canaletas perforadas triangulares..... 88

Figura 41. Canaletas perforadas subterráneas..... 88

Figura 42. Cotización de suelo perforado completo. 89

Figura 43. Imagen de capas y puntos de medición. 90

Figura 44. Cotización sistema de termometría. 92

Lista de Tablas

Tabla 1. Matriz QFD por subsistemas.	19
Tabla 2. Matriz QFD por alternativas.	22
Tabla 3. Dimensiones de los silos y propiedades del arroz.	23
Tabla 4. Ciclos del proceso de refrigeración.....	25
Tabla 5. Temperaturas registradas en el exterior de los silos.	31
Tabla 6. Temperaturas registradas en el interior de la planta.	32
Tabla 7. Dimensiones de las paredes expuestas al sol - silo 1,2 o 3	34
Tabla 8. Dimensiones de las paredes expuestas al sol - silo 4.....	35
Tabla 9. Valores de irradiancia solar total de la pared frontal.	45
Tabla 10. Valores de irradiancia solar total de la pared lateral.....	45
Tabla 11. Temperatura exterior de la pared frontal.	47
Tabla 12. Temperatura exterior de la pared lateral.	48
Tabla 13. Flujo de calor en la pared frontal.	49
Tabla 14. Flujo de calor en la pared lateral.....	49
Tabla 15. Carga térmica en la pared frontal.....	55
Tabla 16. Carga térmica en la pared lateral.	55
Tabla 17. Dimensiones paredes interiores silo 1, 2 o 3.....	56
Tabla 18. Dimensiones paredes interiores silo 4.....	56
Tabla 19. Carga térmica en las paredes internas de los silos 1, 2 o 3.....	58
Tabla 20. Carga térmica en las paredes internas del silo 4.	58
Tabla 21. Área superficial efectiva del techo.....	60
Tabla 22. Carga térmica en la cubierta del techo.....	66
Tabla 23. Carga térmica total en la cubierta del techo.....	67
Tabla 24. Carga térmica total en cada silo central.	68
Tabla 25. Carga térmica total en cada silo esquinero.	69
Tabla 26. Matriz de selección de equipo de refrigeración.	79
Tabla 27. Costos de adquisición del proyecto.....	105
Tabla 28. Resumen de supuestos económicos	110
Tabla 29. Tasa Interna de Retorno.....	112

Lista de Apéndices

Apéndice A. Cotización formal equipo TKS100.

Apéndice B. Especificaciones equipo GCH20..

Apéndice C. Cotización formal equipo GCH20.

Apéndice D. Cotización formal equipo GC140 Europe.

Apéndice E. Plano del sistema de distribución externa de los silos.

Apéndice F. Plano del sistema de distribución externa incluyendo el equipo de refrigeración.

Apéndice G. Cotización sistema de distribución externa de los silos.

Apéndice H. Cotización de suelo perforado completo.

Apéndice I. Cotización sistema de termometría.

Los apéndices están adjuntos y pueden visualizarse en la base de datos de la biblioteca UIS

Resumen

Título: Estudio de viabilidad para la creación de un sistema de refrigeración como medida de prevención de plagas y degradación de grano en silos de almacenamiento de arroz para una planta arrocera en Bucaramanga*

Autor: David Fernando Pinilla Rojas**

Palabras Clave: refrigeración de granos, carga térmica, almacenamiento de arroz, silos, viabilidad económica, control de plagas.

Descripción: Este proyecto lleva a cabo una evaluación de factibilidad técnica y financiera para la puesta en marcha de un sistema de enfriamiento en silos de almacenaje de arroz paddy seco en una fábrica de arroz situada en Bucaramanga, con el objetivo de evitar la aparición de plagas y el deterioro del grano. Se determinaron minuciosamente las cargas térmicas internas, derivadas del calor biológico del grano y del proceso de refrigeración, además de las cargas externas originadas por la radiación solar, las condiciones del entorno y la transferencia de calor por medio de paredes y techos. Basándose en estos cálculos, se llevó a cabo el dimensionamiento de los equipos de enfriamiento, eligiendo la alternativa más apropiada en cuanto a capacidad, eficiencia energética y compatibilidad con el sistema de distribución de piso perforado. Finalmente, el estudio de factibilidad financiera mostró que la puesta en marcha del sistema posibilitaría una disminución notable en las pérdidas debido a la infestación y pérdida de masa seca del arroz, además de los gastos de la fumigación correctiva, con un periodo de recuperación que no superaría los cuatro años. Los hallazgos corroboran la factibilidad completa del sistema como alternativa sustentable y atractiva para la preservación del grano almacenado.

*Trabajo de Grado

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Ingeniería Mecánica.

Director: David Alfredo Fuentes Díaz. PhD. en Tecnología Energética

Abstract

Title: Feasibility Study for the Creation of a Cooling System as a Preventive Measure Against Pests and Grain Degradation in Rice Storage Silos for a Rice Processing Plant in Bucaramanga*

Author: David Fernando Pinilla Rojas**

Keywords: grain cooling, thermal load, rice storage, silos, economic feasibility, pest control.

Description: This project conducts a technical and financial feasibility assessment for the implementation of a cooling system in dry paddy rice storage silos at a rice processing facility located in Bucaramanga, with the goal of preventing pest outbreaks and grain deterioration. Internal thermal loads were carefully determined, including the biological heat generated by the grain and the cooling process itself, as well as external loads caused by solar radiation, environmental conditions, and heat transfer through walls and roofs. Based on these calculations, the cooling equipment was sized, selecting the most appropriate option in terms of capacity, energy efficiency, and compatibility with the perforated floor air distribution system. Finally, the financial feasibility study showed that the implementation of the system would lead to a significant reduction in losses due to infestation and dry matter shrinkage, as well as corrective fumigation costs, with a payback period of less than four years. The findings confirm the overall feasibility of the system as a sustainable and attractive solution for the preservation of stored grain.

*Degree Work

**Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Mechanical Engineering. Director: David Alfredo Fuentes Díaz. PhD. Energetic Technology

Introducción

El almacenamiento adecuado del arroz paddy constituye una etapa crítica dentro de la cadena productiva del grano, especialmente en zonas tropicales donde las condiciones ambientales pueden favorecer su deterioro. Entre los factores que inciden directamente en la calidad del grano durante el almacenamiento, la temperatura juega un papel determinante, ya que influye tanto en la velocidad de respiración del arroz como en la proliferación de insectos y hongos (Navarro & Noyes, 2001). Por ello, resulta indispensable implementar sistemas que permitan mantener condiciones térmicas controladas dentro de los silos.

En este contexto, el diseño de un sistema de refrigeración adaptado a la estructura del silo y a las características del arroz paddy almacenado cobra gran relevancia. La necesidad de reducir la temperatura del grano a niveles seguros, sin comprometer su integridad ni aumentar significativamente el consumo energético, plantea un desafío técnico que requiere una evaluación precisa de las propiedades del grano, las condiciones de almacenamiento y las características térmicas de los materiales constructivos involucrados.

Este estudio se enfoca en evaluar la viabilidad técnica y económica de implementar un sistema de refrigeración en los silos de almacenamiento de una planta arrocera ubicada en Bucaramanga. Para ello, se analizan las condiciones térmicas actuales del grano, se determinan las cargas térmicas que afectan su temperatura interna y se realiza el dimensionamiento de los equipos necesarios; Finalmente, se cuantifican los beneficios operativos y financieros derivados del control térmico, con el fin de establecer si la inversión en el sistema es justificable y sostenible para la empresa.

1. Planteamiento Del Problema

La infestación de plagas en los silos de almacenamiento a gran escala se ha convertido en una amenaza constante para la industria agrícola y alimentaria. Bajo condiciones adecuadas de humedad y temperatura, las plagas de insectos pueden proliferar rápidamente. Además, factores externos como la suciedad o una hermeticidad deficiente en el silo pueden favorecer la presencia de roedores, que consumen el producto y lo contaminan con sus excrementos y orina.

En una reconocida empresa arrocera de Bucaramanga que integra todo el proceso productivo del arroz, desde el secado, descascarillado y selección, hasta el empaque del producto final se presenta cierta problemática recurrente dentro de sus silos de almacenamiento de arroz, a falta de un control sobre la temperatura y humedad dentro de estos, ocasionan que varíen según el día, el horario y la cantidad de grano que contengan en su interior, propiciando la presencia del insecto curculionidae, mejor conocido como gorgojo del arroz; esta especie considerada como plaga se alimenta del arroz y daña el grano, por lo tanto surge la necesidad de un sistema que permita mantener unas condiciones de temperatura y humedad en el interior de los silos.

En la arrocera se encuentran cuatro silos de almacenamiento rectangulares, construidos en concreto reforzado y dispuestos de forma contigua, cada uno con unas medidas en metros de $5.4 * 9.5 * 14$, con capacidad individual de llenado de aproximadamente $667 m^3$ de arroz paddy, los silos se llenan durante la época de cosecha, cuando la arrocera compra arroz paddy verde, lo seca y lo almacena como arroz paddy seco a máxima capacidad, con el fin de garantizar el suministro de materia prima durante los periodos sin cosecha.

En Ecuador en la Universidad Politécnica Salesiana realizó el diseño de un sistema de control de temperatura y humedad en almacenamiento de arroz tomando en cuenta sistemas

embebidos, llegando a desarrollar físicamente un sistema que previene plagas, mantiene el grano a condiciones óptimas y logra realizar acciones correctivas cuando las condiciones no sean las mejores. (Solano, Jean Pierre, Galán, & Maylin, 2021).

Un estudio realizado para la molinera Molinor, en Lambayeque, Perú, sobre las condiciones adecuadas para el correcto almacenaje de arroz logro definir que un 14% de porcentaje de humedad del grano de arroz es el óptimo para ser almacenado. (Sánchez & Santiesteban, 2021)

La implementación de un sistema que sea capaz de mantener condiciones de humedad y temperatura dentro de los silos de almacenamientos de arroz solucionan la constante realización de fumigaciones y el reprocesamiento del arroz almacenado, permite prolongar el tiempo de almacenado para poder adquirir una mayor cantidad de materia prima en tiempo de cosecha y aumentar la producción, además de esto, la infestación de insectos hace que se alimenten del grano, se reduzca su masa y su calidad, aumentando la cantidad de arroz que se considera partido, disminuyendo la masa total y la cantidad de arroz premium.

Como propuesta para la solución de la problemática se plantea un sistema de refrigeración de granos, que trabaje en conjunto con un sistema de medición de temperatura capaz de mantener condiciones ambientales controladas dentro de los silos de almacenamiento de la empresa, con el fin de prevenir la infestación por insectos y el desarrollo de hongos.

Dentro de la realización de este proyecto, es necesario plantear la pregunta ¿Cuál sería el impacto financiero y operativo de la implementación de un sistema de refrigeración para prevención de plagas perjudiciales en silos de almacenamiento de arroz en una arrocera de Bucaramanga?

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la viabilidad de la implementación de un sistema de refrigeración que controle humedad y temperatura para prevenir la aparición de plagas perjudiciales en silos de almacenamiento de arroz en una arrocera de Bucaramanga.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar las condiciones de humedad y temperatura más favorables de almacenamiento para el arroz paddy seco y las cargas térmicas del sistema al momento de tener los 4 silos con capacidad individual de 667m^3 de arroz paddy seco totalmente llenos.
- Establecer los parámetros de funcionamiento y especificaciones de los equipos para mantener el sistema de silos bajo unas condiciones de humedad y temperatura controladas.
- Valorar técnica y económicamente la implementación del sistema de refrigeración como método para la prevención de plagas perjudiciales y degradación de grano en la empresa arrocera.

3. Marco Teórico

El presente marco teórico tiene como objetivo sentar las bases teóricas y conceptuales necesarias para el entendimiento principal del tema de investigación, tomando antecedentes a nivel internacional y nacional, así como referentes teóricos que contribuyan a examinar diferentes teorías e identificar los vacíos existentes que justifican el desarrollo de este proyecto de investigación.

3.1 Antecedentes

Sistema de supervisión y control de temperatura para un silo de almacenamiento de arroz en la molinera Molinor – Lambayeque, Perú (Sánchez & Santiesteban, 2021).

Este proyecto tiene como objetivo principal Diseñar un sistema de supervisión y control de temperatura para un silo de almacenamiento de arroz en la Molinera Molinor - Lambayeque.

Como resultados principales de este proyecto de investigación se definieron los parámetros de porcentaje de humedad del grano de arroz para mantenerse en óptimas condiciones: 12%, temperatura del grano de arroz al salir del proceso de secado: mínima: 36°C / máxima: 40°C y para un almacenamiento óptimo en silo se debe mantener una temperatura de 15°C.

Este proyecto brinda herramientas para el modelamiento de los sistemas de control de humedad y temperatura interiores en silos de almacenamiento en relación con las dimensiones de este y la cantidad de arroz que contengan en su interior, factores claves para la buena simulación térmica del interior del silo.

Arroz Paddy: Preservación Y Tratamiento De Granos Almacenados (Garcia, 2020).

Establecer la importancia de preservación y tratamiento de arroz paddy almacenado.

Dentro de la producción de arroz y su procesamiento se hace necesario conocer la preservación y tratamiento de los granos almacenados de arroz paddy, para evitar el daño del grano, lo que influirá para evitar que pierda su valor comercial y calidad al momento de ser pilado y que cause pérdidas económicas a los agricultores.

Como conclusión principal del estudio, se determinó que los silos de acero representan una mejor alternativa para la conservación del arroz paddy en comparación con los construidos en hormigón o madera. Esto se debe a que el acero permite una desinfección inicial mucho más efectiva, lo cual reduce significativamente la presencia de insectos y microorganismos desde el inicio del almacenamiento, favoreciendo así una mejor preservación del grano a lo largo del tiempo.

3.2 Referentes teóricos

En este apartado se contextualizará la teoría necesaria para lograr entender cada uno de los objetivos específicos basado en otros autores.

3.2.1 Almacenamiento óptimo

Para este proyecto de investigación las variables que se estudiarán serán la humedad y temperatura del grano, como se mencionó anteriormente la ventilación es una parte crucial en el almacenamiento del grano, para (De lucía & Assennato, 1993) el objetivo de la ventilación es el enfriamiento del grano de arroz, el cual es necesario para mantener la humedad cercana a un 12% y la temperatura dentro del silo alrededor de los 15°C.

3.2.2 Determinación de las cargas térmicas del sistema

Dentro de los factores cruciales para la realización del proyecto se encuentra el realizar la aproximación de la carga térmica, que hace referencia a la cantidad de energía que requiere el

espacio para conservar o conseguir determinadas condiciones de temperatura y humedad, para ello se empleó como referencia el libro *Load Calculation Applications Manual* (Spitler, 2014). Este manual ofrece una orientación exhaustiva acerca de los métodos de cálculo de cargas térmicas, que incluyen el método de balance térmico (HBM) y el método de serie temporal radiante (RTSM), que son esenciales para establecer las demandas de refrigeración en construcciones comerciales e industriales.

3.3.3 Dimensionamiento de equipos y parámetros de funcionamiento

Una vez conocidas las condiciones requeridas para mantener el sistema, los valores de carga térmica obtenidos pueden utilizarse como base para el proceso de dimensionamiento del sistema de refrigeración, como se muestra en el libro “*The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration Management*” (Navarro & Noyes, 2001) en donde muestra el paso a paso para encontrar las distintas necesidades del sistema y a partir de allí establecer los requerimientos de los equipos (Navarro & Noyes, 2002).

4. Diseño Conceptual

4.1 Matriz de la calidad (QFD) por subsistemas

A partir del diálogo con la persona encargada de los procesos dentro de la empresa arrocera, se identificaron los siguientes requerimientos:

- Bajo consumo energético.
- Que logre llegar a valores de temperatura seguras para el almacenamiento del grano.
- Que no represente un costo inicial de compra, fabricación e instalación muy elevado.
- Fácil operación y mantenimiento.

- Que cuente con sistema de termometría.
- Larga vida útil.

Tabla 1.
Matriz QFD por subsistemas.

SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	Importancia		Subsistema de enfriador		Subsistema de suministro		Subsistema de transporte		Subsistema de medición		Subsistema de extracción	
	Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total	Valor	Total
Calidad del producto	8	9	72	7	56	8	64	9	72	7	56	
Velocidad del proceso	6	9	54	9	54	5	30	1	6	7	42	
Posibilidad de falla	3	9	27	2	6	1	3	5	15	2	6	
Costo de operación	7	9	63	3	21	1	7	2	14	3	21	
Facil instalación	1	5	5	8	8	8	8	3	3	2	2	
Facil de operar	2	8	16	3	6	3	6	4	8	3	6	
Facil mantenimiento	4	7	28	5	20	3	12	3	12	5	20	
Vida prolongada del equipo	5	8	40	3	15	1	5	7	35	3	15	
TOTAL	-	305	186	135	165	168						

Subsistema de enfriador	Máquina frigorífica
Subsistema de suministro	Sistema de distribución de aire dentro del silo
Subsistema de transporte	Ductos, bridas, acoples, tubería, dampers
Subsistema de medición	Interruptores, sensores, actuadores, controladores
Subsistema de extracción	Ventilador de la parte superior

Dentro de la matriz QFD por subsistemas se pueden destacar los 2 de mayor valor, siendo estos los objetos de estudio a mayor profundidad y para los que se procederá a realizar una nueva selección presentando las alternativas y valorándolas según los requerimientos.

4.2 Alternativas

4.2.1 Subsistema del enfriador

El subsistema de enfriamiento es crítico, garantiza que se cumpla el proceso de enfriamiento del grano, esto se ve reflejado en la matriz QFD donde este subsistema obtuvo el mayor valor. El equipo para refrigeración de granos para silos de almacenamiento ya viene

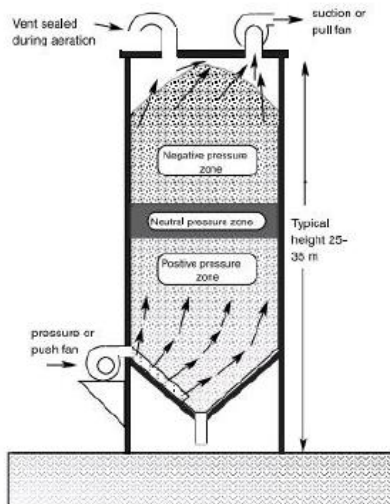
diseñado para tal propósito, por lo que no se presentan alternativas, pero posteriormente si se hace la matriz de selección con los equipos que cumplan con los requisitos de carga térmica calculada.

4.2.2 Subsistema de suministro y extracción

En el ámbito de refrigeración de grano existen varios métodos para distribuir y extraer el aire refrigerado de los silos de almacenamiento, se tomaron alternativas que pueden llegar a ser compatibles con los silos presentes.

4.2.2.1 Aireación Push-Pull

Figura 1.
Sistema de aireación Push-Pull.



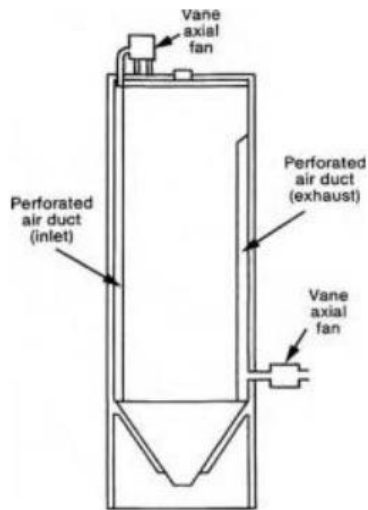
Nota. Tomado de Silos Córdoba. (s.f). Silos de carga a granel. <https://www.siloscordoba.com//>

Consta de un sistema de suministro de aire climatizado desde la parte inferior del silo y un sistema de extracción de aire caliente y húmedo en la parte superior.

4.2.2.2 Aireación Push-Pull

Figura 2.

Sistema de aireación por flujo cruzado.



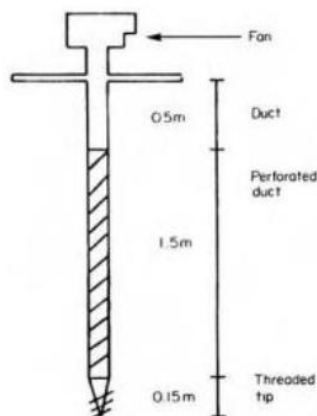
Nota. Tomado de Silos Córdoba. (s.f). Silos de carga a granel. <https://www.siloscordoba.com//>

Consta de un sistema de suministro de aire climatizado y uno de extracción mediante ductos perforados ubicados verticalmente en las paredes del área interior del silo.

4.2.2.3 Aireación por pedestal.

Figura 3.

Sistema de aireación por pedestal.



Nota. Tomado de Silos Córdoba. (s.f). Silos de carga a granel. <https://www.siloscordoba.com//>

Consta de uno o varios ductos perforados ubicados verticalmente en las partes centrales del silo, suministrando el aire acondicionado y en la parte superior del silo cuenta con su respectivo sistema de extracción.

4.3 Matriz de la calidad (QFD) por alternativas

Dentro de la matriz QFD por alternativas, se observan los 3 de mayor valor, siendo estos los objetos de estudio y para los que se pasara a darles una nueva selección presentando las alternativas y valorándolas según los requerimientos.

Tabla 2.
Matriz QFD por alternativas.

	Importancia	SUBSISTEMA DE SUMINISTRO Y EXTRACCIÓN					
		PUSH-PULL	FLUJO CRUZADO	POR PEDESTAL			
Calidad del producto	8	5	40	5	40	5	40
Velocidad del proceso	6	7	42	9	54	5	30
Confiabilidad	3	9	27	9	27	9	27
Costo de operación	7	9	63	5	35	5	35
Facil instalación	1	9	9	3	3	6	6
Facil de operar	2	9	18	7	14	9	18
Facil mantenimiento	4	9	36	5	20	5	20
Vida prolongada del equipo	5	9	45	9	45	9	45
TOTAL			280		238		221

Como resultado del análisis realizado mediante la matriz comparativa entre las alternativas de distribución de aire —Push-Pull, pedestal y flujo cruzado— se concluye que la opción más adecuada para este proyecto es el diseño de un sistema de distribución de aire climatizado tipo Push-Pull.

5. Cálculo de Cargas Térmicas

El cálculo de la carga térmica es esencial para la elección de los equipos a utilizar según su capacidad, estas cargas se pueden dividir en 2 tipos de interacciones térmicas dependiendo de su procedencia:

❖ Cargas térmicas internas

- Carga de enfriamiento del arroz

- Carga por generación de calor biológico del arroz

❖ Cargas térmicas externas

- Carga por paredes y techos (de transferencia)

- Carga por infiltraciones

Cada una de estas se calcula de manera independiente, con su propio método, por lo que a continuación se detalla el procedimiento de cálculo de los componentes de carga mencionados.

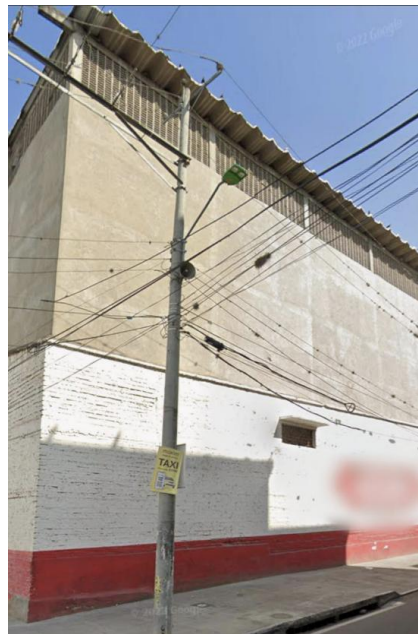
5.1 Consideraciones previas

Tabla 3.
Dimensiones de los silos y propiedades del arroz.

DIMENSIONES DEL SILO		
	Valor	Unidad
Material del silo	Concreto	
Grosor de la pared	40	cm
Cantidad de silos contiguos	4	
Dimensiones de la base individual	5.4x9.5	m
Area de la base individual	51.3	m ²
Altura	14	m
Volumen de arroz por silo	667	m ³
Volumen de arroz total	2668	m ³
Dimensiones de la pared expuesta al sol de cada silo	5.4x14	m
Area de la pared expuesta al sol de cada silo	75.6	m ²
Area total de las paredes de cada silo	417.2	m ²
Dimensiones del techo de cada silo	5.4x9.5	m
Area del techo	51.3	m ²
Velocidad de llenado	157	ton/día
PROPIEDADES DEL ARROZ		
Humedad	12%	
Temperatura de entrada al silo	38	°C
Masa total del arroz por cada silo	390595.2	kg
Masa total de arroz	1562380.8	kg

Figura 4.

Silos de almacenamiento de arroz.



El proceso de enfriamiento del arroz en el silo, en lugar de enfriar todo el volumen de manera simultánea se lleva a cabo por ciclos, con el objetivo de optimizar el uso de energía y asegurar una distribución uniforme del frío en la masa de grano. Se aborda la masa total de grano almacenado en el silo por etapas, reduciendo paulatinamente la temperatura en capas de cierta

altura. Este método permite un mejor control del flujo de aire y previene choques térmicos que podrían provocar condensación y humedad no deseada. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), el enfriamiento por ciclos es una estrategia recomendada para el almacenamiento de granos, ya que minimiza las variaciones bruscas de temperatura y ayuda a evitar problemas de humedad y deterioro del producto, además de reducir significativamente los costos tanto de dimensionamiento de equipos como de costos de operación, especialmente por el consumo energético. (FAO, 2013).

Tabla 4.
Ciclos del proceso de refrigeración.

DIA	TIEMPO DE OPERACIÓN	OBSERVACIONES
1 Y 2	24 horas continuas	Enfriamiento inicial de la primera capa de grano hasta 20°C
3, 4 y 5	12 horas encendido y 12 horas apagado	Rumbo a la temperatura objetivo con pausas para estabilización térmica dentro del silo
6, 7 y 8	8 horas encendido y 16 horas apagado	Se sigue el proceso de enfriamiento de forma lenta hasta que la capa superior este a 2° o menos de la temperatura objetivo
9+	6 a 8 horas encendido	Refuerzo cuando la temperatura de la capa superior aumente por encima de 16°

En la primera fase del enfriamiento y teniendo en cuenta la altura total de silo (14 metros), se ha establecido una altura inicial de enfriamiento de 4 metros, lo que se busca es que esta área sea la primera en alcanzar temperaturas más bajas. Posteriormente, se deja un intervalo entre ciclos, inicialmente de 12 horas encendido y 12 horas apagado, y más adelante 8 horas encendido y 16 horas apagado, esto con el fin de permitir que la baja temperatura se propague de forma natural hacia las capas superiores del grano a través de la conducción térmica. A medida que la temperatura en la base se estabiliza, los ciclos de operación se mantienen hasta que todo el volumen del silo logra la temperatura deseada para el almacenamiento.

Como sistema de monitoreo del proceso se implementará un sistema de termometría en distintas alturas. Estos sensores serán fundamentales para registrar la temperatura en capas

específicas del grano, lo que permitirá verificar el avance del enfriamiento y de ser necesario ajustar o rectificar los ciclos de temperatura para garantizar la temperatura objetivo.

5.2 Cargas térmicas internas

Las cargas térmicas internas son un componente esencial en la estimación completa de la demanda térmica de un sistema de enfriamiento para el almacenamiento de granos. Estas cargas se refieren al calor producido en el silo por diferentes fuentes, incluyendo el metabolismo residual del grano y la cantidad de calor que debe extraerse de la masa de grano para reducir su temperatura.

5.2.1 Carga de enfriamiento del arroz

La carga térmica de enfriamiento se calcula con la ecuación

$$Q_{enfriamiento} = m \cdot C_p \cdot (T_{inicial} - T_{final}) \quad (1)$$

$Q_{enfriamiento}$ = Calor de enfriamiento [kJ]

m = Masa de grano almacenada [kg]

C_p = Calor específico del grano [$kcal/kg \cdot ^\circ C$]

$T_{inicial}$ = Temperatura inicial del grano [$^\circ C$]

T_{final} = Temperatura objetivo del grano [$^\circ C$]

Como se mencionó anteriormente, la masa de grano almacenada en la base del silo que se buscará enfriar en el primer ciclo corresponde a una altura de 4 metros, por lo que se calculó el volumen de grano:

$$V_{grano} = l \cdot a \cdot h \quad (2)$$

V_{grano} = Volumen de grano en la base del silo [m^3]

$l = \text{Largo de la base [m]}$

$a = \text{Ancho de la base [m]}$

$h = \text{Altura de la primera capa de grano [m]}$

Reemplazando los valores

$$V_{grano} = 9.5 [m] \cdot 5.4 [m] \cdot 4[m]$$

$$V_{grano} = 205.2 [m^3]$$

Una vez obtenido el valor del volumen de grano se multiplica por la densidad aparente del arroz paddy seco para encontrar el valor de la masa de grano, este valor de la densidad aparente, así como el calor específico que se utiliza más adelante fue seleccionada con base en la información presentada por Muñoz Cisternas (2003) en su libro sobre manejo de postcosecha de arroz. Es fundamental considerar la densidad aparente en vez de la densidad real, ya que este valor tiene en cuenta tanto la masa del grano como los espacios vacíos que existen entre los granos, esto debido a que el grano no se organiza de manera totalmente compacta, su volumen total incluye aire, lo que influye en la cantidad real de grano que se puede almacenar en un determinado espacio.

$$m_{grano} = V_{grano} \cdot \rho_{aparente} \quad (3)$$

$m_{grano} = \text{Masa de grano en la base del silo [kg]}$

$V_{grano} = \text{Volumen de grano en la base del silo [m}^3]$

$\rho_{aparente} = \text{Densidad aparente del arroz paddy seco [kg/m}^3]$

Por lo tanto

$$m_{grano} = 205.2 [m^3] \cdot 585.6 [kg/m^3]$$

$$m_{grano} = 120165.12 [kg]$$

Una vez calculada la masa de arroz que se busca enfriar en el primer ciclo de refrigeración se procede a calcular el calor necesario para disminuirle la temperatura hasta la temperatura objetivo del primer ciclo que en este caso son 20°C

$$Q_{enfriamiento} = m \cdot C_p \cdot (T_{inicial} - T_{final}) \quad (4)$$

$$Q_{enfriamiento} = 120165.12 [kg] \cdot 1.69 [kJ/kg \cdot K] \cdot (38 [^{\circ}C] - 20 [^{\circ}C])$$

$$Q_{enfriamiento} = 3655423 [kJ]$$

Esta cantidad de energía es la que se debe extraer de la masa de arroz durante la primera etapa de enfriamiento que será con el equipo funcionando de manera continua, posteriormente se detendrá el equipo, el tiempo estipulado para esta primera etapa es de 48 horas o 172800 segundos.

$$P_{enfriamiento} = \frac{3655423 [kJ]}{172800 [s]} = 21.15 [kJ/s] = 21.2 [W]$$

Este valor para términos de cálculo y unificación de unidades se tomará en toneladas de refrigeración

$$P_{enfriamiento} = 21.15 [W] \cdot \frac{1 [TR]}{3.517 [W]} \cong 6 [TR]$$

5.2.2 Carga por generación de calor biológico del arroz

La generación de calor biológico en granos almacenados es el resultado de la actividad metabólica tanto de los granos como de los microorganismos que habitan en su superficie. Si este calor no se disipa de manera adecuada, puede acumularse en el interior del silo, lo que incrementa la temperatura del grano y favorece el crecimiento de hongos e insectos. Por ello, es crucial considerar la generación de calor biológico al diseñar y operar sistemas de refrigeración, con el fin de prevenir pérdidas en la calidad y asegurar la conservación de los granos.

$$Q_{biologico} = q_b \cdot m \quad (5)$$

$q_b =$ Tasa de generación de calor biológico por unidad de masa (W/kg)

$m =$ Masa del producto almacenado (kg)

La tasa de generación de calor por actividad biológica en granos almacenados bajo condiciones de temperatura controlada varía según el contenido de humedad. De acuerdo con la FAO (1993), para arroz paddy seco con un 12% de humedad, esta tasa es de aproximadamente $0.002 \text{ kcal}/kg \cdot h$, lo que equivale a $0.00232 \text{ W}/kg$ en unidades del Sistema Internacional.

$$Q_{biologico} = 0.00232 \left[\text{W}/kg \right] \cdot 390595.2 [kg] = 907.9 [W] \cong 0.26 [TR]$$

5.3 Cargas térmicas externas

Las cargas térmicas externas se refieren a las ganancias de calor que se originan en el ambiente e impactan en el sistema de almacenaje de arroz desde fuera. Principalmente, estas abarcan el calor que se propaga por las paredes y techos del silo a causa de la radiación solar, la

temperatura del entorno y la ventilación no regulada. Además, pueden abarcar infiltraciones de aire caliente del exterior mediante aberturas, uniones o puertas que no sean correctamente selladas. Estas cargas son particularmente relevantes en zonas cálidas o en silos que están directamente expuestos al sol, dado que incrementan la temperatura interna del grano y pueden poner en riesgo su calidad.

5.3.1 Carga por paredes y techos (de transferencia)

Las cargas térmicas en un silo de almacenamiento, tanto por las paredes como por el techo, se refieren a la cantidad de calor que logra atravesar los límites del sistema debido a la transferencia de calor desde el ambiente exterior. Este fenómeno se produce principalmente por la conducción térmica a través de los materiales que conforman el silo, así como por la radiación solar que incide sobre sus superficies expuestas. Varios factores, como la conductividad térmica de los materiales, el espesor de las paredes y el techo, la temperatura ambiente y la orientación del silo, afectan la magnitud de estas cargas térmicas.

El método empleado para el cálculo de las cargas térmicas fue el modelo RSTM (Radiant Time Series Method), elegido por su eficacia para modelar con precisión la transferencia de calor en sistemas donde las temperaturas varían con el tiempo y por su mejor representación de la inercia térmica comparada con métodos simplificados o de factores predefinidos, lo que facilita el cálculo del flujo de calor en función de las propiedades del sistema y de las condiciones ambientales.

Para iniciar con los cálculos, es necesario conocer las temperaturas exteriores e interiores de la arrocera. Para obtener las temperaturas exteriores promedio en Bucaramanga, se tomó como referencia el estudio de *Villamil, Blanco, Salah, & Garcia (2020)*, el cual analiza el fenómeno de

la isla de calor urbana (UHI) en la ciudad mediante mediciones en varios puntos estratégicos y su posterior ponderación.

Tabla 5.
Temperaturas registradas en el exterior de los silos.

TEMPERATURAS EXTERIORES	
HORA	TEMPERATURA
0:00	23.2
1:00	22.8
2:00	22.4
3:00	22.1
4:00	21.9
5:00	22.1
6:00	22.9
7:00	24.8
8:00	26.9
9:00	28.8
10:00	30.6
11:00	31.7
12:00	32.6
13:00	33.1
14:00	33.1
15:00	32.4
16:00	31.6
17:00	30.4
18:00	28.7
19:00	27.5
20:00	26.5
21:00	25.5
22:00	24.7
23:00	23.9

Para las temperaturas interiores de la arrocera se utilizó un termómetro digital de la marca KTJ Thermo que se encuentra instalado en una de las paredes cercanas a los silos de almacenamiento, se realizaron mediciones cada hora durante las 24 horas del día.

Figura 5.

Termómetro utilizado para temperaturas exteriores.



Los datos fueron recolectados en tres días diferentes para obtener una muestra representativa, dos de esos días se estaba en proceso de secado de arroz en los silos de secado que se encuentran cerca de los de almacenamiento, por lo que se pueden evidenciar temperaturas elevadas. Posteriormente, se calcularon los valores promedio de las mediciones, obteniendo los resultados que se presentan a continuación.

Tabla 6.

Temperaturas registradas en el interior de la planta.

TEMPERATURAS INTERIORES				
HORA	DIA 1	DIA 2	DIA 3	PROMEDIO
0:00	27.5	25	26.8	26.4
1:00	27	24.6	26.3	25.9
2:00	26.5	24.3	25.9	25.6
3:00	26.2	24.1	25.6	25.3
4:00	26	24	25.5	25.2
5:00	26.1	24.2	25.6	25.3
6:00	27	25	26.5	26.2
7:00	30	26.5	28.5	28.3
8:00	32.5	28	30.2	30.2
9:00	35	29.8	32.5	32.4
10:00	38.5	32	35.2	35.2
11:00	40	33.2	36.5	36.6
12:00	41.2	34.4	38	37.9
13:00	42	35	39	38.7

14:00	42.5	35.3	39.5	39.1
15:00	41	34.4	38.2	37.9
16:00	39.5	33.5	36.9	36.6
17:00	37	32	34.5	34.5
18:00	34	30	31.8	31.9
19:00	31.5	28.5	29.5	29.8
20:00	29.5	27	28	28.2
21:00	28	26	26.5	26.8
22:00	27	25.2	25.5	25.9
23:00	26	24.5	24.8	25.1

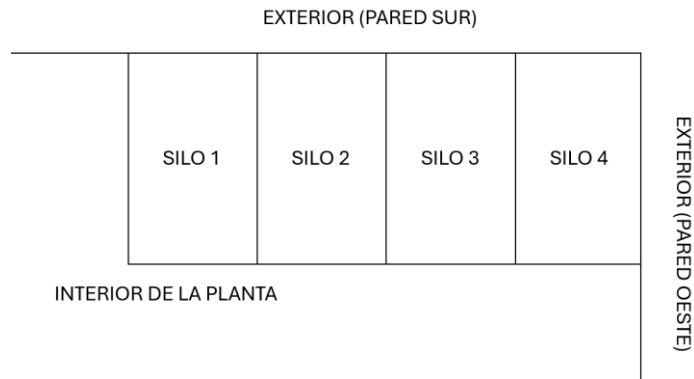
Para los cálculos posteriores se siguió el procedimiento descrito en el libro "Load Calculation Applications Manual" de Jeffrey Spitler (2014) que ofrece una metodología minuciosa para el cálculo de cargas térmicas en edificaciones, en este caso, se utilizaron hojas de cálculo desarrolladas por el profesor David Alfredo Fuentes Díaz (2024) director del presente proyecto de grado y docente de la asignatura de Refrigeración y Aire Acondicionado de la Universidad Industrial de Santander (UIS), las cuales fueron elaboradas siguiendo dicha metodología. Para este estudio, solo se utilizaron las hojas de cálculo correspondientes a las cargas térmicas por paredes y techos que son los temas de interés, las fórmulas y tablas de donde se obtuvieron los valores utilizados en los cálculos se explican en detalle más adelante, proporcionando el fundamento teórico y las referencias necesarias para su correcta aplicación.

5.3.1.1 Carga térmica por paredes expuestas al sol.

Como primer componente de las cargas térmicas por transferencia se analizaron las paredes expuestas al sol, en esta empresa arrocera se identifican dos configuraciones estructurales distintas en los silos de almacenamiento, determinadas por su ubicación dentro del conjunto. Tres de los cuatro silos están dispuestos entre estructuras adyacentes, lo que limita su exposición solar a una sola pared externa, mientras que las otras tres paredes están en contacto con otros silos o áreas

internas de la planta. En contraste, el cuarto silo se encuentra en una esquina de la planta, lo que lo expone a la radiación solar directa en dos de sus paredes externas, mientras que las otras dos permanecen internas. Esta diferencia en exposición térmica tiene implicaciones significativas en el análisis de cargas térmicas y en el diseño del sistema de refrigeración, aparte de esta diferencia, los silos son iguales en el resto de sus características tanto de diseño como de materiales, en la ilustración 6 se muestra la ubicación de los silos.

Figura 6.
Ubicación de los silos.



Una vez explicada la ubicación de los silos se procede a encontrar las áreas superficiales de las paredes expuestas al sol.

Tabla 7.
Dimensiones de las paredes expuestas al sol - silo 1,2 o 3

SILO 1, 2 ó 3		
PAREDES EXPUESTAS A EL SOL		
	DIMENSIONES (m)	ÁREA (m ²)
PARED SUR	5.4*14	75.6
TOTAL		75.6

Tabla 8.*Dimensiones de las paredes expuestas al sol - silo 4*

SILO 4		
PAREDES EXPUESTAS A EL SOL		
	DIMENSIONES (m)	ÁREA (m ²)
PARED SUR	5.4*14	75.6
PARED OESTE	9.5*14	133
TOTAL		208.6

Como se observa en las tablas, ambas clases de silo poseen una pared expuesta al sol de dimensiones iguales, por lo que el cálculo de las cargas térmicas se hará para dos paredes (sur y oeste) pero en el momento de la sumatoria se tendrá en cuenta la configuración de los silos.

Posteriormente, teniendo en cuenta el grosor y los materiales de las paredes del silo se definió el valor del coeficiente de transferencia de calor global (U) y los valores del Conduction Time Series (CTS), estos valores representan que debido a los materiales con los cuales están contruidos, va a tener un retraso temporal por la inercia térmica de los materiales, es decir, el tiempo que tarda en transferirse el calor desde la superficie exterior hasta la parte interior.

Tanto el factor U como el CTS fueron tomados de la figura 7.

Figura 7.
Tabla de factor U y CTS según tipo de pared.

Table 7.3b Wall Conduction Time Series (CTS)
(Source: ASHRAE Handbook—Fundamentals [2013], Chapter 18, Table 16)

Wall Number =	Concrete Block Wall						Precast and Cast-in-Place Concrete Walls									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	
U-Factor, Btu/h-ft ² -F	0.067	0.059	0.073	0.186	0.147	0.121	0.118	0.074	0.076	0.115	0.068	0.082	0.076	0.047	0.550	
Total R	14.8	16.9	13.7	5.4	6.8	8.2	8.4	13.6	13.1	8.7	14.7	12.2	13.1	21.4	1.8	
Mass, lb/ft ²	22.3	22.3	46.0	19.3	21.9	34.6	29.5	29.6	53.8	59.8	56.3	100.0	96.3	143.2	140.0	
Thermal Capacity, Btu/ft ² -F	4.8	4.8	10.0	4.1	4.7	7.4	6.1	6.1	10.8	12.1	11.4	21.6	20.8	30.9	30.1	
Hour	Conduction Time Factors, %															
0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	2	1	3	1	2	1	
1	4	1	2	11	3	1	10	8	1	2	2	3	2	2	2	
2	13	5	8	21	12	2	20	18	3	3	3	4	5	3	4	
3	16	9	12	20	16	5	18	18	6	5	6	5	8	3	7	
4	14	11	12	15	15	7	14	14	8	6	7	6	9	5	8	
5	11	10	11	10	12	9	10	11	9	6	8	6	9	5	8	
6	9	9	9	7	10	9	7	8	9	6	8	6	8	6	8	
7	7	8	8	5	8	8	5	6	9	6	7	5	7	6	8	
8	6	7	7	3	6	8	4	4	8	6	7	5	6	6	7	
9	4	6	6	2	4	7	3	3	7	6	6	5	6	6	6	
10	3	5	5	2	3	6	2	2	7	5	6	5	5	6	6	
11	3	4	4	1	3	6	2	2	6	5	5	5	5	5	5	
12	2	4	3	1	2	5	1	2	5	5	5	4	4	5	4	
13	2	3	2	1	2	4	1	1	4	5	4	4	4	5	4	
14	2	3	2	0	1	4	1	1	4	4	4	4	3	4	4	
15	1	3	2	0	1	3	1	1	3	4	3	4	3	4	3	
16	1	2	1	0	1	3	0	1	2	4	3	4	3	4	3	
17	1	2	1	0	1	2	0	0	2	3	3	4	2	4	3	
18	1	2	1	0	0	2	0	0	1	3	2	4	2	4	2	
19	0	1	1	0	0	2	0	0	1	3	2	3	2	3	2	
20	0	1	1	0	0	2	0	0	1	3	2	3	2	3	2	
21	0	1	1	0	0	2	0	0	1	3	2	3	2	3	1	
22	0	1	1	0	0	1	0	0	1	3	2	3	1	3	1	
23	0	1	0	0	0	1	0	0	1	2	2	2	1	3	1	
Total Percentage	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Layer ID from outdoors to indoors (see Table 18)	F01 M03 I04 G01 F02 —	F01 M08 I04 G01 F02 —	F01 M08 I05 G01 — F02	F01 M08 F02 — — —	F01 M08 F04 G01 F02 —	F01 M09 F04 G01 F02 —	F01 M11 I01 F04 G01 F02 —	F01 M11 I04 G01 F02 — F02	F01 M11 I02 M11 F02 — —	F01 F06 I01 M13 G01 F02 —	F01 F06 I02 M15 G01 F02 —	F01 F06 I04 M15 G01 F02 —	F01 M16 I05 G01 F02 —	F01 M16 I05 G01 F02 —	F01 M16 I05 G01 F02 —	
Wall Number Descriptions	1. 8 in. LW CMU, R-11 batt insulation, gyp board 2. 8 in. LW CMU with fill insulation, R-11 batt insulation, gyp board 3. 1 in. stucco, 8 in. HW CMU, R-11 batt insulation, gyp board 4. 8 in. LW CMU with fill insulation 5. 8 in. LW CMU with fill insulation, gyp board 6. 12 in. LW CMU with fill insulation, gyp board 7. 4 in. LW concrete, R-5 board insulation, gyp board 8. 4 in. LW concrete, R-11 batt insulation, gyp board 9. 4 in. LW concrete, R-10 board insulation, 4 in. LW concrete 10. EIFS finish, R-5 insulation board, 8 in. LW concrete, gyp board 11. 8 in. LW concrete, R-11 batt insulation, gyp board 12. EIFS finish, R-10 insulation board, 8 in. HW concrete, gyp board 13. 8 in. HW concrete, R-11 batt insulation, gyp board 14. 12 in. HW concrete, R-19 batt insulation, gyp board 15. 12 in. HW concrete															

Nota. Tomado de ASHRAE Handbook—Fundamentals (2013), Capítulo 18, Tabla 16.

Esta tabla esta seccionada según el número de muro, y en la parte inferior en la sección “Layer ID from outdoors to indoors” describe la codificación de las capas o componentes que contiene cada muro, la explicación de dicha codificación se encuentra en la figura 8.

Figura 8.

Tabla explicativa de codificación de capas en paredes y techos

Table 7.5 Thermal Properties and Code Numbers of Layers Used in Wall and Roof Descriptions for Tables 7.3a, 7.3b, and 7.4

(Source: ASHRAE Handbook—Fundamentals (2013), Chapter 18, Table 18)

Layer ID	Description	Thickness, in.	Conductivity, Btu-in/h-ft ² -°F	Density, lb/ft ³	Specific Heat, Btu/lb-°F	Resistance, ft ² -h/Btu	R	Mass, lb/ft ²	Thermal Capacity, Btu/ft ² -°F	Notes
F01	Outdoor surface resistance	—	—	—	—	0.25	0.25	—	—	1
F02	Indoor vertical surface resistance	—	—	—	—	0.68	0.68	—	—	2
F03	Indoor horizontal surface resistance	—	—	—	—	0.92	0.92	—	—	3
F04	Wall air space resistance	—	—	—	—	0.87	0.87	—	—	4
F05	Ceiling air space resistance	—	—	—	—	1.00	1.00	—	—	5
F06	EIFS finish	0.375	5.00	116.0	0.20	—	0.08	3.63	0.73	6
F07	1 in. stucco	1.000	5.00	116.0	0.20	—	0.20	9.67	1.93	6
F08	Metal surface	0.030	314.00	489.0	0.12	—	0.00	1.22	0.15	7
F09	Opaque spandrel glass	0.250	6.90	158.0	0.21	—	0.04	3.29	0.69	8
F10	1 in. stone	1.000	22.00	160.0	0.19	—	0.05	13.33	2.53	9
F11	Wood siding	0.500	0.62	37.0	0.28	—	0.81	1.54	0.43	10
F12	Asphalt shingles	0.125	0.28	70.0	0.30	—	0.44	0.73	0.22	10
F13	Built-up roofing	0.375	1.13	70.0	0.35	—	0.33	2.19	0.77	10
F14	Slate or tile	0.500	11.00	120.0	0.30	—	0.05	5.00	1.50	10
F15	Wood shingles	0.250	0.27	37.0	0.31	—	0.94	0.77	0.24	10
F16	Acoustic tile	0.750	0.42	23.0	0.14	—	1.79	1.44	0.20	11
F17	Carpet	0.500	0.41	18.0	0.33	—	1.23	0.75	0.25	12
F18	Terrazzo	1.000	12.50	160.0	0.19	—	0.08	13.33	2.53	13
G01	5/8 in. gyp board	0.625	1.11	50.0	0.26	—	0.56	2.60	0.68	14
G02	5/8 in. plywood	0.625	0.80	34.0	0.29	—	0.78	1.77	0.51	14
G03	1/2 in. fiberboard sheathing	0.500	0.47	25.0	0.31	—	1.06	1.04	0.32	14
G04	1/2 in. wood	0.500	1.06	38.0	0.39	—	0.47	1.58	0.62	15
G05	1 in. wood	1.000	1.06	38.0	0.39	—	0.94	3.17	1.24	15
G06	2 in. wood	2.000	1.06	38.0	0.39	—	1.89	6.33	2.47	15
G07	4 in. wood	4.000	1.06	38.0	0.39	—	3.77	12.67	4.94	15
R01	R-5, 1 in. insulation board	1.000	0.20	2.7	0.29	—	5.00	0.23	0.07	16
R02	R-10, 2 in. insulation board	2.000	0.20	2.7	0.29	—	10.00	0.45	0.13	16
R03	R-15, 3 in. insulation board	3.000	0.20	2.7	0.29	—	15.00	0.68	0.20	16
R04	R-11, 3-1/2 in. batt insulation	3.520	0.32	1.2	0.23	—	11.00	0.35	0.08	17
R05	R-19, 6-1/4 in. batt insulation	6.080	0.32	1.2	0.23	—	19.00	0.61	0.14	17
R06	R-30, 9-1/2 in. batt insulation	9.600	0.32	1.2	0.23	—	30.00	0.96	0.22	17
M01	4 in. brick	4.000	6.20	120.0	0.19	—	0.65	40.00	7.60	18
M02	6 in. LW concrete block	6.000	3.39	32.0	0.21	—	1.77	16.00	3.36	19
M03	8 in. LW concrete block	8.000	3.44	29.0	0.21	—	2.33	19.33	4.06	20
M04	12 in. LW concrete block	12.000	4.92	32.0	0.21	—	2.44	32.00	6.72	21
M05	8 in. concrete block	8.000	7.72	50.0	0.22	—	1.04	33.33	7.33	22
M06	12 in. concrete block	12.000	9.72	50.0	0.22	—	1.23	50.00	11.00	23
M07	6 in. LW concrete block (filled)	6.000	1.98	32.0	0.21	—	3.03	16.00	3.36	24
M08	8 in. LW concrete block (filled)	8.000	1.80	29.0	0.21	—	4.44	19.33	4.06	25
M09	12 in. LW concrete block (filled)	12.000	2.04	32.0	0.21	—	5.88	32.00	6.72	26
M10	8 in. concrete block (filled)	8.000	5.00	50.0	0.22	—	1.60	33.33	7.33	27
M11	4 in. lightweight concrete	4.000	3.70	80.0	0.20	—	1.08	26.67	5.33	28
M12	6 in. lightweight concrete	6.000	3.70	80.0	0.20	—	1.62	40.00	8.00	28
M13	8 in. lightweight concrete	8.000	3.70	80.0	0.20	—	2.16	53.33	10.67	28
M14	6 in. heavyweight concrete	6.000	13.50	140.0	0.22	—	0.44	70.00	15.05	28
M15	8 in. heavyweight concrete	8.000	13.50	140.0	0.22	—	0.48	93.33	20.07	28
M16	12 in. heavyweight concrete	12.000	13.50	140.0	0.22	—	0.89	140.0	30.10	28
M17	2 in. LW concrete roof ballast	2.000	1.30	40	0.20	—	1.54	6.7	1.33	28

Notes: The following notes give sources for the data in this table.

- Chapter 26, Table 1 for 7.5 mph wind
- Chapter 26, Table 1 for still air, horizontal heat flow
- Chapter 26, Table 1 for still air, downward heat flow
- Chapter 26, Table 3 for 1.5 in. space, 90°F; horizontal heat flow, U32 resistance
- Chapter 26, Table 3 for 3.5 in. space, 90°F; downward heat flow, U32 resistance
- EIFS finish layers approximated by Chapter 26, Table 4 for 3/8 in. cement plaster, sand aggregate
- Chapter 33, Table 3 for steel (mild)
- Chapter 26, Table 4 for architectural glass
- Chapter 26, Table 4 for marble and granite
- Chapter 26, Table 4, density assumed same as Southern pine
- Chapter 26, Table 4 for mineral fiberboard, wet-matted, acoustic tile
- Chapter 26, Table 4 for carpet and rubber pad, density assumed same as fiberboard
- Chapter 26, Table 4, density assumed same as stone
- Chapter 26, Table 4 for nail-base sheathing
- Chapter 26, Table 4 for Southern pine
- Chapter 26, Table 4 for expanded polystyrene
- Chapter 26, Table 4 for glass fiber batt, specific heat per glass fiber board
- Chapter 26, Table 4 for clay fired brick
- Chapter 26, Table 4, 16 lb block, 8 × 16 in. face
- Chapter 26, Table 4, 19 lb block, 8 × 16 in. face
- Chapter 26, Table 4, 32 lb block, 8 × 16 in. face
- Chapter 26, Table 4, 33 lb normal weight block, 8 × 16 in. face
- Chapter 26, Table 4, 50 lb normal weight block, 8 × 16 in. face
- Chapter 26, Table 4, 16 lb block, vermiculite fill
- Chapter 26, Table 4, 19 lb block, 8 × 16 in. face, vermiculite fill
- Chapter 26, Table 4, 32 lb block, 8 × 16 in. face, vermiculite fill
- Chapter 26, Table 4, 33 lb normal weight block, 8 × 16 in. face, vermiculite fill
- Chapter 26, Table 4 for 40 Btu/LW concrete

Nota. Tomado de ASHRAE Handbook—Fundamentals (2013), Capítulo 18, Tabla 18.

Analizando las figuras 7 y 8 se ha determinado que la pared número 35 es la que más se asemeja a la pared real en cuanto a la composición de capas, a pesar de que su espesor es de 30 cm (el mayor espesor presentado en la tabla), mientras que el muro real presenta un espesor de 40 cm. Esta similitud en la disposición de los materiales permite utilizar las propiedades térmicas de la pared número 35 como una referencia aproximada para estimar el comportamiento de la pared en estudio, especialmente en lo que se refiere a la conducción de calor y su capacidad térmica.

El factor U encontrado en la tabla se encuentra en unidades inglesas, por lo que se hace necesario pasarlas a unidades del sistema internacional (SI)

$$0.550 \frac{Btu}{h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F} \cdot \frac{1 W/m^2 \cdot K}{0.1761 Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F} \cong 3.123 W/m^2 \cdot K$$

Posteriormente se necesita encontrar el valor del coeficiente de transferencia de calor convectivo, para ello se tomó como referencia la figura 9.

Figura 9.
Coeficientes de transferencia de calor y resistencias de distintas superficies.

Table 3.4 Surface Film Coefficients/Resistances

(Source: ASHRAE Handbook—Fundamentals [2013], Chapter 26, Table 10)

Position of Surface	Direction of Heat Flow	Surface Emittance, ε					
		Nonreflective ε = 0.90		Reflective			
				ε = 0.20		ε = 0.05	
		<i>h_i</i>	<i>R_i</i>	<i>h_i</i>	<i>R_i</i>	<i>h_i</i>	<i>R_i</i>
Indoor							
Horizontal	Upward	1.63	0.61	0.91	1.10	0.76	1.32
Sloping at 45°	Upward	1.60	0.62	0.88	1.14	0.73	1.37
Vertical	Horizontal	1.46	0.68	0.74	1.35	0.59	1.70
Sloping at 45°	Downward	1.32	0.76	0.60	1.67	0.45	2.22
Horizontal	Downward	1.08	0.92	0.37	2.70	0.22	4.55
Outdoor (any position)		<i>h_o</i>	<i>R_o</i>				
15 mph wind (for winter)	Any	6.00	0.17	—	—	—	—
7.5 mph wind (for summer)	Any	4.00	0.25	—	—	—	—

Notes:

1. Surface conductance *h_i* and *h_o*, measured in Btu/h·ft²·°F; resistance *R_i* and *R_o*, in h·ft²·°F/Btu.
2. No surface has both an air space resistance value and a surface resistance value.
3. Conductances are for surfaces of the stated emittance facing virtual blackbody surroundings at same temperature as ambient air. Values based on surface/air temperature difference of 10°F and surface temperatures of 70°F.
4. See Chapter 4 for more detailed information.
5. Condensate can have significant effect on surface emittance (see Table 2). Also, oxidation, corrosion, and accumulation of dust and dirt can dramatically increase surface emittance. Emittance values of 0.05 should only be used where highly reflective surface can be maintained over the service life of the assembly.

Nota. Tomado de ASHRAE Handbook—Fundamentals (2013), Capítulo 26, Tabla 10.

Este coeficiente de transferencia de calor se encuentra tabulado en función del valor de la emisividad de la superficie, por lo que se hace uso de ilustración 10.

Figura 10.

Coeficientes de emisividad de distintas superficies.

Table 3.3a Emittance Values of Various Surfaces and Effective Emittances of Air Spaces^a

[Source: ASHRAE Handbook—Fundamentals [2013], Chapter 26, Table 2]

Surface	Average Emissivity ϵ	Effective Emittance ϵ_{eff} of Air Space	
		One Surface's Emittance ϵ ; Other, 0.9	Both Surfaces' Emittance ϵ
Aluminum foil, bright	0.05	0.05	0.03
Aluminum foil, with condensate just visible (>0.7 g/ft ²)	0.30 ^b	0.29	—
Aluminum foil, with condensate clearly visible (>2.9 g/ft ²)	0.70 ^b	0.65	—
Aluminum sheet	0.12	0.12	0.06
Aluminum-coated paper, polished	0.20	0.20	0.11
Brass, nonoxidized	0.04	0.038	0.02
Copper, black oxidized	0.74	0.41	0.59
Copper, polished	0.04	0.038	0.02
Iron and steel, polished	0.2	0.16	0.11
Iron and steel, oxidized	0.58	0.35	0.41
Lead, oxidized	0.27	0.21	0.16
Nickel, nonoxidized	0.06	0.056	0.03
Silver, polished	0.03	0.029	0.015
Steel, galvanized, bright	0.25	0.24	0.15
Tin, nonoxidized	0.05	0.047	0.026
Aluminum paint	0.50	0.47	0.35
Building materials: wood, paper, masonry, nonmetallic paints	0.90	0.82	0.82
Regular glass	0.84	0.77	0.72

^aValues apply in 4 to 40 μm range of electromagnetic spectrum. Also, oxidation, corrosion, and accumulation of dust and dirt can dramatically increase surface emittance. Emittance values of 0.05 should only be used where the highly reflective surface can be maintained over the service life of the assembly. Except as noted, data from VDI (1999).

^bValues based on data in Bassett and Trethowen (1984).

Nota. Tomado de ASHRAE Handbook—Fundamentals (2013), Capítulo 26, Tabla 2.

Se tiene en cuenta el valor de emisividad (ϵ) de 0.9 ya que el terminado superficial de los silos es el concreto a la intemperie, y con este valor de emisividad se selecciona el valor de h de $4 \text{ Btu}/\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}$, realizando la conversión a $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$

$$4 \text{ Btu}/\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \frac{1 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}}{5.6783 \text{ Btu}/\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}} \cong 22.7131 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$$

Posteriormente se calcula el valor de la absorptancia de la superficie (α) que indica la fracción de la radiación incidente que un material absorbe en comparación con lo que recibe, para esto hacemos se tomó como referencia la figura 11.

Figura 11.

Coefficientes de absorptancia de distintas superficies.

Table 15 Solar Absorptance Values of Various Surfaces

Surface	Absorptance
Brick, red (Purdue) ^a	0.63
Paint	
Red ^b	0.63
Black, matte ^b	0.94
Sandstone ^b	0.50
White acrylic ^a	0.26
Sheet metal, galvanized	
New ^a	0.65
Weathered ^a	0.80
Shingles	0.82
Gray ^b	
Brown ^b	0.91
Black ^b	0.97
White ^b	0.75
Concrete ^{a,c}	0.60 to 0.83

^aIncropera and DeWitt (1990).
^bParker et al. (2000).
^cMiller (1971).

Nota. Tomado de ASHRAE Handbook—Fundamentals (2013), Tabla 15.

El valor de la absorptancia (α) para el concreto varía entre 0.60 y 0.83, para términos de cálculo se tomará un valor dentro del rango de 0.75.

Para el cálculo es importante conocer los valores de la radiación que recibe el muro al transcurso del día, esta radiación se divide en directa (I_b), difusa (I_d), y reflejada (I_r), así mismo también se hace necesario conocer el ángulo de incidencia del sol con respecto a la superficie, para este procedimiento se hizo uso del aplicativo PosSolar desarrollado por la Universidad Industrial de Santander UIS.

Esta aplicación fue diseñada para facilitar los cálculos relacionados a la radiación sobre superficies expuestas al sol, este aplicativo como una de sus funciones es capaz de calcular los coeficientes de radiación directa, difusa y difusa, así como el ángulo de incidencia del sol, para ello se requieren que se le suministren los siguientes datos: una fecha exacta (día, mes y año), coordenadas de la superficie (latitud y longitud), diferencia al tiempo universal medida en grados, inclinación de la superficie con respecto al suelo en grados, acimut de la superficie en grados, material de la superficie, la absorptancia solar y el coeficiente ho.

La fecha escogida fue la del solsticio de verano, ya que es el día del año donde se recibe mayor cantidad de luz solar, esta fecha es el 21 de junio y el año tomado fue el 2024, las coordenadas de la arrocería en cuestión son Latitud: 7° 07' 31.4" N Longitud: 73° 07' 188" O, la diferencia al tiempo universal teniendo en cuenta que Colombia tiene una diferencia horaria de UTC-5, esto pasándolo a grados teniendo en cuenta que cada hora son 15° sería una diferencia de -75°, la inclinación de la pared al ser vertical es de 90°, el acimut de la pared frontal es de 240° y de 150° la pared lateral, el material es concreto a la intemperie, y como se determinó en la figura 11, la absorptancia es de 0.75 y de la figura 9 el ho corresponde a 22.7131.

A continuación, se muestra la interfaz del aplicativo con los datos ingresados y posteriormente los resultados:

Figura 12. Interfaz PosSolar con los datos diligenciados de la pared frontal.

The screenshot shows the 'Posición del sol' window with the following data:

Posición solar		Formato		Pared	
Hora local	12:00:00	HH:MM:SS		Inclinación de la pared	90
Día	21/06/24	DD.MM.AAAA		Acimut de la pared	240
Latitud	07.07.31.4 N	GG.MM.SS N/S		Azimuth superficie sol	
Longitud	73.7.188 W	GG.MM.SS W/E		Angulo de incidencia	
Diferencia a tiempo universal	-75	grados			
Acimut					
Declinación					
Elevación					

Intensidad solar		Reflectancia (Albedo)		Directa	
Mes	Junio	0.2			W/m ²
Tau b	0.473	Concreto a la intemperie			W/m ²
Tau b	2.168				W/m ²
					W/m ²
					W/m ²
					W/m ²

Nota. Captura de pantalla tomada por el autor desde la aplicación PosSol.

Figura 13.

Resultados de coeficientes de radiación y ángulo de incidencia de la pared frontal. Hora 1-12

Variables						
Hora	T amb (C)	Rad directa (W/m2)	Rad difusa (W/m2)	Rad reflejada (W/m2)	T s-a (C)	Incidencia (°)
1		0.00	0.00	0.00	0.00	63.82
2		0.00	0.00	0.00	0.00	50.88
3		0.00	0.00	0.00	0.00	37.87
4		0.00	0.00	0.00	0.00	25.06
5		0.00	0.00	0.00	0.00	13.55
6		29.63	28.18	2.34	7.13	10.28
7		358.74	99.91	19.04	56.64	19.88
8		487.86	132.69	41.17	78.46	32.39
9		480.23	141.00	62.05	81.02	45.36
10		389.83	133.59	78.67	71.39	58.36
11		249.67	117.81	89.28	54.16	71.18
12		86.37	99.64	92.85	33.06	83.67

Calcular Cancelar

Nota. Captura de pantalla tomada por el autor desde la aplicación PosSol.

Figura 14.

Resultados de coeficientes de radiación y ángulo de incidencia de la pared frontal. Hora 13-24

Variables						
Hora	T amb (C)	Rad directa (W/m2)	Rad difusa (W/m2)	Rad reflejada (W/m2)	T s-a (C)	Incidencia (°)
13		0.00	82.99	89.06	5.68	95.62
14		0.00	69.34	78.25	4.87	106.72
15		0.00	62.47	61.46	4.09	116.50
16		0.00	51.89	40.50	3.05	124.23
17		0.00	35.72	18.40	1.79	128.97
18		0.00	8.87	2.06	0.36	129.84
19		0.00	0.00	0.00	0.00	126.66
20		0.00	0.00	0.00	0.00	120.07
21		0.00	0.00	0.00	0.00	111.06
22		0.00	0.00	0.00	0.00	100.45
23		0.00	0.00	0.00	0.00	88.81
24		0.00	0.00	0.00	0.00	76.90

Calcular Cancelar

Nota. Captura de pantalla tomada por el autor desde la aplicación PosSol.

Figura 15.
Interfaz PosSolar con los datos diligenciados de la pared lateral.

The screenshot shows the 'Posición del sol' window in the PosSolar application. It is divided into several sections:

- Posición solar:**
 - Hora local: 12:00:00 (Formato: HH:MM:SS)
 - Día: 21/06/2024 (Formato: DD.MM.AAAA)
 - Latitud: 07.07.31.4 N (Formato: GG.MM.SS N/S)
 - Longitud: 73.07.188 W (Formato: GG.MM.SS W/E)
 - Diferencia a tiempo universal: -75 grados
 - Acimut: 175.29
 - Declinación: 23.45
 - Elevación: 73.62
- Pared:**
 - Inclinación de la pared: 90
 - Acimut de la pared: 150
 - Azimuth superficie sol: 25.29
 - Angulo de incidencia: 75.23
- Intensidad solar:**
 - Mes: Junio
 - Reflectancia (Albedo): 0.2
 - Directa: 207.32 W/m²
 - Tau b: 0.473
 - Concreto a la interperie (dropdown)
 - Difusa: 101.04 W/m²
 - Tau b: 2.168
 - Reflejada: 92.82 W/m²
 - Total: 401.18 W/m²

Buttons for 'OK', 'Calcular', 'Continuo', and 'Temp sol aire' are visible on the right side.

Nota. Captura de pantalla tomada por el autor desde la aplicación PosSol.

Figura 16.
Resultados de coeficientes de radiación y ángulo de incidencia de la pared lateral. Hora 1-12

The screenshot shows a table titled 'Variables' with the following data:

Hora	T amb (C)	Rad directa (W/m2)	Rad difusa (W/m2)	Rad reflejada (W/m2)	T s-a (C)	Incidencia (Á°)
1		0.00	0.00	0.00	0.00	74.26
2		0.00	0.00	0.00	0.00	81.48
3		0.00	0.00	0.00	0.00	87.98
4		0.00	0.00	0.00	0.00	93.43
5		0.00	0.00	0.00	0.00	97.51
6		0.00	10.63	2.34	1.54	99.92
7		0.00	38.82	19.04	6.86	100.48
8		0.00	56.75	41.17	11.61	99.14
9		0.00	70.76	62.05	15.75	96.01
10		0.00	83.37	78.67	19.21	91.33
11		62.09	95.59	89.28	29.28	85.40
12		155.41	107.43	92.85	42.17	78.56

Buttons for 'Calcular' and 'Cancelar' are visible at the bottom right.

Nota. Captura de pantalla tomada por el autor desde la aplicación PosSol.

Figura 17.

Resultados de coeficientes de radiación y ángulo de incidencia de la pared lateral. Hora 13-24

Variables						
Hora	T amb (C)	Rad directa (W/m2)	Rad difusa (W/m2)	Rad reflejada (W/m2)	T s-a (C)	Incidencia (Å°)
13		250.01	117.76	89.06	15.09	71.14
14		331.10	124.36	78.25	17.63	63.49
15		380.97	123.87	61.46	18.70	55.99
16		375.32	111.86	40.50	17.43	49.12
17		270.66	81.88	18.40	12.25	43.51
18		17.16	21.08	2.06	1.33	39.93
19		0.00	0.00	0.00	0.00	39.07
20		0.00	0.00	0.00	0.00	41.12
21		0.00	0.00	0.00	0.00	45.63
22		0.00	0.00	0.00	0.00	51.85
23		0.00	0.00	0.00	0.00	59.04
24		0.00	0.00	0.00	0.00	66.43

Nota. Captura de pantalla tomada por el autor desde la aplicación PosSol.

Una vez seleccionados y encontrados los datos anteriores se pueden comenzar a encontrar algunos datos preliminares que serán importantes a la hora de computar las cargas térmicas totales, se comenzará encontrando el valor de la irradiancia solar (I) que está definida como la suma de los factores de los 3 tipos de radiación, directa, difusa y reflejada.

$$I = I_b + I_d + I_r \quad (6)$$

Este procedimiento se aplicó para cada una de las 24 horas del día y para las paredes tanto frontal como lateral de los silos, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 9.

Valores de irradiancia solar total de la pared frontal.

Hora	Irradiancia solar (I) [W/m^2]
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	60.5
7	477.97
8	661.82
9	683.24
10	601.99
11	456.61
12	278.68
13	172.03
14	147.57
15	123.91
16	92.36
17	54.08
18	10.89
19	0
20	0
21	0
22	0
23	0
24	0

Tabla 10.

Valores de irradiancia solar total de la pared lateral.

Hora	Irradiancia solar (I) [W/m ²]
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	13.02
7	57.9
8	97.96
9	132.84
10	162.07
11	247.06
12	355.79
13	456.91
14	533.77
15	566.32
16	527.59
17	370.71
18	40.05
19	0
20	0
21	0
22	0
23	0
24	0

Posteriormente se procede a calcular la temperatura exterior del muro, que es un resultado de la acción de la temperatura ambiental, la radiación solar, la velocidad del viento, el material y el color de la superficie, entre otros factores. Para esto se utiliza la siguiente formula:

$$T_e = T_o + \left(I \cdot \frac{\alpha}{h_o} \right) \quad (7)$$

T_e = Temperatura exterior de la pared

T_o = Temperatura sol – aire exterior

I = Irradiancia solar total

α = Absortancia de la superficie

h_o = Coeficiente de transferencia de calor convectivo

Este procedimiento realizado para cada una de las 24 horas del día arroja los siguientes resultados:

Tabla 11.

Temperatura exterior de la pared frontal.

Hora	Te [°C]
1	23.2
2	22.8
3	22.4
4	22.1
5	21.9
6	24.1
7	38.7
8	46.7
9	49.5
10	48.7
11	45.7
12	40.9
13	38.3
14	38
15	37.2
16	35.4
17	33.4
18	30.8
19	28.7
20	27.5
21	26.5
22	25.5
23	24.7
24	23.9

Tabla 12.*Temperatura exterior de la pared lateral.*

Hora	Te [°C]
1	23.2
2	22.8
3	22.4
4	22.1
5	21.9
6	22.5
7	24.8
8	28
9	31.3
10	34.2
11	38.8
12	43.4
13	47.7
14	50.7
15	51.8
16	49.8
17	43.8
18	31.7
19	28.7
20	27.5
21	26.5
22	25.5
23	24.7
24	23.9

Una vez encontrada la temperatura exterior se procede a calcular el flujo de calor a través de la pared, definido por la formula:

$$Q = U \cdot A \cdot (T_e - T_i) \quad (8)$$

$Q =$ Flujo de calor a traves de la pared

$U =$ Coeficiente de transferencia de calor global

$T_e =$ Temperatura exterior

$T_i =$ Temperatura objetivo interior

Se realizó el cálculo y los resultados fueron los siguientes:

Tabla 13.

Flujo de calor en la pared frontal.

Hora	Q [W]
1	2172.1
2	2077.7
3	1983.2
4	1912.4
5	1865.2
6	2384.1
7	5827.6
8	7709.5
9	8372.3
10	8187.4
11	7479
12	6351.6
13	5732.6
14	5660
15	5475.5
16	5064.3
17	4577
18	3956.9
19	3470.7
20	3187.3
21	2951.2
22	2715.1
23	2526.3
24	2337.4

Tabla 14.

Flujo de calor en la pared lateral.

Hora	Q [W]
1	3821.3
2	3655.2
3	3489
4	3364.4

5	3281.3
6	3543
7	4490.8
8	5829.4
9	7180.1
10	8370.2
11	10283.5
12	12231.7
13	13992.4
14	15254.2
15	15700.7
16	14878.7
17	12394.8
18	7361.2
19	6105.8
20	5607.3
21	5192
22	4776.6
23	4444.3
24	4112.1

Para realizar un correcto análisis de la transferencia de calor en los silos de almacenamiento no es suficiente con determinar el flujo de calor a través de las paredes, resulta importante considerar, el retraso térmico por conducción representado con las constantes CTS que se explicaron anteriormente, pero además de esto, también se puede presentar un retraso en la forma como se libera la energía almacenada en forma de radiación a lo largo del día, este retraso se representa con las constantes RTS (Radiant Time Series), para seleccionar estos valores se tomó como referencia la tabla de la figura 18.

Figura 18.
Factores RTS según tipo de construcción.

Table 7.12 Representative Solar RTS Values for Light to Heavy Construction
(Source: ASHRAE Handbook—Fundamentals [2013], Chapter 18, Table 20)

% Glass	Light						Medium						Heavy					
	With Carpet			No Carpet			With Carpet			No Carpet			With Carpet			No Carpet		
	10	50	90	10	50	90	10	50	90	10	50	90	10	50	90	10	50	90
Hour	Radiant Time Factor, %																	
0	53	55	56	44	45	46	52	54	55	28	29	29	47	49	51	26	27	28
1	17	17	17	19	20	20	16	16	15	15	15	15	11	12	12	12	13	13
2	9	9	9	11	11	11	8	8	8	10	10	10	6	6	6	7	7	7
3	5	5	5	7	7	7	5	4	4	7	7	7	4	4	3	5	5	5
4	3	3	3	5	5	5	3	3	3	6	6	6	3	3	3	4	4	4
5	2	2	2	3	3	3	2	2	2	5	5	5	2	2	2	4	4	4
6	2	2	2	3	2	2	2	1	1	4	4	4	2	2	2	3	3	3
7	1	1	1	2	2	2	1	1	1	4	3	3	2	2	2	3	3	3
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	2	2	2	3	3	3
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	2	2	2	3	3	3
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	3	3	2
12	1	1	1	1	1	0	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2
13	1	1	0	1	0	0	1	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	2
14	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2	2
15	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
16	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
17	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
18	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	2	2	2
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	2	2
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	1	1
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	1	1
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Nota. Tomado de ASHRAE Handbook—Fundamentals (2013), Capítulo 18, Tabla 20.

Figura 19.
Especificaciones de cada tipo de construcción para cálculo de RTS.

Table 7.13 Representative Zone Construction for Tables 7.11 and 7.12
(Source: ASHRAE Handbook—Fundamentals [2013], Chapter 18, Table 21)

Construction Class	Exterior Wall	Roof/Ceiling	Partition	Floor	Furnishing
Light	Steel siding, 2 in. insulation, air space, 3/4 in. gyp	4 in. LW concrete, ceiling air space, acoustic tile	3/4 in. gyp, air space, 3/4 in. gyp	Acoustic tile, ceiling air space, 4 in. LW concrete	1 in. wood @ 50% of floor area
Medium	4 in. face brick, 2 in. insulation, air space, 3/4 in. gyp	4 in. HW concrete, ceiling air space, acoustic tile	3/4 in. gyp, air space, 3/4 in. gyp	Acoustic tile, ceiling air space, 4 in. HW concrete	1 in. wood @ 50% of floor area
Heavy	4 in. face brick, air space, 2 in. insulation, 8 in. HW concrete, 3/4 in. gyp	8 in. HW concrete, ceiling air space, acoustic tile	3/4 in. gyp, 8 in. HW concrete block, 3/4 in. gyp	Acoustic tile, ceiling air space, 8 in. HW concrete	1 in. wood @ 50% of floor area

Nota. Tomado de ASHRAE Handbook—Fundamentals (2013), Capítulo 18, Tabla 21.

Por el grosor del muro se considera una construcción de tipo pesado y sin revestimiento, la tabla considera la proporción del área de la pared exterior que está ocupada por ventanas o superficies de vidrio, en este caso los muros no tienen ventanas, por lo que se selecciona el menor porcentaje presentado en la tabla (10%)

Otra consideración importante dentro del método RSTM es el porcentaje de transferencia que se va a considerar como convectiva y radiante, esto se encuentra tabulado para algunos casos específicos en la figura 20.

Figura 20.
Fracciones recomendadas para convección y radiación.

Table 7.10 Recommended Radiative/Convective Splits for Internal Heat Gains
(Source: Nigusse 2007)

Heat Gain Type	Recommended Radiative Fraction	Recommended Convective Fraction	Comments
Occupants—typical office conditions	0.6	0.4	See Table 6.1 for other conditions.
Equipment	0.1–0.8	0.9–0.2	See Chapter 6 for detailed coverage of equipment heat gain and recommended radiative/convective splits for motors, cooking appliances, laboratory equipment, medical equipment, office equipment, etc.
Office equipment with fan	0.10	0.9	
Office equipment without fan	0.3	0.7	
Lighting			Varies—see Table 6.3.
Conduction heat gain through walls and floors	0.46	0.54	
Conduction heat gain through roofs	0.60	0.40	
Conduction heat gain through windows	0.33	0.67	
	(SHGC > 0.5) 0.46	(SHGC > 0.5) 0.54	
	(SHGC ≤ 0.5)	(SHGC ≤ 0.5)	
Solar heat gain through fenestration w/o interior shading	1.0	0.0	
Solar heat gain through fenestration w/interior shading			Varies; see Tables 3.9a to 3.9e
Infiltration	0.0	1.0	

Nota. Tomado de ASHRAE Handbook—Fundamentals (2013), Capítulo 18, Tabla 18.

La tabla presentada se enfoca principalmente en aplicaciones residenciales, donde las superficies internas disipan el calor almacenado principalmente mediante convección y radiación. No obstante, en el caso analizado (donde las paredes del silo están en contacto directo con el arroz almacenado) no hay un fluido intermedio ni separación entre superficies. Por tanto, se puede estimar que la transferencia de calor hacia el grano se produce principalmente por conducción, siendo los mecanismos de convección y radiación en este caso poco relevantes.

Para el cálculo de las cargas térmicas considerando los efectos de conducción y radiación (solo conducción en este caso), es necesario tener en cuenta las cargas acumuladas en las horas anteriores, tal como se describe en la fórmula 7.1 del libro Load Calculation Applications Manual

(Spitler, 2014). Dicha fórmula permite calcular por separado la carga transmitida por conducción o por radiación, modificando únicamente el factor de respuesta térmica correspondiente (CTS para conducción, RTS para radiación).

$$q_{\theta} = \sum_{j=0}^{23} c_j U A (t_{e, \theta-j\delta} - t_{rc}) \quad (9)$$

q_{θ} = Carga térmica conductiva o radiactiva en cada hora

U = Coeficiente global de transferencia de calor

A = Area de la superficie

c_j = j^{th} factor CTS o RTS

$t_{e, \theta-j\delta}$ = Temperatura sol – aire exterior

t_{rc} = Temperatura objetivo interior

θ = Hora en curso

δ = Intervalo de tiempo (1 hora)

Una vez presentada la fórmula que explica el procedimiento teórico, para este caso se toma como guía el formato desarrollado por el profesor Fuentes (2024) en el que se emplea un macro en Excel que automatiza estos cálculos, facilitando su aplicación práctica. A continuación, se muestra una imagen del macro para ilustrar su funcionamiento y utilidad dentro del proyecto.

Figura 21.

Código en macro para cálculo de carga térmica.

```
Function Macrol(fila)
'
' Macrol Macro
'
col = ActiveCell.Column - 1
suma = 0
For i = 1 To 24
j = fila - i + 4
If (j < 4) Then
j = 27 - i + fila + 1
End If
suma = suma + Cells(3 + i, col) * Cells(j, col - 1)
Next i
Macrol = suma
End Function

Function CalcularQr(ent, rad As Range, rts As Range)
'
fila = ActiveCell.Row
col = ActiveCell.Column
filasrad = rad.Rows.Count
filasrts = rts.Rows.Count
If (filasrad <> filasrts) Then
'MessageBox "Las filas de los vectores son diferentes " & filasrad & " y " & filasrts
CalcularQr = 0
Return
End If
'Set rng = Range(Cells(fila, col), Cells(fila + filasrad, col))

j = ent
For i = 1 To filasrad
k = j - i + 1
If (k <= 0) Then
k = filasrad - i + j + 1
End If

suma = suma + rts(i, 1) * rad(k, 1)

Next i
CalcularQr = suma
End Function
```

Nota. Captura de pantalla tomada por el autor del macro desarrollado por el profesor David Fuentes (2024).

Una vez aplicada la formula los resultados fueron los siguientes.

Tabla 15.*Carga térmica en la pared frontal.*

Hora	Q [W]	CTS	CARGA TÉRMICA [W]
1	2172.1	1	4452.5
2	2077.7	2	4256.7
3	1983.2	4	4065.5
4	1912.4	7	3855
5	1865.2	8	3642.6
6	2384.1	8	3446.9
7	5827.6	8	3276.4
8	7709.5	8	3170.2
9	8372.3	7	3194.5
10	8187.4	6	3393.5
11	7479	6	3708.8
12	6351.6	5	4067.8
13	5732.6	4	4417.4
14	5660	4	4722
15	5475.5	4	4945.1
16	5064.3	3	5091.8
17	4577	3	5197.9
18	3956.9	3	5245.3
19	3470.7	2	5223.1
20	3187.3	2	5161.1
21	2951.2	2	5073.4
22	2715.1	1	4940.6
23	2526.3	1	4790.9
24	2337.4	1	4637.3

Tabla 16.*Carga térmica en la pared lateral.*

Hora	Q [W]	CTS	CARGA TÉRMICA [W]
1	3821.3	1	8472.1
2	3655.2	2	8072.6
3	3489	4	7683.4
4	3364.4	7	7288.7
5	3281.3	8	6920.8
6	3543	8	6576.6
7	4490.8	8	6231.7
8	5829.4	8	5906.7
9	7180.1	7	5662
10	8370.2	6	5503.8
11	10283.5	6	5461.3
12	12231.7	5	5574.8
13	13992.4	4	5826.9
14	15254.2	4	6239.5
15	15700.7	4	6826.2
16	14878.7	3	7513.6
17	12394.8	3	8238.6
18	7361.2	3	8919.9
19	6105.8	2	9435.4
20	5607.3	2	9695.3
21	5192	2	9689
22	4776.6	1	9514.1
23	4444.3	1	9232.7
24	4112.1	1	8874.3

El procedimiento arroja el valor de la carga térmica, se recuerda que para la sumatoria al final hay un tipo de silo que cuenta con dos paredes expuestas (frontal y lateral) y los otros silos solo tienen una pared expuesta (frontal).

5.3.1.2 Carga térmica por paredes internas.

Aunque las paredes que lindan con el interior de la arrocera no están expuestas al sol, también representan una carga térmica significativa ya que el interior de los silos se encuentra a una temperatura baja y las paredes, expuestas a temperaturas más altas en su superficie exterior, absorben calor y lo transfieren hacia el interior.

Tal como se muestra en la figura 6 el silo ubicado en la esquina de la planta tiene dos paredes exteriores expuestas al sol y dos interiores, mientras que los otros 3 silos tienen una sola pared exterior expuesta al sol y 3 paredes interiores, por esta razón se toman en cuenta los dos casos para calcular ambos casos y compararlos.

Tabla 17.
Dimensiones paredes interiores silo 1, 2 o 3.

SILO 1, 2 ó 3		
PAREDES INTERIORES		
	DIMENSIONES (m)	ÁREA (m ²)
PARED NORTE	5.4*14	75.6
PARED ESTE	9.5*14	133
PARED ESTE	9.5*14	133
TOTAL		341.6

Tabla 18.
Dimensiones paredes interiores silo 4.

SILO 4		
PAREDES INTERIORES		
	DIMENSIONES (m)	ÁREA (m ²)

PARED NORTE	5.4*14	75.6
PARED ESTE	9.5*14	133
TOTAL		208.6

La transferencia de calor a través de las paredes internas se calcula de la misma manera que las expuestas al sol, con la diferencia de que estas no van a tener ningún tipo de irradiancia solar, por lo tanto, tomando la ecuación (7) y asumiendo $I=0$.

$$T_e = T_o + \left(0 \cdot \frac{\alpha}{h_o}\right)$$

Entonces

$$T_e = T_o$$

Esto lo que representa es que la temperatura exterior del muro se tomará igual a la temperatura sol-aire al interior de la planta, medidas y registradas en la tabla 6, para efectos de cálculo esto simplifica el proceso ya que no se requiere seleccionar ni el valor de la absorptancia (α) ni el coeficiente de transferencia de calor convectivo (h_o).

Además de esto al ser las paredes idénticas en grosor y materiales a las exteriores, comparten el coeficiente global de transferencia de calor y el factor de retraso de carga térmica por conducción (CTS) que se seleccionó en la figura 7 seleccionando el muro #35.

Con estas consideraciones, teniendo el área de las paredes, el coeficiente global de transferencia de calor, la temperatura interior y exterior ya es posible hacer uso de la ecuación 8 para obtener el flujo de calor hacia el interior, así mismo, teniendo los valores de CTS se procede a calcular la carga térmica con el retraso correspondiente a la conducción, los resultados son los siguientes.

Tabla 19.*Carga térmica en las paredes internas de los silos 1, 2 o 3.*

Hora	To [°C]	Te [°C]	Q [W]	CTS	CARGA TÉRMICA [W]
1	24.5	24.5	11237.1	1	14362.9
2	24.1	24.1	10810.4	2	14111.9
3	23.7	23.7	10383.7	4	13855.8
4	23.4	23.4	10063.6	7	13587.7
5	23.2	23.2	9850.3	8	13294.3
6	23.3	23.3	9957	8	12993.8
7	23.8	23.8	10490.4	8	12697.6
8	25	25	11735	8	12408.9
9	26	26	12801.8	7	12160.6
10	27.2	27.2	14046.4	6	11994.9
11	28.5	28.5	15468.8	6	11929.5
12	29.3	29.3	16322.3	5	11971.5
13	30	30	17069.1	4	12134.7
14	30.4	30.4	17531.4	4	12409.9
15	30.5	30.5	17602.5	4	12759.8
16	30.3	30.3	17353.6	3	13162.4
17	29.8	29.8	16820.1	3	13584.8
18	29	29	15966.7	3	13984.2
19	27.8	27.8	14686.5	2	14327.7
20	26.7	26.7	13584.1	2	14589.8
21	25.9	25.9	12730.7	2	14745.5
22	25.1	25.1	11877.2	1	14785.7
23	24.5	24.5	11237.1	1	14720.3
24	24.8	24.8	11521.6	1	14573.1

Tabla 20.*Carga térmica en las paredes internas del silo 4.*

Hora	To [°C]	Te [°C]	Q [W]	CTS	CARGA TÉRMICA [W]
1	24.5	24.5	6862	1	8770.8
2	24.1	24.1	6601.4	2	8617.5
3	23.7	23.7	6340.9	4	8461.1
4	23.4	23.4	6145.4	7	8297.4
5	23.2	23.2	6015.1	8	8118.2
6	23.3	23.3	6080.3	8	7934.8
7	23.8	23.8	6406	8	7753.9
8	25	25	7166	8	7577.5

9	26	26	7817.5	7	7426
10	27.2	27.2	8577.5	6	7324.8
11	28.5	28.5	9446.1	6	7284.8
12	29.3	29.3	9967.3	5	7310.4
13	30	30	10423.3	4	7410.1
14	30.4	30.4	10705.6	4	7578.2
15	30.5	30.5	10749.1	4	7791.9
16	30.3	30.3	10597	3	8037.7
17	29.8	29.8	10271.3	3	8295.7
18	29	29	9750.2	3	8539.5
19	27.8	27.8	8968.4	2	8749.3
20	26.7	26.7	8295.2	2	8909.3
21	25.9	25.9	7774.1	2	9004.4
22	25.1	25.1	7252.9	1	9029
23	24.5	24.5	6862	1	8989
24	24.8	24.8	7035.7	1	8899.1

Al igual que con las paredes exteriores se considera toda la transferencia de calor por conducción entre el muro y el grano almacenado, por lo que no se hace necesario seleccionar los factores RTS y el valor calculado es el total de la carga térmica de las paredes internas.

El mayor valor de carga térmica en las paredes internas se obtiene en la hora 22, teniendo valores pico de 14785.7 W para los silos centrales y 9029 W para el silo esquinero.

5.3.1.3 Carga térmica por el techo.

La superficie del techo representa el elemento más crítico en cuanto a cargas térmicas se refiere, esto debido a que es el área que mayor tiempo recibe la radiación solar y además al estar constituida por láminas de acero galvanizado, es el sector que menor aislamiento térmico posee, por lo que el cálculo de esta carga térmica es un factor clave para el diseño del sistema.

El área superficial efectiva del techo en este caso no coincide exactamente con el área proyectada de la base del silo, ya que el material utilizado es lámina galvanizada con ondulaciones, esta geometría estándar es usada para otorgarle mayor rigidez estructural a la cubierta del techo,

pero a su vez, agrega mayor área superficial en comparación con una superficie plana. El aumento en el área depende del tipo de ondulaciones y la altura de estas y se suelen utilizar factores de corrección que van de entre 1.1 a 1.4 el área proyectada de la base, para este caso se tomó de 1.2, a continuación, se muestra el área del techo.

Tabla 21.
Área superficial efectiva del techo.

TECHO			
DIMENSIONES [m]	ÁREA [m ²]	FACTOR DE CORRECCIÓN	AREA SUPERFICIAL EFÉCTIVA
5.4*9.5	51.3	1.2	61.56

En este caso, para determinar el coeficiente de transferencia de calor global (U) y los valores del Conduction Time Series (CTS) es necesario utilizar una tabla especializada para cubiertas y techos, esta se muestra en la figura 22.

Figura 22.
Factor U y CTS según tipo de techo.

Table 7.4 Roof Conduction Time Series (CTS)
[Source: ASHRAE Handbook—Fundamentals (2013), Chapter 18, Table 17]

Roof Number	Sloped Frame Roofs						Wood Deck		Metal Deck Roofs					Concrete Roofs					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
U-Factor, Btu/h·ft ² ·°F	0.044	0.040	0.045	0.041	0.042	0.041	0.069	0.058	0.080	0.065	0.057	0.036	0.052	0.054	0.052	0.051	0.056	0.055	0.042
Total R Mass, lb/ft ²	22.8	25.0	22.2	24.1	23.7	24.6	14.5	17.2	12.6	15.4	17.6	27.6	19.1	18.6	19.2	19.7	18.0	18.2	23.7
Thermal Capacity, Btu/ft ² ·°F	5.5	4.3	2.9	7.1	11.4	7.1	10.0	11.5	4.9	6.3	5.1	5.6	11.8	30.6	43.9	57.2	73.9	97.2	74.2
	1.3	0.8	0.6	2.3	3.6	2.3	3.7	3.9	1.4	1.6	1.4	1.6	2.8	6.6	9.3	12.0	16.3	21.4	16.2
Hour	Conduction Time Factors, %																		
0	6	10	27	1	1	1	0	1	18	4	8	1	0	1	2	2	2	3	1
1	45	57	62	17	17	12	7	3	61	41	53	23	10	2	2	2	2	3	2
2	33	27	10	31	34	25	18	8	18	35	30	38	22	8	3	3	5	3	6
3	11	5	1	24	25	22	18	10	3	14	7	22	20	11	6	4	6	5	8
4	3	1	0	14	13	15	15	10	0	4	2	10	14	11	7	5	7	6	8
5	1	0	0	7	6	10	11	9	0	1	0	4	10	10	8	6	7	6	8
6	1	0	0	4	3	6	8	8	0	1	0	2	7	9	8	6	6	6	7
7	0	0	0	2	1	4	6	7	0	0	0	0	5	7	7	6	6	6	7
8	0	0	0	0	0	2	5	6	0	0	0	0	4	6	7	6	6	6	6
9	0	0	0	0	0	1	3	5	0	0	0	0	3	5	6	6	5	5	5
10	0	0	0	0	0	1	3	5	0	0	0	0	2	5	5	6	5	5	5
11	0	0	0	0	0	1	2	4	0	0	0	0	1	4	5	5	5	5	5
12	0	0	0	0	0	0	1	4	0	0	0	0	1	3	5	5	4	5	4
13	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	1	3	4	5	4	4	4
14	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	3	4	4	4	4	3
15	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	2	3	4	4	4	3
16	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	3	4	3	4	3
17	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	3	4	3	4	3
18	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	3	3	3	3	2
19	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	2	3	3	3	2
20	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2	3	3	3	2
21	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2	3	3	3	2
22	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	2	3	2	2	2
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	2	2
Total Percentage	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Layer ID from outdoors to indoors (see Table 18)	F01	F01	F01	F01	F01	F01	F01	F01	F01	F01	F01	F01	F01	F01	F01	F01	F01	F01	F01
	F08	F08	F08	F12	F14	F15	F13	F13	F13	F13	F13	F13	M17	F13	F13	F13	F13	F13	F13
	G03	G03	G03	G05	G05	G05	G03	G03	G03	G03	G03	G03	F13	G03	G03	G03	G03	G03	M14
	F05	F05	F05	F05	F05	F05	I02	I02	I02	I02	I03	I02	G03	I03	I03	I03	I03	I03	F05
	I05	I05	I05	I05	I05	I05	G06	G06	F08	F08	F08	I03	I03	M11	M12	M13	M14	M15	I05
	G01	F05	F03	F05	F05	F05	F03	F05	F03	F05	F03	F08	F08	F03	F03	F03	F03	F03	F16
	F03	F16	—	G01	G01	G01	—	F16	—	F16	—	—	F03	—	—	—	—	—	F03
	—	F03	—	F03	F03	F03	—	F03	—	F03	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Nota. Tomado de ASHRAE Handbook—Fundamentals (2013), Capítulo 18, Tabla 17.

La figura muestra 5 tipos de cubiertas metálicas, cada una de ellas con unas características diferentes explicadas en la ilustración 8 (página 33), se evidencia que ninguna de las cubiertas metálicas presentada es similar a la instalada en los silos, ya que todas las opciones presentadas están compuestas por una o varias capas de fibra u otros materiales aislantes, tomar el valor de alguna de estas configuraciones de cubierta sería un error ya sea el coeficiente de transferencia de calor o los valores de retraso térmico por conducción, ya que estaríamos tomando en cuenta un aislamiento que en el caso de estudio no se encuentra y además un retraso por conducción que en una lámina delgada es casi nulo. El resultado sería una carga térmica mal calculada e inferior a la necesaria, por lo que se plantea:

1. Calcular el coeficiente de transferencia de calor global utilizando las resistencias tabuladas en la ilustración 8.

2. Asumir unos valores de CTS que modelen de forma coherente el retraso térmico en una lámina de esas características.

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor de la lámina de acero galvanizada se deben sumar 3 resistencias, la resistencia superficial externa, la resistencia propia de la lámina y la resistencia superficial interna, el inverso del resultado de esta suma será el valor del coeficiente de transferencia de calor. Los datos de resistencia se basaron en la tabla 8, se realizó la suma en las unidades de la tabla y el resultado se pasó a unidades del SI.

$$U = \frac{1}{R_{total}} \quad (10)$$

$$R_{total} = R_{exterior} + R_{lamina} + R_{interior} \quad (11)$$

El factor de resistencia exterior e interior registrados en la tabla son:

$$R_{exterior} = 0.25 \frac{ft^2 \cdot ^\circ F \cdot h}{Btu}$$

$$R_{interior} = 0.92 \frac{ft^2 \cdot ^\circ F \cdot h}{Btu}$$

La resistencia de la lámina está definida como el espesor sobre la conductividad del material, el espesor es de 1 mm, en pulgadas 0.0394, y la conductividad se tomó de la tabla 8.

$$R_{lamina} = \frac{e}{k} \quad (12)$$

$$R_{lamina} = \frac{0.0394 \text{ in}}{314 \text{ Btu} \cdot \text{in} / \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{h}} = 0.0001254 \frac{\text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{h}}{\text{Btu}}$$

Sumando todos los valores

$$R_{total} = 0.25 \frac{\text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{h}}{\text{Btu}} + 0.0001254 \frac{\text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{h}}{\text{Btu}} + 0.92 \frac{\text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{h}}{\text{Btu}}$$

$$R_{total} = 1.17 \frac{\text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{h}}{\text{Btu}}$$

$$U = \frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{1.17 \text{ ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{h} / \text{Btu}} = 0.85 \frac{\text{Btu}}{\text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{h}}$$

Realizando la conversión

$$0.85 \frac{\text{Btu}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}} \cdot \frac{1 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}}{0.1761 \text{ Btu} / \text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}} \cong 4.8268 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

Con respecto a los valores de los factores de retraso en la conducción (CTS), al ser una lámina de apenas 1 mm de espesor y de un material bastante conductivo se puede considerar que la energía se conduce al instante y no genera un retraso en la carga térmica significativo, porque se tomará que el 100% se libera en la primera hora y en las demás horas en 0.

El coeficiente de transferencia de calor convectivo sigue siendo el mismo que para los muros $h_o = 22.7131 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$, ya que en la ilustración 9 el único factor del cual depende es de

la velocidad del viento, y tanto muros como techos comparten estas características, igualmente se utilizó la misma tabla que en las paredes para extraer el valor de la absorción (figura 11), que en este caso son laminas galvanizadas que se encuentran en buen estado, por lo que el valor correspondiente es de 0.65.

Posteriormente se realiza el cálculo de la irradiancia solar utilizando el aplicativo PosSolar, los únicos datos que varían con respecto a la pared expuesta a el sol es que el techo cuenta con una inclinación de 0° al estar en forma horizontal, y al estar horizontalmente no cuenta con un acimut.

Figura 23. Interfaz PosSolar con los datos diligenciados de la cubierta del techo.

The screenshot shows the 'Posición del sol' window of the PosSolar application. It is divided into several sections:

- Posición solar:** Contains input fields for local time (12:00:00), date (21/06/2024), latitude (07.07.31.4 N), longitude (73.07.188 W), difference to universal time (-75), azimuth (175.29), declination (23.45), and elevation (73.62). Each field has a corresponding format specification.
- Pared:** Contains input fields for wall inclination (0), wall azimuth (0), surface azimuth (175.29), and incidence angle (16.38).
- Intensidad solar:** Contains a dropdown for the month (Junio), a reflectance (albedo) field (0.6), and a roof type dropdown (Techo con aislante). It also displays calculated values for direct (780.03 W/m²), diffuse (142.18 W/m²), reflected (0.00 W/m²), and total (922.21 W/m²) solar intensity.

Buttons for 'OK', 'Calcular', 'Continuo', and 'Temp sol aire' are visible on the right side of the window.

Nota. Captura de pantalla tomada por el autor desde la aplicación PosSol.

Figura 24.

Resultados de coeficientes de radiación y ángulo de incidencia de la cubierta del techo. Hora 1-12.

Temperatura sol aire

Alpha

ho W/(m2)

Variables

Hora	T amb (C)	Rad directa (W/m2)	Rad difusa (W/m2)	Rad reflejada (W/m2)	T s-a (C)	Incidencia (Á°)
1		0.00	0.00	0.00	3.90	145.46
2		0.00	0.00	0.00	3.90	136.66
3		0.00	0.00	0.00	3.90	125.30
4		0.00	0.00	0.00	3.90	112.69
5		0.00	0.00	0.00	3.90	99.44
6		6.40	1.95	0.00	4.14	85.85
7		138.34	23.32	0.00	8.53	72.12
8		329.86	55.64	0.00	14.93	58.38
9		513.94	89.43	0.00	21.17	44.84
10		660.80	118.03	0.00	26.19	31.90
11		752.75	136.58	0.00	29.35	20.88
12		780.03	142.18	0.00	30.30	16.38

Calcular Cancelar

Nota. Captura de pantalla tomada por el autor desde la aplicación PosSol.

Figura 25.

Resultados de coeficientes de radiación y ángulo de incidencia de la cubierta del techo. Hora 13-24.

Temperatura sol aire

Alpha

ho W/(m2)

Variables

Hora	T amb (C)	Rad directa (W/m2)	Rad difusa (W/m2)	Rad reflejada (W/m2)	T s-a (C)	Incidencia (Á°)
13		739.86	133.95	0.00	28.91	22.71
14		636.35	113.17	0.00	25.35	34.31
15		480.67	83.15	0.00	20.04	47.42
16		292.29	49.06	0.00	13.67	61.02
17		104.81	17.98	0.00	7.41	74.77
18		0.53	0.38	0.00	3.93	88.49
19		0.00	0.00	0.00	3.90	102.03
20		0.00	0.00	0.00	3.90	115.19
21		0.00	0.00	0.00	3.90	127.62
22		0.00	0.00	0.00	3.90	138.61
23		0.00	0.00	0.00	3.90	146.68
24		0.00	0.00	0.00	3.90	149.39

Calcular Cancelar

Nota. Captura de pantalla tomada por el autor desde la aplicación PosSol.

Una vez encontrados estos datos se procedió a calcular utilizando el mismo procedimiento que para las paredes el valor de la irradiancia solar (I), la temperatura exterior (T_e), la transferencia de calor (Q) y la carga térmica con el retraso por conducción.

Tabla 22.

Carga térmica en la cubierta del techo.

Hora	To [°C]	Eb	Ed	Er	Theta [°]	Irradiancia solar [W/m ²]	Te [°C]	Q [W]	CTS	CARGA TÉRMICA [W]
1	23.2	0	0	0	145.5	0	23.2	2733.7	100	2733.7
2	22.8	0	0	0	136.7	0	22.8	2614.8	0	2614.8
3	22.4	0	0	0	125.3	0	22.4	2496	0	2496
4	22.1	0	0	0	112.7	0	22.1	2406.8	0	2406.8
5	21.9	0	0	0	99.4	0	21.9	2347.4	0	2347.4
6	22.1	6.4	2	0	85.9	8.4	22.3	2477.8	0	2477.8
7	22.9	138.3	23.3	0	72.1	161.7	27.5	4019.2	0	4019.2
8	24.8	329.9	55.6	0	58.4	385.5	35.8	6487.2	0	6487.2
9	26.9	513.9	89.4	0	44.8	603.4	44.2	8963.8	0	8963.8
10	28.8	660.8	118	0	31.9	778.8	51.1	11020.4	0	11020.4
11	30.6	752.8	136.6	0	20.9	889.3	56.1	12494.9	0	12494.9
12	31.7	780	142.2	0	16.4	922.2	58.1	13101.3	0	13101.3
13	32.6	739.9	134	0	22.7	873.8	57.6	12957.2	0	12957.2
14	33.1	636.4	113.2	0	34.3	749.5	54.5	12048.8	0	12048.8
15	33.1	480.7	83.2	0	47.4	563.8	49.2	10469.7	0	10469.7
16	32.4	292.3	49.1	0	61	341.4	42.2	8370	0	8370
17	31.6	104.8	18	0	74.8	122.8	35.1	6273.8	0	6273.8
18	30.4	0.5	0.4	0	88.5	0.9	30.4	4880.8	0	4880.8
19	28.7	0	0	0	102	0	28.7	4367.9	0	4367.9
20	27.5	0	0	0	115.2	0	27.5	4011.4	0	4011.4
21	26.5	0	0	0	127.6	0	26.5	3714.2	0	3714.2
22	25.5	0	0	0	138.6	0	25.5	3417.1	0	3417.1
23	24.7	0	0	0	146.7	0	24.7	3179.4	0	3179.4
24	23.9	0	0	0	149.4	0	23.9	2941.7	0	2941.7

Así como se consideró una transferencia totalmente conductiva entre las paredes y el grano almacenado, en el caso del techo es diferente ya que el grano nunca entra en contacto con las láminas del techo, por lo que la transferencia de calor se da por radiación y convección, para poder representar cómo los materiales absorben y liberan gradualmente la energía en forma de radiación es necesario separar el calor radiante y el convectivo, para esto se utilizó la figura 20 que define las fracciones para techos como 0.6 en forma radiante y 0.4 en forma convectiva, esta fracción se multiplica por el resultado de la carga térmica, adicionalmente se debe seleccionar los valores de los factores RTS, pero tal como se consideró para los factores CTS, al ser una lámina delgada se puede considerar que libera su energía almacenada durante la primera hora.

Una vez hecho esto y utilizando de nuevo la ecuación 8, se encuentra la carga térmica total, los resultados de estos cálculos se encuentran en la tabla 23.

Tabla 23.*Carga térmica total en la cubierta del techo.*

Hora	CARGA TÉRMICA	Convectivo (40%)	Radiante (60%)	RTS	Carga Rad acumulada	CARGA DE ENFRIAMIENTO
	[W]					TOTAL
1	2733.7	1093.5	1640.2	100	1640.2	2733.7
2	2614.8	1045.9	1568.9	0	1568.9	2614.8
3	2496.0	998.4	1497.6	0	1497.6	2496.0
4	2406.8	962.7	1444.1	0	1444.1	2406.8
5	2347.4	939.0	1408.4	0	1408.4	2347.4
6	2477.8	991.1	1486.7	0	1486.7	2477.8
7	4019.2	1607.7	2411.5	0	2411.5	4019.2
8	6487.2	2594.9	3892.3	0	3892.3	6487.2
9	8963.8	3585.5	5378.3	0	5378.3	8963.8
10	11020.4	4408.2	6612.2	0	6612.2	11020.4
11	12494.9	4997.9	7496.9	0	7496.9	12494.9
12	13101.3	5240.5	7860.8	0	7860.8	13101.3
13	12957.2	5182.9	7774.3	0	7774.3	12957.2
14	12048.8	4819.5	7229.3	0	7229.3	12048.8
15	10469.7	4187.9	6281.8	0	6281.8	10469.7
16	8370.0	3348.0	5022.0	0	5022.0	8370.0
17	6273.8	2509.5	3764.3	0	3764.3	6273.8
18	4880.8	1952.3	2928.5	0	2928.5	4880.8
19	4367.9	1747.2	2620.8	0	2620.8	4367.9
20	4011.4	1604.5	2406.8	0	2406.8	4011.4
21	3714.2	1485.7	2228.5	0	2228.5	3714.2
22	3417.1	1366.8	2050.3	0	2050.3	3417.1
23	3179.4	1271.7	1907.6	0	1907.6	3179.4
24	2941.7	1176.7	1765.0	0	1765.0	2941.7

5.4 Sumatoria de cargas térmicas

La sumatoria se realizó teniendo en cuenta las dos configuraciones de silos, los resultados fueron los siguientes

Tabla 24.

Carga térmica total en cada silo central.

HORA	PAREDES EXPUESTAS AL SOL		PAREDES NO EXPUESTAS AL SOL		CUBIERTA DEL TECHO	CARGA TÉRMICA				
	[W]	[W]	[W]	[W]		TOTAL PAREDES Y TECHOS	TOTAL PAREDES Y TECHOS	CARGA TÉRMICA BIOLÓGICA DEL ARROZ	CARGA DE REFRIGERACIÓN DEL ARROZ	TOTAL
1	4452.7	14362.9	2733.7	21549.2	6.1	0.26	6.0	12.4		
2	4256.8	14111.9	2614.8	20983.5	6.0	0.26	6.0	12.2		
3	4065.7	13855.8	2496.0	20417.4	5.8	0.26	6.0	12.1		
4	3855.1	13587.7	2406.8	19849.6	5.6	0.26	6.0	11.9		
5	3642.7	13294.3	2347.4	19284.4	5.5	0.26	6.0	11.8		
6	3446.9	12993.8	2477.8	18918.6	5.4	0.26	6.0	11.7		
7	3276.4	12697.6	4019.2	19993.2	5.7	0.26	6.0	12.0		
8	3170.3	12408.9	6487.2	22066.3	6.3	0.26	6.0	12.5		
9	3194.5	12160.6	8963.8	24319.0	6.9	0.26	6.0	13.2		
10	3393.6	11994.9	11020.4	26408.9	7.5	0.26	6.0	13.8		
11	3709.0	11929.5	12494.9	28133.4	8.0	0.26	6.0	14.3		
12	4068.0	11971.5	13101.3	29140.7	8.3	0.26	6.0	14.6		
13	4417.7	12134.7	12957.2	29509.5	8.4	0.26	6.0	14.7		
14	4722.3	12409.9	12048.8	29181.0	8.3	0.26	6.0	14.6		
15	4945.4	12759.8	10469.7	28174.9	8.0	0.26	6.0	14.3		
16	5092.1	13162.4	8370.0	26624.5	7.6	0.26	6.0	13.8		
17	5198.1	13584.8	6273.8	25056.7	7.1	0.26	6.0	13.4		
18	5245.6	13984.2	4880.8	24110.6	6.9	0.26	6.0	13.1		
19	5223.4	14327.7	4367.9	23919.0	6.8	0.26	6.0	13.1		
20	5161.3	14589.8	4011.4	23762.5	6.8	0.26	6.0	13.0		
21	5073.6	14745.5	3714.2	23533.3	6.7	0.26	6.0	13.0		
22	4940.8	14785.7	3417.1	23143.6	6.6	0.26	6.0	12.9		
23	4791.1	14720.3	3179.4	22690.8	6.5	0.26	6.0	12.7		
24	4637.4	14573.1	2941.7	22152.2	6.3	0.26	6.0	12.6		

Tabla 25.

Carga térmica total en cada silo esquinero.

HORA	PAREDES EXPUESTAS AL SOL [W]		PAREDES EXPUESTAS AL SOL [W]		PAREDES NO EXPUESTAS AL SOL [W]		CUBIERTA DEL TECHO [W]		CARGA TÉRMICA TOTAL PAREDES Y TECHOS [W]		CARGA TÉRMICA TOTAL PAREDES Y TECHOS [TR]		CARGA TÉRMICA BIOLÓGICA DEL ARROZ [TR]		CARGA DE REFRIGERACIÓN DEL ARROZ [TR]		CARGA TÉRMICA TOTAL [TR]	
	EXPUESTAS AL SOL	EXPUESTAS AL SOL	EXPUESTAS AL SOL	EXPUESTAS AL SOL	EXPUESTAS AL SOL	EXPUESTAS AL SOL	TECHO	TECHO	Y TECHOS	Y TECHOS	ARROZ	ARROZ	DEL ARROZ	DEL ARROZ	DEL ARROZ	DEL ARROZ	TOTAL	
1	4452.5	8472.1	8770.8	2733.7	24429.1	6.9	0.26	6.0	13.2									
2	4256.7	8072.6	8617.5	2614.8	23561.6	6.7	0.26	6.0	13.0									
3	4065.5	7683.4	8461.1	2496.0	22706.0	6.5	0.26	6.0	12.7									
4	3855.0	7288.7	8297.4	2406.8	21847.9	6.2	0.26	6.0	12.5									
5	3642.6	6920.8	8118.2	2347.4	21029.0	6.0	0.26	6.0	12.3									
6	3446.9	6576.6	7934.8	2477.8	20436.1	5.8	0.26	6.0	12.1									
7	3276.4	6231.7	7753.9	4019.2	21281.2	6.1	0.26	6.0	12.3									
8	3170.2	5906.7	7577.5	6487.2	23141.7	6.6	0.26	6.0	12.9									
9	3194.5	5662.0	7426.0	8963.8	25246.2	7.2	0.26	6.0	13.5									
10	3393.5	5503.8	7324.8	11020.4	27242.4	7.7	0.26	6.0	14.0									
11	3708.8	5461.3	7284.8	12494.9	28949.8	8.2	0.26	6.0	14.5									
12	4067.8	5574.8	7310.4	13101.3	30054.3	8.5	0.26	6.0	14.8									
13	4417.4	5826.9	7410.1	12957.2	30611.6	8.7	0.26	6.0	15.0									
14	4722.0	6239.5	7578.2	12048.8	30588.6	8.7	0.26	6.0	15.0									
15	4945.1	6826.2	7791.9	10469.7	30032.9	8.5	0.26	6.0	14.8									
16	5091.8	7513.6	8037.7	8370.0	29013.1	8.2	0.26	6.0	14.5									
17	5197.9	8238.6	8295.7	6273.8	28005.9	8.0	0.26	6.0	14.2									
18	5245.3	8919.9	8539.5	4880.8	27585.6	7.8	0.26	6.0	14.1									
19	5223.1	9435.4	8749.3	4367.9	27775.7	7.9	0.26	6.0	14.2									
20	5161.1	9695.3	8909.3	4011.4	27777.0	7.9	0.26	6.0	14.2									
21	5073.4	9689.0	9004.4	3714.2	27481.1	7.8	0.26	6.0	14.1									
22	4940.6	9514.1	9029.0	3417.1	26900.8	7.6	0.26	6.0	13.9									
23	4790.9	9232.7	8989.0	3179.4	26192.0	7.4	0.26	6.0	13.7									
24	4637.3	8874.3	8899.1	2941.7	25352.4	7.2	0.26	6.0	13.5									

La carga térmica registrada como valor máximo para cada uno de los silos centrales es de 14.7 toneladas de refrigeración y en el caso del silo esquinero una carga de 15 toneladas de refrigeración.

Los silos se llenan progresivamente y con lentitud, ya que el llenado de los silos está limitado a la capacidad de secado de la planta que es de 156 ton/día aproximadamente, por lo que llenar un silo puede tardar varios días, y tener los cuatro silos llenos puede tomar varias semanas dependiendo el abastecimiento de arroz a la planta. Por esta razón, no es lógico dimensionar el equipo para soportar la carga de enfriar los 4 silos llenos, por términos de viabilidad económica se plantea que el equipo de refrigeración sea capaz de enfriar totalmente la masa de arroz de uno de los silos, y que dicha capacidad sea suficiente para cumplir con los ciclos de conservación de la temperatura (cuando los silos suban de nuevo la temperatura).

6. Dimensionamiento de Equipos y Parámetros de Funcionamiento

Esta sección aborda el proceso técnico mediante el cual se seleccionan los componentes principales en función de las necesidades específicas del proyecto, las condiciones operativas esperadas y los criterios establecidos, con el fin de minimizar el deterioro de grano, la proliferación de plagas y mantener o mejorar la calidad del grano almacenado.

6.1 Selección del equipo de refrigeración

Con base en la carga térmica total previamente determinada (15 Ton) se procede a seleccionar el equipo de refrigeración, el equipo debe ser capaz de reducir la temperatura del arroz hasta niveles seguros de conservación (14 a 18 °C), tener la capacidad de enfriar dos de los silos simultáneamente dentro de sus ciclos de refrigeración y suministrar el aire con una humedad

relativa de 50-55%, considerado el rango de humedad de equilibrio para las características de humedad y temperatura del grano almacenado.

Para este propósito específico (refrigeración de granos almacenados) ya se cuenta en el mercado con equipos especializados, que son capaces de regular tanto la temperatura y la humedad para suministrar aire a silos de almacenamiento, lastimosamente, Colombia aun no cuenta con una empresa que se dedique a fabricar estos equipos, pero si cuenta con comercializadoras y multinacionales que cubren las necesidades de la industria. Se realizó la selección y cotización del equipo en 3 empresas de diferentes características, siendo una de ellas una comercializadora de equipos de refrigeración, otra una multinacional con representantes en el país y una empresa extranjera y sin presencia en Colombia.

Como primera parte se presentan los equipos seleccionados de cada una de las marcas, se exponen sus características, algunas ventajas, desventajas y el costo de equipo incluyendo accesorios, envíos e impuestos. Datos necesarios para posteriormente realizar la matriz de selección.

6.1.1 Equipo marca Tailor Made Solutions (TMS) referencia TKS100

Tailor Made Solutions (TMS) es una empresa especializada en ofrecer sistemas de refrigeración industrial con presencia en diversos países, siendo Brasil el único país sudamericano donde tiene presencia la multinacional.

El equipo seleccionado tiene una capacidad de refrigeración de 100 kw, equivalente a 28.43 toneladas de refrigeración, capacidad que cumpliría el requisito de ser capaz de enfriar dos de los silos simultáneamente, este además es el equipo de menor capacidad comercializado por la marca, las características son las siguientes:

Figura 26.
Especificaciones equipo TKS100.

Especificaciones Técnicas TKS		
TKS 100		
Capacidad de refrigeración	Ton/Día	220 - 430
Capacidad de refrigeración del compresor	kW	100,00
Capacidad de calefacción	kW	24,00
Caudal de aire a 1000 Pa	m ³ /h	13.000
Presión estática máxima del aire exterior	Pa	6.000
Refrigerante	Type	R407C / R513A
Temperatura máxima de funcionamiento	°C	45
Cantidad/diámetro de la manguera de aire	Ø mm	1 x Ø 356
Consumo total de energía	kW	82,00
Corriente máxima total	A	175,00
Dimensiones (L x An x Al)	mm	4.600x1.550x2.500
Peso neto	kg	2.650
Fuente de alimentación	V/Ph/Hz	400/3/50

Nota. Captura de pantalla tomada por el autor del documento TKS Tablo. Disponible en: <https://tmsgrup.com/pdf/TKS-Tablo-ES.pdf>

Se solicitó una cotización formal escrita y el valor obtenido fue el siguiente.

Figura 27.
Cotización formal equipo TKS100.

TMS				
Product / Service Description	Quantity	Unit	Unit Price	Amount
TKS100	1,00	Pcs	59.325,00 EUR	59.325,00 EUR
			Total Amount	59.325,00 EUR
Scope of Supply				
TKS100				1 Pcs
Refrigerant charge in system				1 Set
Manuals				1 Pcs
Electrical project				1 Pcs
Packaging; overseas				1 Set
With Tyres				1 Set
Electrical heating				1 Pcs
Spare dust filter				1 Set
Condenser Cleaning tool				1 Pcs
Ø300mm 10m flexible air duct				1 Set
Hermetic Scroll compressor				1 Pcs
Remote control and monitoring by modbus				1 Pcs
Out of Scope				
All kind of installation processes				
Commissioning processes				
Delivery Type	: EXW, TMS-Istanbul			
Delivery Date	: 12-14 Weeks			
Packing Type	: Pallet Box (Complete Closed) - Aluminium barrier			
Payment Terms	: 30 % With order			
	: 70 % With when order ready for dispatch			
Currency	: EUR			

Nota. Captura de pantalla tomada por el autor de una cotización enviada por TMS. El documento completo se encuentra en el

Apéndice A.

En la cotización se presenta el valor del equipo en euros y los accesorios que incluye, la cotización completa con todos sus términos y condiciones se encuentra en los anexos del documento, en ella se explica que la empresa no se encarga de enviar el equipo, sino que entrega el equipo en su fábrica, que en este caso es su sede de Estambul y el envío debe ser gestionado y costado por el cliente encargándose del transporte internacional, tramites de importación y exportación, seguros y aduanas y el transporte nacional hasta el destino, este es un factor relevante a tener en cuenta a la hora de comparar con otras marcas.

Otro factor importante es que TMS al no tener representación en el país no se compromete a realizar los servicios técnicos, suministro de repuestos u reparaciones al equipo, factor que es clave y que lo deja en inferioridad por lo menos en lo que a servicio postventa se refiere.

6.1.2 Equipo marca COOLSEED referencia GCH20

CoolSeed es una empresa brasileña especializada en el desarrollo de tecnologías para el manejo postcosecha de granos y semillas, dentro de su portafolio incluyen los refrigeradores de granos y sus diseños están enfocados en climas tropicales o subtropicales para suplir el mercado latinoamericano.


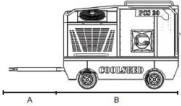
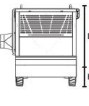

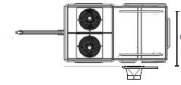



Dentro de su lista de productos tienen dos equipos que podrían suplir la carga del caso de estudio, el primero, el GCH20, que tiene una capacidad frigorífica de 80 kW, equivalente a 22.74 toneladas de refrigeración, y el segundo el GCH40, con capacidad de 150 kW, equivalente a 42.65 toneladas de refrigeración.

Comparando las capacidades con el valor de la carga térmica combinada de dos silos que es 29.64 toneladas de refrigeración, se evidencia que la capacidad del GCH40 puede estar bastante

sobredimensionada, por lo que en términos de costos de adquisición y costos de operación la opción más viable es la selección del equipo GCH20.

Las características del equipo son las siguientes.

Figura 28. Especificaciones equipo GCH20.

EQUIPO DE AIREACIÓN ARTIFICIAL DE SILOS										
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GCH 20										
DATOS ELÉCTRICOS	Opciones para alimentación eléctrica		380 V	trifásico	50/60 Hz	SISTEMA DE AUTOMATIZACIÓN				
			440 V	trifásico	60 Hz	1. CLP con pantalla táctil 2. Inversor de frecuencia 3. Interruptores de activación y operación 4. Controladores digitales de temperatura				
	Potencia	29,8 kW	380 V	In (A)	53,3	 <p>Para una caída de tensión del 3% desde el cuadro alimentador hasta la máquina</p> <p>**Variación de tensión admisible +10% y -7%</p>				
	Distancia (m)		50	100	150					
	Sección del conductor / Cable AFUMEX 0,6/1 kv 3x(mm ²)		10	16	25					
	Sección del conductor tierra/ Aterramiento		10	16	16					
	Sección del conductor / Cable AFUMEX 0,6/1 kv 3x(mm ²)		10	16	25	<p>La tecnología touch screen facilita la visualización de la información, con una navegación intuitiva y registro de incidencias.</p>				
Sección del conductor tierra / Aterramiento		10	16	16						
Aterramiento < 5 Ohm										
CAPACIDAD FRIGORÍFICA					80 kW	60.606	Kcal/h			
DESEMPEÑOS ESPERADOS	Silos 1800(t)	Ref. Dinámico (t/h)		Ref. Estático (t/24h)			Para un aumento de temperatura de 12 a 15°C en la masa de semillas. El rendimiento depende de las condiciones ambientales (ecuatorial, tropical o subtropical) y otras condiciones de almacenamiento			
		Caliente/Moderado	Frio	Caliente	Moderado	Frio				
		4	5	6	100	135	170			
Consumo de energía eléctrica (KWh/t)		3 a 5		5	3	1,5				
Unidad condensadora	Dos circuitos frigoríficos independientes, con filtros secadores y acumulador de succión.				Condensación por aire mediante dos ventiladores axiales de 1550W/1/60 o 50 Hz controlados automáticamente por la presión de condensación.					
	Dos compresores tipo hermético, alternativo o rotativo, de 5 HP cada uno, con gas R438A o R22.				Dos serpentineras aletadas de aluminio con una etapa independiente, circuitos frigoríficos y colectores de tubos de cobre.					
Unidad evaporadora	Dos circuitos frigoríficos independientes, con válvulas de expansión termostáticas y acumulador de succión.				Expansión directa en dos etapas mediante serpentín, ventilador centrífugo tipo Limit Load de alta eficiencia, con flujo y presión variables de 0 a 100%.					
	Dos serpentineras aletadas de aluminio con dos etapas independientes, válvula de expansión termostática, circuitos frigoríficos y colectores de tubos de cobre.									
Protecciones eléctricas		Sub y sobretensión		Falta de fase		Sobrecorriente y cortocircuito				
Protecciones mecánicas		Baja presión		Alta presión		Descongelamiento				
Datos dimensionales	Diametro ducto (mm)		500		Rodas aro		10 "			
	Peso total (Kg)		1640		El equipo es móvil y debe instalarse sobre una superficie nivelada al aire libre, sin obstrucciones para el aire de condensación, y debe estar conectado a tierra (con una resistencia menor a 5 Ohms).					
	DIMENSIONES (mm)									
	A	B	C	D	E	AMV	Minima	Recomendada		
	1290	3670	2055	1795	600		8	12		
VISTAS LATERAL X FRONTAL X SUPERIOR										
										
										
										
REVISION 12/07/2024										
EQUIPO EN CONFORMIDAD CON LAS NORMAS NR10 Y NR12										

Nota. Captura de pantalla tomada por el autor de un documento enviado por COOLSEED. El documento completo se encuentra en el Apéndice B

El valor de la cotización formal es la siguiente.

Figura 29.
Cotización formal equipo GCH20.

Cool seed Ind. e Com. Ltda. Rodovia BR.277 km 611, N° 1.500, Marginal Sul - Distrito Industrial
 CNPJ: 04749583000109 CEP: 85825 - 000
 IE: 90250718 - 30 Fone: +55 45 3231 1677 / +55 45 99125 9433 Santa Tereza do Oeste -Paraná

OFERTA COMERCIAL N°: 2506/24 Fecha: Febrero - 12 -2025


COMPRADOR	ARROCERA SANTANDER			TELÉFONO:	+57 317 646 5117
E-MAIL	davidpinilla82@gmail.com				
DIRECCIÓN	Cra 15 No. 7-34	CIUDAD	Bucaramanga	CEP:	
RUC	9001694921	ESTADO/PAÍS:	Santander /Colombia	CONTACTO:	David Pinilla
RED ELECTRICA LOCAL		N° de Fases	TRIFASICA	VOLTS:	440 60 Hz
FORMA DE PAGO:	50% anticipo / 50% contra aviso de alistamiento eN		PLAZO DE ENTREGA: 90 días en fabrica. fabrica para despacho		
El plazo de entrega pactado arriba substituye el plazo de entrega típico listado abajo					
La validez de esta oferta comercial es de 10 días a partir de la fecha de su emisión.					

QT	MOD.	ESPECIFICACIONES/CAPACIDAD/UNIDAD	PRECIO (US)		
			UNITARIO	TOTAL	
01	GCH20	Equipo refrigerador de granos y semillas, marca COOL SEED, modelo PCS 20, de 60.606Kcal/h de capacidad frigorífica, expansión directa, condensación a aire, móvil, 440 V -60Hz, potencia electrica de 30.7KW. Se incluye dos tramos de ductos flexibles de 4 mt cada uno.	49.500,00	49.500,00	
VALOR TOTAL EX -FABRICA COOLSEED - BRASIL				49.500,00	
VALOR FLETE ESTIMADO BRASIL HASTA PTO DE CARTAGENA				6.325,00	
VALOR TOTAL CIF EQUIPO PTO DE CARTAGENA-COLOMBIA				55.825,00	
NOTA: SI EXISTE VARIACION EN EL VALOR DEL FLETE AL MOMENTO DEL DESPACHO ESTE DEBE SER ASUMIDO POR EL CLIENTE					
TOTAL				CINCUENTA Y CINCO MIL OCHOCIENTOS VENTICINCO DOLARES AMERICANOS	55.825,00

VENDEDOR	SILOS Y GRANELES INGENIERIA SAS			TELÉFONO:	573102540510
DIRECCIÓN	CRA 63 No. 22-45	CIUDAD:	Bogota	CEP:	
CNPJ	901263889-7	ESTADOPAÍS:	Cundinamarca / Colombia	CONTACTO:	Cesar Gonzalez

MODELO	DESCRIPCIÓN	PLAZO ENTREGA TÍPICO (DÍAS)	NCM
GCH	Equipo de aeración artificial de silos	60 a 90	313552
PCS	Equipo de aeración artificial de silos	60 a 90	1586410
SRF	Silos Refrigeradores	60 a 90	2600514
UTA	Unid. Tratamiento de aire	60 a 90	2600500
SMI	Secador de Multipla Intermilenia	120 a 150	3455804
SBJ	Secador de Bandejas	120 a 150	3202997
FOR	Horno de Fuego Indirecto	120 a 150	3383098
CLM	Climatizador Galpón Semillero	60 a 90	3263013
FTA	Cinta Transportadora de comas	De acuerdo con el proyecto	3763691
EL	Elevador de Comas	120 a 150	3763163
SE 3	Secador Estático Cool seed	120 a 150	3617171
SE 0	Secador Estático Cool seed	120 a 150	3617171
TMI	Transportador Móvil Inclinado	120 a 150	3620203
TC 10	Intercambiador de Calor	120 a 150	3632981
TC 20	Intercambiador de Calor	120 a 150	3632981

1) FORMA DE PAGO: 50% anticipo y 50% contra aviso de alistamiento
 2) VALIDAD DE LA OFERTA COMERCIAL: 15 (quince) días
 3) ENVIO Y MONTAJE A CARGO DEL CLIENTE


 FIRMA DEL REPRESENTANTE COMERCIAL

Nota. Captura de pantalla tomada por el autor de una cotización enviada por COOLSEED. El documento completo se encuentra en el Apéndice C.

La cotización muestra el valor del equipo en dólares americanos, algunos plazos de entrega y los costos de envío del equipo desde su fábrica en Brasil, los costos que no están incluidos son los impuestos de aduanas y el transporte desde el puerto de Cartagena hasta Bucaramanga. La empresa cuenta con representación en el país y tiene una amplia lista de servicios postventa, que van desde asesorías profesionales hasta servicios técnicos y comercialización de repuestos, esto se debe también a que la empresa al estar establecida en Brasil se cuenta con más facilidad y cercanía de la fábrica principal con la arrocería.

6.1.3 Equipo marca FRIGORTEC referencia GRANIFRIGOR GC140

Frigortec es una empresa alemana con una amplia experiencia en soluciones para el almacenamiento y conservación de productos agrícolas, Granifrigor es uno de sus equipos más reconocidos que consiste en un sistema de refrigeración móvil para granos como arroz, maíz, trigo y cebada.

Los productos Granifrigor vienen segmentados no por la capacidad frigorífica sino por la cantidad de arroz que es capaz de enfriar en un lapso de 24 horas, protegen mucho los datos técnicos de sus equipos de refrigeración, pero con la ayuda de su asesoría técnica, se le suministran los datos y ellos realizan el proceso de selección del equipo, el indicado es el equipo GC140 Europe, la empresa manifiesta que este equipo cuenta una capacidad frigorífica de entre 60 y 70 kW.

Los equipos están segmentados en Europe y Tropic, según la región donde va a funcionar, el GC140 solo está disponible en su versión Europe, pero se indica que la única diferencia es la relación ventilador/compresor, un equipo Europe funcionando en una región tropical va a tener un ventilador un poco sobredimensionado y podría interferir con el funcionamiento del sistema de deshumidificación, pero la empresa manifiesta que esto se controla mediante un variador de frecuencia integrado, por lo que no representa una problemática significativa.

Figura 30.
Especificaciones equipo GC140 Europe.

FRIGORTEC
Cooling to the point



GRANFRIGOR™	GC 40 Europe	GC 60 / 80 Europe Tropic	GC 140 Europe
Potencia entradora en 24 horas ¹⁰ [r/día]	30 - 45	55 - 120	140 - 220
Ventilador de aire frío			
Caudal volumétrico [m ³ /h] ¹¹	2.400	4.400	7.700
Presión [Pa] máxima ¹¹	3.200	3.400	4.700
Potencia nominal del compresor [kW] ¹²	11	20 - 25	32
Datos eléctricos *			
Potencia (promedio) [kW]	4,2	9	14
Amperaje máximo [A]	18	32 - 27	56
Valor de conexión eléctrica ¹³ [A]	32	32	63
Conexiones			
Ø mm conexión manguera de aire frío	300	300	300
Eliminación promedio de agua de condensación [l/h]	6	15	25
Ø [pulg] manguera de eliminación de agua de condensación	1/4	1/4	1/4
Dimensiones [L x A x H en mm]/ peso [kg]			
con neumáticos	3.450 x 1.350 x 1.750 / 600	3.370 x 1.320 x 1.750 / 700	3.420 x 1.330 x 2.245 / 950
con ruedas direccionables	2.050 x 950 x 1.570 / 550	2.230 x 990 x 1.700 / 450	2.520 x 1.130 x 2.085 / 660

Nota. Captura de pantalla tomada por el autor del documento de FRIGORTEC. Disponible en:

<https://media.graphassets.com/qudXeSmlQf2HFYFdLDUF>

Figura 31.
Cotización formal equipo GC140 Europe.

2. Precios y condiciones comerciales

Pos.	Descripción del artículo	Ud.	Moneda	Precio	Precio total
1	GRANFRIGOR™ GC 140 Europe con calentamiento eléctrico 460 V/3/50 Hz (según volumen de suministro)	1	EUR	52.600,00	52.600,00
Precios adicionales para opciones:					
2	Manguera de conexión flexible de aire frío (Ø300mm, longitud 3m)	1	EUR	500,00	500,00
4	Chasis (1 eje con neumáticos de goma)	0	EUR	2.900,00	0,00
6	Filtro de repuesto	4	EUR	25,00	100,00
7	Techo protector	EUR	Incluido		Incluido
11	Rejilla protectora contra animales	1	EUR	500,00	500,00
12	Termostato de invierno y verano	EUR	Incluido		Incluido
13	Control electrónico (Siemens S7)	EUR	Incluido		Incluido
14	Batería eléctrica de calefacción	EUR	Incluido		Incluido
16	Puesta en funcionamiento/instrucción: consultar	0	EUR	no incluido	no incluido
17	Controlador del orden de fases	1	EUR	220,00	220,00
18	Contador d'energía en Siemens S7	0	EUR	1300,00	0,00
20	Luz piloto de señalización	1	EUR	400,00	400,00
21	Cepillo para condensador	1	EUR	60,00	60,00
22	Alojamientos para caretila elevadora	1	EUR	500,00	500,00
23	Cable de conexión (7 m, clavija de enchufe CEKON)	1	EUR	400,00	400,00
24	Soporte para cable	1	EUR	130,00	130,00
25	Tapa protectora salida de aire frío	1	EUR	60,00	60,00
	Precio total		EUR		55.470,00
	Descuento comercial	20%	EUR		-11.094,00
	Precio de 1 GRANFRIGOR™ GC 140 Europe, según volumen de suministro, neto sin IVA, de la fábrica de Amzell. FCA (INCOTERMS		EUR		44.376,00
	Embalaje (con chasis / con ruedas)		EUR		2.000,00
	Transporte a Cartagena, sin descargar,		EUR		5.000,00
	Precio total de 1 aparato GRANFRIGOR™ GC 140 Europe, sin IVA, CIF Cartagena (INCOTERMS 2010), sin descargar		EUR		51.376,00

Condiciones de pago: 30 % tras la recepción de la confirmación del pedido
70 % antes de la entrega

Tiempo de entrega desde fábrica: actualmente unos 1-2 meses, sujeto a cambios

Nota. Captura de pantalla tomada por el autor de una cotización enviada por FRIGORTEC. El documento completo se encuentra en el Apéndice D.

La cotización presenta el valor del equipo en euros y los accesorios, algunos de ellos vienen incluidos y otros son opcionales con un costo adicional, a diferencia de las otras dos alternativas no incluye el chasis con ruedas, para movilidad, aunque esto no se considera un problema ya que el equipo se va a mantener en un lugar fijo, igual que la opción anterior, no incluye los costos de los impuestos de aduanas y el transporte nacional, la multinacional tiene representación en Colombia para consultas y asesoría pero para tema de repuestos tienen que ser importadas de Alemania, por lo que los costos de mantenimiento y repuestos puede ser bastante elevado.

6.1.4 Matriz de selección de equipo de refrigeración

Con el objetivo de seleccionar el equipo refrigerador de grano más adecuado para las condiciones operativas, logísticas y económicas del proyecto, se ha elaborado una matriz de selección entre las 3 alternativas consultadas.

La matriz considera criterios clave agrupados en 3 categorías.

1. Desempeño técnico del equipo (capacidad frigorífica y nivel de automatización)
2. Aspectos económicos y logísticos (precio del equipo, operación y mantenimiento).
3. Soporte postventa y trayectoria del fabricante (disponibilidad de repuestos, servicio técnico, garantías, renombre).

A cada criterio se le fue asignado un peso relativo de acuerdo con su importancia en el contexto del proyecto, posteriormente se le asignó una calificación de 1-5 a cada alternativa según el cumplimiento del criterio, el ponderado es la multiplicación de la calificación por el peso específico de cada criterio y el ponderado total permite visualizar de forma objetiva la opción más conveniente en función del conjunto de factores evaluados.

Tabla 26.

Matriz de selección de equipo de refrigeración.

CRITERIOS DE SELECCIÓN	MATRIZ DE SELECCIÓN DE EQUIPO DE REFRIGERACIÓN							
	PESO RELATIVO	TMS TKS100		COOLSEED GCH20		FRIGORTEC GC140		
		CALIFICACIÓN	PONDERADO	CALIFICACIÓN	PONDERADO	CALIFICACIÓN	PONDERADO	
CAPACIDAD FRIGORIFICA (Ton/24h)	15	5	75	4	60	3	45	
COSTO DE ADQUISICIÓN (ENVÍO E IMPUESTOS INCLUIDOS)	14	2	28	5	70	4	56	
COSTO DE OPERACIÓN	14	2	28	4	56	5	70	
COSTOS DE MANTENIMIENTO	11	1	11	4	44	2	22	
GARANTÍA Y CLAUSULAS DE POSTVENTA	11	2	22	4	44	4	44	
NIVEL DE AUTOMATIZACIÓN	11	5	55	4	44	4	44	
DISPONIBILIDAD DE REPUESTOS	8	1	8	5	40	3	24	
SERVICIO TÉCNICO Y CAPACITACIÓN EN SITIO	8	1	8	4	32	4	32	
TRAYECTORIA Y RENOMBRE DEL FABRICANTE	8	2	16	4	32	5	40	
TOTAL PONDERADO	100		251		422		377	

Luego de aplicar la matriz de selección, el equipo CoolSeed GCH20 resultó ser la opción más favorable para el proyecto. Su selección se sustentó principalmente a su menor costo de adquisición y en el hecho de que CoolSeed cuenta con la mayor cobertura de servicio técnico y soporte en el país, lo que representa una ventaja significativa al minimizar los costos asociados al mantenimiento, disponibilidad de repuestos y atención posventa.

6.2 Sistema de extracción

Tal como lo dice su nombre el sistema seleccionado para este proyecto (sistema push-pull), consta de un equipo que inyecta aire frío por la parte inferior del silo y un sistema que le ayuda a superar la resistencia del grano en la parte superior expulsando el aire caliente, sin embargo, según Isilar (s.f.), el sistema de extracción superior solo se usa para algunos casos específicos como silos de gran altura (más de 20 metros), alta compactación del grano (grano con alto nivel de impurezas y polvo) o condiciones de flujo dificultoso, en casos donde no se presente ninguna de estas características el flujo de aire suministrado por el equipo de refrigeración es más que suficiente.

En este caso no se presenta ninguna de estas características, ya que los silos tienen una altura de 14 metros, bastante inferior a los 20 metros que se presentan como caso especial y tampoco se presenta la segunda característica, ya que el arroz pasa por varias etapas de limpieza tanto de tamizado como de eliminación de polvo mediante turbinas antes de llegar a los silos de almacenamiento. Por lo que para este proyecto no se hace necesaria la utilización de un extractor en la parte superior.

6.3 Sistema de distribución externo de aire frío

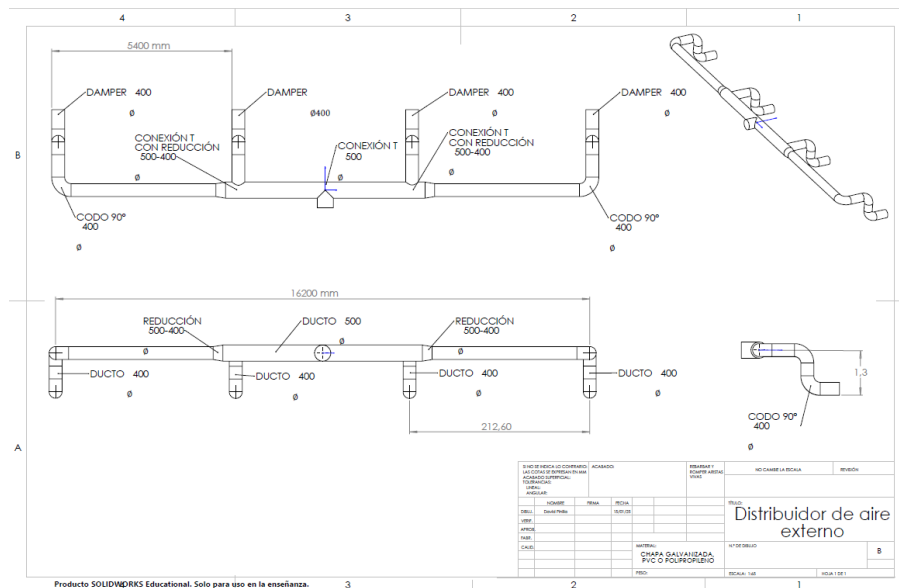
El sistema de distribución externo de aire frío se refiere al conjunto de conductos que transportan el aire frío generado por el equipo de refrigeración hasta las entradas de los 4 silos de almacenamiento, este sistema no contempla la distribución de aire frío dentro de los silos. Este sistema está compuesto por un ducto principal y unas ramificaciones que se dirigen hacia cada silo que poseen cada una de ellas una válvula damper para abrir o cerrar el paso de aire hacia los silos que van a estar en el ciclo de enfriamiento.

Los ductos se definieron con algunas recomendaciones del servicio de asesoría técnica especializada de CoolSeed, que es el fabricante del equipo seleccionado, se recomendó utilizar un ducto principal de 500mm (mismo diámetro de la salida de aire del equipo), con las ramificaciones que va a la entrada de los silos de 400mm.

El plano de la tubería modelado en Solidworks es el siguiente.

Figura 32.

Plano del sistema de distribución externa de los silos.

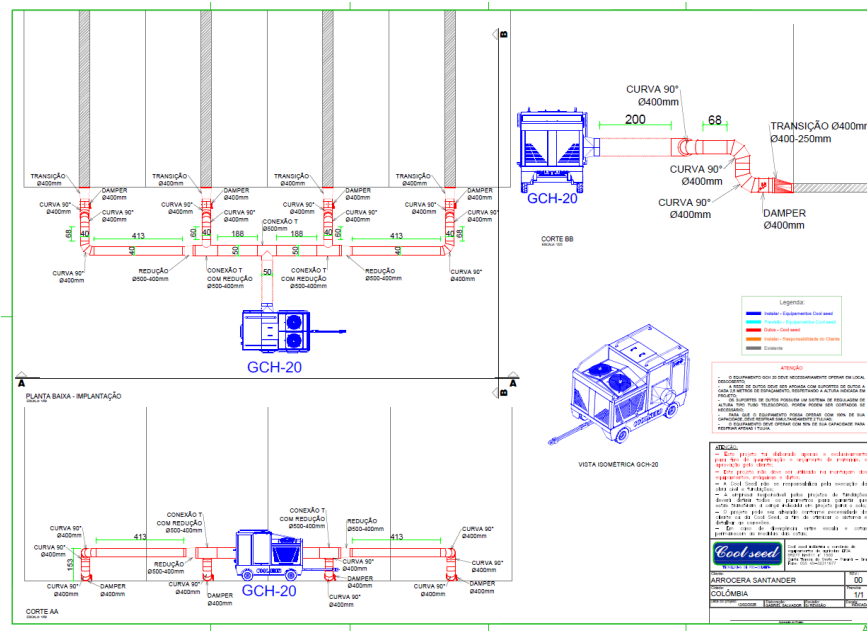


Nota. Plano elaborado por el autor. El documento completo se encuentra en el Apéndice E.

Durante el diseño de la tubería de conducción de aire externa se evaluaron como alternativas la tubería en material termoplástico (PVC o polipropileno) o ductos en chapa metálica galvanizada. La alternativa más opcionada era el material termoplástico, ya que este material en principio es más económico además de ofrecer un poco más de aislamiento térmico comparado con la chapa galvanizada, pero consultando el mercado actual no se consigue fácilmente ducto de estas dimensiones (superior a las 10") y mucho menos accesorios como uniones, ramificaciones en T, codos o los damper requeridos, por estas razones se optó por utilizar chapa galvanizada.

Se envió el diseño a CoolSeed ya que debe ser autorizado y evaluado por su equipo de trabajo y se recibió el siguiente plano final con el modelo 3D del equipo de refrigeración.

Figura 33. Plano del sistema de distribución externa incluyendo el equipo de refrigeración.



Nota. Captura de pantalla tomada de plano enviado por COOLSEED. El documento completo se encuentra en el Apéndice F.

Se solicitó la cotización a la empresa SESCAS SAS por recomendación del fabricante, ya que esta empresa ya ha realizado instalaciones anteriores para equipos de refrigeración CoolSeed en Colombia, la cotización se muestra a continuación.

Figura 34.

Cotización sistema de distribución externa de los silos.

Datos Cliente		Datos Cotización		
Nombre: Silos y graneros		Objeto: Suministro e instalación		
Nit: 901.263.889-7		Tiempo de Entrega: 30 días		
Ciudad: Aguazul, Casanare		Forma de Pago: Anticipo 50% contraentrega 50%		
Teléfono:		Ciudad: Aguazul, Casanare		

Item	Descripción	Cant.	Vr. Unitario	Vr. Total
1	SUMINISTRO E INSTALACION DUCTERIA ESTATICA PARA EQUIPO COOL SEED GCH20 (SEGÚN PLANO ENVIADO POR FABRICA)	1	\$ 48.767.857,00	\$ 48.767.857,00
SUBTOTAL				\$ 48.767.857
IVA 19%				\$ 9.265.893
TOTAL				\$ 58.033.750

TERMINOS Y CONDICIONES
Esperamos que los productos y servicios cotizados sean de su interés nos ponemos a su entera disposición para resolver cualquier inquietud.

GRACIAS POR CONFIAR EN NOSOTROS!

NOTA: NO ESTAMOS COTIZANDO SISTEMA DE AIREACION DE CADA BOEDGA INTERNA QUE DEBEN SER SUMINISTRADOS POR EL CLIENTE.

Nota. Captura de pantalla tomada por el autor de una cotización enviada por SESCAS S.A.S. El documento completo se encuentra en el Apéndice G.

Esta cotización incluye la fabricación e instalación del diseño del plano, incluyendo soportes para los ductos cada 2.5 metros y la perforación en la pared del silo para la entrada de los ductos.

Adicional a esta cotización se debe sumar el aislamiento térmico para los ductos, ya que al estar transportando aire frío y estar expuestos al aire ambiente, si no se instala aislamiento se generaría una ganancia de calor significativa y esto recaería en mayor consumo energético y menor eficiencia de la refrigeración.

Figura 35.

Aislamiento térmico para las tuberías.



Nota. Captura de pantalla tomada por el autor de la página de INSULMARKET. Disponible en:

<https://insulmarket.com/producto/rollo-fibra-de-vidrio/>

Figura 36.

Cotización aislamiento térmico para las tuberías.

Tu pedido	
Producto	Subtotal
Rollo Fibra de Vidrio - Rollo - 1.22m x 15.24m x 2.50in × 2	\$459.282
Subtotal	\$459.282
Envío	<input type="radio"/> Recoge en Planta Copacabana, Antioquia <input type="radio"/> Recoger en Bodega Fontibón Bogotá <input checked="" type="radio"/> Acuerda el Flete y la entrega con Insulmarket
iva	\$87.264
Total	\$546.546

Nota. Captura de pantalla tomada por el autor de la página de INSULMARKET. Disponible en:

<https://insulmarket.com/producto/rollo-fibra-de-vidrio/>

6.4 Sistema de suministro interno de aire frío

El sistema de distribución de aire dentro del silo tiene como objetivo garantizar un enfriamiento uniforme en la masa del grano, promoviendo el flujo de aire desde la base hacia la parte superior, para esto se utilizan diferentes tipos de diseños y estructuras dependiendo de las necesidades del sistema.

A la hora de consultar se debe tener en cuenta que la base del silo no es totalmente plana, sino que tiene una ligera inclinación con una compuerta en el centro de la base por donde se realiza la descarga por gravedad, consultando las opciones presentes en el mercado se encontró con 3 posibles sistemas de distribución de aire.

- 1.Suelo perforado completo.
- 2.Canal semicircular perforado.
- 3.Canaletas perforadas rectangulares.

Se evaluaron las alternativas teniendo en cuenta costos, eficiencia y disponibilidad en el mercado local para tomar la mejor decisión, la explicación de cada una de ellas y su evaluación se encuentra a continuación.

6.4.1 Suelo perforado completo

Esta configuración consta de una estructura metálica que sostiene una lámina metálica perforada o rejilla que cubre la totalidad del piso del silo, permitiendo que el aire se distribuya uniformemente desde abajo sobre la masa del grano.

Figura 37.
Suelo perforado.



Nota. Tomado de la página de AGRIEXPO. Disponible en: <https://www.agriexpo.online/es/prod/mysilo-siloport/product-169799-160148.html>

Esta alternativa se puede adaptar a la geometría del fondo del silo, se coloca la estructura sobre el piso del silo y las canaletas sobre la estructura, quedando el suelo perforado con la misma inclinación del silo y dejando el espacio central de la compuerta de descarga.

Dado que se insufla el aire sobre toda el área del piso del silo esta alternativa garantiza una mejor eficiencia y uniformidad comparándola con las otras alternativas.

6.4.2 Canal semicircular perforado

El canal semicircular perforado es una lámina perforada moldeada en forma de medialuna con ondulaciones, estos canales se pueden unir entre sí para adaptarse a distintos tipos de silos, la forma semicircular hace aumentar el área de flujo de aire y junto con las ondulaciones otorgan mayor rigidez estructural para soportar la carga del grano almacenado.

Figura 38.
Semiducto perforado.



Nota. Tomado de la página de AGRIXPO. Disponible en: <https://www.agriexpo.online/es/prod/himel-maschinen-gmbh-co-kg/product-169265-27135.html>

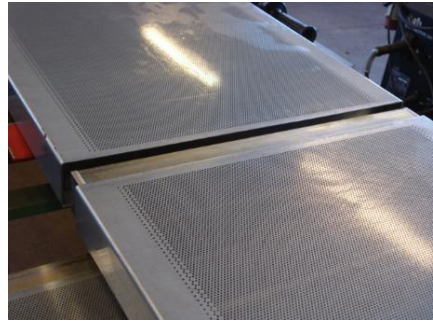
En el mercado local no se logró conseguir un proveedor o fabricante de esta clase de ductos standard, se tendrían que fabricar, pero por sus características de ser un canal ondulado y perforado no todas las empresas metalmecánicas están capacitadas para fabricarlo.

6.4.3 Canaletas perforadas

Las canaletas perforadas son elementos modulares construidos con lámina galvanizada perforada que se instalan directamente sobre el piso del silo, su diseño permite configurarlas en la geometría y cantidad que el silo requiera, además de ser una opción más sencilla en términos de construcción comparada con las anteriores propuestas al ser simplemente una lámina perforada doblada en forma rectangular o triangular.

Figura 39.

Canaletas perforadas rectangulares.



Nota. Tomado de la página de SILOZURI CEREALE. Disponible en: <https://siloz-cereale.ro/canale-galvanizate-aerare-cereale-plate-semicirculare-danemarca/>

Figura 40.

Canaletas perforadas triangulares.



Nota. Tomado de la página de PRADOSILOS. Disponible en: <https://pradosilos.com/es/sistema-ventilacion-para-silos/>

Figura 41.

Canaletas perforadas subterráneas.



Nota. Tomado de la página de PRADOSILOS. Disponible en: <https://pradosilos.com/es/sistema-ventilacion-para-silos/>

Analizando la funcionalidad de estos 3 tipos de canaletas se debe tener en cuenta que con cualquiera de ellas se tiene una menor eficiencia energética al no aprovechar la totalidad del área la base, haciendo que no haya una correcta distribución de temperatura.

6.4.4 Selección sistema de distribución interna de aire frío

Una vez explicadas las alternativas se optó por un suelo perforado en lugar de canaletas debido a su mayor eficiencia en la distribución del aire frío a través de la masa de grano. Esta configuración permite un flujo uniforme y vertical que maximiza el contacto del aire con el arroz, reduciendo el tiempo necesario para alcanzar la temperatura deseada.

Se intentó cotizar con empresas nacionales pero las pocas empresas que fabrican este tipo de componentes lo hacen únicamente para sus propios modelos de silos metálicos, no para silos ya existentes o de otros fabricantes, por lo que la cotización se realizó con una multinacional (Chief Industries) que tiene representación en Colombia, pero tiene sus fábricas en Argentina y EEUU, por lo que los costos son mayores por el envío e impuestos.

La cotización es la siguiente.

Figura 42. Cotización de suelo perforado completo.

CHIEF INDUSTRIES		Quote Number: 35088.2 Dealer Number: 103002 Quote Site: 09 Date: 4/10/2025 Customer Only Quote				
Cust Name: Arrocería Santander Cust Address: Bucaramanga, COLOMBIA Cust Phone: Cust Fax: Cust E-Mail:						
Project Title: Floors for Square Silos Project Site Location City: Bucaramanga State: Country: COLOMBIA Quote Number: 35088.2 Validity: 4/24/2025 Quoted By: Juan Pablo Merino Sales Person: Travys Woodside						
Part Num	Qty	Description	Unit Wt (Kg)	Unit Price(\$)	Ttl Wt (Kg)	Ttl Price(\$)
Full Floor Systems for four (4) Square Silos Floors for four (4) 5.4 meters x 9.5 meters rectangular silos, 14 meters tall.						
9746542	120	CHANNELLOCK PLANK,18GA,PERF,0.094,34"	2.31	13.74	277.60	1,648.77
9736660	1468	SUPT CHNLK CLS-13 16 GRN	1.53	4.97	2,249.72	7,289.50
9764423	52	FLASHING CHNLCK 96" FF	0.82	6.47	42.43	336.39
719427	520	SCREWF SD,#12X1.250,HWH,TEK3,PLTD	0.01	0.04	2.71	22.36
Equipment Total			2,572.46 Kgs			\$ 9,297.03
Container Loading Costs - 40' Standard Container						\$ 700.00
Insurance						\$ 32.21
Freight						\$ 5,000.00
Total Freight, Loading, and Insurance						\$ 5,732.21
Total System Price CIP Barranquilla, COLOMBIA						\$ 15,029.24

Nota. Captura de pantalla tomada por el autor de una cotización enviada por CHIEF INDUSTRIES. El documento completo se encuentra en el Apéndice H.

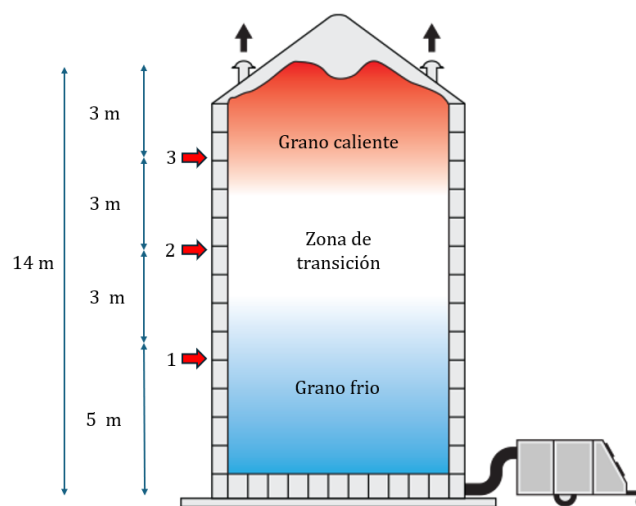
El valor se encuentra en dólares americanos, valor que está sujeto a cambios por el valor del dólar en el momento de la compra, la cotización completa se puede encontrar en los anexos del documento.

6.5 Sistema de termometría en silo

El proceso de medición y registro de temperaturas dentro del silo a diferentes alturas y ubicaciones se vuelve indispensable dentro del proceso de refrigeración de granos almacenados, esto debido a que se debe evaluar primeramente cómo disminuye la temperatura desde la base del silo hacia las capas superiores, y posteriormente una vez alcanzada la temperatura objetivo seguir con el monitoreo para saber en qué momento sube la temperatura por encima del rango y se debe encender de nuevo el equipo de refrigeración.

Por la altura de los silos y por la forma en que se van a enfriar los silos (por capas) no basta con un solo punto de medición, por lo que se definieron 3 alturas representativas a las que se medirá temperatura.

Figura 43.
Imagen de capas y puntos de medición.




Nota. Tomado de la página de CERREALTEC. Disponible en: <https://cerealtec.com/refrigeracion-de-granos/>

La primera capa (grano frío) se definió como 5 metros desde la parte de cálculo de cargas térmicas, y los otros dos puntos a 3 y 6 metros de dicho punto, ya que en estas zonas el enfriamiento avanza más lento.

Se realizó la cotización con la empresa INSTRUMATIC de un sistema de medición compuesto por un equipo principal multicontrolador-registrador marca SIMEX, referencia CMC99-42EE-DL. El sistema incluye una tarjeta de comunicación Ethernet, referencia ETU, que permite la transmisión remota y en tiempo real de los datos al computador del jefe de producción o a cualquier dispositivo al que se le instale el software. Además, se incorporan 12 sensores PT100 con bulbo de acero inoxidable SS304 de 10" x ¼" (distribuidos a razón de 3 por silo en las alturas especificadas), tarjetas RT4 para la conexión de los sensores al multicontrolador (cada tarjeta admite 4 entradas, por lo que se requieren 3 en total), y el cableado de 3 hilos con recubrimiento en PVC necesario para vincular los sensores PT100 al punto de recolección de datos.

La cotización es la siguiente.

Figura 44.
Cotización sistema de termometría.



INSTRUMATIC
OPTIMIZANDO SU INDUSTRIA

Instrumentos y Automatismos SAS
Calle 93 # 15-73 oficina 502
(571) 9160040
ventas@instrumatic.com.co
Bogota Colombia

FECHA: 2025-04-29 COTIZACION No. CT-1156498

Cliente: INVERSIONES RESTREPO LTDA Contacto: David Pinilla Dirección: CL 5 13 41 Celular: 573213927109 Tiempo de entrega: 60 dias	Nit: 804009825 Cargo: Ingeniero de Mantenimiento Email: davidpinilla0822@gmail.com Ciudad: Bucaramanga Forma de Pago: 0; Dias	
--	--	--

Aplicacion: MONITOREO TEMPERATURA EN SILOS DE ARROZ

ITEM	PRODUCTO	DESCRIPCIÓN	CANT	VALOR UNITARIO	DTD.	DESCUENTO PRODUCTO	VALOR TOTAL
1	71-1674	CMC99-4ZEE-DL, 4 SLOTS, RS485, USB FRONT, MULTICONTROLADOR-REGISTRADOR.	1	USD 1.190	8 %	USD 95	USD 1.095
2	71-0566	RFA, TARJETA 8X PT 100, ENTRADAS PARA MULTICONTROL CMC	3	USD 310	8 %	USD 74	USD 856
3	71-0626	ETU, TARJETA COMUNICACION ETHERNET, 10MB USB HOST PARA CMC	1	USD 347	8 %	USD 28	USD 319
4	41-0500	ENSAMBLE PT100, BULBO 10" x 1/4" x 1/2"NPT, SS304, CAB. ALUM. PEQUEÑO, 220°C.	12	USD 66	8 %	USD 63	USD 729
5	77-1164	3 COND X AWG 24, CABLE PVC, 2R 18, MAX 105°C/ 300V	140	USD 5	8 %	USD 56	USD 644

OBSERVACIONES
MONEDA DOLLAR.
CONDICIONES DE PAGO SUJETOS A NEGOCIACION. OPCION 1: 50 % PARA ORDEN Y 50% PARA ENTREGAR.

SUBTOTAL : USD 3.643
IVA (19,0 %) : USD 692
VALOR TOTAL : USD 4.335

Nota. Captura de pantalla tomada por el autor de una cotización enviada por INSTRUMATIC. El documento completo se encuentra en el Apéndice I.

El valor se encuentra en dólares americanos, valor que está sujeto a cambios por el valor del dólar en el momento de la compra, la cotización completa se puede encontrar en los anexos del documento.

7.Viabilidad Técnica

La viabilidad técnica del proyecto fue evaluada con base en la capacidad de implementación del sistema de refrigeración en silos de almacenamiento de arroz paddy de una empresa en Bucaramanga. El sistema busca reducir la temperatura del grano almacenado de 38°C a 14°C (temperatura en la base del silo, se espera una variación de temperatura de 2°C entre la capa inferior y superior del silo), con el fin de reducir pérdidas, conservar la calidad del grano y evitar infestaciones o desarrollo de hongos.

7.1 Descripción del sistema seleccionado

Se seleccionó un sistema de refrigeración capaz de controlar temperatura y humedad con una capacidad frigorífica de 80 kW, con un flujo de aire de entre 10000 y 13000 m^3/h con una presión máxima aproximada de 5000 Pascales, flujo de aire que se transporta a cada uno de los silos mediante ductos metálicos y controlado mediante dämpers en la entrada de cada silo. El aire frío será impulsado desde la base del silo a través de un suelo perforado de chapa metálica galvanizada calibre 18 con orificios de 0.094 in, lo cual permite una distribución uniforme de la temperatura que se monitorea mediante un sistema de sensores multipunto instalados a distintas alturas y con supervisión remota.

7.2 Requerimientos técnicos y operativos

El sistema requiere una alimentación eléctrica de 440 V a 60 Hz, con una potencia instalada total de 29.8 kW (según la ficha técnica del equipo). Requiere un espacio 2 metros desde la pared de los silos para la instalación de la tubería y un espacio de 5x3x3 metros en una zona cercana a los silos de almacenamiento el equipo de refrigeración. La operación y mantenimiento pueden ser realizados por el personal actual con entrenamiento básico en sistemas de refrigeración y monitoreo.

Los equipos seleccionados son de fabricación comercial, cuentan con soporte técnico en Colombia, y han sido utilizados previamente en instalaciones similares, lo cual garantiza su funcionalidad y facilidad de mantenimiento.

7.3 Conclusión técnica

Con base en la selección de equipos, disponibilidad de tecnología, condiciones de instalación y capacidad operativa, se concluye que el proyecto es técnica y operativamente viable. La solución propuesta es factible dentro del contexto local y permite alcanzar los objetivos de conservación y calidad del grano.

8. Viabilidad Económica

El análisis de viabilidad económica busca determinar si la inversión en un sistema de refrigeración para los silos de almacenamiento de arroz paddy de estas dimensiones es financieramente rentable. Esta evaluación abarca los costos iniciales del proyecto, los gastos operativos anuales y los beneficios económicos que se obtienen al reducir las pérdidas por deterioro, mejorar la calidad del grano y optimizar la capacidad de almacenamiento. A partir de estos factores, se calcula el período de recuperación de la inversión y el retorno económico esperado, lo que proporciona a la empresa una herramienta objetiva para tomar decisiones informadas sobre la implementación del proyecto.

8.1 Costos operativos actuales

Los gastos operacionales presentes en la planta abarcan varios componentes para la gestión del arroz almacenado como la compra de elementos utilizados como planes de contingencia y preventivos contra la infestación de plagas, así como costos de operación de equipos actuales instalados en los silos.

8.1.1 Costo de fumigación preventiva

Como primer costo se tiene la aplicación de un pesticida en forma de aspersion para limpiar los silos previo al almacenamiento del arroz, asegurando que las superficies estén exentas de plagas antes de ser almacenadas con el arroz, la aplicación de este se hace en punto clave, como ductos, rendijas, grietas y la base del silo.

Se gasta aproximadamente un litro de pesticida por silo, cada uno tiene un costo aproximado de \$95.000 COP, el total para los 4 silos es de \$380.000 COP y al año al ser dos temporadas de almacenamiento serian \$760.000 COP.

8.1.2 Costo de operación de soplador

El segundo costo operacional se encuentra en el uso de un soplador utilizado como una estrategia poco eficiente para reducir la temperatura alta que trae el grano después del proceso de secado, el uso de este soplador no está programado o estipulado cuando y por cuanto tiempo utilizarlo, esto ya que no se tiene instalada ninguna forma para saber la temperatura interna en los silos, según información suministrada por los operadores y explicaron que usualmente se prende el soplador en jornadas de 6 horas y la cantidad de veces en que se activa es de 1-2 veces por cada tanda de llenado (usualmente un silo se llena en 5 tandas), por lo que se tomará un promedio de 8 tandas por cada silo para cálculos económicos.

El soplador tiene un motor WEG AL100L de 5 HP (3.725 kW) con corriente nominal de 6.45 A.

$$\textit{Tiempo total} = \# \textit{tandas} \cdot \# \textit{horas} = 8 \textit{ tandas} \cdot 6 \textit{ horas}$$

$$\textit{Tiempo total} = 48 \textit{ horas por silo}$$

La tarifa del kWh de la electrificadora de Santander ESSA en la empresa arrocera es de \$858.48 COP por kWh.

$$\text{Consumo} = 3.725 \text{ kW} \cdot 48 \text{ horas} = 178.8 \text{ kWh}$$

$$\text{Consumo} = 178.8 \text{ kWh} \cdot \$858.48 \text{ COP/kWh}$$

$$\text{Consumo} = \$153.496 \text{ COP por silo}$$

$$\text{Consumo total} = \$613.985 \text{ COP}$$

Se multiplica por las dos temporadas de almacenamiento en el año

$$\text{Consumo total} = \$1'227.970 \text{ COP al año}$$

8.1.3 Costo de fumigación correctiva

Como tercer costo adicional se encuentra el método de contingencia cuando un silo ya está infestado de gorgojo, el método consiste en aplicar fosfuro de aluminio que es un potente fumígeno utilizado en la industria ya que no deja residuos en los granos, se presenta como pastillas, pellets o tabletas y la entrar en contacto con el aire liberan un gas que es altamente tóxico, incluso para los humanos. El método de aplicación utilizado es colocarlo en unos tubos agujereados en la base del silo y dejar que hagan efecto, sin embargo, su uso no está arrojando los resultados esperados por varias razones, incluidas:

- Las dimensiones del silo hacen que el gas no sea capaz de propagarse por toda la masa de grano, haciendo que solo actúe contra totalmente a los insectos de las capas inferiores del silo.
- El gas solo actúa contra el insecto, mas no proporciona una protección al grano, por lo que al no matar todos los insectos el silo se vuelve a infestar en poco tiempo.

- Dicho gas producido al contacto con el aire es demasiado tóxico, y dado que los silos no son totalmente herméticos se debe aplicar en pequeñas cantidades.
- Tiempo de aplicación, dentro de las indicaciones se especifica que las pastillas liberan gas dentro de 48 a 72 horas, pero se recomienda dejar el espacio hermético por lo menos de 7-8 días para asegurar la efectividad del producto, pero en este caso, se aplican las pastillas y al no ser hermético el gas se escapa y no dura el tiempo recomendado en contacto con el producto.

La empresa realiza la fumigación distribuyendo un tarro de 500 tabletas (\$192.000 COP) entre los 4 silos, esto equivale aproximadamente a 350 gramos por silo, la fumigación se realiza aproximadamente 2 veces durante los 4 meses del tiempo de almacenamiento, por lo que el costo por temporada de almacenamiento es de \$384.000 COP y \$768.000 COP al año

8.2 Pérdidas existentes

8.2.1 Pérdida de masa seca por respiración.

En el proceso de almacenamiento, los granos de arroz mantienen una respiración suave, incluso en circunstancias secas. Este proceso metabólico genera dióxido de carbono (CO₂), agua y calor mediante el uso de las reservas internas del grano, en especial los carbohidratos, esto provoca una disminución de la masa seca y genera un dinero que se deja de ganar para la arrocera.

Para calcular esta pérdida, se emplea el modelo sugerido por (Seidel & Spadaro, 1976), el cual ha sido extensamente utilizado y mencionado en manuales técnicos como el de (Chakraverty, 2003) y que tiene como primer calcular la producción de CO₂ por respiración.

$$C = 10^{aM-b} \quad (13)$$

Donde:

C : producción de CO_2 en $mL/kg \cdot día$

M : contenido de humedad del grano (% base húmeda)

a y b : coeficientes empíricos

Según (Castaño, C. E., 1994), para arroz paddy seco:

$$a = 0.21; b = 3.04$$

Reemplazando:

$$C = 10^{(0.21 \cdot 12) - 3.04} = 10^{-0.52} = 0.30199 \cong 0.302 \text{ mL/kg} \cdot \text{día}$$

Posteriormente se calcula la pérdida de materia seca por cada kilogramo de grano almacenado, para esto se toma el dato de la (FAO, 1993) que explica que por cada mililitro de CO_2 producido se pierden 0.682 miligramos de materia seca en el arroz paddy.

Esto introducido en la siguiente ecuación de (Seidel & Spadaro, 1976) que propone la pérdida de materia seca inicial queda así:

$$DML_0 = \frac{0.682 \cdot C}{1000} \quad (14)$$

$$DML_0 = \frac{0.682 \text{ mg materia seca/ml } CO_2 \cdot 0.302 \text{ mL/kg} \cdot \text{día}}{1000} =$$

$$DML_0 = 0.000206 \text{ kg/dia}$$

Este valor multiplicado por la cantidad de kilogramos almacenados en los silos daría un valor de pérdidas de masa seca, pero no sería muy acertado con respecto a la realidad ya que la tasa de respiración no es la misma durante todo el tiempo de almacenamiento, sino que es mayor al principio y va disminuyendo progresivamente, por esto, (Seidel & Spadaro, 1976) proponen una ecuación exponencial que modela como es este proceso a lo largo del tiempo.

$$DML_{total} = \frac{DML_0}{k} \cdot (1 - e^{-kt}) \quad (15)$$

Donde:

DML_{total} : Pérdida de masa seca en el día [kg/dia]

DML_0 : Pérdida de materia seca inicial [kg/dia]

k : Constante de decaimiento [dia^{-1}]

t : Tiempo en días

Valores típicos para k según (Chakraverty, 2003) están entre 0.01 y 0.03. Se toma un valor intermedio conservador de 0.02. Reemplazando en la ecuación.

$$DML_{total} = \frac{0.000206}{0.02} \cdot (1 - e^{-(0.02 \cdot 120)})$$

$$DML_{total} = 0.009366 \text{ kg de masa seca / kg de masa almacenada}$$

$$Perdida\ total = 0.009366 \left[\frac{kg\ ms}{kg\ ma} \right] \cdot 390595 [kg]$$

$$Perdida\ total = 3658.31\ kg \cong 3.66\ ton\ por\ silo$$

Las pérdidas en los 4 silos son:

$$Perdida\ total = 0.009366 \left[\frac{kg\ ms}{kg\ ma} \right] \cdot 1562380.8 [kg]$$

$$Perdida\ total = 14633.25\ kg \cong 14.6\ ton$$

El porcentaje de pérdida sobre el total almacenado es:

$$porcentaje\ de\ perdida = \left(\frac{14633.25 [kg]}{1562380.8 [kg]} \right) \cdot 100 = 0.937\%$$

8.2.2 Pérdida por infestación de gorgojo

En el almacenamiento de granos, uno de los elementos más determinantes que influyen en la calidad y volumen del producto es la plaga de insectos. Los gorgojos del arroz, especialmente los pertenecientes a la familia Curculionidae, son vistos como una de las plagas más frecuentes y dañinas en los silos de arroz. Estos insectos producen calor metabólico y causan la disminución directa de la masa del grano al alimentarse de este, además de promover el crecimiento de hongos y bacterias secundarios.

En esta sección se evalúa numéricamente la disminución de la masa seca de arroz guardado en un silo, atribuida a la actividad de estos insectos.

La Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, s.f.) señala que las pérdidas provocadas por gorgojos y otras plagas pueden fluctuar considerablemente dependiendo

de la gravedad de la infestación, el tipo de insecto, el tiempo de conservación, la temperatura y la humedad. Para los gorgojos de arroz, los índices de pérdida reportados varían del 0.5% al 4% mensual, caracterizando estos valores como infestación leve e infestación grave respectivamente, para el caso de estudio se consideró una infestación leve tomando un valor de 1% ya que las estrategias de mitigación ayudan a que no pase a una escala mayor la infestación.

Se multiplica el valor de la masa de arroz almacenada en cada silo por el porcentaje de pérdidas por infestación por el número de meses de almacenamiento.

$$\text{Pérdidas por infestación} = 0.005 \cdot 390.595 \text{ Ton} \cdot 4 \text{ meses}$$

$$\text{Pérdida por infestación} = 7.81 \text{ ton por silo}$$

$$\text{Pérdida por infestación} = 31.24 \text{ ton en total}$$

8.2.3 Pérdidas reflejadas en dinero

Tras medir las pérdidas físicas en términos de masa seca y perjuicio por infestación, se requiere convertir estos valores a su impacto económico. Esta conversión posibilita determinar con más exactitud el costo verdadero que implican las pérdidas durante el proceso de almacenaje y postcosecha. Por esta razón, se toman en cuenta los costos de venta por kilogramo de los diferentes tipos de arroz vendidos (premium, normal y partido), además de su participación en la producción de la planta. Además, se considera un mínimo porcentaje de grano que, debido a imperfecciones de color u otros factores, no es adecuado para ser vendido.

Según datos estimados por la empresa, con los equipos instalados y el ajuste de las máquinas actual se tiene un porcentaje de conversión del 67%, lo que implica que, debido al proceso de descascarado, molienda y pulido del grano por cada 100 kg de arroz paddy almacenado, se consiguen 67 kg de arroz blanco. Después de la transformación, viene el proceso de selección

que es realizado por una seleccionadora automática que, por medio de unos sensores ópticos y unos inyectores de aire separan el arroz en calidad premium (7-8% de arroz partido), calidad normal (10-12% de arroz partido), arroz partido o arroz descartado (grano amarillento o negro no apto para el consumo humano).

Como primer paso se suma la cantidad obtenida como pérdida de masa seca y la pérdida por infestación y se multiplica por el porcentaje de conversión.

$$kg \text{ de pérdidas} = \text{Pérdida por infestacion} + \text{Pérdida masa seca}$$

$$kg \text{ de pérdidas} = 7810 \text{ kg} + 3658.31 \text{ kg}$$

$$kg \text{ de pérdidas} = 11468.31 \text{ kg por silo}$$

$$kg \text{ de grano perdido} = kg \text{ de pérdidas} \cdot \% \text{ de conversión}$$

$$kg \text{ de grano perdido} = 11468.31 \cdot 0.67$$

$$kg \text{ de grano de arroz} = 7683.77 \text{ kg por silo}$$

A esta cantidad se le resta el porcentaje de arroz que es desechado por la seleccionadora como no apto para venta o consumo que, de acuerdo con estimaciones internas es un valor cercano al 0.5%.

$$kg \text{ de grano malo} = kg \text{ de grano de arroz} \cdot \% \text{ de grano malo}$$

$$kg \text{ de grano malo} = 7683.77 \cdot 0.005 = 38.42 \text{ kg por silo}$$

$$kg \text{ de grano bueno} = kg \text{ de grano de arroz} - kg \text{ de grano malo}$$

$$kg \text{ de grano bueno} = 7683.77 \text{ kg} - 38.42 \text{ kg}$$

$$kg \text{ de grano bueno} = 7645.35 \text{ kg}$$

Este total de grano en buen estado, según los datos de producción, se distribuye de la siguiente manera dentro del portafolio de productos ofrecidos por la empresa.

Arroz premium (7 – 8 % de arroz partido) = 30% de la producción

$$\text{Precio comercial} = \frac{\$3400}{\text{kg}}$$

Arroz normal(10 – 12 % de arroz partido) = 55% de la producción

$$\text{Precio comercial} = \frac{\$3200}{\text{kg}}$$

Arroz partido = 15% de la producción

$$\text{Precio comercial} = \frac{\$1300}{\text{kg}}$$

El porcentaje de producción de arroz partido cabe aclarar que es la cantidad de arroz partido que queda como sobrante después de seleccionar toda la producción en premium y normal.

Se calcula la pérdida económica de cada una de las clases de arroz, multiplicándola por su porcentaje de la producción y posteriormente multiplicándolo por el precio.

$$\text{Pérdidas en dinero} = \text{kg de grano} \cdot \% \text{ producción} \cdot \text{precio} \quad (16)$$

$$\text{Pérdidas de arroz premium} = \text{kg de grano bueno} \cdot 30\% \cdot \$3400$$

$$\text{Pérdidas de arroz premium} = 7645.35 \text{ kg} \cdot 0.3 \cdot \$3400$$

$$\text{Pérdidas de arroz premium} = \$7'798.257$$

$$\text{Pérdidas de arroz normal} = \text{kg de grano bueno} \cdot 55\% \cdot \$3200$$

$$\text{Pérdidas de arroz normal} = 7645.35 \text{ kg} \cdot 0.55 \cdot \$3200$$

$$\text{Pérdidas de arroz normal} = \$13'455.816$$

$$\text{Pérdidas de arroz partido} = \text{kg de grano bueno} \cdot 15\% \cdot \$1300$$

$$\text{Pérdidas de arroz partido} = 7645.35 \text{ kg} \cdot 0.15 \cdot \$1300$$

$$\text{Pérdidas de arroz partido} = \$1'490.843$$

El total de pérdidas corresponde a la suma de las tres clases de arroz.

$$\text{Pérdidas económicas} = \$7'798.257 + \$13'455.816 + \$1'490.843$$

$$\text{Pérdidas económicas} = \$22'744.916 \text{ por silo}$$

Se multiplica por el número de silos presentes en la arrocera.

$$\text{Pérdidas económicas totales} = \$90'979.664$$

Estas pérdidas económicas están calculadas por los 4 meses de almacenamiento que dura el arroz en los silos antes de pasar a ser procesado, normalmente la planta hace este proceso dos veces por año que representan las dos temporadas de cosecha de arroz.

$$\text{Pérdidas económicas por año} = \$181'959.328$$

8.3 Costos de adquisición

La puesta en marcha de un sistema de enfriamiento para granos supone una considerable inversión en el proceso de actualización y adecuación del sistema de conservación postcosecha. Los gastos de compra abarcan todos los costos requeridos para implementar el sistema, que incluyen la adquisición del equipo principal, los componentes auxiliares, modificaciones de infraestructura necesarias en los silos, impuestos, los costos de importación para los equipos que

vienen del exterior (aranceles, gastos portuarios, agente de aduana y transporte nacional) y un rubro adicional destinado a imprevistos del 5%.

Los valores en cotizaciones que estaban en dólares se pasaron a pesos colombianos tomando la Tasa Representativa del Mercado (TRM) vigente el día 21 de abril de 2025, la cual fue de \$4.306,54 COP por USD.

Tabla 27.
Costos de adquisición del proyecto.

TABLA DE COSTOS ESTIMADOS DEL PROYECTO		
CATEGORIA	DETALLE	COSTO ESTIMADO (COP)
EQUIPOS PRINCIPALES	EQUIPO DE REFRIGERACIÓN	\$ 240,605,750.00
	DUCTOS DISTRIBUIDORES	\$ 58,580,296.00
	PISO PERFORADO	\$ 64,776,024.00
	TERMOMETRIA	\$ 18,668,850.90
COSTOS DE IMPORTACION (EQUIPO DE REFRIGERACION)	ARANCEL ADUANERO	\$ 0.00
	IVA	\$ 45,715,092.00
	GASTOS PORTUARIOS	\$ 4,800,000.00
	AGENTE DE ADUANA	\$ 2,200,000.00
COSTOS DE IMPORTACION (PISO PERFORADO)	ARANCEL ADUANERO	\$ 0.00
	IVA	\$ 12,307,420.00
	GASTOS PORTUARIOS	\$ 4,800,000.00
	AGENTE DE ADUANA	\$ 2,200,000.00
TRANSPORTE NACIONAL	CARTAGENA-BUCARAMANGA	\$ 6,000,000.00
INSTALACION Y OBRA CIVIL	FABRICACIÓN DE SOPORTES PARA LOS SENSORES	\$ 2,400,000.00
	MANO DE OBRA DE INSTALACION	\$ 4,000,000.00
	INSTALACION ELECTRICA	\$ 1,000,000.00
CONTINGENCIAS	IMPREVISTOS (5%)	\$ 23,402,671.65
COSTO TOTAL DE ADQUISICION DEL PROYECTO		\$ 491,456,104.55

Las cotizaciones de los costos de importación para los dos ítems que son traídos del exterior fueron realizadas con una empresa de importación, por lo que son costos reales no estimados. Para ambos casos no se tiene en cuenta arancel aduanero ya que tanto los equipos provenientes de Brasil (equipo de refrigeración) y Estados Unidos (piso perforado) ambos son cubiertos por tratados de libre comercio (TLC).

8.4 Costos de operación y mantenimiento proyectados

En el caso del sistema de refrigeración para silos de arroz, estos costos comprenden los recursos económicos necesarios para asegurar el funcionamiento de los equipos, así como las actividades requeridas para preservar su vida útil y desempeño. En este segmento se tuvo en cuenta

el consumo energético de los dispositivos, la calibración periódica de sensores y el mantenimiento anual del equipo de refrigeración.

8.4.1 Consumo energético del sistema

En el sistema de refrigeración de arroz almacenado que se planteó solo dos equipos representan un consumo energético, el equipo de refrigeración y el multicontrolador, los sensores y los accesorios del sistema de termometría no se consideran ya que estos se alimentan del mismo consumo del multicontrolador.

8.4.1.1 Consumo energético del equipo refrigerador.

El consumo del sistema de refrigeración esta dado por sus horas de operación, estas están especificadas para cada ciclo en la tabla 14, aunque de estos ciclos es importante aclarar que los tres primeros se realizan individualmente en cada silo ya que la carga térmica es más alta por la temperatura que tiene el arroz y los refuerzos de refrigeración se pueden realizar para 3 silos al tiempo, ya que la carga térmica es mucho más baja ya que no hay mucha diferencia de temperatura.

Una vez entendido esto se realiza la suma de las horas de trabajo de los 4 silos durante los 4 meses que se mantiene almacenado el arroz, para esto se calculan los tiempos por cada ciclo y para posteriormente sumarlos.

- **Ciclo 1.**

Durante dos días encendido continuo, trabajando de forma individual en cada silo una única vez, esto equivale a 48 horas por silo, lo que representa un total de 192 horas para los cuatro silos.

- **Ciclo 2.**

Durante tres días, el equipo opera con un ciclo de 12 horas encendido y 12 apagado, trabajando de forma individual en cada silo. Esto equivale a 36 horas de operación por silo a lo

largo de los tres días, lo que representa un total de 144 horas de funcionamiento para los cuatro silos.

- Ciclo 3.

Durante tres días, el sistema opera con un ciclo de 8 horas encendido y 16 horas apagado, trabajando de forma individual en cada silo. Esto equivale a 24 horas de operación por silo a lo largo de los tres días, lo que representa un total de 96 horas de funcionamiento para los cuatro silos.

- Ciclo 4.

Cada vez que la temperatura de la capa superior del grano supere los 18°C, se aplica un refuerzo de refrigeración con una duración de 8 horas. El equipo tiene la capacidad de realizar este refuerzo simultáneamente en tres silos. Se proyecta realizar tres refuerzos por semana, alternando entre los cuatro silos (en cada refuerzo se aplicaría a tres silos mientras uno permanece en reposo). Esto representa un total de 24 horas de operación semanal durante un período de 15 semanas, excluyendo la primera semana, que corresponde a los tres ciclos iniciales de enfriamiento. En conjunto, esto equivale a 384 horas de funcionamiento acumuladas para los cuatro silos.

La suma de los 4 tiempos daría un total de 816 horas de operación durante los 4 meses que se va a tener el arroz almacenado, junto con el valor del costo de la energía eléctrica y el consumo del equipo según la ficha técnica nos da el valor del consumo energético en pesos.

$$\text{Consumo refrigerador} = 29.8 \text{ kW} \cdot 816 \text{ horas} = 24316.8 \text{ kWh}$$

$$\text{Consumo refrigerador} = 24316.8 \text{ kWh} \cdot \$858.48 \text{ COP/kWh}$$

$$\text{Consumo refrigerador} = \$20'875.487 \text{ COP}$$

Este valor de consumo eléctrico vendrá repartido en los 4 meses que dura cada temporada de almacenamiento, pero el costo del primer mes de la temporada será significativamente más alto debido a que los primeros ciclos son los que más tiempo de operación requieren, el valor anual será el doble de esta suma.

$$\text{Consumo refrigerador} = \$41'750.974 \text{ COP al año}$$

8.4.1.2 Consumo energético del multicontrolador.

El multicontrolador permanecerá encendido de forma continua durante todo el período de almacenamiento. Suponiendo que un mes tiene 30 días, el total de funcionamiento durante los 4 meses de almacenamiento sería de 2.880 horas. Este tiempo se multiplica por su consumo eléctrico, que según la ficha técnica es de 20 W (0.02 kW), para obtener el consumo energético total durante el periodo.

$$\text{Consumo multicontrolador} = 0.02 \text{ kW} \cdot 2880 \text{ horas} = 57.6 \text{ kWh}$$

$$\text{Consumo multicontrolador} = 57.6 \text{ kWh} \cdot \$858.48 \text{ COP/kWh}$$

$$\text{Consumo multicontrolador} = \$49.449 \text{ COP}$$

Este valor vendrá repartido en partes iguales entre las facturas de energía de los 4 meses.

$$\text{Consumo multicontrolador} = \$98.898 \text{ COP al año}$$

8.4.2 Costo de calibración periódica de sensores

Aunque los sensores PT100 son reconocidos por su estabilidad y durabilidad, pueden presentar pequeñas desviaciones con el tiempo; por esta razón, se recomienda realizar calibraciones en períodos de entre 12 y 24 meses, según las condiciones de trabajo. En este caso, dado que no están expuestos a condiciones ambientales adversas, no son manipulados con

frecuencia, no enfrentan grandes fluctuaciones de temperatura y no se requiere una medición de alta exactitud, se puede optar por el intervalo más amplio, realizando la calibración cada 24 meses.

El costo de esta calibración, llevando los sensores al laboratorio y considerando la cantidad (12 sensores), oscila entre \$80.000 y \$100.000 por unidad. Se adoptará el valor más alto, lo que equivale a un costo total de \$1.200.000 COP.

Para expresar este valor en la misma unidad de tiempo que se utiliza en el análisis de pérdidas (al año) y considerando que se realizan dos ciclos de almacenamiento por año, el valor se dividirá entre 2. Esto indica que la calibración debe efectuarse una vez cada dos años de funcionamiento.

8.4.3 Costo de mantenimiento del refrigerador

Según información del fabricante (COOLSEED), el equipo requiere un mantenimiento anual de 3 días de duración realizado por el personal de la marca que consta de limpieza de filtros, mantenimiento de componentes eléctricos, lubricación de componentes mecánicos, pruebas de presión y estanqueidad, limpieza de intercambiadores de calor, calibración de sensores y prueba de arranque y funcionamiento. Este mantenimiento tiene un costo de \$5'000.000 COP, esto los primeros 3 o 4 años que el equipo no necesita repuestos, posteriormente se deben sumar el costo de los elementos de cambio (filtros, correas, recarga de refrigerante).

8.4.4 Sumatoria de costos de operación y mantenimiento.

La suma de todos los costos se aterriza a un periodo de un año, de manera que cada costo, independientemente de su frecuencia original, se ha ajustado para expresarse en función de este intervalo. Esto permite consolidar y comparar de forma coherente los diferentes gastos asociados

al sistema, garantizando que la evaluación económica refleje con precisión los costos por cada ciclo de almacenamiento.

$$\begin{aligned}
 & \text{Consumo operación y mtto} = \\
 & \text{Consumo refrigerador} + \text{Consumo multicontrolador} + \text{Calibración sensores} \\
 & + \text{Mtto refrigerador} \\
 & = \$41'750.974 + \$98.898 + \$600.000 + \$5'000.000 \\
 & \text{Consumo operación y mtto} = \$47'449.872 \text{ COP}
 \end{aligned}$$

8.5 Resumen de supuestos económicos

Tabla 28.
Resumen de supuestos económicos

RUBRO	DATO	VALOR	DESCRIPCIÓN
COSTOS OPERATIVOS ACTUALES	Costo de fumigación preventiva	\$ 760,000.00	Fumigación en la superficie interna del silo
	Costo de operación soplador	\$ 1,227,970.00	Soplador para bajar temperatura del arroz
	Costo de fumigación correctiva	\$ 768,000.00	Fumigación con fosforo de aluminio en casos de infestación de gorgojo
	TOTAL DE COSTOS OPERATIVOS ACTUALES	\$ 2,755,970.00	Costos operativos actuales que se eliminan con la implementación del sistema de refrigeración
PÉRDIDAS EXISTENTES	Pérdida de masa seca	\$ 123,914,303.00	Pérdida económica por disminución de masa seca por respiración de grano
	Pérdida por infestación de gorgojo	\$ 58,045,025.00	Pérdida económica por disminución de masa almacenada por infestación de gorgojo
	TOTAL DE PÉRDIDAS EXISTENTES	\$ 181,959,328.00	Pérdidas económicas que eliminan con la implementación del sistema de refrigeración
COSTOS DE ADQUISICIÓN	Costo de adquisición	\$ 491,456,104.00	Costo de adquisición del sistema de refrigeración de grano
	TOTAL DE COSTOS DE ADQUISICIÓN	\$ 491,456,104.00	Costo de adquisición del sistema de refrigeración de grano
COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO PROYECTADOS	Consumo energético del equipo refrigerador	\$ 41,750,974.00	Consumo de energía eléctrica del equipo refrigerador
	Consumo energético del multicontrolador	\$ 98,898.00	Consumo de energía eléctrica del multicontrolador
	Costo de calibración periódica de sensores	\$ 600,000.00	Calibración de los sensores PT100
	Costo de mantenimiento del refrigerador	\$ 5,000,000.00	Costos de mantenimiento anual del equipo de refrigeración COOLSEED
	TOTAL DE COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN	\$ 47,449,872.00	Costos de operación y mantenimiento proyectados del sistema de refrigeración

8.6 Tasa Interna de Retorno (TIR)

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es un indicador financiero que permite evaluar la rentabilidad de un proyecto de inversión, considerando todos los flujos de caja que este generará a lo largo de su vida útil. Se define como la tasa de descuento que iguala el valor presente de los

ingresos netos esperados con la inversión inicial, es decir, aquella tasa que hace que el valor presente neto (VPN) del proyecto sea igual a cero. Su principal utilidad radica en determinar la rentabilidad relativa del proyecto, facilitando la comparación con otras alternativas de inversión o con la tasa mínima aceptable de rendimiento establecida por la empresa. Un proyecto es financieramente viable cuando su TIR supera el costo de oportunidad del capital, lo que implica que genera un rendimiento superior al mínimo exigido (Sapag Chain, Sapag Chain, & Sapag, 2014)

La fórmula general para calcular la TIR es:

$$VPN = \sum_{t=1}^n \frac{\text{flujos de caja}_t}{(1 + TIR)^t} - \text{Inversión inicial} = 0 \quad (17)$$

VPN: valor presente neto

Flujos de caja: flujos de caja generados en el tiempo t

TIR: tasa interna de retorno

n: número de períodos del proyecto

Inversión inicial: monto invertido al inicio del proyecto

Para efectos del cálculo del TIR se tomaron en cuenta tres columnas.

- Ingresos: En esta sección entran los costos operativos actuales y las perdidas existentes ya que son dineros que se ahorrarán.
- Costos: En esta sección entran los costos de adquisición y los costos de operación y mantenimiento proyectados, ya que corresponden a la inversión inicial y el dinero para mantener el sistema en funcionamiento.

• Flujo de caja neto: Es el valor de la diferencia de los dos anteriores (ingresos-costos) y representa la verdadera cantidad de dinero que entra o sale de la empresa con la implementación del proyecto.

El TIR se calcula teniendo en cuenta la vida útil esperada del equipo, para equipos de refrigeración usualmente se considera una duración de 10 años, basada en prácticas comunes en la industria y en la importancia de un mantenimiento preventivo regular para prolongar la vida útil del equipo.

Tabla 29.

Tasa Interna de Retorno.

AÑO	INGRESOS	COSTOS	FLUJO DE CAJA NETO (INGRESOS-COSTOS)	DESCRIPCIÓN
0	\$ 0.00	\$ 491,456,104.55	-\$ 491,456,104.55	Inversión inicial (sin ingresos)
1	\$ 184,715,298.00	\$ 47,449,872.00	\$ 137,265,426.00	Ingresos (perdidas y costos evitados) menos costos operativos
2	\$ 184,715,298.00	\$ 47,449,872.00	\$ 137,265,426.00	Ingresos (perdidas y costos evitados) menos costos operativos
3	\$ 184,715,298.00	\$ 47,449,872.00	\$ 137,265,426.00	Ingresos (perdidas y costos evitados) menos costos operativos
4	\$ 184,715,298.00	\$ 47,449,872.00	\$ 137,265,426.00	Ingresos (perdidas y costos evitados) menos costos operativos
5	\$ 184,715,298.00	\$ 47,449,872.00	\$ 137,265,426.00	Ingresos (perdidas y costos evitados) menos costos operativos
6	\$ 184,715,298.00	\$ 47,449,872.00	\$ 137,265,426.00	Ingresos (perdidas y costos evitados) menos costos operativos
7	\$ 184,715,298.00	\$ 47,449,872.00	\$ 137,265,426.00	Ingresos (perdidas y costos evitados) menos costos operativos
8	\$ 184,715,298.00	\$ 47,449,872.00	\$ 137,265,426.00	Ingresos (perdidas y costos evitados) menos costos operativos
9	\$ 184,715,298.00	\$ 47,449,872.00	\$ 137,265,426.00	Ingresos (perdidas y costos evitados) menos costos operativos
10	\$ 184,715,298.00	\$ 47,449,872.00	\$ 137,265,426.00	Ingresos (perdidas y costos evitados) menos costos operativos
TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)			24.91%	

Para calcular la Tasa Interna de Retorno (TIR) de este proyecto, se utilizó la fórmula TIR de Excel, la cual permite determinar la tasa de descuento que iguala a cero el valor presente neto (VPN) de una serie de flujos de caja como lo expone la fórmula general.

La Tasa Interna de Retorno (TIR) del proyecto es de 24.91%, al compararla con la tasa del depósito a término fijo a 365 días, que según (Banco de la República, 2025) es de 9.72% (tasa representativa del mercado), se observa que el proyecto ofrece un porcentaje significativamente más alta. Esto sugiere que, si se elige el proyecto de refrigeración de arroz como medida de prevención de plagas y degradación de grano, se obtendría un retorno mucho mayor en comparación con la opción de colocar los fondos en un depósito a término fijo (CDT), lo que hace

que el proyecto sea financieramente atractivo, siempre y cuando los riesgos asociados sean gestionables y aceptables para la empresa.

8.7 Periodo de Recuperación (PR o Payback)

El Periodo de Recuperación (PR) o Payback como es llamado en algunos libros de ingeniería económica, es un indicador financiero que permite estimar el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial de un proyecto mediante los flujos de caja netos generados anualmente. Este criterio evalúa el riesgo y la liquidez del proyecto, ya que indica cuán rápido se recupera el capital invertido sin considerar el valor temporal del dinero. Su cálculo es sencillo cuando los flujos de caja son constantes, dividiendo la inversión inicial entre el beneficio neto anual (Sapag Chain, Sapag Chain, & Sapag, 2014).

$$PR = \frac{\text{Inversión inicial}}{\text{Beneficio anual}} \quad (18)$$

Sustituyendo los valores con los calculados en la tabla 30.

$$PR = \frac{491'456.104}{137'265.426} = 3.6 \text{ años}$$

El resultado obtenido indica que la inversión inicial del proyecto se recupera en un periodo aproximado de 3.6 años. Esto significa que, a partir de ese momento, los flujos de caja generados representan beneficios netos para la empresa, ya que se habrá cubierto completamente el capital invertido.

9. Conclusiones

- El análisis de cargas térmicas evidenció que la mayor ganancia de calor en los silos proviene de la cubierta metálica debido a su alta exposición solar y baja capacidad aislante. El silo esquinero es el que mayor carga térmica representa por la influencia de la radiación solar en sus dos paredes expuestas al sol, dichas cargas sumadas a la carga biológica y la carga de enfriamiento del arroz, arroja una carga térmica total de 15 Toneladas de refrigeración, dato que representa los requerimientos térmicos reales del sistema.
- Con base en la carga térmica total estimada y las condiciones de operación requeridas, se evaluaron tres opciones comerciales de equipos de refrigeración, se selecciona un equipo de la marca Coolseed de 22 TR que cumple con los requerimientos de la capacidad y demás condiciones operativas. Además, se optó por un sistema de distribución de aire de piso perforado, acompañado de un sistema de distribución en ductos galvanizados y un sistema de termometría para el monitoreo del proceso.
- El proyecto demostró una viabilidad técnica sólida, al integrar un sistema de refrigeración capaz de mantener temperaturas internas cercanas a 14 °C. En el aspecto económico, se identificó que la implementación del sistema reduciría significativamente las pérdidas de masa seca por respiración del grano y por infestación de plagas. El análisis financiero proyecta un retorno de inversión (ROI) del 24.95% y un periodo de recuperación de menos de 4 años, validando la propuesta como una alternativa sostenible y a tenerse en cuenta para su implementación en la industria arrocera.

Referencias Bibliográficas

- Banco de la Republica. (2025). *Suameca.banrep.gov*. Obtenido de Estadísticas económicas: <https://suameca.banrep.gov.co/estadisticas-economicas/#!/informacionSerie/220003/Tasas%20de%20inter%C3%A9s/DTF>
- Castaño, C. E. (1994). *Manual de poscosecha del arroz*. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias. INIAP.
- Chain, S. (2014). *Preparación y evaluación de proyectos*. McGraw-Hill.
- Chakraverty, M. R. (2003). *Handbook of Postharvest Technology: Cereals, Fruits, Vegetables, Tea, and Spices*. Marcel Dekker.
- Chung, J. H. (1989). *Modeling, Simulation, and Automatic Control for Optimum Drying*. Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College.
- De lucía, & Assennato. (1993). *Manejo y tratamiento de granos*.
- FAO. (s.f.). Obtenido de Insect pests of stored products: <https://www.fao.org/4/x5036e/x5036E0y.htm>
- FAO. (1993). *Grain Storage Techniques: Evolution and Trends in Developing Countries*. *FAO Agricultural Services Bulletin*. No 109.
- FAO. (2013). *Grain Storage Techniques Evolution and Trends*.
- FAO. (s.f.). *Insect pests of stored products*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Fuentes, D. A. (2024). Documento en Excel para el cálculo de cargas térmicas. *Archivo no publicado*. Bucaramanga, Colombia.
- García, A. (2020). *Arroz paddy: Preservación y tratamiento de granos almacenados*. Universidad Técnica De Babahoyo-Ecuador.
- Isilar. (s.f.). *Aireación*. Obtenido de <https://www.isilar.com.ar/es/aireacion.html>
- Muñoz Cisternas, R. (2003). *Manejo de poscosecha de arroz*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Navarro, S., & Noyes. (2001). *The mechanics and physics of modern grain aeration Management*.
- Pinazo, J. (1999). *Manual de climatización: cargas térmicas*. Tomo 2. Universidad Politécnica de Valencia & Instituto Politécnico Nacional.
- Sánchez, M., & Santiesteban, G. (2021). *Sistema de supervisión y control de temperatura para un silo de almacenamiento de arroz en la molinera Molinor* –. Perú: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

- Sapag Chain, N., Sapag Chain, R., & Sapag, J. M. (2014). *Preparación y evaluación de proyectos*. McGraw Hill.
- Seidel & Spadaro. (1976). *Dry matter loss in stored grain as related to carbon dioxide production*. Cereal Chemistry.
- Silos Cordoba. (2021). *Almacenamiento del arroz para proteger su calidad*. Cordoba-España.
- Solano, C., Jean Pierre, D., Galán, M., & Maylin, I. (2021). *Diseño de un Prototipo de Sistema de Control para temperatura y humedad en el almacenamiento de arroz, utilizando Sistemas embebidos*. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Spitler, J. (2014). *Load Calculation Applications Manual*. ASHRAE Atlanta.
- Tridente. (s.f.). *Ficha Técnica Alufos 56%*. Tridente Productos Agroquímicos .
- Villagomez, L., Molina, Carrera, M., & Calderón, M. (2020). Numerical study to predict temperature and moisture profiles in unventilated grain silos at prolonged time periods. *International journal of thermophysics*.
- Villamil, H., Blanco, K., Salah, O., & Garcia, C. (2020). Characterization of the urban heat island at Bucaramanga, Colombia, using real-time temperature monitoring. *Revista Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia*, 10-21.