

**Escuela de Ingeniería Electromecánica
Sistema de Estudios de Posgrado**

Evaluación del impacto en el desempeño energético, ambiental y económico ante la sustitución del sistema de refrigeración HFCF-22 (R-22) por un sistema NH₃/CO₂ (R-717 / R-744) en cascada con CO₂ recirculado (tipo brine) en la Cámara de Producto Terminado y Antecámaras de la empresa Premezclas Industriales para Panadería S.A. (PINOVA).

Propuesta final de graduación para optar por el título de Máster en Administración de la Ingeniería Electromecánica con Énfasis en Administración de la Energía

**ESTUDIANTE
Karen Ivannia Araya Varela**

**Cartago, Costa Rica
Diciembre, 2021**

Tribunal Académico

Esta propuesta final de graduación fue aprobada en Cartago el día XXXX por la Comisión de Maestría de la Escuela de Ingeniería Electromecánica, como requisito para optar el grado de Máster.

MAIE. Ing. Greivin Barahona Guzmán
Director Posgrado de la Escuela de Ingeniería Electromecánica

MAIE. Ing. Rodolfo Elizondo Hernández
Profesor Guía

MAIE. Ing. Luis Guillermo Valerio Pérez
Asesor

MAIE. Ing. Ignacio Del Valle Granados
Asesor

Ing. Karen Ivannia Araya Varela
Sustentante

Declaración Jurada

Yo, **Karen Ivannia Araya Varela**, cédula **402000258**, estudiante de la Maestría en Ingeniería Electromecánica con énfasis en Gestión de la Energía, declaro bajo juramento que soy autora intelectual del presente trabajo final de graduación con el título: **Evaluación del impacto en el desempeño energético, ambiental y económico ante la sustitución del sistema de refrigeración HFCE-22 (R-22) por un sistema NH₃/CO₂ (R-717 / R-744) en cascada con CO₂ recirculado (tipo *brine*) en la Cámara de Producto Terminado y Antecámaras de la empresa Premezclas Industriales para Panadería S.A. (PINOVA)** y no hay copia ni duplicación de material intelectual procedente de medios impresos, digitales o audiovisuales que se presente como de mi autoría. Toda palabra dicha o escrita por otra persona consignada en este trabajo, está debidamente referenciada.

Cartago, 1 de diciembre de 2021

Karen Ivannia Araya Varela

Estudiante

Datos personales.

Nombre completo: Karen Ivannia Araya Varela

Número de cédula: 402000258

Número de carné: 200646685

Números de teléfono: (506) 83467193

Correos electrónicos: karenaryv@gmail.com

Datos de la empresa.

Nombre: Premezclas Industriales para Panadería S.A. (PINOVA)

Actividad Principal: Manufactura de Alimentos

Dirección: San José, La Uruca, 100m este y 125m norte de la entrada principal de Migración

Contacto: German Coto Solano

Teléfono: (506) 24377670

1. Contenido

Índice de Figuras	11
Índice de Gráficos	13
Lista de siglas, abreviaturas y acrónimos.....	14
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 Antecedentes.....	16
1.2 Justificación e importancia de la investigación.....	18
1.3 Planteamiento del problema	19
1.3.1 Pregunta de investigación	20
1.3.2 Objetivo general.....	20
1.3.3 Objetivos específicos.....	20
1.4 Viabilidad	21
1.5 Alcance.....	21
1.6 Limitaciones	22
1.7 Resumen de capítulos	22
CAPÍTULO II: MARCO CONTEXTUAL.....	25
2.1 Marco Referencial	25
2.2 Marco Teórico.....	28
2.2.1 Refrigerantes.....	28

2.2.2 Ciclo frigorífico	30
2.2.3 CO ₂ como refrigerante	35
2.3 Marco Legal	39
2.3.1 Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono	39
2.3.2 Protocolo de Montreal relativo a las sustancias agotadoras de la capa de ozono.....	39
2.2.3 Plan de Gestión para la eliminación de HCFC en Costa Rica 2013 – 2030.....	41
2.3.4 Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050.....	42
2.3.5 Programa País Carbono Neutralidad.....	42
2.3.6 Normas Técnicas.....	44
2.4 Hipótesis de Investigación.....	45
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	46
3.1 Tipo de estudio	46
3.2 Paradigma de investigación	46
3.3 Instrumentos de recolección de datos	46
3.4 Definición de prueba piloto para Objetivo 1	47
3.5 Técnicas para presentación y análisis de la información.....	48
3.6 Cronograma de ejecución	50
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL SISTEMA ORIGINAL (HCFC-22)	
Y EL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN ACTUAL (NH₃/CO₂ EN CASCADA)	51
4.1 Descripción de la Empresa.....	51

4.1.1	Información general de la Empresa.....	51
4.1.2	Áreas de producción.....	53
4.1.3	Sistema de Gestión de la Energía (SGEn).....	54
4.2	Descripción de los sistemas de refrigeración.....	56
4.2.1	Sistema HCFC-22.....	56
4.2.2	Sistema NH ₃ /CO ₂ en cascada con CO ₂ recirculado (tipo <i>brine</i>).....	59
4.3	Escenario Energético.....	65
4.3.1	Consumo de energía eléctrica.....	66
4.3.2	Temperatura de las Cámaras.....	74
4.3.3	Datos de producto terminado.....	75
4.4	Plan Piloto.....	77
4.5	Comparación de los sistemas.....	81
CAPÍTULO V: INDICADORES DE DESEMPEÑO ENERGÉTICO.....		82
5.1	Línea base de energía.....	82
5.2	Indicadores de desempeño energético.....	88
CAPÍTULO VI: EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO.....		93
6.1	Descripción del proyecto.....	93
6.2	Identificación de las fuentes, sumideros y reservorios (FSR) pertinentes al proyecto.....	94
6.3	Determinación de la línea base de GEI.....	95

6.4 Cuantificación de las emisiones y/o remociones de GEI	96
6.5 Cuantificación de reducciones de emisiones y aumentos de remociones de GEI	98
CAPÍTULO VII: EVALUACIÓN FINANCIERA	100
7.1 Escenario 1: Financiamiento No Reembolsable	102
7.2 Escenario 2: Financiamiento Reembolsable	104
CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	107
8.1 Conclusiones	107
BIBLIOGRAFÍA	109
APÉNDICES	114
Apéndice 1. Instalaciones del sistema de refrigeración NH ₃ /CO ₂	114
Apéndice 2. Datos de consumo mensual de energía eléctrica y demanda.	118
Apéndice 3. Datos semanales de temperatura y peso de producto terminado en la cámara fría.	120
Apéndice 4. Ahorros económicos	121
Apéndice 4.1. Consumo de energía eléctrica.	121
Apéndice 4.2. Mantenimiento	122
Apéndice 4.3. Compensación de emisiones de gases de efecto invernadero	123
Apéndice 4.4. Financiamiento Reembolsable	124
ANEXOS	125
Anexo 1. Diagrama de flujo del Sistema NH₃/CO₂ en cascada tipo <i>brine</i>	125

Índice de Tablas

Tabla 1. Lista de refrigerantes naturales.....	30
Tabla 2. Comparación entre el CO ₂ y otros refrigerantes.....	36
Tabla 3. Comparación entre sistema NH ₃ /CO ₂ en cascada y NH ₃ /CO ₂ tipo brine.....	38
Tabla 4: Instrumentos de recolección de datos.....	46
Tabla 5: Técnicas para presentación y análisis de la información	49
Tabla 6. Usos significativos de la energía de la Planta de Manufactura PINOVA.....	56
Tabla 7. Lista de inventario de equipos eléctricos del sistema HCFC-22.....	57
Tabla 8. Tabla 8. Energía consumida por el sistema HCFC-22.....	58
Tabla 9. Lista de inventario de equipos eléctricos del sistema NH ₃ /CO ₂	60
Tabla 10. Temperatura y cargas térmicas de la cámara y antecámaras de producto terminado.....	64
Tabla 11. Características de la cámara y antecámaras de producto terminado.....	64
Tabla 12. Tarifa eléctrica en colones para T-MTb vigente el 01 de julio del 2021 y hasta el 30 de setiembre 2021.....	67
Tabla 13. Inventario de equipos de medición de energía y presión.....	72
Tabla 14. Medición de parámetros operacionales asociados al Sistema NH ₃ /CO ₂	72
Tabla 15. Datos de los compresores del sistema NH ₃ /CO ₂	80
Tabla 16. Comparación del sistema original (HCFC-22) y el sistema actual (NH ₃ /CO ₂ en cascada). ..	81
Tabla 17. Variables independientes para la aplicación de la regresión lineal múltiple en el periodo 2016-2017.....	84
Tabla 18. Estimación del cambio porcentual del IDEn con respecto a la LBEn.....	89
Tabla 19. Fuentes de emisiones de GEI del sistema HCFC-22.....	94

Tabla 20. Registros históricos por fuente de emisión para el año 2016.	95
Tabla 21. Factores de emisión.	96
Tabla 22. Potenciales de calentamiento global.	96
Tabla 23. Cálculo de la línea base.	96
Tabla 24. Registros por fuente de emisión para el periodo setiembre 2020 - agosto 2021.	97
Tabla 25. Factores de emisión.	98
Tabla 26. Cuantificación de emisiones de GEI del proyecto.	98
Tabla 27. Escenarios de financiamiento.	100
Tabla 28. Análisis con financiamiento no reembolsable.	103
Tabla 29. Indicadores financieros para el financiamiento no reembolsable.	104
Tabla 30. Esquema de financiamiento reembolsable.	104
Tabla 31. Condiciones financiamiento reembolsable.	104
Tabla 32. Análisis financiero con financiamiento reembolsable.	105
Tabla 33. Indicadores financieros para el financiamiento reembolsable.	106
Tabla 34. Consumo mensual de energía eléctrica y demanda.	118
Tabla 35. Registros semanales de temperatura y producto terminado en la cámara fría.	120
Tabla 36. Estimación de ahorros económicos asociados al consumo de energía eléctrica.	122
Tabla 37. Estimación de ahorros económicos asociados a mantenimiento.	122
Tabla 38. Estimación de ahorros económicos asociados a compensación de emisiones de GEI.	123
Tabla 39. Servicio de la deuda (intereses sobre saldo).	124

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama del ciclo frigorífico de compresión.	31
Figura 2. Diagrama básico de refrigeración.	34
Figura 3. Diagrama del sistema NH ₃ /CO ₂ con CO ₂ recirculado tipo <i>brine</i>	38
Figura 4. Sistema de reconocimiento del Programa País Carbono Neutral 2.0.....	43
Figura 5. Imagen del software Pack Calculation Pro en relación con el cálculo de consumo energético.	47
Figura 6. Diagrama de Gantt del proyecto de investigación.	50
Figura 7. Planta de Premezclas Industriales para Panadería S.A. (Florida Retail).....	51
Figura 8. Ubicación de Planta de Premezclas Industriales para Panadería S.A.	52
Figura 9. Organigrama de la Gerencia de Mantenimiento.	52
Figura 10. Distribución en planta.	54
Figura 11. Política de Gestión de Energía de Florida Retail.	55
Figura 12. Organigrama del SGEN en Planta Florida Retail.	55
Figura 13. Diagrama de planta del sistema NH ₃ /CO ₂ en cascada tipo <i>brine</i>	63
Figura 14. Flujo de energía consumida anual en PINOVA (GJ).....	66
Figura 15. Flujo del consumo de energía eléctrica en PINOVA.	70
Figura 16. Consumo de energía y promedio mensual del sistema NH ₃ /CO ₂ en cascada.	73
Figura 17. Diagrama de Molliere de HCFC-22.....	77
Figura 18. Vista de compresor de tornillo de HCFC-22.	78
Figura 19. Modelo del Sistema HCFC-22.....	79
Figura 20. Simulación del consumo energético anual de los compresores del sistema HCFC-22.	79

Figura 21. Pasos de la Norma ISO 50006:2014.	82
Figura 22. Ecuación de regresión lineal.	85
Figura 23. Análisis de Varianza.	85
Figura 24. Coeficientes del modelo.	85
Figura 25. Resumen del modelo basado en el análisis de regresión lineal múltiple.	86
Figura 26. Prueba de normalidad de los residuos.	87
Figura 27. Distribución normal de la energía consumida.	87
Figura 28. Requisitos de la INTE/ISO 14064-2:2019 Gases de Efecto Invernadero - Parte 2 utilizados en la investigación.	93
Figura 29. Vista general del sistema de refrigeración NH ₃ /CO ₂	114
Figura 30. Compresores de tornillo para NH ₃	114
Figura 31. Compresor recíprocante para NH ₃	115
Figura 32. Tanque termosifón de NH ₃	115
Figura 33. Sistema de recirculación de CO ₂	116
Figura 34. Unidad condensadora e intercambiador de casco y placa.	116
Figura 35. Evaporadores de CO ₂	117
Figura 36. Tubería de alimentación y retorno de CO ₂ con aislamiento térmico.	117

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Comportamiento en el uso de refrigerante HCFC-22.	58
Gráfico 2. Consumo de energía eléctrica por proceso (sistema original).....	59
Gráfico 3. Consumo anual de energía de la Planta PINOVA.....	65
Gráfico 4. Consumo de energía de la Planta PINOVA - Medidor 941353.	68
Gráfico 5. Comportamiento de la demanda máxima (kW) de la Planta PINOVA - Medidor 941353... 69	
Gráfico 6. Distribución del consumo mensual de energía eléctrica entre los procesos de la Planta PINOVA.	70
Gráfico 7. Monto de la facturación mensual asociada al medidor N°941353.	71
Gráfico 8. Consumo de energía del sistema NH ₃ /CO ₂ en cascada.....	74
Gráfico 9. Temperatura promedio de la cámara de refrigeración de producto terminado.	75
Gráfico 10. Cantidad de producto terminado almacenado por año en la cámara y antecámaras.	76
Gráfico 11. Comportamiento del consumo de energía en relación con los kilogramos de producto almacenado.	76
Gráfico 12. Costos anuales por kwh consumidos.....	101

Lista de siglas, abreviaturas y acrónimos

AMCHAM: Cámara Costarricense Norteamericana de Comercio

ASHRAE: Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado

ASME: Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos

BCR: Banco de Costa Rica

CFC: Clorofluorocarbonos

CO₂: Dióxido de Carbono (R-744)

COP: Coeficiente de desempeño

DCC: Dirección de Cambio Climático

DIGECA: Dirección de Gestión de Calidad Ambiental

GEI: Gases de efecto invernadero

FIFCO: Florida Ice & Farm Company

FSR: Fuentes, sumideros y reservorios

GWP: Potencial de Calentamiento Global

h: Entalpía

HFC: Hidrofluorocarburos

HCFC-22: Clorodifluorometano

HPMP: Plan de Manejo para la Eliminación de HCFC

HVAC: Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado

IDEn: Indicadores de desempeño energético

INTECO: Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica

ISO: Organización Internacional de Normalización

LBEn: líneas base de energía

LT: Baja Temperatura

MT: Media Temperatura

NDC: Contribución Nacionalmente Determinada

NH₃: Amoníaco (R-717)

ODP: Potencial de Agotamiento de Ozono

PINOVA: Premezclas Industriales para la Panadería S.A.
SGEn: Sistema de Gestión de la Energía
SHE: Seguridad, Salud y Ambiente
tCO_{2e}: Toneladas de CO₂ equivalente
T-MT: Tarifa Media Tensión
T-MTb: Tarifa Media tensión b
TR: Toneladas de refrigeración
TREMA: Tasa de rentabilidad mínima aceptable
PNUD: Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo
PRIFD: Periodo de recuperación de la inversión con flujos descontados
SAO: Sustancias agotadoras capa ozono
VAN: Valor actual neto
TIR: Tasa interna de retorno
USD: Dólar estadounidense

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Premezclas Industriales para la Panadería S.A. (PINOVA) es una empresa costarricense que pertenece a la división de FIFCO Retail de la Corporación Florida Ice & Farm Company (FIFCO), la cual se dedica a la manufactura, producción e industrialización de productos de repostería y panadería, los cuales son comercializados a través de la cadena de panaderías y tiendas MUSMANNI, distribuidores, supermercados y cadenas de restaurantes en Centroamérica, Puerto Rico y Colombia.

PINOVA requiere del uso de sistemas de refrigeración de baja temperatura para su proceso de manufactura y posteriormente el almacenamiento temporal de las diferentes bases de panadería y repostería fabricadas. Para el almacenamiento de producto terminado se necesita una cámara de congelación y un sistema de tres precámaras para el ingreso y salida del mismo de un total de 7,630 m³. La capacidad máxima de almacenamiento en la cámara es de aproximadamente 250 toneladas de producto terminado.

El sistema que por más de 15 años operó PINOVA para la refrigeración de la cámara de producto terminado, estaba compuesto por un sistema de expansión directa de una sola etapa, con una carga refrigerante de 909 kg de HCFC-22. Este contaba con una capacidad de refrigeración de 176 kW (50 TR) y con una temperatura promedio de -11°C (UNDP, 2018) y fue utilizado hasta diciembre del año 2017.

Mediante un acuerdo con el Ministerio de Ambiente y Energía, se realizó un proyecto con el cofinanciamiento del Fondo Multilateral del Protocolo de Montreal que fue implementado por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo en Costa Rica (PNUD), orientado a la reconversión del sistema con HCFC-22 a un sistema NH₃/CO₂ en cascada con CO₂ recirculado tipo brine para la refrigeración de la cámara de producto terminado.

Con un costo total de \$943,000 USD, el nuevo sistema de refrigeración inició su periodo de pruebas y puesta en marcha durante el mes de enero del año 2018. Dicho sistema se caracteriza por utilizar dos circuitos, uno de NH₃ (amoníaco) y otro de CO₂ (dióxido de carbono), el NH₃ es utilizado en el sistema de alta temperatura y el CO₂ en el circuito de baja temperatura impulsado por bombas, donde este último

es utilizado como un fluido de transferencia de calor (*Brine*). Esta característica hace que el proyecto sea innovador y también el primero y único en la región centroamericana implementado en la industria de manufactura de alimentos.

Se conocen únicamente otras dos instalaciones NH₃/CO₂ “*brine*” en Suramérica, una se encuentra en Argentina y la otra en Ecuador. Esta última fue la instalación que sirvió de modelo para el proyecto, mediante la Cooperación Sur-Sur entre PINOVA en Costa Rica y UNILEVER en Guayaquil, antes y después de puesto en marcha el sistema, incluyendo la capacitación del personal de PINOVA en Ecuador.

Las obras se contrataron a la empresa costarricense CUESA Construcciones HU S.A. bajo sistema “llave en mano”, quien adquirió los equipos por medio de la compañía Mayekawa de Centroamérica S.A., también basada en Costa Rica.

La capacidad total de refrigeración es de 359.4 kW (102.2 TR), y potencia eléctrica total instalada es de 195.89 kW, la operación del sistema es 24/7 y todos los motores son de alta eficiencia (UNDP, 2018).

A continuación se resumen las metas de dicho proyecto:

- Cumplir con el Plan de Gestión de Eliminación de HCFC’s del Gobierno de Costa Rica, de acuerdo con el calendario de reducciones establecido en el Protocolo de Montreal (35% al 2020).
- Reducir las toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) generadas por el uso de sustancias refrigerantes, con el fin contribuir con el compromiso de Carbono Neutral de la compañía y la iniciativa del país en la C-Neutralidad al 2021.
- Ampliar la capacidad de almacenamiento de producto congelado de la planta de producción de PINOVA.
- Utilizar refrigerantes ambientalmente amigables y energéticamente eficientes en los sistemas de refrigeración de PINOVA.
- Ser un proyecto piloto para la industria de manufactura de alimentos en la región.

1.2 Justificación e importancia de la investigación

FIFCO opera bajo un modelo de triple utilidad, en donde la sostenibilidad es el eje transversal de la empresa, motor de la innovación y superación constante (FIFCO, 2018). El sistema de refrigeración con gases naturales NH₃/CO₂ es un proyecto innovador de la empresa, siendo el primero y único en la región centroamericana que se adopta en la industria de manufactura de alimentos.

La presente investigación surge de la necesidad de contar con datos confiables obtenidos a partir de la aplicación del método científico para demostrar que el uso de NH₃/CO₂ en cascada, con CO₂ recirculado tipo *brine*, podría ser una solución energética, ambiental y económicamente eficiente para empresas manufactureras en Costa Rica, y también para empresas regionales que necesitan encontrar una solución definitiva ante el proceso de eliminación de refrigerantes HCFC y de control de los refrigerantes HFC's aprobado en la Enmienda de Kigali del Protocolo de Montreal.

La investigación está dirigida a respaldar técnicamente los aportes del proyecto a la Política de Gestión de Energía y a la certificación Carbono Neutralidad de la empresa, en alineamiento con el Plan Nacional de Descarbonización y el Plan de Gestión de Eliminación de HCFC's del Gobierno de Costa Rica.

Como el primer proyecto piloto en Costa Rica y con una inversión total de \$943,000 USD, es necesario desarrollar un análisis financiero que permita cuantificar los beneficios económicos al implementar esta nueva tecnología.

Con solo dos instalaciones adicionales existentes en Suramérica, la literatura disponible en la región es muy limitada. Por tanto, el presente trabajo tiene una utilidad metodológica, permitiendo el análisis de datos de operación desde el año 2018 del sistema de refrigeración utilizando refrigerantes naturales (NH₃ y CO₂).

Se plantea que los resultados de la investigación van a permitir generar confianza en la toma de decisiones relacionadas con la adopción de tecnologías naturales definitivas en sistemas RAC en el sector comercial e industrial. De no llevarse a cabo la presente investigación, se estaría desaprovechando el conocimiento local, los recursos nacionales y de cooperación internacional para romper los paradigmas en torno al desempeño energético, seguridad y aplicaciones posibles de la tecnología a nivel nacional y regional.

1.3 Planteamiento del problema

El HCFC-22 es un propulsor del agotamiento de la capa de ozono y posee un alto potencial de calentamiento global. Según los lineamientos del Protocolo de Montreal y del Plan de Gestión de Eliminación de HCFC's del Gobierno de Costa Rica, se ha planteado una reducción paulatina de la importación de HCFC, siguiendo un esquema gradual que inició en el 2013 y finalizará en el 2030 (DIGECA, 2013).

A nivel de la compañía, el consumo de dicho refrigerante generó 4,730 toneladas de CO₂ equivalente entre el 2015-2017, comprometiendo las metas relacionadas a la carbono neutralidad (UNDP, 2018).

La implementación del sistema de refrigerantes naturales como respuesta a la eliminación de HCFC's en la empresa, si bien representa para Costa Rica y para la región una novedad tecnológica, requiere de mayor investigación para favorecer su penetración en el mercado y posterior maduración tecnológica.

La Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE, por sus siglas en inglés), mantiene una posición sólida en cuanto al hecho de que el uso de refrigerantes naturales ayuda a satisfacer las crecientes demandas de RAC de manera sostenible. Asimismo, ASHRAE en su Documento de Posición en Refrigerantes Naturales del 2014 recomienda que se realicen más investigaciones sobre:

- Seguridad, eficiencia energética, costos e impacto ambiental para todos los refrigerantes usando una metodología consistente y completa
- El desarrollo de sistemas y componentes que puedan garantizar la aplicación segura de refrigerantes naturales sin comprometer la eficiencia energética
- El comportamiento de los refrigerantes naturales en los sistemas operativos
- El papel de los refrigerantes naturales en el logro de la sostenibilidad

Si bien la implementación del sistema de refrigerantes naturales en PINOVA fue planteado como un proyecto energético y ambientalmente eficiente, no se ha realizado un estudio que permita cuantificar el impacto en la empresa, en cuanto a su contribución en el desempeño energético, sostenibilidad ambiental y ahorro económico, limitando además el efecto demostrativo del proyecto para realizar una adecuada transferencia tecnológica al sector.

1.3.1 Pregunta de investigación

La presente investigación responde a la siguiente pregunta:

¿Cuál es el impacto en el desempeño energético, ambiental y económico ante la sustitución del sistema de refrigeración HCFC-22 (R-22) por un sistema NH₃/CO₂ (R-717/R-744) en cascada con CO₂ recirculado (tipo *brine*) en la Cámara de Producto Terminado y Antecámaras de la empresa Premezclas Industriales para Panadería S.A.?

1.3.2 Objetivo general

Evaluar el impacto en el desempeño energético, ambiental y económico ante la sustitución del sistema de refrigeración HCFC-22 (R-22) por un sistema NH₃/CO₂ (R-717/R-744) en cascada con CO₂ recirculado (tipo *brine*), mediante un análisis técnico y financiero para la reducción del consumo eléctrico en un 20% en la Cámara de Producto Terminado y Antecámaras de la empresa Premezclas Industriales para Panadería S.A. (PINOVA).

1.3.3 Objetivos específicos

Objetivo 1

Realizar un análisis comparativo entre el sistema original (HCFC-22) y el sistema de refrigeración actual (NH₃/CO₂) para la estimación de la eficiencia energética a través del cálculo del coeficiente de desempeño (COP).

Objetivo 2

Establecer indicadores energéticos para la medición del desempeño energético en el proceso de almacenamiento de producto terminado según las normas ISO 50001 e ISO 50006.

Objetivo 3

Determinar la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero debido al uso de refrigerantes naturales (NH₃/CO₂) para el cálculo de la huella de carbono según la norma ISO 14064.

Objetivo 4

Desarrollar la evaluación financiera del proyecto implementado para la identificación de beneficios económicos a través de indicadores financieros como el VAN y TIR.

1.4 Viabilidad

La presente investigación pretende brindar continuidad al proyecto de cambio tecnológico implementado en el 2018, para lo cual se cuenta con el apoyo y compromiso de la Gerencia de Mantenimiento de PINOVA, así como el respaldo técnico y científico del MINAE y PNUD.

La empresa cuenta con Sistema de Gestión de la Energía (SGEn) basado en la norma *INTE/ISO 50001:2018. Sistemas de gestión de la energía. Requisitos con orientación para su uso*, y en su Política de Gestión de la Energía se compromete a asegurar la disponibilidad de la información y los recursos necesarios para la mejora continua del desempeño energético y del SGEn. Por tanto, se dispondrá de los datos de operación y económicos de los últimos tres años. La instalación actual (NH₃/CO₂) cuenta con equipos y sistemas de última tecnología, incluyendo un sistema de compresores inteligentes.

En la investigación se dispondrá de las herramientas tecnológicas necesarias para la colecta de datos necesarios en la toma de decisiones. Asimismo, se hará uso de las normas ISO (ISO 50001, ISO 50006, ISO 14064).

1.5 Alcance

La presente investigación responde a un alcance correlacional, debido a que se busca cuantificar las variables operativas del sistema de refrigeración, así como evaluar la relación de variables tanto de carácter técnico como económico. Se establecerá además un análisis comparativo para evaluar el desempeño entre dos tipos de tecnologías de refrigeración, incluyendo el consumo de energía, temperatura de operación, cargas térmicas, capacidad de almacenamiento de productos, emisiones de gases de efecto invernadero, así como el cálculo de parámetros clave como el coeficiente de desempeño.

El análisis de los datos se hará en Microsoft Excel, además, se crearán las plantillas necesarias para obtener los resultados esperados.

La investigación se realizará específicamente en relación con el sistema de refrigeración de las tres precámaras y una cámara de almacenamiento de producto terminado de la Planta de Manufactura de PINOVA (Florida Retail) ubicada en La Uruca, San José.

1.6 Limitaciones

Debido a los protocolos sanitarios por la situación ante el COVID-19, la empresa ha restringido el ingreso a planta de cualquier persona externa durante el año 2020. A pesar de que se cuenta con el interés y el respaldo de la Gerencia de Mantenimiento para iniciar la investigación en el 2021, se deberán considerar las restricciones futuras de las autoridades sanitarias y de la empresa.

La presente investigación tiene por objeto de estudio el sistema de refrigeración HCFC-22, para el cual únicamente se tienen datos de consumo de energía estimados, ya que el sistema original no contaba con medición de energía eléctrica y salió de operación a inicios del año 2018.

La información generada en la investigación se socializará como resultado de la implementación de un proyecto piloto con la tecnología NH₃/CO₂ en cascada en la industria de manufactura de alimentos. Sin embargo, se excluye del presente estudio la transferencia de conocimientos y la capacitación para técnicos de refrigeración y profesionales en ingeniería, ya que serán desarrolladas en una etapa posterior por las instituciones socias del proyecto.

1.7 Resumen de capítulos

La presente investigación comprende los siguientes capítulos:

Capítulo I: Introducción. Se presentaron las generalidades del proyecto implementado por PINOVA, correspondiente a la sustitución del sistema de refrigeración HCFC-22 (R-22) por un sistema NH₃/CO₂ (R-717 / R-744) en cascada con CO₂ recirculado (tipo *brine*) en la cámara de producto terminado y antecámaras. En este capítulo se abordó la justificación y el planteamiento del problema, la pregunta de investigación, el objetivo general y los objetivos específicos, así como los alcances, la viabilidad y los límites del estudio.

Capítulo II: Marco Contextual. En este capítulo se realizó la revisión del marco de referencias, del marco teórico y del marco legal. En el marco referencial se analizaron artículos y documentos académicos

relacionados con el trabajo de investigación como panorama de las tendencias de investigaciones similares. En el marco teórico se incluyeron aspectos técnicos y caracterización del sistema en estudio. En el marco legal se presentaron las referencias a políticas, normas y reglamentos a que fundamentan la investigación.

Capítulo III: Metodología de investigación. Se realizó la descripción del tipo de estudio, la metodología de investigación, la instrumentación para la recolección de datos y la definición de la prueba piloto.

Capítulo IV: Análisis comparativo entre el sistema original (HCFC-22) y el sistema de refrigeración actual (NH₃/CO₂ en cascada). Se realizó una caracterización de ambos sistemas, sus principales parámetros de operación y se realizó una revisión energética que permitió identificar el sistema en estudio como uno de los usos significativos de la energía, además se logró determinar una mayor eficiencia del sistema NH₃/CO₂ en cascada. Se obtuvo un valor del coeficiente de desempeño (COP) para el sistema original HCFC-22 de 2.04 y un valor de 2.72 para el sistema NH₃/CO₂ en cascada.

Capítulo V: Indicadores de Desempeño Energético. Con base en las normas *INTE/ISO 50001:2018* e *ISO 50006:2014*, se normalizó la línea base (LB_{En}) y se modelaron los datos de consumo de energía eléctrica con respecto a las variables mediante un análisis de regresión lineal múltiple. Mediante la estimación de ID_{En} del USE 2, se logró determinar que el porcentaje de ahorro energético es de un 39%, donde el consumo de energía eléctrica se encuentra directamente afectado por las variables relevantes de temperatura de la cámara de congelación de producto terminado y las toneladas de producto terminado almacenado.

Capítulo VI: Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Con base en la norma *INTE/ISO 14064-2:2019*, se estableció la línea base de gases de efecto invernadero (GEI) y se cuantificaron las reducciones de emisiones por la sustitución tecnológica con un valor de 2,570.1 toneladas CO_{2eq}.

Capítulo VII: Evaluación Financiera. Se analizaron dos escenarios de financiamiento reembolsable y no reembolsable para el proyecto de implementación del sistema NH₃/CO₂ en cascada. Considerando los ahorros económicos en cuanto a reducción de costos de mantenimiento, reducción de costos por facturación eléctrica y reducción del pago de compensación de GEI, se comprobó la factibilidad económica del proyecto en ambos escenarios, con una tasa de retorno (TIR) superior al 11%.

Capítulo VIII: Conclusiones y recomendaciones. Se presentaron las consideraciones finales de la investigación en cuanto a la mejora del desempeño energético, reducción de emisiones de GEI y factibilidad económica del sistema en estudio, así como las oportunidades para la transferencia tecnológica a nivel nacional y regional.

CAPÍTULO II: MARCO CONTEXTUAL

2.1 Marco Referencial

La reactivación en el uso de refrigerantes naturales ha sido impulsada por acuerdos internacionales como el Protocolo de Montreal (1987), Protocolo de Kioto (1997) y el Acuerdo de París (2015), así como por el creciente interés en reducir el impacto ambiental del sector RAC.

Los refrigerantes naturales incluyen amoníaco, dióxido de carbono, hidrocarburos, agua y aire. Tanto el amoníaco (NH_3) como el dióxido de carbono (CO_2) se utilizaron a mediados y finales del siglo XIX. Sin embargo, a medida que la seguridad y la eficiencia del sistema de amoníaco mejoraron a principios del siglo XX, los sistemas de dióxido de carbono se volvieron menos comunes. Con la introducción de los fluorocarbonos en 1930, el dióxido de carbono dejó de utilizarse en la década de 1950 (ASHRAE, 2014). Desde principios de la década de 1990, el dióxido de carbono ha cobrado nuevo interés como alternativa a los refrigerantes clorofluorocarbonos (CFC).

De acuerdo con Gullo *et al.* (2017) el dióxido de carbono actualmente representa el refrigerante ecológico de mayor duración en el sector de la refrigeración comercial, ya que es un fluido de trabajo natural no tóxico, no inflamable, económico y fácilmente disponible, además de poseer propiedades termofísicas ventajosas.

En el año 1994 Lorentzen examinó diferentes ciclos con CO_2 y concluyó que el CO_2 es un fluido de trabajo prometedor porque tiene propiedades térmicas superiores, además de que el CO_2 tiene valores de coeficiente de rendimiento (COP) relativamente mejores en comparación con los refrigerantes sintéticos de uso común. Se recomendó que el ciclo transcrito y el sistema en cascada pueden ser dos aplicaciones especialmente adecuadas para el CO_2 .

Bansal y Jain (2007) elaboraron una discusión sobre los sistemas de refrigeración en cascada y sugirieron que el ciclo NH_3/CO_2 puede ser la potencial selección en aplicaciones de baja temperatura. El sistema de refrigeración en cascada de NH_3/CO_2 utiliza amoníaco en el ciclo de alta temperatura y dióxido de carbono en el ciclo de baja temperatura.

Si bien se han desarrollado diversos estudios teóricos sobre el rendimiento del sistema de refrigeración NH_3/CO_2 en cascada, la investigación a nivel experimental y a escala de instalaciones industriales es limitada.

Getu y Bansal (2008) desarrollaron un análisis teórico del sistema en cascada R717-R744 (NH_3/CO_2) considerando el efecto del grado de sobrecalentamiento y subenfriamiento como un parámetro de diseño adicional. En este análisis también se presentaron las expresiones para una temperatura de evaporación óptima de R717 en el condensador en cascada, el COP máximo y la relación de flujo másico óptima de R717 a la de R744 en el sistema en cascada.

Lee *et al.* (2006) analizaron sistemas de refrigeración en cascada de NH_3/CO_2 utilizando un modelo termodinámico para determinar la temperatura de condensación óptima del dióxido de carbono en el intercambiador de calor en cascada en un rango de condiciones de operación. Además, se integraron correlaciones de eficiencia de compresores reales.

Aminyavari *et al.* (2014) investigaron el sistema de refrigeración NH_3/CO_2 en cascada desde el punto de vista exergético, económico y ambiental. Se empleó una optimización multi-objetivo mediante un algoritmo genético para lograr los parámetros de diseño óptimos del sistema. Los resultados de la optimización mostraron que, considerando una capacidad de enfriamiento de 50 kW, el diseño elegido conduce a una eficiencia exergética del 45,89%.

Rezayan y Behbahaninia (2011) elaboraron un método para la optimización termoeconómica del ciclo de refrigeración en cascada de NH_3/CO_2 . Los autores señalaron que, para una capacidad de enfriamiento constante de 40 kW, se observó una reducción del 9.34% en el costo anual total del sistema en comparación con el caso base.

Rawat, *et al.* (2015) desarrollaron un modelo termodinámico utilizando el software Engineering Equation Solver, para sistema de refrigeración NH_3/CO_2 en cascada. Los parámetros de diseño y funcionamiento incluyeron: temperatura del condensador, temperatura del evaporador, temperatura de acoplamiento, eficiencia isentrópica del compresor, y diferencia de temperatura en el intercambiador de calor en cascada. Se reportó que aumenta el COP del sistema en cascada con el aumento de la temperatura del evaporador y disminuye con el aumento de la temperatura del condensador.

Dopazo *et al.* (2009) desarrollaron y validaron un modelo matemático con datos experimentales de un sistema en cascada de NH₃/CO₂. Los autores analizaron el efecto de los parámetros operativos sobre el desempeño del sistema y obtuvieron que el COP aumenta un 70% cuando la temperatura de evaporación del CO₂ varía de -55 °C a -30 °C.

Aghazadeh *et al.* (2014) evaluaron termodinámicamente el impacto de la utilización del eyector en el rendimiento del ciclo en cascada que utiliza CO₂ y NH₃ como refrigerantes. Los resultados muestran que la implementación de los eyectores para el ciclo en cascada tiene un impacto considerable en el rendimiento, obteniendo que el COP máximo del nuevo sistema con eyector experimentó aproximadamente un aumento en 7% en comparación con el convencional.

A nivel experimental, Bingming *et al.* (2009) desarrollaron y evaluaron experimentalmente un sistema de refrigeración en cascada de NH₃/CO₂ con compresores de doble tornillo a escala de laboratorio. Los autores analizaron el efecto de los parámetros operativos sobre el COP del sistema, comparando el desempeño del sistema NH₃/CO₂ con el sistema NH₃ de dos etapas y el sistema NH₃ de una sola etapa con o sin economizador. Se encontró que el COP del sistema en cascada es el mejor entre todos, cuando la temperatura de evaporación es inferior a -40°C.

Dopazo y Seara (2011) diseñaron, construyeron y evaluaron una instalación experimental de un sistema NH₃/CO₂. El COP del sistema de refrigeración en cascada medido experimentalmente se comparó con el COP obtenido de dos sistemas de refrigeración habituales de NH₃ de doble etapa: un sistema con dos etapas de compresión con economizador de tanque flash, y un sistema con dos etapas de compresión con intercooling en un tanque flash.

Likitthammanit (2007) diseñó y construyó un sistema de refrigeración experimental de NH₃/CO₂ en cascada para aplicación en un supermercado de tamaño medio en Suecia con el fin de evaluar la eficiencia energética del sistema. Se investigó el comportamiento transitorio de los parámetros del sistema y diferentes arreglos en cascada-condensador que afectan al rendimiento de sistema.

En cuanto a investigaciones realizadas en instalaciones industriales, UNDP (2014) evaluó la implementación de un sistema NH₃/CO₂ en reemplazo de la tecnología de HCFC-22 para aplicaciones de almacenamiento en frío y congelación en la empresa Yantai Moon Group Co. Ltd. en China. Se

demonstró que en comparación con los sistemas de refrigeración normales (HCFC-22, NH₃), el sistema con CO₂ como refrigerante puede ejercer una gran eficiencia en condiciones de baja temperatura, sin embargo, en condiciones de temperatura normal, el CO₂ tiene algunos problemas, como baja eficiencia, alta presión, gran volumen de sistema y alto costo. Se determinó que la eficiencia energética del sistema NH₃/CO₂ aumentó en más de un 20% en comparación con el sistema HCFC-22 existente.

2.2 Marco Teórico

2.2.1 Refrigerantes

2.2.1.1. Clorofluorocarbonos (CFC)

Son sustancias derivadas de los hidrocarburos saturados, que contienen átomos de cloro y flúor sustituyendo átomos de hidrógeno.

Su estabilidad química y volatilidad hacen que se acumulen fácilmente en la atmósfera, alcanzando la estratósfera y con un periodo de degradación muy largo, razón por la que tienen un alto poder de agotamiento del ozono estratosférico (MINAE, 2017). La importación de esta familia de refrigerantes se prohibió en Costa Rica a partir del 2010.

Los refrigerantes más representativos de esta familia son el R11 y el R12. El R11 se utilizaba ampliamente en sistemas de aire acondicionado, en procesos industriales y como propelente de las latas de pintura y desodorantes. El R12 se aplicaba a sistemas de media y baja temperatura, así como en el aire acondicionado de vehículos (BUN-CA, 2009).

2.2.1.2 Refrigerantes hidroclorofluorocarbonados (HCFC)

Son sustancias refrigerantes que incorporan átomos de hidrógeno, cloro y flúor. El átomo de hidrógeno en su molécula les permite oxidarse con mayor rapidez en la parte baja de la atmósfera y afectar en menor medida la capa de ozono. Tienen un poder de agotamiento de ozono estratosférico entre el 2% y el 7% comparado con los CFC (MinAmbiente, 2014) y han sido utilizados como sustancias de transición (sustitutos a mediano plazo de los CFC).

Los refrigerantes más utilizados en Costa Rica son el R22 (muy utilizado en sistemas de aire acondicionado y refrigeración de media temperatura) y el R141b (MINAE, 2017).

2.2.1.3 Refrigerantes hidrofluorocarbonados (HFC)

Los refrigerantes hidrofluorocarbonados son cada uno de los derivados de los hidrocarburos que contienen átomos de hidrógeno y flúor y no contienen cloro en su molécula, oxidándose con gran rapidez en capas bajas de la atmósfera, con un potencial de cero como sustancias agotadoras del ozono (MinAmbiente, 2014).

Su uso aparece como una alternativa para sustituir los CFC, puesto que no afectan la capa de ozono, sin embargo, los refrigerantes de esta familia son gases de efecto invernadero.

Los más utilizados son el R134a y el R125, los cuales se utilizan como sustitutos del R11, R12 y R22.

2.2.1.4 Refrigerantes Naturales

Los refrigerantes naturales incluyen una gama de compuestos orgánicos e inorgánicos adecuados para su uso en una variedad de aplicaciones de sistemas de refrigeración y aire acondicionado. Según ASHRAE *“los refrigerantes naturales ocurren en los ciclos biológicos y químicos de la naturaleza sin intervención humana. Estos materiales incluyen amoníaco, dióxido de carbono, hidrocarburos naturales, agua y aire”* (ASHRAE, 2014).

Los refrigerantes naturales responden a una alternativa de bajo Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés), bajo o cero Potencial de Agotamiento de Ozono (ODP, por sus siglas en inglés) y una probabilidad reducida de otros impactos ambientales. Las ventajas de los refrigerantes naturales han llevado a un aumento significativo en su uso en los últimos años en aplicaciones tradicionalmente servidas por fluorocarbonos.

Tabla 1. Lista de refrigerantes naturales.

NATURALES	HIDROCARBUROS	MEZCLAS DE HIDROCARBUROS
R-702 (Hidrógeno)		
R-704 (Helio)	R-1150 (Etileno)	R-432a R-1270/E170 (80/20)
R-717 (Amoníaco)	R-1270 (Propileno)	R-433a R-1270/290 (30/70)
R-718 (Agua)	R-270 (Etano)	R-436A R290/600a (56/44)
R-729 (Aire)	R-290 (Propano)	R-436B R290/600a (52/48)
R-744 (Dióxido de Carbono)	R-600 (Butano)	R-510A R-E170/600a (88/12)
R-764 (Dióxido de Azufre)	R-600a (Isobutano)	

Fuente: (CICR, 2017)

El amoníaco ($\text{NH}_3/\text{R-717}$) es el más importante de los refrigerantes naturales debido a su uso prolongado y generalizado en el procesamiento y conservación de alimentos y bebidas, y debido a su creciente adopción en enfriadores HVAC, sistemas de almacenamiento térmico, enfriamiento de procesos y aire acondicionado, sistemas de enfriamiento de distrito, supermercados, tiendas de conveniencia, etc.

El amoníaco tiene un potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP) y un potencial de calentamiento global (GWP) igual a cero. Tiene un rendimiento energético inherentemente alto, excelentes propiedades termodinámicas y altos coeficientes de transferencia de calor (ASHRAE, 2017).

La principal desventaja del amoníaco es su efecto tóxico a concentraciones más altas (es decir, por encima de 300 ppm). El amoníaco es clasificado por ASHRAE como de "menor inflamabilidad" en el aire cuando su concentración oscila entre el 16% y el 28% (ASHRAE, 2017).

2.2.2 Ciclo frigorífico

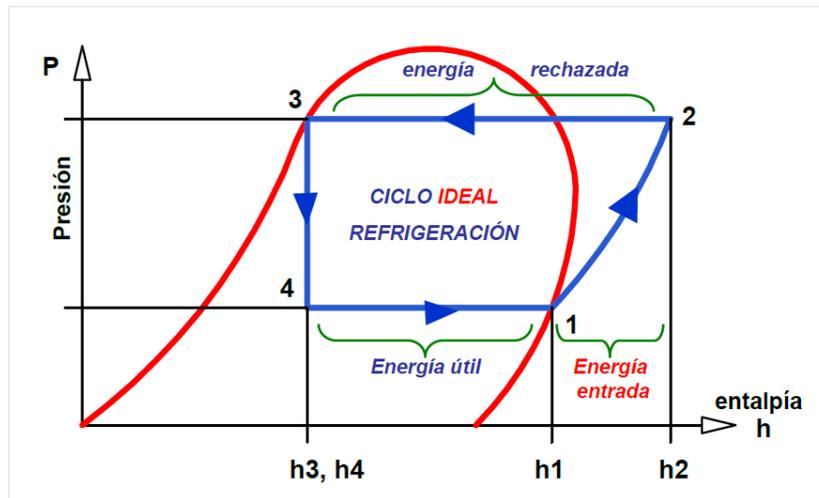
El sistema de refrigeración más generalizado es la producción de frío por compresión de vapor. Este consiste en un circuito cerrado en el que se somete a un fluido refrigerante, sucesivas situaciones de cambios estado, mediante compresión y expansión, para transmitir y absorber el calor producido con el ambiente y el medio a refrigerar.

2.2.2.1 Ciclo de compresión

El ciclo de compresión es característico de cada refrigerante. Se basa en los cambios de estado (líquido-gas y gas-líquido) del fluido refrigerante a temperaturas diferentes en función de la presión (GIZ, 2015).

A continuación se muestra un ejemplo de este ciclo en el diagrama de Molliere presión entalpía o diagrama termodinámico H-P:

Figura 1. Diagrama del ciclo frigorífico de compresión.



Fuente: Mayekawa.

En el punto 4₁, la mezcla del líquido-gas del refrigerante entra al evaporador. Como la presión y temperatura en el evaporador es baja y menor a la de la cámara de refrigeración, el líquido refrigerante se vaporiza rápidamente convirtiéndose en gas a la misma presión de entrada.

En el evaporador (punto 4 al punto 1), al evaporarse, el líquido frío absorbe el “calor” del aire que circula por el exterior del serpentín del evaporador. Una vez que absorbe el calor, el refrigerante se evapora llegando al punto 1.

El gas, en este punto 1, llega al compresor mediante la línea de succión, donde es comprimido a altas presión y temperatura (punto 2). En el proceso de compresión, al gas se le agrega calor sensible, por lo que sufre un sobre calentamiento, prueba de esto es que la temperatura del gas refrigerante es entonces más alta que la del aire que rodea al condensador (USAID, 2011).

En el condensador (del punto 2 al punto 3), el aire que pasa a través de los tubos del radiador transfiere el calor que lleva el gas caliente a alta presión, al medio ambiente, por lo que el gas se condensa (punto 3).

Desde el condensador, el refrigerante se almacena en un depósito, donde se encuentra en estado líquido y caliente. De ahí el refrigerante va a la válvula de expansión (punto 3 al 4), donde se controla otra vez el caudal que entra al evaporador, y el ciclo se repite sucesivamente.

La manera más conocida de calcular el rendimiento energético es a través del coeficiente de desempeño (COP, por sus siglas en inglés). Se define como la relación entre la cantidad de refrigeración obtenida y la cantidad de energía que se requiere aportar para conseguir esta refrigeración (GIZ, 2015), tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$COP = \frac{\text{Calor extraído (kW)}}{\text{Trabajo de compresión (kW)}} = \frac{Q_L}{W_C} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

2.2.2.2 Componentes del sistema de refrigeración

▪ *Compresor*

Un compresor es una máquina que eleva la presión de un gas o vapor. Son máquinas de flujo continuo en donde se transforma la energía cinética (velocidad) en trabajo (presión). El compresor sube la presión del refrigerante para subir la temperatura, el refrigerante es un medio para transferir calor del evaporador, produciendo frío o un cambio de estado. Se busca tener un coeficiente de rendimiento (COP) lo más alto posible.

De todos los elementos del sistema, es el componente más costoso y el que más consume energía.

Se clasifica según las temperaturas del refrigerante a comprimir:

- Baja Temperatura: de -10°C a -30°C
- Media Temperatura: 0°C a -10°C
- Alta Temperatura: 7°C a -5°C

Existen diferentes tipos de compresores:

- a) Reciprocante: presentan buena descarga, son de desplazamiento positivo, presentan una condensación variable y un tamaño limitado.
- b) Tornillo: tienen una capacidad entre los reciprocantes y centrífugos, son de desplazamiento positivo.
- c) Centrífugo: son de desplazamiento dinámico, no descargan, presentan una presión de condensación limitada, y no es bueno a cargas reducidas.
- d) Rotatorio: son de desplazamiento positivo, no descargan, presentan una presión de condensación limitada y son desechables.

Los tipos de compresor más ampliamente utilizados son el compresor reciprocante y el de tornillo.

El compresor reciprocante es un compresor de desplazamiento positivo (lo que significa que una cantidad de refrigerante gaseoso es atrapado y desplazado), en el que la compresión se obtiene por desplazamiento de un pistón moviéndose lineal y secuencialmente de atrás hacia adelante dentro de un cilindro; reduciendo de esta forma, el volumen de la cámara (cilindro) donde se deposita el gas; este efecto, origina el incremento en la presión hasta alcanzar la presión de descarga, desplazando el fluido a través de la válvula de salida del cilindro.

Los compresores de tornillo son los otros compresores ampliamente utilizados en la industria. Funcionan mediante dos rotores helicoidales paralelos, que giran en un cárter en sentidos contrarios e impulsan el gas de forma continua. El rotor macho, conectado al motor, arrastra al rotor hembra como consecuencia del contacto de sus superficies. El volumen libre entre ellos disminuye comprimiendo el gas. El twin es el más utilizado.

▪ *Condensador*

El condensador es el intercambiador de calor donde el refrigerante, que proviene de la descarga del compresor como gas a alta presión y temperatura (fundamentalmente una temperatura superior a la del medio ambiente), ingresa al condensador, en donde transfiere su calor al medio ambiente, y, de manera ideal, sale en forma de líquido, es decir el gas se condensa.

- **Válvula de expansión térmica**

Uno de los objetivos del dispositivo es regular la cantidad de refrigerante que llega al evaporador, siendo el objetivo principal el causar una caída de presión en el refrigerante líquido, llevándolo de una presión alta (lado condensador) a una presión baja (lado evaporador), en donde también se logra conseguir que la temperatura del refrigerante baje a un valor por debajo de la temperatura del recinto a enfriar. Esto permite que, al existir un gradiente de temperatura “adecuado”, el refrigerante, a baja temperatura, absorba el calor del recinto y de los productos que contiene, a través del evaporador (USAID, 2011).

Cuanto más “subenfriado” llegue el líquido refrigerante a la válvula, menos cantidad tendrá que evaporarse para alcanzar la temperatura adecuada de enfriamiento (BUN-CA, 2009).

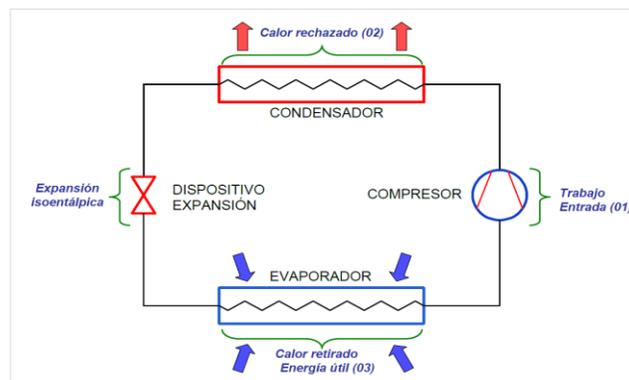
- **Evaporador**

Es un intercambiador de calor, donde el refrigerante, a una temperatura menor que la del cuarto o recinto frío (incluido en este los productos contenidos), absorbe el “calor” de éste, enfriando a la vez el recinto o cuarto, así como los productos contenidos en el cuarto.

En este proceso de absorción de calor, el fluido refrigerante cambia de su estado de líquido frío a gas caliente, es decir se lleva a cabo un proceso de evaporación, que es lo que le permite “absorber” grandes cantidades de calor.

En la siguiente figura se muestra un diagrama básico de refrigeración, donde muestra se aprecian los elementos que integran el sistema de refrigeración, que fueron descritos en los apartados anteriores.

Figura 2. Diagrama básico de refrigeración.



Fuente: Mayekawa.

2.2.3 CO₂ como refrigerante

La baja toxicidad, la no inflamabilidad, el potencial cero de agotamiento del ozono y el bajo potencial de calentamiento global han atraído la atención de los diseñadores de sistemas a principios de la década de 1990, cuando se buscaban alternativas a los clorofluorocarbonos (CFC).

Desde entonces, el dióxido de carbono ha tenido una amplia aceptación en toda la gama de sistemas de compresión de vapor, desde congeladores de baja temperatura hasta bombas de calor de alta temperatura (ASHRAE, 2014). También se ha utilizado ampliamente como refrigerante secundario, ofreciendo mejoras significativas en la eficiencia en comparación con los sistemas tradicionales de agua, glicol o salmuera.

Se han documentado las siguientes ventajas del CO₂ como refrigerante (Melo, 2016):

- Alta eficiencia, presenta mayor coeficiente de transferencia de calor y menor área de transferencia.
- Alto rendimiento volumétrico: 3-12 veces el rendimiento del NH₃.
- Buenas propiedades térmicas.
- Compresores, tuberías y elementos auxiliares de tamaño reducido: 3-12 veces más pequeños.
- Reducción en el uso de aislamiento.
- Alto COP a bajas temperaturas en ciclos subcríticos.
- Alto coeficiente de transferencia de calor.
- Baja pérdida de presión.
- En sistemas de circuito cerrado no es químicamente activo ni inflamable.
- Compatible con materiales metálicos (cobre, acero al carbón, acero inoxidable).

Dentro de las desventajas se pueden citar (Melo, 2016):

- Baja temperatura en el punto crítico.
- Presión de diseño de los equipos muy elevada en comparación con otros refrigerantes lo cual exige: componentes especiales, mayores medidas de seguridad, mayor espesor de pared de tuberías, personal especializado y mayor inversión inicial.
- Más pesado que el aire, en caso de escape desplaza el oxígeno pudiendo alcanzar

concentraciones perjudiciales para la salud.

- Inodoro, en caso de escape, no hay advertencia basada en olor.

A continuación se muestra un cuadro comparativo entre el CO₂ y otros refrigerantes de uso común.

Tabla 2. Comparación entre el CO₂ y otros refrigerantes.

PROPIEDADES	R-744(CO ₂)	R-134a	R-407C	R-410a	R-717 (NH ₃)	R-290 (PROPANO)
Tipo	Natural inorgánico	HFC (puro)	HFC (mezcla)	HFC (mezcla)	Natural inorgánico	Natural orgánico
ODP/GWP	0/1	0/1300	0/1600	0/1900	0/0	0/3
Inflamable/Tóxico	No/ No	No/ No	No/ No	No/ No	Sí/Sí	Sí/No
Masa molecular (kg/kmol)	44.0	102.0	86.2	72.6	17.0	44.1
Punto Ebullición(°C)	-78.4	-26.2	-43.8	-52.6	-33.3	-45.1
Presión Crítica(bar)	73.85	40.7	46.4	47.9	114.2	42.5
Temperatura Crítica(°C)	31.1	101.1	86.1	70.2	133.0	96.7
Calor específico (0°C y 1 bar) (kJ/kg-K)	0.82672	0.81542	0.80504	0.79452	2.1778	1.5837
Capacidad volum. refrigeración (kJ/m³)	22,545	2,868	4,029	6,763	4,382	3,902

Fuente: (Bellido, 2016)

El presente estudio aborda el sistema NH₃/CO₂ con CO₂ recirculado tipo *brine*. El sistema se caracteriza por no usar compresor para CO₂ en la segunda etapa, recirculando el CO₂ líquido a baja temperatura en los evaporadores por medio de un sistema de bombeo.

Tiene las siguientes ventajas respecto a otros ciclos de refrigeración:

- El NH₃ se usa en la etapa de alta para condensar el CO₂.
- Menor volumen de NH₃ (reducción del 85 al 90%). No hay NH₃ en los evaporadores.
- El CO₂ evaporado se condensa sin comprimirlo.
- No hay riesgo de contaminación de producto terminado.
- Menor carga de amoníaco en el sistema.
- Evaporadores con menos área de transferencia.

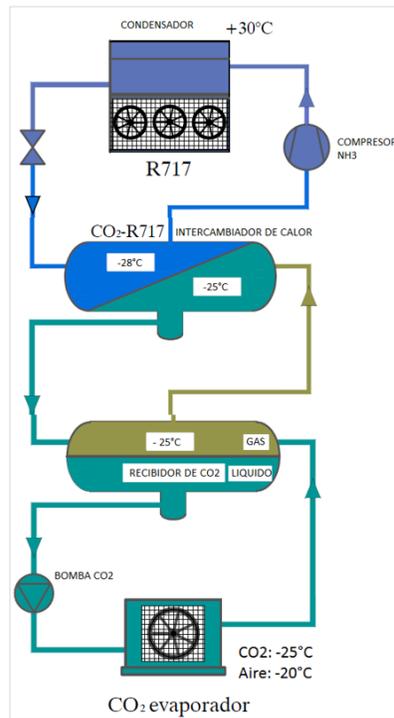
- No requiere compresor de CO₂.
- Utiliza bombas para recirculación para el CO₂ en circuito de refrigeración.
- No hay aceite en el sistema (segunda etapa).
- Sistema de bombeo de baja potencia.
- Tuberías de menor diámetro.
- Compatibilidad con materiales metálicos (cobre, acero al carbono, acero inoxidable).
- Se aprovecha el calor latente del CO₂ (30 veces superior al calor sensible de otros refrigerantes secundarios).
- Menor consumo energético.
- Seguridad (menor impacto si hay fugas, beneficio en el seguro industrial, atóxico, no inflamable).
- Costo de implantación y operación similar a los sistemas convencionales.
- Costo de mantenimiento más bajo en comparación con los sistemas de compresión de CO₂ en cascada.
- Menor impacto ambiental (GWP, ODP).

Algunas desventajas respecto a sistemas convencionales son:

- Presión de diseño alta.
- Mayor inversión inicial.
- Altas presiones cuando el sistema se detiene.

A continuación se presenta un diagrama del sistema:

Figura 3. Diagrama del sistema NH₃/CO₂ con CO₂ recirculado tipo *brine*.



Fuente: Mayekawa.

En resumen, se presenta la comparación entre los sistemas NH₃/CO₂ en cascada y NH₃/CO₂ tipo *brine*:

Tabla 3. Comparación entre sistema NH₃/CO₂ en cascada y NH₃/CO₂ tipo *brine*.

NH ₃ /CO ₂ EN CASCADA	NH ₃ /CO ₂ EN CASCADA CON CO ₂ RECIRCULADO TIPO BRINE
Sistemas de muy baja temperatura (-40°C a -55°C)	Sistemas de baja y media temperatura (-5°C a -40°C)
El CO ₂ se usa en la etapa de baja (evaporador)	El CO ₂ se usa en la etapa de baja (evaporador)
Se hace circular mediante una bomba	Se hace circular mediante una bomba
El CO ₂ evaporado (cambio de fase) se comprime.	El CO ₂ evaporado (cambio de fase) se condensa sin comprimirlo. No requiere compresor de CO ₂
Se requiere un compresor de NH ₃ y otro compresor de CO ₂	No requiere compresor de CO ₂
El NH ₃ se usa en la etapa de alta para condensar el CO ₂	El NH ₃ se usa en la etapa de alta para condensar el CO ₂

Fuente: (Melo, 2016)

2.3 Marco Legal

Costa Rica se ha comprometido con diversos acuerdos internacionales y ha establecido políticas y regulaciones a nivel nacional que aplican al sector RAC.

El marco regulatorio está impulsado principalmente el cumplimiento del Protocolo de Montreal y por las estrategias país para lograr la eliminación de los HCFC.

Dentro de la legislación aplicable en el siguiente estudio se encuentra:

2.3.1 Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono

El Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono fue aprobado el 22 de marzo de 1985 y entró en vigor en septiembre del 1988. Costa Rica ratificó el convenio mediante la Ley N. 7228 del 6 de mayo de 1991, Aprobación de la Adhesión al Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono.

El Convenio de Viena tiene por objetivo promover la cooperación entre los Países Parte, a través de observaciones sistemáticas, investigaciones e intercambio de información sobre el impacto de las actividades humanas en la capa de ozono y para adoptar medidas legislativas o administrativas para reducir efectos adversos en la capa de ozono.

2.3.2 Protocolo de Montreal relativo a las sustancias agotadoras de la capa de ozono

El Protocolo de Montreal se firmó en 1987 y entró en vigor en 1989. El 16 de septiembre de 2009, la Convención de Viena y el Protocolo de Montreal se convirtieron en los primeros tratados de la historia de las Naciones Unidas en lograr la ratificación universal (197 Países Partes). En Costa Rica fue ratificado mediante la Ley N. 7223 del 8 de abril de 1991, Aprobación del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias agotadoras de la capa de ozono. Los principales tipos corresponden a los clorofluorocarbonos (CFC), hidroclorofluorocarbonos (HCFC), halones y bromuro de metilo. (DIGECA, 2021).

El Protocolo nace con el objetivo de asistir técnica y financieramente a los Países Parte en reducir la producción y el consumo de sustancias agotadoras de ozono, disminuyendo de esta manera su potencial liberación a la atmósfera.

En 1990 se crea el Fondo Multilateral del Protocolo de Montreal, el cual proporciona fondos para ayudar a los países en desarrollo a cumplir con sus obligaciones en virtud del Protocolo, y así eliminar gradualmente el uso de sustancias que agotan la capa de ozono (SAO) en un calendario acordado. Los países elegibles para esta asistencia son aquellos con un consumo anual per cápita de SAO de menos de 0.3 kg al año, según se define en el Artículo 5 del Protocolo (Multilateral Fund, 2021).

El Fondo es administrado por un Comité Ejecutivo con una representación equitativa de siete países industrializados y siete países que operan al amparo del Artículo 5, los cuales son elegidos anualmente por la Reunión de las Partes. Costa Rica es uno de los países del Artículo 5 y gracias al co-financiamiento del Fondo Multilateral administrado por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, se implementó el sistema NH₃/CO₂ en cascada en la empresa PINOVA.

Se han realizado enmiendas al Protocolo de Montreal con el fin de incluir sustancias agotadoras de la capa de ozono que deben ser controladas por los Países Parte. Costa Rica ha aprobado dichas enmiendas mediante las siguientes leyes:

- Aprobación de la Enmienda del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de Ozono y sus anexos adoptadas en la Segunda y Cuarta reunión de las partes de Londres y Copenhague de 1998 (Ley N° 7808 del 11 de junio de 1998).
- Aprobación de la Enmienda de Montreal al Protocolo de Montreal relativo a las sustancias agotadoras de la capa de Ozono y sus anexos de 1997 (Ley N° 8443 del 3 de mayo del 2005).
- Aprobación de la Enmienda de Beijing al Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de Ozono (Ley N° 8670 del 9 de octubre de 2008).
- Aprobación de la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal, relativo a las Sustancias Agotadoras de la Capa de Ozono (Ley N° 9522 del 20 de diciembre de 2017). Con dicha Enmienda, se incorpora un nuevo Anexo F al Protocolo de Montreal, que enlista los HFC, y establece que los países desarrollados comenzarán a disminuir gradualmente el uso de los HFC en el 2019, mientras que aquellos en vías de desarrollo, congelarán sus niveles de consumo entre los años 2024 y 2028.

Asimismo, se han establecido los siguientes reglamentos para la regulación de las sustancias agotadoras de la capa de ozono:

- Reglamento de control de sustancias agotadoras de la capa de ozono de acuerdo con la Ley N° 7223 y sus enmiendas (N° 35676-S-H-MAG-MINAET del 5 de marzo del 2010).
- Reglamento de incorporación del anexo D del Protocolo de Montreal (N° 35694-MINAET-H-RE del 8 de marzo del 2010).
- Reglamento para implementar un mecanismo de cuotas de importación para la eliminación gradual del uso de HCFC limitados en el grupo I del Anexo C del protocolo de Montreal (N°37614-MINAET del 9 de Noviembre de 2012). El reglamento establece la reducción gradual de la importación de HCFC a partir del mes de enero del año 2013 y hasta el 2030. La Oficina Técnica del Ozono es la encargada de fijar la cuota total anual de importación de los HCFC, con base en el promedio del historial de importación para los años 2009-2010.

2.2.3 Plan de Gestión para la eliminación de HCFC en Costa Rica 2013 – 2030

El *Plan de Gestión para la eliminación de HCFC en Costa Rica* se fundamenta en el control de las importaciones de hidroclorofluorocarbonos a granel por medio de la aplicación rigurosa de un sistema de cuotas ajustadas al calendario de reducciones establecido en el Protocolo de Montreal.

El objetivo general de la estrategia corresponde a “*proteger el medio ambiente a través de la disminución en el país del uso de los HCFC hasta eliminar su uso como refrigerante y espumante, con la menor afectación a los sectores usuarios*” (DIGECA, 2013). Dicha estrategia consta de dos partes principales: 1- Eliminación gradual de los HCFC usados principalmente en refrigeración y aire acondicionado, 2- Transformación de procesos industriales para la producción de espumas sin HCFC, con lo que se logra hacer una reducción muy importante de la importación de los HCFC utilizados para la producción de espumas en las primeras fases del HPMP.

La implementación y seguimiento de la estrategia está a cargo de la Dirección de Gestión de Calidad Ambiental (DIGECA) y de la Oficina Técnica del Ozono (OTO).

La estrategia tiene un horizonte de tiempo de 20 años que consta de tres fases. Durante la primera fase se congela, desde el 2010 y hasta el 2013, la importación de HCFC a los niveles alcanzados en el 2010. A partir del 2013 y hasta el 2015 se implementarán los proyectos específicos para la conversión de sectores que llevarán a una disminución de casi el 60% al 2015. Para la segunda fase se han definido la

reconversión de sectores menores y la implementación escalonada de los sistemas de cuotas, prohibiciones e incentivos al uso de equipos eficientes, para que al 2030 la cantidad en kg de HCFC importados por año sea igual o inferior al 2.5% de la cantidad importada en el 2010 (DIGECA, 2013).

2.3.4 Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050

El Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050 fue lanzado el 24 de febrero del 2019 bajo el liderazgo del Ministerio de Ambiente y Energía y la Dirección de Cambio Climático. La visión del plan contempla la transición hacia una economía moderna, verde y libre de emisiones.

El objetivo a largo plazo es lograr emisiones netas cero para el 2050, a través de implementación de acciones en 10 ejes sectoriales con paquetes de políticas en tres periodos: inicio (2018-2022), inflexión (2023- 2030) y despliegue masivo (2031-2050), así como 8 estrategias transversales.

En su Eje 6, el Plan Nacional de Descarbonización contempla la *“modernización del sector industrial mediante la aplicación de procesos y tecnologías eléctricas, eficientes y sostenibles de baja y cero emisiones”*. Para ello, el Plan establece como acción prioritaria los procesos de sustitución de refrigerantes con bajo o cero PCG, en alineamiento con el Protocolo de Montreal y la Enmienda de Kigali.

2.3.5 Programa País Carbono Neutralidad

La Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Energía ha impulsado el Programa País Carbono Neutralidad (PPCN) como parte de los compromisos nacionales en la mitigación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) contemplados en la Estrategia Nacional de Cambio Climático, el Plan de Descarbonización y los compromisos internacionales establecidos en la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC) y el Acuerdo de París.

El Programa fue oficializado mediante el acuerdo N°36-2012-MINAET como un mecanismo voluntario para el reporte de inventarios de GEI y la demostración de carbono neutralidad en organizaciones dentro del marco del Sistema Nacional para la Calidad (DCC, 2020).

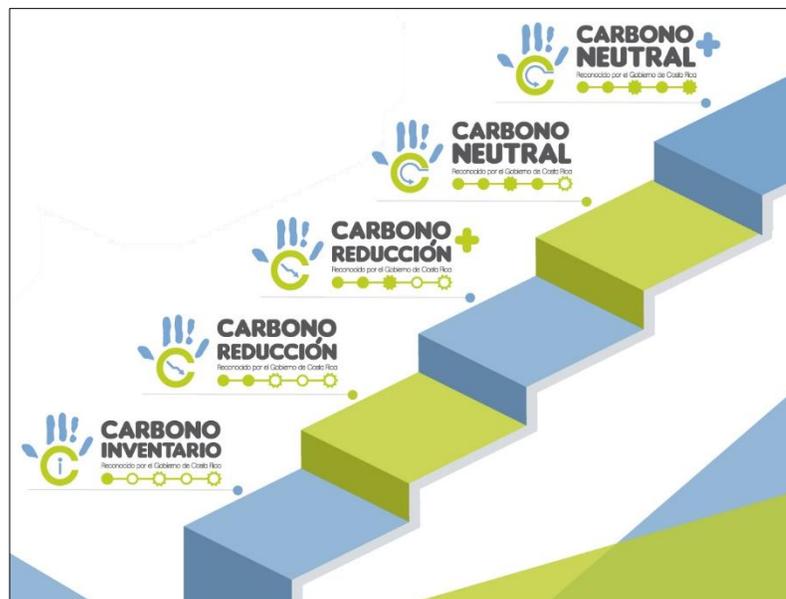
Actualmente se ejecuta el Programa País Carbono Neutralidad 2.0, el cual consta de diferentes categorías como organizacional, comunidades, productos, eventos y centros educativos. El PPCN categoría

organizacional está dirigido tanto a organizaciones públicas como privadas, las cuales deben cumplir con los requisitos de la norma *INTE B5: Norma para demostrar la Carbono Neutralidad*.

El PPCN 2.0 brinda 5 tipos de reconocimiento a las organizaciones (DCC, 2020):

- **Carbono Inventario:** La organización realiza el inventario de sus emisiones y remociones de GEI de acuerdo con lo especificado en las normativas de procesos y estándares de calidad del PPCN 2.0.
- **Carbono Reducción:** La organización, además de realizar su inventario, gestiona y cuantifica acciones de reducción de emisiones GEI asociadas a sus fuentes de emisión
- **Carbono Reducción Plus:** La organización, además de gestionar y cuantificar acciones de reducción, establece objetivos adicionales determinados por el Ministerio de Ambiente y Energía.
- **Carbono Neutral:** La organización realiza acciones de mitigación y compensa aquellas no ha podido reducir a través de los Mecanismos de Compensación Permitidos.
- **Carbono Neutral Plus:** La organización, además de compensar sus emisiones, establece objetivos adicionales determinados por el Ministerio de Ambiente y Energía.

Figura 4. Sistema de reconocimiento del Programa País Carbono Neutral 2.0.



Fuente: DCC, 2021.

La empresa Premezclas Industriales para Panadería S.A. participa en el PPCN desde el año 2014.

El alcance de la organización corresponde a las emisiones directas e indirectas de dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbono e hidroclorofluorocarbono para las actividades de elaboración de productos para panadería y repostería en las presentaciones de: premezclas, masa congelada, precocido y listos para consumir, desde la recepción de materias primas e insumos hasta el despacho del producto final. Se incluyen otras emisiones indirectas producto de compostaje, residuos ordinarios y viajes aéreos. Actualmente la empresa tiene el reconocimiento de *Carbono Neutralidad Plus* (DCC, 2020).

2.3.6 Normas Técnicas

Las siguientes normas técnicas aplican a la presente investigación:

- *INTE/ISO 50001:2018 / Sistemas de gestión de la energía – Requisitos con orientación para su uso.* Esta norma presenta los requisitos para establecer, implementar, mantener y mejorar un sistema de gestión de la energía (SGEn), con el propósito de permitir a una organización contar con un enfoque sistemático para alcanzar una mejora continua en su desempeño energético, incluyendo la eficiencia energética, el uso de la energía y el consumo de energía.
- *ISO 50006:2014 Sistemas de gestión de la energía - Medición del rendimiento energético mediante líneas de base de energía e indicadores de rendimiento energético - principios generales y directrices.* Esta norma orienta sobre cómo establecer, utilizar y mantener los indicadores de desempeño energético (IDEn) y líneas base de energía (LBEn) como parte del proceso de medición del desempeño energético dirigido a las organizaciones.
- *INTE/ISO 14064-2:2019. Gases de efecto invernadero — Parte 2: Especificación con orientación, a nivel de proyecto, para la cuantificación, el seguimiento y el informe de la reducción de emisiones o el aumento en las remociones de gases de efecto invernadero.* Esta norma especifica los principios, requisitos, así como orientaciones para la cuantificación, el seguimiento y el informe de actividades destinadas a producir reducciones de las emisiones o aumentos de las remociones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel de proyecto.

2.4 Hipótesis de Investigación

La presente investigación plantea la siguiente hipótesis alternativa:

- El Sistema NH_3/CO_2 genera una reducción del consumo eléctrico en 20% en comparación con el Sistema HCFC-22 en la Cámara de Producto Terminado y Antecámaras de la empresa Premezclas Industriales para Panadería S.A. (PINOVA).

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

3.1 Tipo de estudio

La presente investigación sigue un diseño cuantitativo no experimental y el tipo de estudio es correlacional, debido a que se busca cuantificar las variables operativas del sistema de refrigeración, así como evaluar la relación de variables tanto de carácter técnico como económico.

3.2 Paradigma de investigación

La investigación responde a un paradigma cuantitativo debido a que, mediante la recolección de datos y el uso de métodos estadísticos, se busca realizar un análisis comparativo entre variables técnicas y económicas para dos diferentes tecnologías de refrigeración.

3.3 Instrumentos de recolección de datos

En la siguiente tabla se muestran los instrumentos de recolección de datos para el desarrollo de los objetivos de la investigación.

Tabla 4: Instrumentos de recolección de datos

OBJETIVO PLANTEADO	INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	FUENTE DE INFORMACIÓN	FORMA DE RECOLECCIÓN	FORMA ANÁLISIS DE LOS DATOS
Objetivo 1: Realizar un análisis comparativo entre el sistema original (HCFC-22) y el sistema de refrigeración actual (NH ₃ /CO ₂) para la estimación de la eficiencia energética a través del cálculo del coeficiente de desempeño (COP).	Observación Análisis de documentos	Recibos de facturación eléctrica. Bitácoras y registros de consumo de energía, temperatura y presión. Manual de uso de software. Fichas técnicas del fabricante.	Recopilación de datos históricos de medidores de energía Acuvim II, así como datos de temperatura y presión de los equipos. Bitácoras, registros y facturación de la empresa (al menos tres años de operación).	Análisis comparativo del consumo anual de energía de los sistemas de refrigeración (HCFC-22 y NH ₃ /CO ₂). Modelación mediante el uso del software Pack Calculation Pro. Cálculo de propiedades térmicas del CO ₂ y NH ₃ mediante el paquete de código abierto CoolPack.
Objetivo 2: Establecer indicadores energéticos para la medición del desempeño energético en el proceso de almacenamiento de producto terminado según las normas ISO 50001 e ISO 50006.	Observación	Recibos de facturación eléctrica. Registros de consumo de energía. Registros de cantidad de producto almacenado.	Recopilación de los datos históricos provenientes de bitácoras, registros y facturación de la empresa.	Análisis de los indicadores de desempeño energético contra la línea base siguiendo los lineamientos de las normas ISO 50001 e ISO 50006.

OBJETIVO PLANTEADO	INSTRUMENTO DE MEDICIÓN	FUENTE DE INFORMACIÓN	FORMA DE RECOLECCIÓN	FORMA ANÁLISIS DE LOS DATOS
Objetivo 3: Determinar la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero debido al uso de refrigerantes naturales (NH ₃ /CO ₂) para el cálculo de la huella de carbono según la norma ISO 14064.	Observación	Recibos de facturación eléctrica. Registros de consumo eléctrico. Recibos de carga de refrigerante.	Recopilación de los datos históricos provenientes de bitácoras, registros y facturación de la empresa.	Cálculo según la norma ISO 14064, considerando datos históricos desde el 2016 como año base. Tablas de datos y gráficos.
Objetivo 4: Desarrollar la evaluación financiera del proyecto implementado para la identificación de beneficios económicos a través de indicadores financieros como el VAN y TIR.	Observación	Datos de contabilidad de la empresa. Valor del dólar BCCR.	Recopilación de los datos históricos provenientes de la facturación y contabilidad de la empresa.	Matriz de datos, cálculos financieros.

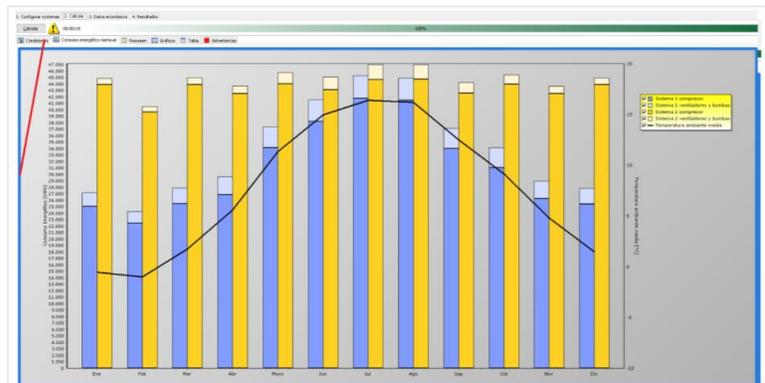
Fuente: Elaboración propia.

3.4 Definición de prueba piloto para Objetivo 1

El plan piloto de la investigación consistirá en una simulación del sistema original (HCFC-22) y el sistema de refrigeración actual (NH₃/CO₂) mediante el software Pack Calculation Pro de IPU.

Mediante la simulación de la instalación, se realizará el cálculo y comparación del consumo energético anual de los sistemas de refrigeración en estudio. Este análisis permitirá comprobar si el sistema NH₃/CO₂ genera una reducción del consumo eléctrico en 20% en comparación con el Sistema HCFC-22.

Figura 5. Imagen del software Pack Calculation Pro en relación con el cálculo de consumo energético.



Fuente: Guía de Usuario del Software Pack Calculation Pro de IPU (IPU, 2020).

En el cálculo del consumo de energía de los sistemas de refrigeración, se modelará la instalación integrando las potencias de los equipos consumidores de energía, en cada régimen de funcionamiento del ciclo operativo. El software seleccionado balancea el sistema de refrigeración para cada hora del año.

El software Pack Calculation Pro permite comparar sistemas al seleccionar los compresores de una base de datos, incluyendo el sistema de CO₂ en cascada. Además, se debe configurar el perfil de carga, la temperatura de evaporación, tipo de condensador, etc.

El plan piloto permitirá aproximar las condiciones reales de los sistemas de refrigeración en estudio, con el fin de obtener valoraciones precisas de las variables establecidas en los objetivos de la investigación.

3.5 Técnicas para presentación y análisis de la información

Los objetivos de la investigación se desarrollarán con base en las siguientes técnicas para presentación y análisis de información:

Tabla 5: Técnicas para presentación y análisis de la información

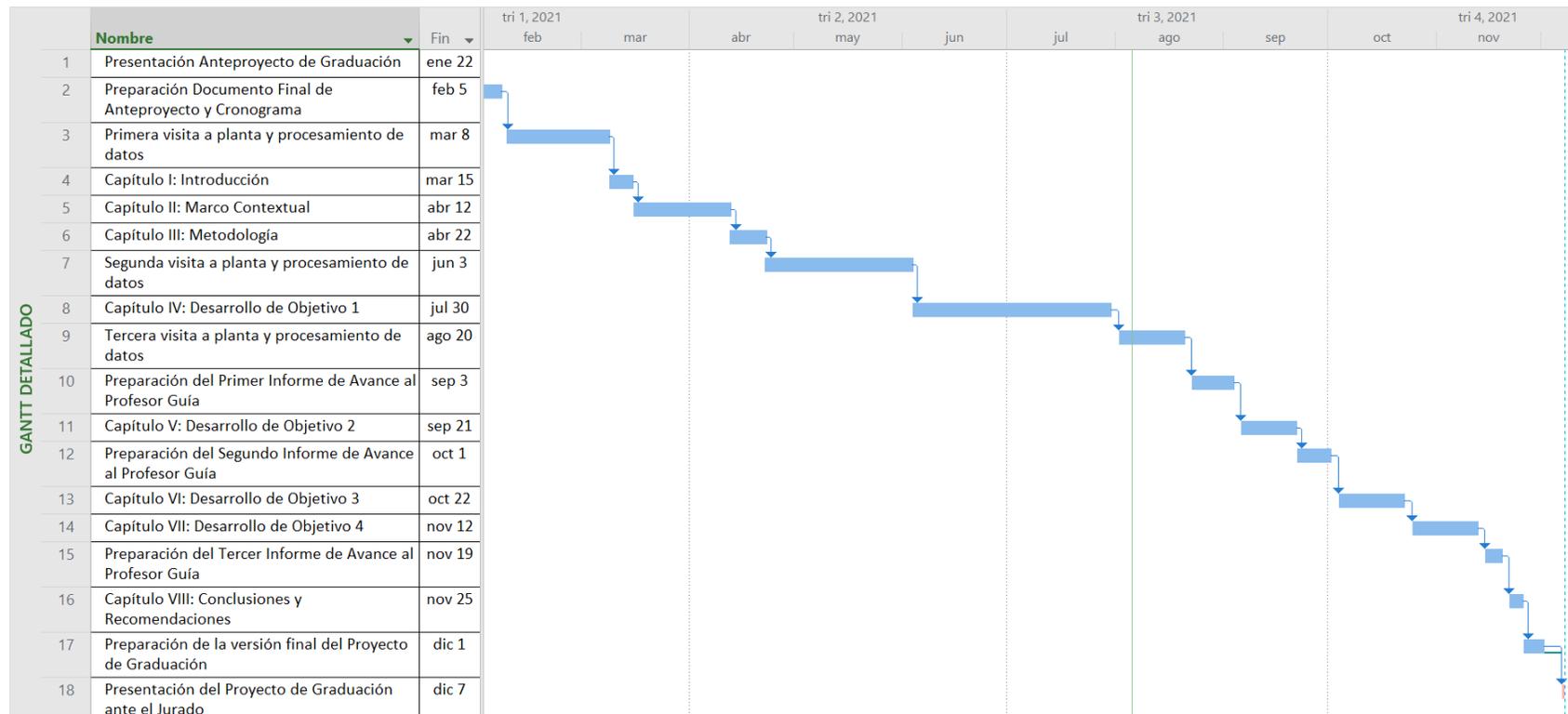
OBJETIVO	UNIDAD DE ANÁLISIS	VARIABLE O DIMENSIÓN	INDICADORES DE LOGRO	TIPO	FUENTE	TÉCNICA DE ANÁLISIS
Objetivo 1: Realizar un análisis comparativo entre el sistema original (HCFC-22) y el sistema de refrigeración actual (NH ₃ /CO ₂) para la estimación de la eficiencia energética a través del cálculo del coeficiente de desempeño (COP).	Conocimiento técnico de variables.	Consumo eléctrico (kWh).	Reducción del consumo eléctrico en 20%	Intervalo	Recibos de facturación eléctrica. Bitácoras y registros de consumo de energía, temperatura y presión. Manual de uso de software. Fichas técnicas del fabricante.	Análisis comparativo del consumo anual de energía de los sistemas de refrigeración (HCFC-22 y NH ₃ /CO ₂). Modelación mediante el uso del software Pack Calculation Pro. Cálculo de propiedades térmicas del CO ₂ y NH ₃ mediante el paquete de código abierto CoolPack.
		Consumo de potencia eléctrica (kW).				
		Capacidad de refrigeración (kW).				
		Coeficiente de desempeño (COP).				
Objetivo 2: Establecer indicadores energéticos para la medición del desempeño energético en el proceso de almacenamiento de producto terminado según las normas ISO 50001 e ISO 50006.	Conocimiento técnico de variables.	Consumo eléctrico (kWh).	Reducción 40% kWh/TM	Intervalo	Recibos de facturación eléctrica Registros de cantidad de producto almacenado	Análisis mediante regresión lineal, siguiendo los lineamientos de las normas ISO 50001 e ISO 50006.
		Producto congelado almacenado (TM).				
		Toneladas de Refrigeración (TR).				
Objetivo 3: Determinar la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero debido al uso de refrigerantes naturales (NH ₃ /CO ₂) para el cálculo de la huella de carbono según la norma ISO 14064.	Conocimiento técnico de variables.	Consumo eléctrico (kWh).	Reducción del 40% de toneladas de CO ₂ equivalente (ton CO _{2eq})	Intervalo	Recibos de facturación eléctrica Registros de consumo eléctrico Recibos de carga de refrigerante Factores de emisión de gases de efecto invernadero (IMN) Potencial de Calentamiento Global	Cálculo según la norma ISO 14064.
		Pérdidas de HCFC-22 (kg).				
		Costos de recarga de refrigerante.				
Objetivo 4: Desarrollar la evaluación financiera del proyecto implementado para la identificación de beneficios económicos a través de indicadores financieros como el VAN y TIR.	Conocimiento económico de variables.	Cantidad de paros no programados.	TIR > 10%	Intervalo	Datos de contabilidad de la empresa. Valor del dólar BCCR	Matriz de datos, cálculos financieros.
		Costos por tercerización de servicios de bodegaje refrigerado.				
		Costo de inversión inicial del proyecto.				
		Costos de mantenimiento.				

Fuente: Elaboración propia.

3.6 Cronograma de ejecución

En la siguiente figura se presenta el cronograma de ejecución del proyecto a través de un diagrama de Gantt.

Figura 6. Diagrama de Gantt del proyecto de investigación.



Fuente: Elaboración propia, Microsoft Project.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL SISTEMA ORIGINAL (HCFC-22) Y EL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN ACTUAL (NH₃/CO₂ EN CASCADA)

4.1 Descripción de la Empresa

4.1.1 Información general de la Empresa

En 1988 nace Premezclas Industriales para Panaderías S.A. (PINOVA), la cual incorpora la venta de pan preparado para que las panaderías puedan vender el producto fresco. Actualmente PINOVA pertenece a la división de FIFCO Retail de la Corporación Florida Ice & Farm Company (FIFCO), la cual adquirió a Corporación Musmanni en diciembre del 2011. FIFCO Retail además comprende las Tiendas de Conveniencia Musi, La Tienda de la Birra, L'Artisan Café y Vinum Stores.

Figura 7. Planta de Premezclas Industriales para Panadería S.A. (Florida Retail).



Fuente: Elaboración propia.

La planta se ubica en la provincia San José y el cantón de la Uruca. Dicha ubicación se detalla a continuación:

Figura 8. Ubicación de Planta de Premezclas Industriales para Panadería S.A.

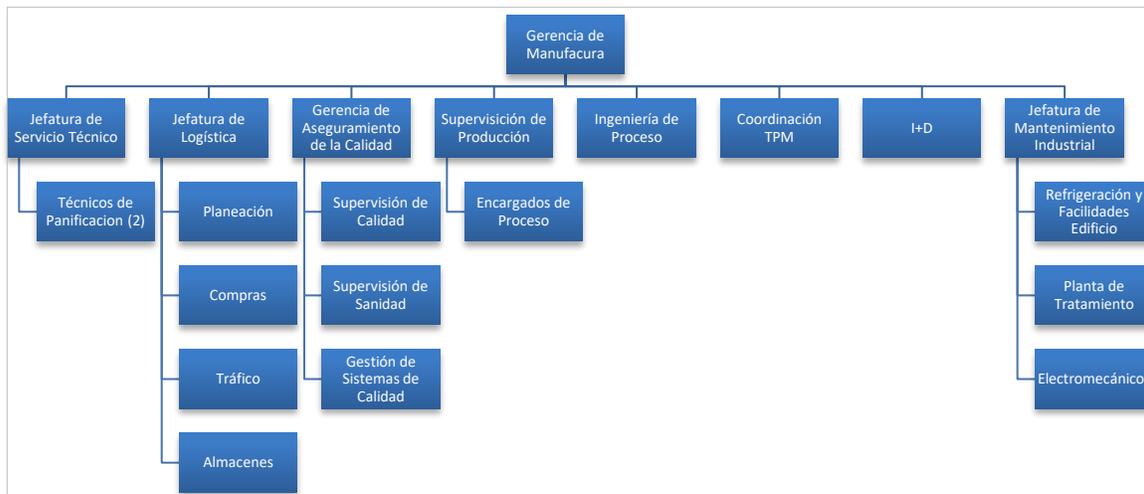


Fuente: Google Earth, 2021.

La Uruca presenta una temperatura ambiente entre los 17°C y los 28 °C.

Se muestra a continuación el organigrama de la Gerencia de Manufactura:

Figura 9. Organigrama de la Gerencia de Mantenimiento.



Fuente: Florida Retail.

Según el último Reporte de Sostenibilidad de la empresa del año 2020, la Planta de PINOVA (Florida Retail) cuenta con las siguientes certificaciones:

- ISO 14001:2015 Sistema de Gestión Ambiental
- ISO 14064 Huella de Carbono
- INTE-ISO 50001:2018 Sistema de Gestión de la Energía
- INTE B5 Sistema para demostrar la Carbono Neutralidad, Categoría Carbono Neutral Plus
- Certificación en Inocuidad Alimentaria FSSC 22000

En el año 2018 la empresa obtiene el Premio de Responsabilidad Social en Acción “Alberto Martín Chavarría”, Premio Ambiente, otorgado por AMCHAM, por la implementación del proyecto objeto de la presente investigación “Sistema de Refrigeración con Gases naturales en la Planta de Manufactura de Florida Retail”.

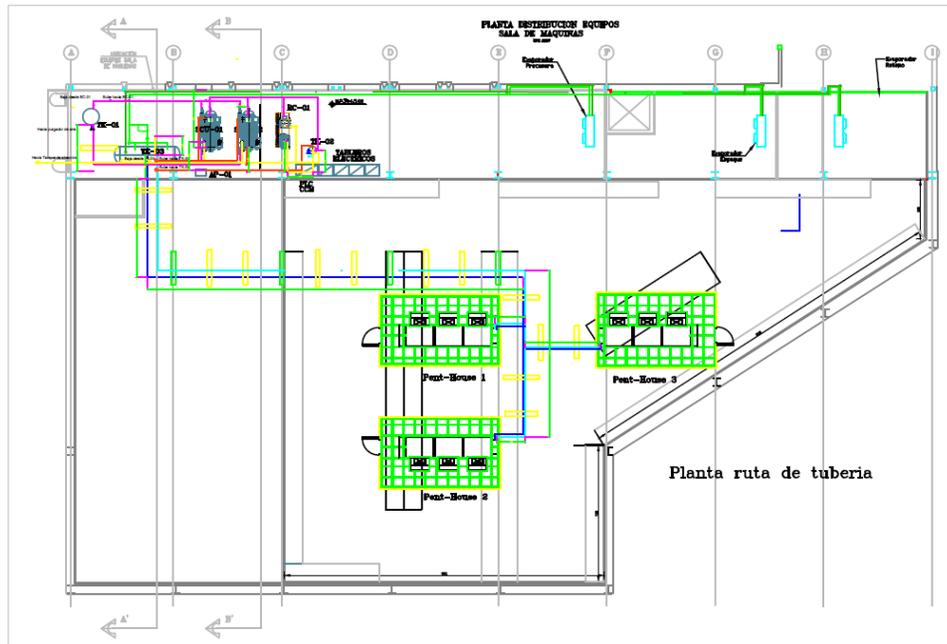
4.1.2 Áreas de producción

La Planta Premezclas Industriales para Panadería S.A. comprende diferentes líneas de producción, las cuales se dividen en 3 plantas a nivel interno:

- En la Planta 1 de 450 m² se reciben las materias primas secas para ser pesadas y dosificadas, posteriormente se realizan los bultos de mezcla en la línea Agriflex de 1500 kg/h, para que puedan ser transportados en paquetes a las diferentes líneas producción o para que puedan ser empacadas y etiquetadas para su almacenamiento. Cuenta con 6 silos de 200 toneladas que abastecen de harina a toda la planta.
- La Planta 2 de 1,450 m² está compuesta por tres líneas de producción de panes congelados (meca 1, meca 2 y meca 3).
- La Planta 3 de 1,100 m² cuenta con 6 líneas de producción de pasteles, productos hojaldrados, rellenos y galletas.
- Zonas de almacenamiento: Se cuenta con una zona de almacenamiento en seco de 350 m² y las cámaras de congelado de 750 m² (250 toneladas de producto), estas últimas corresponden al objeto de la presente investigación.

El detalle del área de estudio se presenta en la siguiente figura, donde se muestran la distribución de los evaporadores tipo Penthouse:

Figura 10. Distribución en planta.



Fuente: Florida Retail.

4.1.3 Sistema de Gestión de la Energía (SGEn)

Premezclas Industriales para Panadería S.A. recibió en junio del 2020 el certificado de Sistema de Gestión de la Energía de acuerdo con la norma *INTE-ISO 50001:2018*.

El alcance del Sistema de Gestión de la Energía corresponde a la “Elaboración de productos para panadería y repostería en las presentaciones de: premezclas secas, así como pastelería y pan laminado (con o sin relleno), pan formado y galletería, incluyendo los procesos de mezclado, horneado, enfriado, empaque, congelado y despacho de producto terminado” (Florida Retail, 2020).

Abarca las operaciones en Costa Rica, considerando todas las personas, las actividades de la planta de manufactura y las actividades de apoyo interno que se ubican dentro de los límites físicos del SGEn. De acuerdo con el Manual del SGEn, la organización incluye en su alcance todos los tipos de energía que están dentro del alcance y de los límites.

La empresa tiene documentada su política energética, la cual incluye los compromisos de alta dirección y su importancia dentro de la organización, tal y como se puede observar en la siguiente imagen:

Figura 11. Política de Gestión de Energía de Florida Retail.

 SHE Planta Florida Retail	Política de Gestión de Energía	CODIGO: PSG-SHE-0001 VERSION: 002 PAGINA: 1 de 1
---	---------------------------------------	--

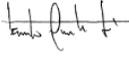
Política de Gestión de Energía

Planta de Manufactura de Florida Retail reconoce su responsabilidad del Sistema de Gestión de Energía (SGEn), asumiendo los siguientes compromisos:

- Cumplir, controlar y revisar los objetivos y metas energéticas.
- Asegurar la disponibilidad de la información y los recursos necesarios para la mejora continua del desempeño energético y del SGEn.
- Cumplir los requisitos legales y normativas aplicables a la empresa.
- Apoyar la adquisición de productos y servicios, así como las actividades de diseño de eficiencia energética que impactan en el desempeño energético.

Alta Dirección del Sistema de Gestión de Energía:

Fecha de aprobación:
Mayo/2020



 Gerardo Miranda
 Gerente Salud, Seguridad y Ambiente
 FIFCO



 Enrique Víquez
 Gerente Manufactura
 Planta de Manufactura Retail

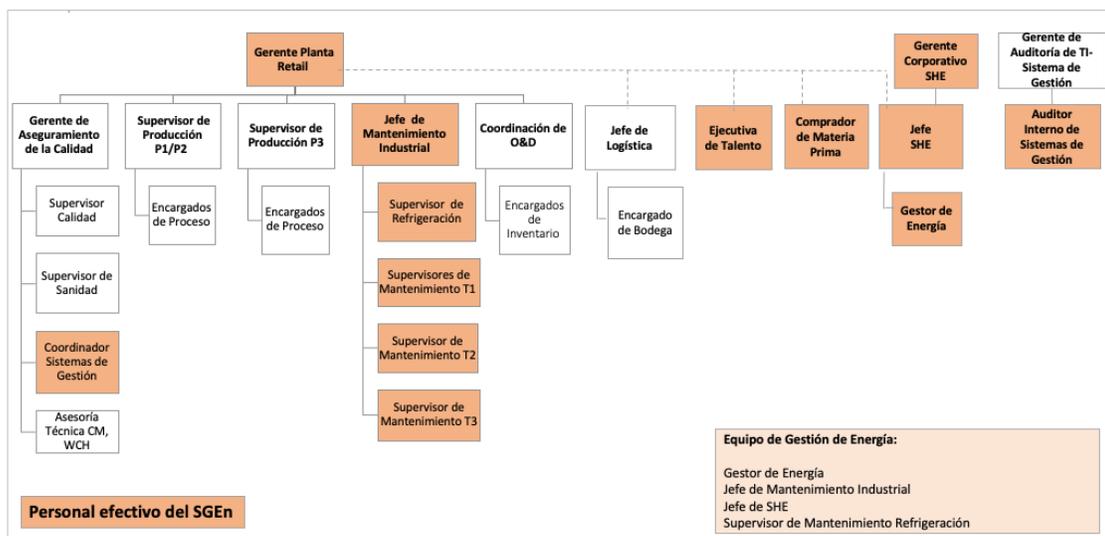


 Adrián Canessa
 Jefe Salud, Seguridad y Ambiente
 Planta de Manufactura Retail

Fuente: Florida Retail.

La organización ha identificado el personal efectivo del SGEn y ha designado a un equipo de gestión de energía designado, tal y como se muestra en la siguiente figura:

Figura 12. Organigrama del SGEn en Planta Florida Retail.



Fuente: Florida Retail.

La organización cuenta con el compromiso de la alta dirección, asignando los recursos adecuados para establecer, implementar, mantener y mejorar el SGen y el desempeño energético. Dichos recursos incluyen el recurso humano, presupuesto en gasto operativo (OPEX) y presupuesto en gasto capital (CAPEX) (Florida Retail, 2020).

Con base en la revisión energética realizada por la empresa en el 2020, se identificaron los siguientes usos significativos de la energía:

Tabla 6. Usos significativos de la energía de la Planta de Manufactura PINOVA.

USOS SIGNIFICATIVOS DE LA ENERGÍA	VARIABLES RELEVANTES	IDEn
USE 1: Refrigeración para congelación	Producción (cajas Producidas)	Consumo real (kWh) / Consumo esperado (kWh)
USE 2: Refrigeración para mantenimiento	No establecido	Consumo real (kWh) / Consumo esperado (kWh)

Fuente: Florida Retail.

El USE 2 corresponde al sistema de refrigeración objeto de la presente investigación y se abordará en detalle en los subsiguientes apartados. En el marco del SGen, la empresa a la fecha no ha determinado las variables relevantes para el USE 2, por lo que se presenta su respectivo análisis en el Capítulo V.

4.2 Descripción de los sistemas de refrigeración

4.2.1 Sistema HCFC-22

La instalación original utilizaba HCFC-22 como refrigerante y consistía en un sistema de expansión directa de una sola etapa, con una potencia total instalada de 223kW (299 HP) y una capacidad de refrigeración de 176 kW (50 TR). Se tenía un compresor de tornillo marca Frick modelos RXF24 de 23 años de antigüedad y otras 2 unidades marca Luve Contardo con compresores de tornillo Bitzer alemanes modelo OSN-7441(60 HP) con más de 15 años de operación (Florida Retail, 2020).

4.2.1.1 Inventario de equipos eléctricos del sistema HCFC-22

A continuación se presentan las características generales de los equipos que constituían la instalación original:

Tabla 7. Lista de inventario de equipos eléctricos del sistema HCFC-22.

EQUIPO	CANTIDAD	CANTIDAD DE MOTORES	TIPO	ALIMENTACIÓN 3Ø	POTENCIA UNITARIA		POTENCIA TOTAL
				VOLTIOS	HP	KW	KW
Compresor #1	1	1	Tornillo	220	60	44,76	44,76
Compresor #2	1	1	Tornillo	220	60	44,76	44,76
Compresor #3	1	1	Tornillo	220	50	37,30	37,30
Compresor #4	1	1	Reciprocante	220	6	4,48	4,48
Compresor #5	1	1	Reciprocante	220	6	4,48	4,48
Compresor #6	1	1	Reciprocante	220	7	5,22	5,22
Evaporadores #1	11	13	Abanico axial	220	5	3,73	48,49
Evaporador #2	3	6	Abanico axial	220	1,5	1,12	6,71
Condensador #1	1	2	Abanico axial	220	3	2,24	4,48
Condensador #2	1	2	Abanico axial	220	3	2,24	4,48
Condensador #3	1	8	Abanico axial	220	3	2,24	17,90
Total:							223,05

Fuente: (UNDP, 2018)

4.2.1.2 Temperatura de cámaras

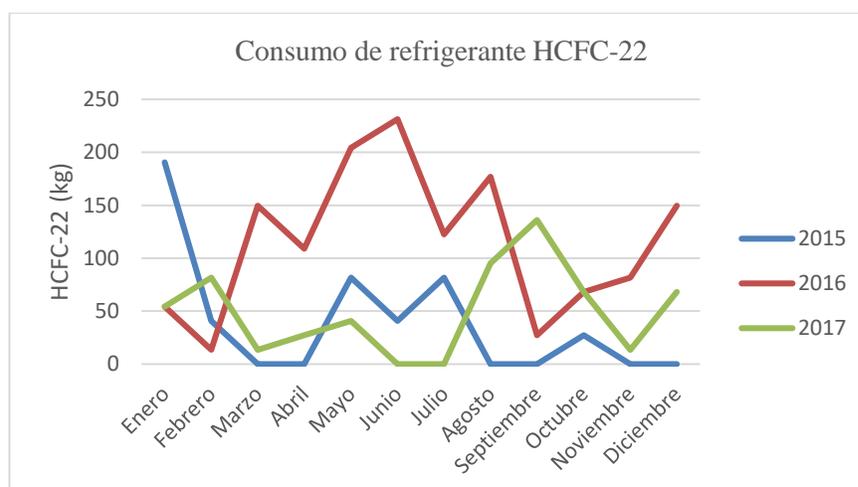
El sistema original presentaba limitaciones para alcanzar temperaturas óptimas en las cámaras y antecámaras de producto terminado. Dicho sistema alcanzaba una temperatura promedio de -11°C, mientras el producto sale de producción a -15°C. Además, se tenían 3 antecámaras y una cámara de empaque con un promedio de 12°C; cuando se requería un alcanzar un rango de temperatura de 0 a 5°C.

La instalación original contaba con capacidad para el almacenamiento de 150 toneladas de producto terminado, sin embargo, se limitaba la posibilidad de aprovechar todo el volumen disponible para almacenar hasta 250 toneladas aproximadamente y así satisfacer las necesidades debido a la expansión del negocio a partir del año 2011.

4.2.1.3 Consumo de refrigerante

La instalación original basada en el uso de HCFC-22 contaba con aproximadamente 909 kg de carga. Debido a que el sistema de refrigeración original operaba al margen de su vida útil, se requería de mayor mantenimiento y recargas de gas refrigerante.

Gráfico 1. Comportamiento en el uso de refrigerante HCFC-22.



Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.4 Consumo de energía eléctrica

En el sistema original de HCFC-22, el consumo de energía eléctrica estaba relacionado a los equipos instalados de la Tabla 4. Por las condiciones del proceso de manufactura, la operación del sistema de refrigeración se realizaba de forma continua 24/7.

En la siguiente tabla se muestra la estimación del consumo de energía eléctrica para el sistema HCFC-22.

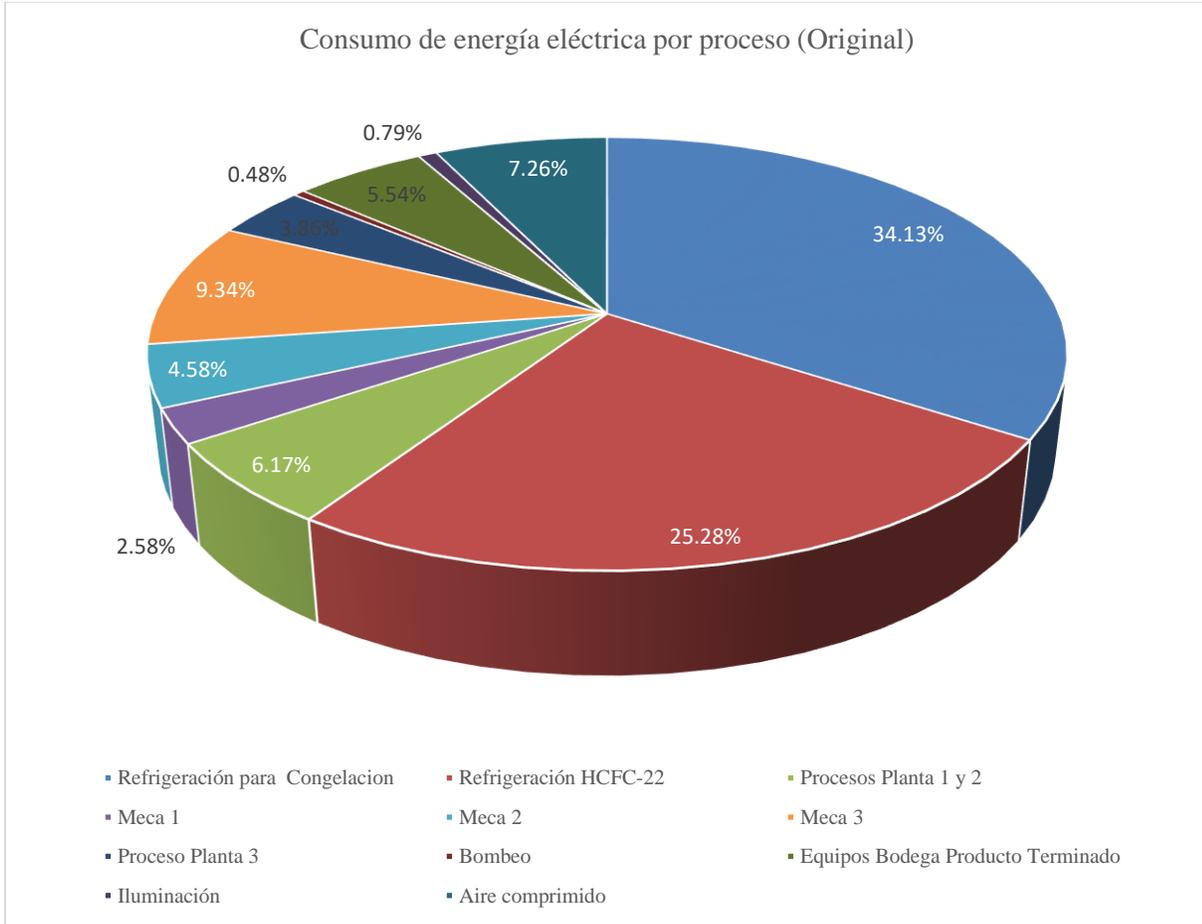
Tabla 8. Tabla 8. Energía consumida por el sistema HCFC-22.

EQUIPO	ENERGÍA CONSUMIDA (KWH)		
	DÍA	MES	AÑO
Compresor #1	1,074.24	32,227.20	386,726.40
Compresor #2	1,074.24	32,227.20	386,726.40
Compresor #3	895.20	26,856.00	322,272.00
Compresor #4	107.42	3,222.72	38,672.64
Compresor #5	107.42	3,222.72	38,672.64
Compresor #6	125.33	3,759.84	45,118.08
Evaporadores #1	1,163.76	34,912.80	418,953.60
Evaporador #2	161.14	4,834.08	58,008.96
Condensador #1	107.42	3,222.72	38,672.64
Condensador #2	107.42	3,222.72	38,672.64
Condensador #3	429.70	12,890.88	154,690.56
Total	5,353.30	160,598.88	1,927,186.56

Fuente: (UNDP, 2018)

Con base en la estimación del consumo de energía eléctrica para el sistema HCFC-22, se determinó que representaba el 25.28% del consumo total de energía eléctrica de la Planta PINOVA.

Gráfico 2. Consumo de energía eléctrica por proceso (sistema original).



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Sistema NH₃/CO₂ en cascada con CO₂ recirculado (tipo *brine*)

La instalación actual consiste en un sistema mixto que utiliza dos circuitos, amoníaco (NH₃ / R-717) y dióxido de carbono (CO₂ / R-744). El CO₂ se usa en la etapa de baja temperatura y es impulsado por bombas, actuando como un fluido de transferencia de calor (*brine*). El CO₂ evaporado se condensa sin comprimirlo. El NH₃ se usa en la etapa de alta temperatura para condensar el CO₂.

El sistema NH₃/CO₂ en cascada inició su implementación en junio del 2017 y su puesta en marcha se concretó en enero del 2018.

4.2.2.1 Inventario de equipos eléctricos del sistema NH₃/CO₂ en cascada

A continuación, se detalla un inventario de equipos suministrados por la organización:

Tabla 9. Lista de inventario de equipos eléctricos del sistema NH₃/CO₂.

No.	DETALLE	CÓDIGO	CANTIDAD EQUIPOS	CANTIDAD MOTORES	POTENCIA UNIT MOTORES (KW)	POTENCIA TOTAL (KW)
1	Evaporador PH #1	AC01	1	3	2.24	6.71
2	Evaporador PH #2	AC02	1	3	2.24	6.71
3	Evaporador PH #3	AC03	1	3	2.24	6.71
4	Bomba #1 para CO ₂	PM-1	1	1	2.24	2.24
5	Bomba #2 para CO ₂	PM-2	1	1	2.24	2.24
6	Evaporador andén de carga	AC04	1	3	0.56	1.12
7	Evaporador zona de bandas	AC05	1	3	0.37	0.75
8	Evaporador rellenos	AC06	1	2	0.37	0.75
9	Compresor tornillo N170JS-V	SCU-01	1	1	67.1	67.1
10	Compresor tornillo N170JS-V	SCU-02	1	1	67.1	67.1
11	Compresor reciprocante N4WA	RC01	1	1	19.54	19.54
12	Condensador ventiladores	EC-01	1	1	11.19	11.19
13	Condensador bomba agua		1	1	1.49	1.49
14	Bomba de aceite Co. #1		1	1	1.12	1.12
15	Bomba de aceite Co. #2		1	1	1.12	1.12
				Total	181.16	195.89

Fuente: Mayekawa.

4.2.2.2 Características de los equipos instalados

A continuación se presenta la descripción de los equipos instalados del sistema sistema NH₃/CO₂ en cascada (Cuesa Construcciones Hu S.A., 2017).

i. Compresores

- Dos compresores tipo tornillo marca MYCOM (media /baja), modelo N170JS-V, con sistema economizador, enfriado por termosifón, diseñados para trabajar con refrigerante amoníaco en simple etapa de compresión, con potencia al freno de 93.6 BHP en condición de temperatura de evaporación de -28.9 °C y temperatura de condensación de 35 °C, operando a 3,550 r.p.m. Cada unidad incluye motor eléctrico eficiencia Premium y un tablero arrancador de estado sólido.

- Un compresor recíprocante MYCOM (media /alta) modelo N4WA, diseñado para trabajar con refrigerante amoníaco (NH₃) y ofrecer una capacidad de enfriamiento correspondiente a 24.7 TR (86.7 KW) con potencia al freno de 26.3 BHP, operando a 950 r.p.m., en condición de temperatura de evaporación de -3.89 °C (25 °F) y temperatura de condensación de 35 °C. La unidad incluye motor eléctrico tipo ODP, eficiencia Premium y arrancador tipo estado sólido.

ii. Evaporadores cámara de conservación congelado

- Dos (2) evaporadores tipo *Penthouse*, marca COLMAC COIL, modelo A+L33T-21, fabricados con carcasa en acero galvanizado, tuberías en acero inoxidable A-304 y aletas de aluminio. Cada uno diseñado para trabajar con refrigerante CO₂ (R744) en sistema recirculado 2:1, con una capacidad de 29.4 TR (103.3 kW), operando a una temperatura de evaporación de -25 °C y temperatura aire de -18 °C. Cada unidad cuenta con tres (3) ventiladores de 762 mm y tres (3) motores de 3 HP.
- Un evaporador tipo *Penthouse*, marca COLMAC COIL, modelo A+L33T-22, fabricado con carcasa en acero galvanizado, tuberías en acero inoxidable A-304 y aletas de aluminio. Diseñado para trabajar con refrigerante CO₂ (R744) en sistema recirculado 2:1, con una capacidad de 25 TR (87.9 KW), operando a una temperatura de evaporación de -25 °C y temperatura aire de -18 °C. La unidad cuenta con tres (3) ventiladores de 762 mm y tres (3) motores de 3 HP.

iii. Evaporadores antecámaras y salas

- Tres evaporadores tipo axial, marca COLMAC COIL USA, modelo A-S23M-14. Diseñado para trabajar con refrigerante (R717) amoníaco en sistema de expansión directa:
 - Andén de Carga y Descarga: capacidad de 9.7 TR, operando a una temperatura de evaporación de -3.88 °C (25 °F) y temperatura aire de 4.44 °C (40 °F). La unidad cuenta con dos (2) ventiladores de 610 mm y dos (2) motores de 3/4 HP.
 - Zona de bandas: capacidad de 8.8 TR, operando a una temperatura de evaporación de -3.88 °C (25 °F) y temperatura aire de 4.44 °C (40 °F). La unidad cuenta con dos (2) ventilador de 610 mm y dos (2) motores de ½ HP.

- Cámara de rellenos: capacidad de 6.6 TR, operando a una temperatura de evaporación de $-3.88\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($25\text{ }^{\circ}\text{F}$) y temperatura aire de $4.44\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($40\text{ }^{\circ}\text{F}$). La unidad cuenta con dos (2) ventiladores de 560 mm y dos (2) motores de $\frac{1}{2}$ HP.

iv. Condensador

- Condensador Evaporativo Evapco, modelo CATC-241, diseñado para trabajar con amoníaco, con una capacidad de 640.7 kW, operando a una temperatura de condensación de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ para una condición de bulbo húmedo de $26.67\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cuenta con un moto ventilador de 11 kW y una motobomba para recirculación de agua de 1.50 kW.

v. Recibidor de líquido vertical y tanque termosifón

- Un tanque recibidor de CO_2 líquido, operando a una temperatura de evaporación de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, diseñado para garantizar el suministro de CO_2 líquido por medio de bombeo a los tres evaporadores de la cámara de producto terminado congelado. Fabricado en acero al carbono, bajo norma y con estampe ASME.

vi. Recirculador para CO_2

- Un recirculador para CO_2 construido de acero al carbón, bajo norma con estampe ASME
- Dos bombas centrífugas de 3 HP, una de ellas en reserva, marca TEIKOKU modelo .R43-216F4G, diseñadas para bombear CO_2 líquido hacia los evaporadores de la cámara de producto terminado congelado.

vii. Separador de líquido para intercambiador de NH_3/CO_2

- Un tanque separador líquido/gas NH_3 , tipo horizontal, de acero al carbón, bajo norma y con estampe ASME, para alimentación de NH_3 en sistema inundado, al condensador de CO_2 .

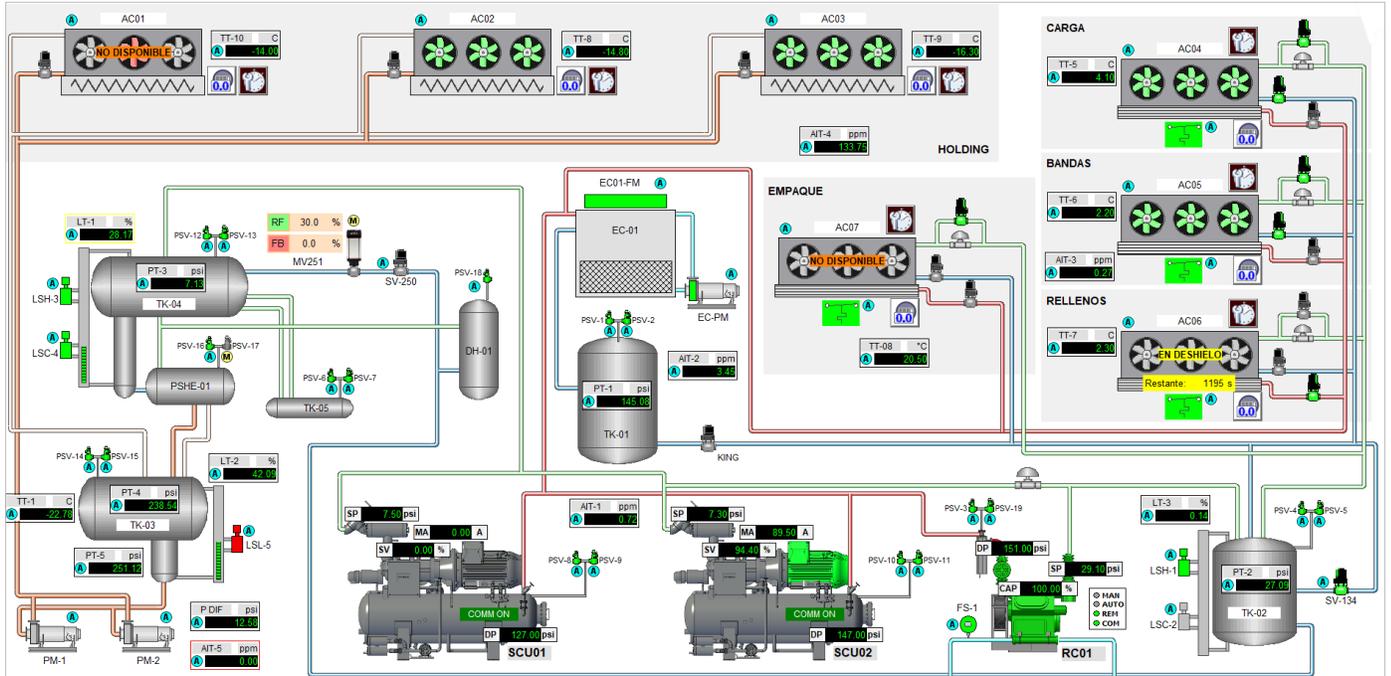
viii. Intercambiador de NH_3/CO_2

- Un Intercambiador tipo casco y placas para condensación de CO_2 , con una capacidad de 298.8 kW (85 TR), operando con amoníaco en sistema inundado a una temperatura de evaporación de $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$ y condensación de CO_2 de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ix. Acumulador de succión

- Un tanque vertical para utilizar como *Flash Economizer* de los dos nuevos compresores de tornillo y como trampa de succión con serpentín para la operación de los evaporadores de las antecámaras que trabajarán en expansión directa, bajo norma y con estampe ASME.

Figura 13. Diagrama de planta del sistema NH₃/CO₂ en cascada tipo *brine*.



Fuente: Florida Retail, 2021.

En el Anexo 1 se presenta el plano de la instalación.

4.2.2.3 Temperatura de cámaras

De acuerdo con la propuesta técnica elaborada por la empresa contratada para el proyecto de sustitución, se contemplaron las siguientes condiciones operativas del nuevo sistema de refrigeración NH₃/CO₂:

Tabla 10. Temperatura y cargas térmicas de la cámara y antecámaras de producto terminado.

PARÁMETRO	VALOR
Temperatura de la cámara de producto terminado	-18°C.
Temperatura de antecámaras	0°C a 5°C
Temperatura de evaporación en el lado de amoniaco (NH ₃)	-30°C
Temperatura de condensación	35°C
Temperatura de bulbo húmedo	26°C
Carga térmica de cámara de producto terminado	274.2 kW (78 TR)
Carga térmica de andén de carga	30.9 kW (8.8 TR)
Carga térmica de zona de bandas	27.8 kW (7.9 TR)
Carga térmica de cámara de rellenos	22.9 kW (6.5 TR)

Fuente: (Cuesa Construcciones Hu S.A., 2017)

En la siguiente tabla se presentan las características y parámetros de operación para las cámaras y antecámaras de congelación:

Tabla 11. Características de la cámara y antecámaras de producto terminado.

CÁMARA	DETALLE
Holding de congelado	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Refrigerante: CO₂ (R744) ▪ Dimensiones: 35.5 m (L) x 22.5 m (W) x 8.5 m (H) ▪ Producto: Variedad presentación de panes ▪ Temperatura de aire: -18 °C ▪ Temperatura de entrada producto: Variada (-5 °C, -8 °C, -10 °C, 22 °C) ▪ Temperatura de salida producto: -18 °C ▪ Cantidad de producto total en cámara: 250,000 kg ▪ Tiempo de permanencia: Diferente ▪ Empaque: Cajas de cartón. ▪ Voltaje de Fuerza y control: 460V/120V/60Hz
Antecámara Carga y Descarga	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Refrigerante: CO₂ (R744) ▪ Dimensiones: 12 m (L) x 5.5 m (W) x 4 m (H) ▪ Producto: Zona de tránsito ▪ Temperatura de aire: 4 °C ▪ Empaque: Cajas de cartón. ▪ Voltaje de Fuerza y control: 460V/120V/60Hz
Antecámara Zona de Bandas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Refrigerante: CO₂ (R744) ▪ Dimensiones: 18 m (L) x 5.5 m (W) x 4 m (H) ▪ Producto: Zona de tránsito ▪ Temperatura de aire: 4 °C ▪ Empaque: Cajas de cartón. ▪ Voltaje de Fuerza y control: 460V/120V/60Hz
Antecámara de Rellenos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Refrigerante: CO₂ (R744) ▪ Dimensiones: 6 m (L) x 7.5 m (W) x 4 m (H) ▪ Producto: Diferentes presentaciones ▪ Temperatura de aire: 4 °C ▪ Empaque: Cajas de cartón ▪ Voltaje de Fuerza y control: 460V/120V/60Hz

Fuente: (Cuesa Construcciones Hu S.A., 2017)

4.2.2.4 Proyectos de mejora del desempeño energético

La empresa implementó en el año 2020 un proyecto para mejorar y reemplazar el aislamiento en el sistema NH₃/CO₂ en cascada del equipo de enfriamiento de la cámara de producto terminado, permitiendo desplazar parcialmente la operación en horas punta (Florida Retail, 2021).

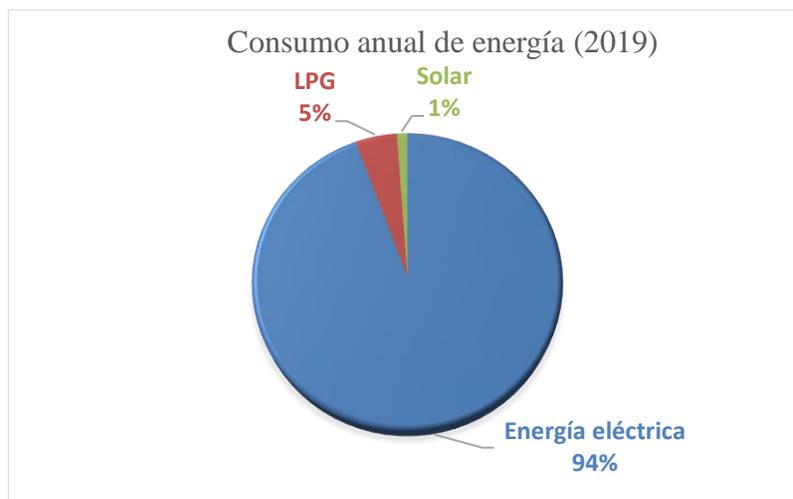
El proyecto contempló el ahorro de 3,483 kWh/mes, con un costo de \$30,000. A continuación se presentan las actividades llevadas a cabo:

- Reemplazo del aislamiento del tanque Surge Dromp (NH₃).
- Reemplazo del aislamiento del intercambiador Vatherus NH₃/CO₂.
- Reemplazo del aislamiento del recirculador de CO₂.
- Reemplazo del aislamiento del sistema de tuberías que lo entrelazan
- Ejecución de pruebas de desplazamiento parcial de la operación de compresión en el sistema en horas punta.
- Validación de la reducción de energía y eficacia del proyecto.

4.3 Escenario Energético

El consumo energético total de la Planta PINOVA está constituido por el uso de combustibles fósiles (GLP), energía solar y energía eléctrica, esta última es la más significativa, ya que representa el 94% del consumo anual de energía, tal y como se puede observar en el siguiente gráfico:

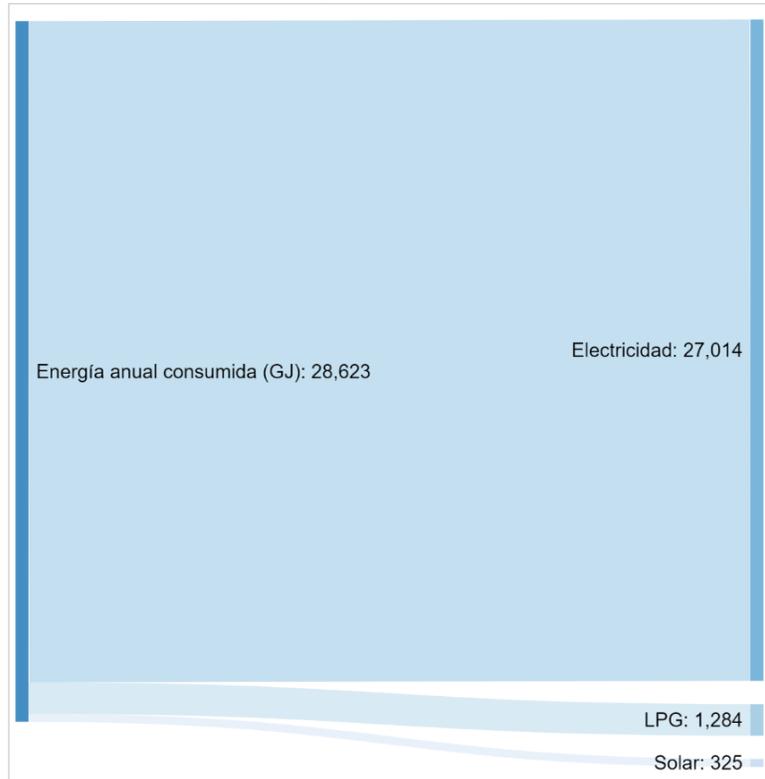
Gráfico 3. Consumo anual de energía de la Planta PINOVA.



Fuente: Elaboración propia.

El consumo actual de gas LP se utiliza para los hornos de panificación, en la cocina-comedor de la empresa y transporte de montacargas. La energía solar se utiliza para el calentamiento de agua.

Figura 14. Flujo de energía consumida anual en PINOVA (GJ).



Fuente: Elaboración propia.

4.3.1 Consumo de energía eléctrica

El suministro de energía eléctrica está dado por la Compañía Nacional de Fuerza y Luz, el tipo de tarifa era de media tensión (T-MT). Debido a la implementación del SGen y a la obtención de la certificación de la norma ISO 50001, en junio del 2020 se aprobó el cambio de tarifa de T-MT a T-MTb.

Se cuenta con sistema de respaldo solamente para operaciones críticas, como el caso de la operación de los compresores para las cámaras de congelación. Además, se cuenta con un generador de 500KW que permite un respaldo de 12 horas continuas.

4.3.1.1 Facturación eléctrica

La Tarifa Media Tensión b T-MTb es una tarifa competitiva y opcional para clientes servidos en media tensión (1000 a 34,500 voltios), con un consumo de mínimo 1,000,000 kWh/mes de energía y 2,000

kW/mes de potencia, al menos 10 de los últimos 12 meses del siguiente año calendario. Si bien la Planta PINOVA presenta menores niveles de consumo, ha accedido a la tarifa gracias a la certificación ISO 50001- Sistema de Gestión Energética y a sus acciones de eficiencia energética. A continuación, se muestra a detalle de dicha tarifa aprobada por la ARESEP:

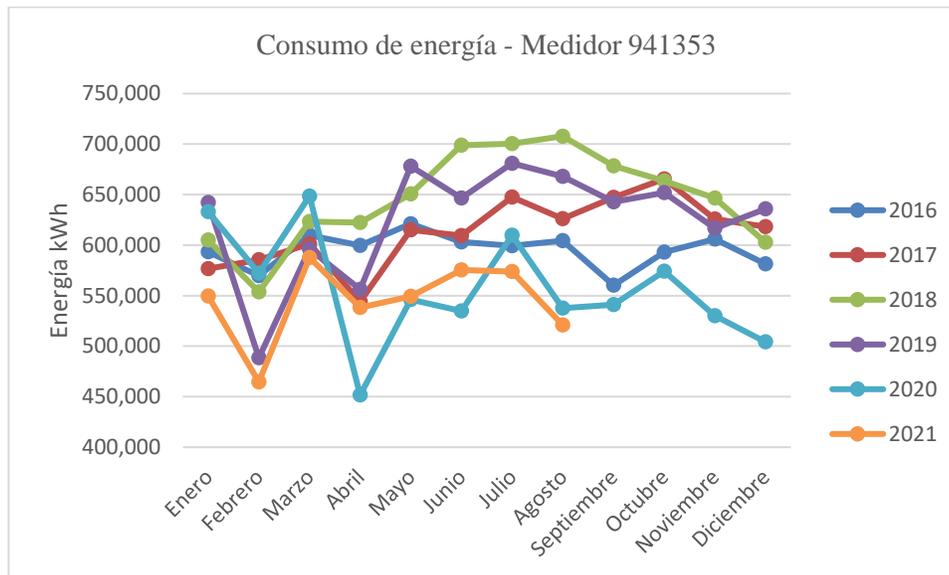
Tabla 12. Tarifa eléctrica en colones para T-MTb vigente el 01 de julio del 2021 y hasta el 30 de setiembre 2021.

VARIABLE	PERIODO	MONTO
Cargo por energía (por cada kWh)	Punta (máxima)	¢94.09
	Punta (mínimo)	¢89.51
	Valle (máxima)	¢32.32
	Valle (mínimo)	¢30.75
	Nocturno (máxima)	¢20.76
	Nocturno (mínimo)	¢19.75
Cargo por potencia (por cada kW)	Punta (máxima)	¢2,763.50
	Punta (mínimo)	¢2,628.92
	Valle (máxima)	¢1,929.19
	Valle (mínimo)	¢1,835.23
	Nocturno (máxima)	¢1,236.27
	Nocturno (mínimo)	¢1,176.06

Fuente: (Alcance N°128 Gaceta N°125, 2021).

A continuación, se muestra el detalle de la facturación de la Planta PINOVA por concepto de consumo de energía eléctrica para el periodo comprendido entre enero del 2016 y agosto del 2021, relacionados al medidor N° 941353.

Gráfico 4. Consumo de energía de la Planta PINOVA - Medidor 941353.



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico anterior se puede observar que el comportamiento en el consumo de energía es fluctuante a lo largo del año, donde los valores más altos corresponden principalmente al mes de agosto. Para el periodo en estudio, el valor máximo de consumo de energía fue de 707,821 kWh registrado en agosto del 2018, correspondiente al mes de mayor producción debido al aumento de ventas, principalmente asociadas a pastelería.

El comportamiento anual está asociado a las entradas y salidas de clientes. Como se puede observar en el gráfico, el año 2018 presenta un incremento del consumo de energía con respecto a los años anteriores, y en el cual se registraron exportaciones a Colombia, así como la apertura de 29 puntos de venta y la suma de 20 franquiciados a la cadena Musmanni. Para el año 2019, se redujeron las exportaciones a Colombia y se registró la salida de uno de los mayores clientes asociados a la producción de pan blanco, pan integral y galletas.

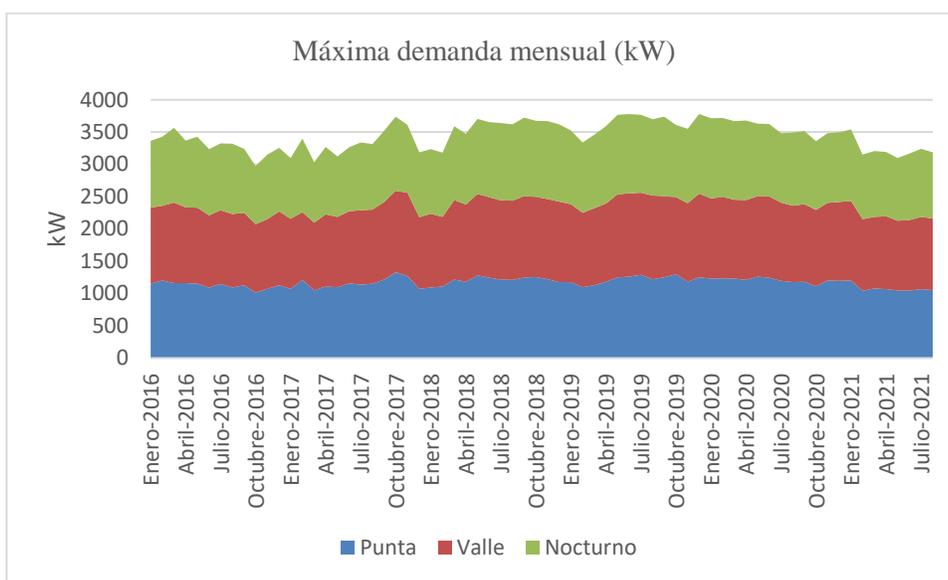
El comportamiento del consumo en el año 2020 está marcado por la reducción continuada de la producción, debido principalmente a la emergencia sanitaria por COVID-19. En este año se registró el menor consumo del periodo en estudio, correspondiente a 464,619 kWh en el mes de abril, relacionado

al cierre de la planta por 15 días en respuesta a las restricciones sanitarias. Para el año 2020 se registró un total de 14 mil toneladas de producto terminado, en contraste con 20 mil toneladas para el año 2018.

En los siguientes apartados además se abordará la relación del consumo de energía con respecto a la implementación del sistema NH₃/CO₂ en cascada, así como las mejoras en el desempeño energético asociadas al SGen.

En el siguiente gráfico se observa un comportamiento muy estable asociado a la demanda máxima para el periodo de estudio.

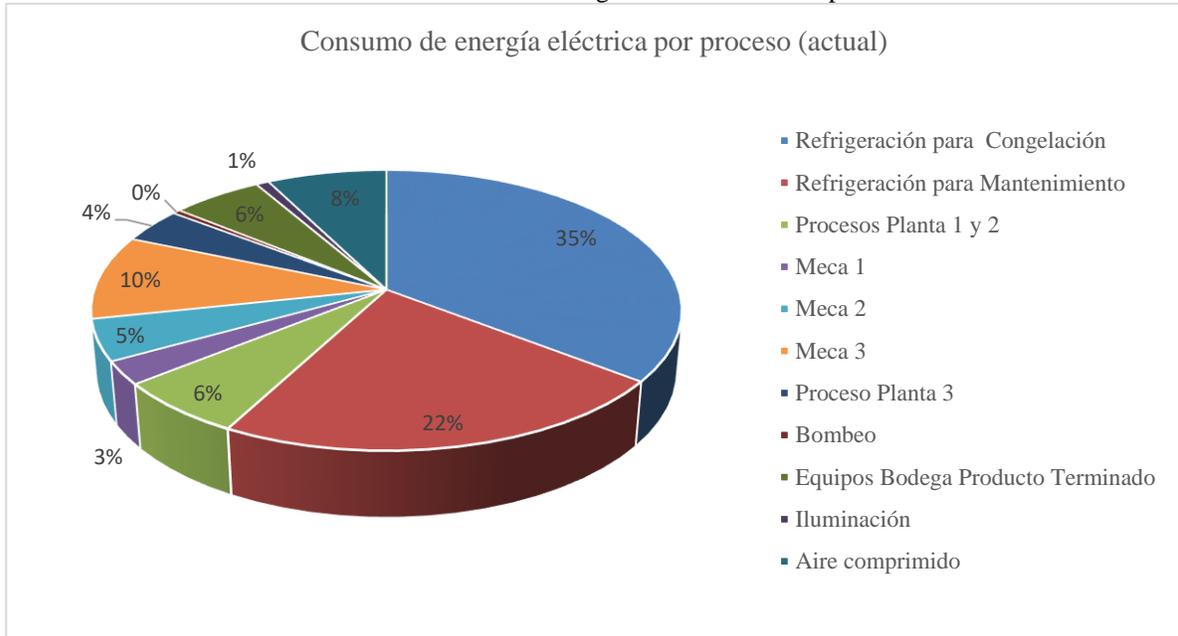
Gráfico 5. Comportamiento de la demanda máxima (kW) de la Planta PINOVA - Medidor 941353.



Fuente: Elaboración propia.

Tal y como se puede apreciar en el siguiente gráfico, alrededor del 60% del consumo de energía eléctrica está asociado a los dos USEs identificados por la empresa, correspondiente a los sistemas de refrigeración para congelación (líneas de producción) y el sistema de refrigeración para mantenimiento del pan frío (bodega de producto terminado, correspondiente al sistema NH₃/CO₂).

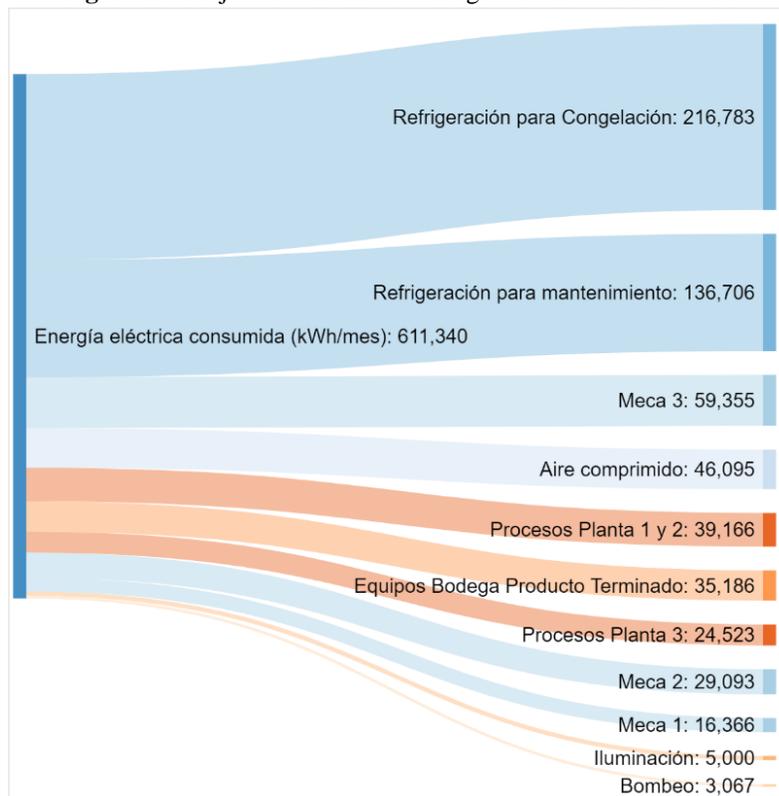
Gráfico 6. Distribución del consumo mensual de energía eléctrica entre los procesos de la Planta PINOVA.



Fuente: Florida Retail.

A continuación se puede observar el diagrama de sankey:

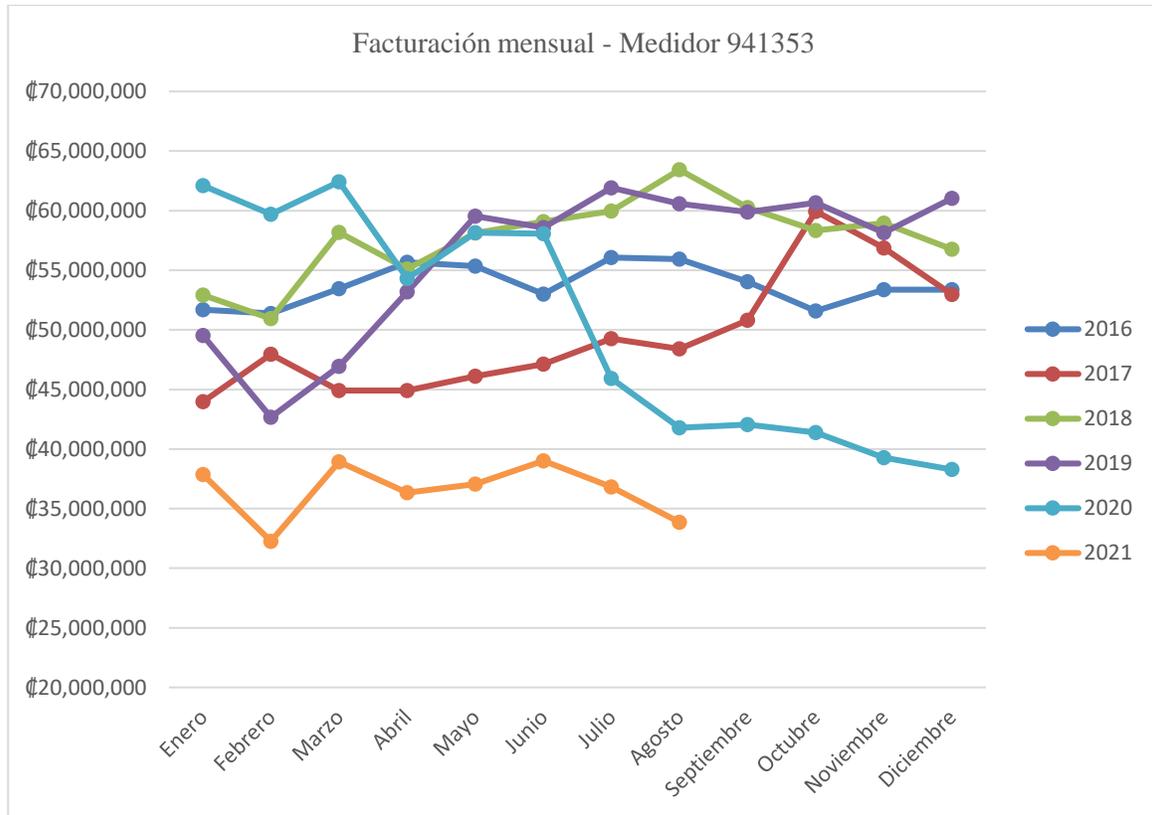
Figura 15. Flujo del consumo de energía eléctrica en PINOVA.



Fuente: Elaboración propia.

En el siguiente gráfico se detalla el costo mensual de la facturación eléctrica entre enero del 2016 y agosto del 2021.

Gráfico 7. Monto de la facturación mensual asociada al medidor N°941353.



Fuente: Elaboración propia.

La reducción más significativa de la facturación se presenta a partir del mes de julio del 2020, correspondiente al cambio de tarifa de T-MT a T-MTb.

La implementación del Sistema de Gestión de la Energía (SGEn) ha contribuido significativamente en el ahorro económico de la empresa con la entrada de la tarifa T-MTb, con una reducción promedio de un 29.5% de los costos de facturación eléctrica, lo que equivale aproximadamente a un ahorro mensual de \$16,136,435.

4.3.1.2 Equipos de medición

Como parte del SGEN, la empresa cuenta con dispositivos para la medición de energía y presión en la instalación actual de NH₃/CO₂, tal y como se puede apreciar en la siguiente tabla.

Tabla 13. Inventario de equipos de medición de energía y presión.

ASPECTO AMBIENTAL	NOMBRE/MARCA DEL DISPOSITIVO	UNIDAD DE MEDICIÓN	IDENTIFICACIÓN DEL DISPOSITIVO	UBICACIÓN
Energía	Medidor de energía Eléctrica - Serie AH 16072883	kWh	Compresor RC01	Segundo piso de facilidades
Energía	Medidor de energía Eléctrica - Serie AH17125737	kWh	Compresor SCU 01	Segundo piso de facilidades
Energía	Medidor de energía Eléctrica - Serie AH17125726	kWh	Compresor SCU 02	Segundo piso de facilidades
Energía	Medidor de energía Eléctrica - Serie LQN 1517	kWh	Compresor CCM y PLC	Segundo piso de facilidades
Presión	Compresores de mantenimiento	psi	Compresor RC01	Segundo piso de facilidades
Presión	Compresores de mantenimiento	psi	Compresor SCU-01	Segundo piso de facilidades
Presión	Compresores de mantenimiento	psi	Compresor SCU-02	Segundo piso de facilidades

Fuente: Florida Retail.

La organización además ha desarrollado el *Registro Plan de recopilación y medición energética (R-SHE-0006)*, donde se establece la periodicidad de medición de los parámetros operacionales relacionados con el USE 2, correspondiente al Sistema NH₃/CO₂, tal y como se muestra a continuación:

Tabla 14. Medición de parámetros operacionales asociados al Sistema NH₃/CO₂.

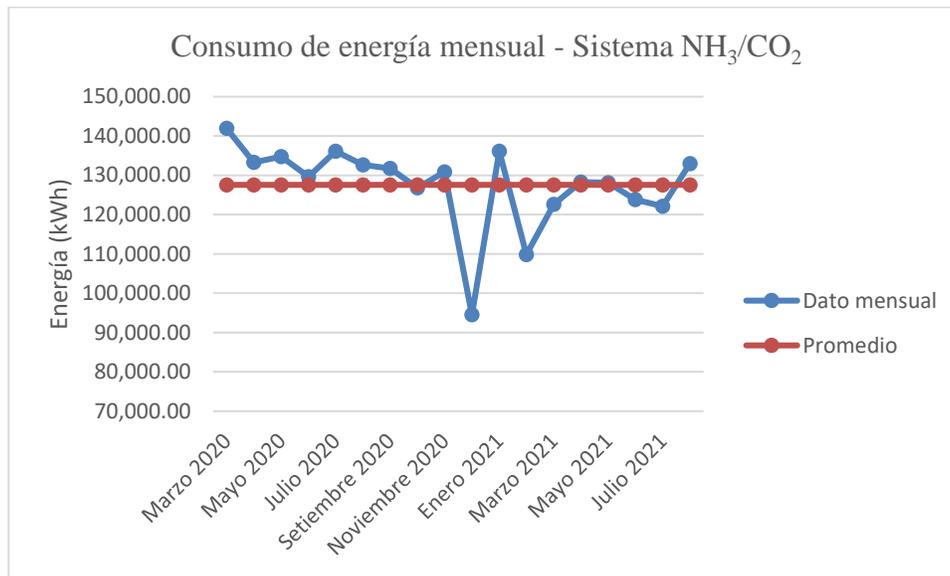
USE	VARIABLE	PARÁMETRO	CRITERIO O FACTOR	PERIODICIDAD
	Presión de succión	Presión de succión de NH ₃	Min 2 psi - Máx 7 psi	Diario
	Presión de descarga	Presión de descarga de NH ₃	Presión positiva (min 120 psi - máx 160 psi)	Diario
Compresores de NH ₃ de mantenimiento	Presión de succión	Presión de succión de NH ₃ recíprocante	Presión positiva (min 20 psi - máx 40 psi)	Diario
	Presión de descarga	Presión de descarga de NH ₃ recíprocante	Presión positiva (min 120 psi - máx 170 psi)	Diario
	Mantenimiento preventivo mensual	Mantenimiento preventivo mensual	Condición, operación y limpieza adecuada	Mensual

Fuente: Florida Retail.

4.3.1.3 Consumo de energía eléctrica del sistema NH₃/CO₂ en cascada

En las visitas realizadas a la Planta PINOVA los días 05 de febrero, 23 de abril y 24 de setiembre del 2021, se recolectaron los datos del consumo de energía obtenidos por medio de la instrumentación descrita en la tabla 13, correspondientes a mediciones diarias del consumo de energía en el periodo comprendido entre el mes de marzo del 2020 y el mes de agosto del 2021.

Figura 16. Consumo de energía y promedio mensual del sistema NH₃/CO₂ en cascada.



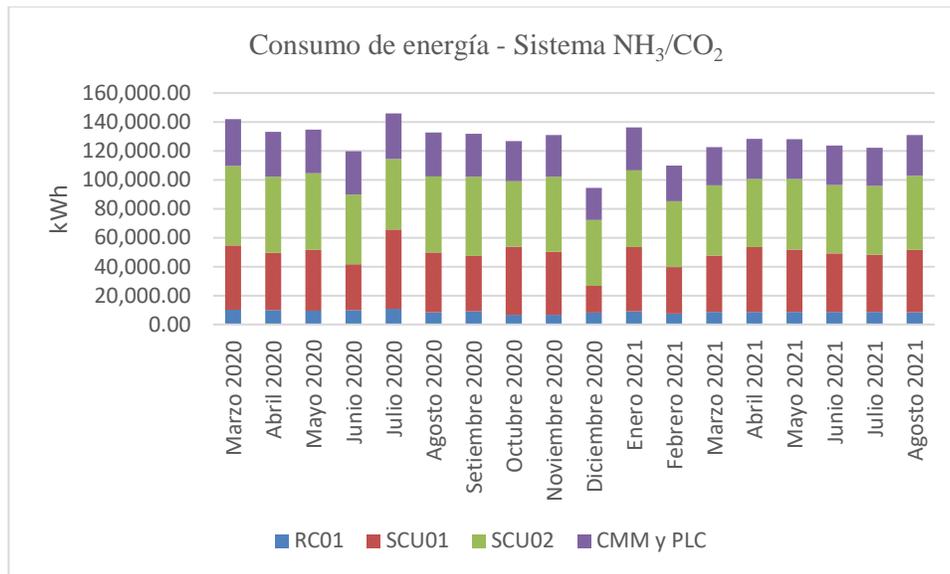
Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento del consumo de energía asociado a la cámara de producto terminado es regular a lo largo del año. Mientras que los valores totales de consumo de la planta PINOVA fluctúan con respecto a los niveles de producción, el sistema NH₃/CO₂ opera de forma continua 24/7.

Las principales desviaciones del consumo de energía con respecto al promedio entre el mes de diciembre 2020 y febrero 2021, responden a fallas operativas del sistema relacionadas a la fuga de CO₂, llegando a temperaturas de -6°C y -7°C en la cámara de producto terminado. La causa-raíz identificada corresponde al disparo de la válvula de seguridad del CO₂ por el paro no programado de un compresor. Debido a esta situación, durante dos días a finales del mes de diciembre, el producto terminado fue almacenado en bodegas alquiladas.

En el siguiente gráfico se puede visualizar que el mayor consumo del sistema está asociado a los dos compresores tipo tornillo de 100HP, SCU01 y SCU02, los cuales representan el 70% del consumo de energía.

Gráfico 8. Consumo de energía del sistema NH₃/CO₂ en cascada.



Fuente: Elaboración propia.

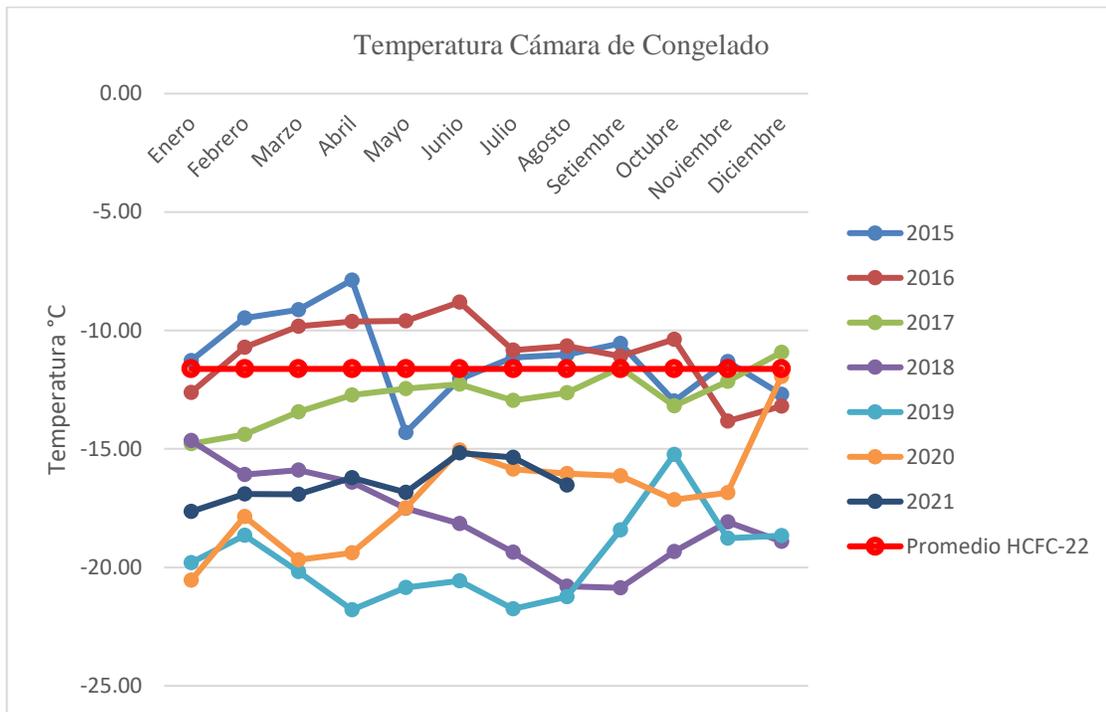
4.3.2 Temperatura de las Cámaras

Las líneas de producción descritas en el apartado 4.1.2 congelan el producto terminado, que posteriormente se almacena en la cámara de congelado objeto del presente estudio.

Se analizaron los registros de temperatura de la cámara de congelado en el periodo comprendido entre enero del 2015 y agosto del 2021. Con la implementación del sistema NH₃/CO₂ se recopilieron datos de temperatura desde enero del 2018 con mediciones cada 5 segundos.

En el periodo comprendido entre el año 2015 e inicios del 2018, la temperatura promedio de la cámara de producto congelado terminado correspondía a -11.6°C. Con la implementación del sistema NH₃/CO₂ en cascada a partir del 2018, se ha logrado alcanzar una temperatura mínima de -21.79°C, con una temperatura promedio de -18.21°C.

Gráfico 9. Temperatura promedio de la cámara de refrigeración de producto terminado.



Fuente: Elaboración propia.

El sistema NH₃/CO₂ en cascada tipo *brine* ha permitido alcanzar temperaturas más bajas en la cámara fría, debido a la alta eficiencia de los refrigerantes, con el uso de CO₂ como refrigerante secundario combinado con las buenas propiedades térmicas del amoníaco. Asimismo, la instalación actual cuenta con equipos y sistemas de última tecnología, con motores de eficiencia Premium.

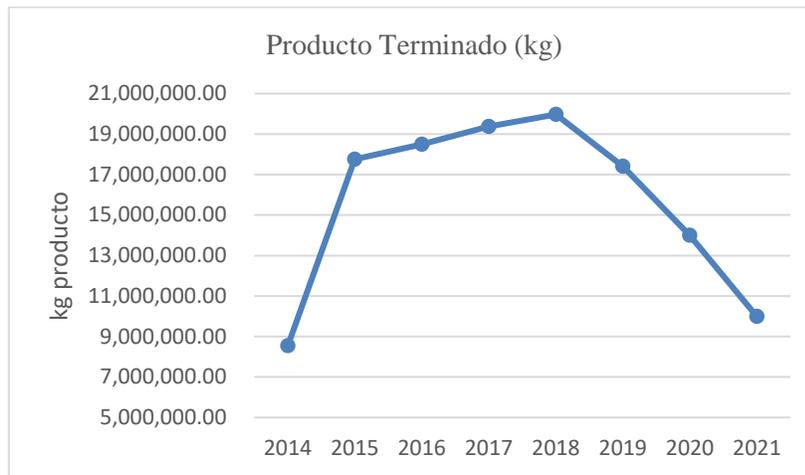
El cambio tecnológico ha permitido aumentar la capacidad de refrigeración del sistema, pasando de 176 kW (50 TR) a 359.4 kW (102.2 TR).

4.3.3 Datos de producto terminado

En la planta Florida Retail se manufacturan los productos de panadería, los cuales se congelan para su almacenamiento y su posterior distribución a los centros de acopio y luego a las panaderías donde se hornea el producto.

En el siguiente gráfico se presenta el histórico anual de producto terminado almacenado en la cámara del sistema de refrigeración durante el periodo de estudio.

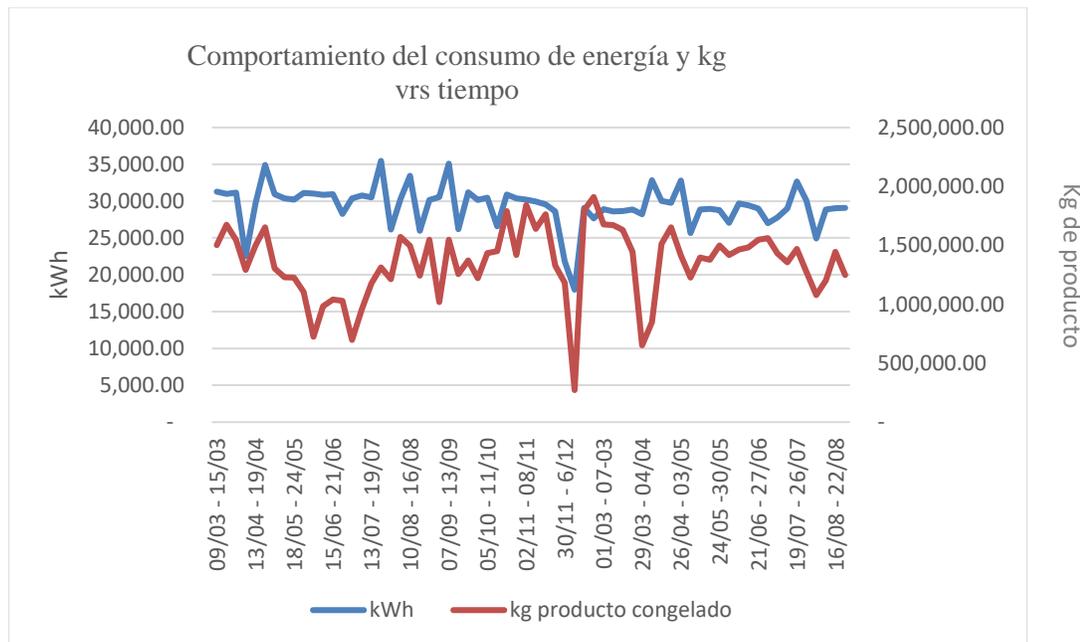
Gráfico 10. Cantidad de producto terminado almacenado por año en la cámara y antecámaras.



Fuente: Elaboración propia.

El comportamiento entre marzo del 2020 y agosto del 2021 se puede observar en el siguiente gráfico:

Gráfico 11. Comportamiento del consumo de energía en relación con los kilogramos de producto almacenado.



Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, la implementación del sistema NH₃/CO₂ en cascada ha permitido aumentar el producto almacenado en la cámara fría. Previo a la instalación del sistema en el 2018, la

capacidad máxima correspondía a 150 toneladas. Entre marzo del 2020 y agosto del 2021, el promedio de producto almacenado fue de 245 toneladas, logrando alcanzar un máximo de 385 toneladas de producto terminado almacenado.

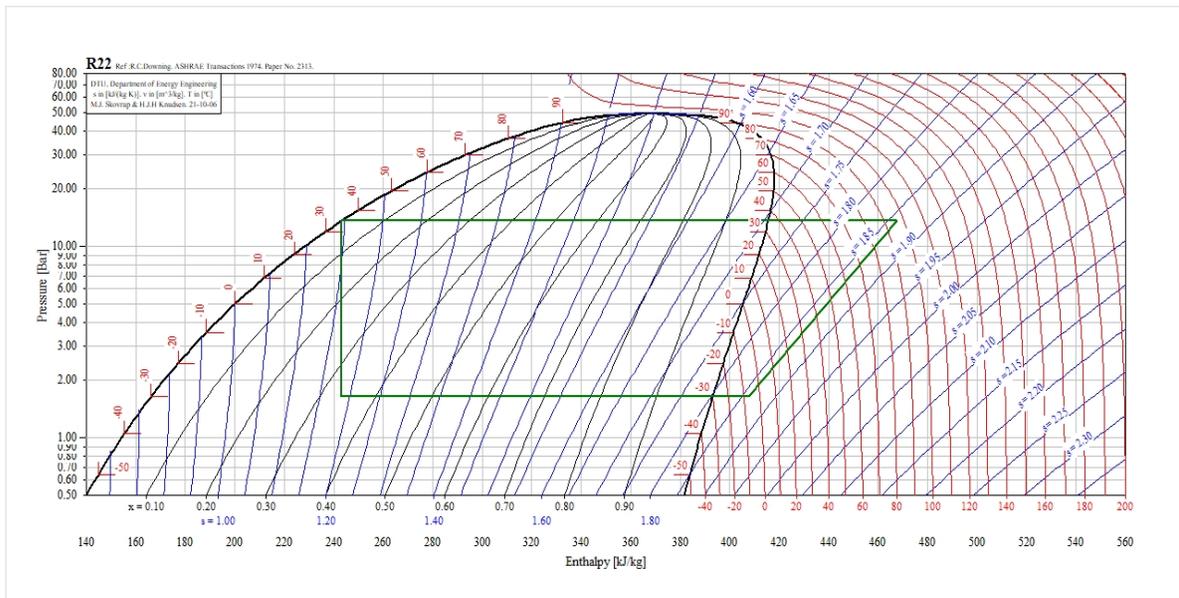
En el Capítulo V se presenta el análisis de la cantidad de producto terminado almacenado en la cámara fría para determinar si corresponde a una variable relevante.

4.4 Plan Piloto

Se utilizó el módulo de “Utilidades de Refrigeración” del software CoolPack para obtener el diagrama de Molliere del refrigerante HCFC-22. CoolPack es una colección de modelos de simulación para sistemas de refrigeración de IPU.

Se consideró un sistema de una etapa de HCFC-22 con una temperatura de evaporación de -18°C y una temperatura de condensación de 35°C , obteniendo el siguiente diagrama de Molliere:

Figura 17. Diagrama de Molliere de HCFC-22.



Fuente: CoolPack, IPU.

Para el cálculo del coeficiente de desempeño (COP), debido a la limitación de datos de consumo energético del sistema original (HCFC-22), en el plan piloto de la investigación se realizó una simulación de la instalación original mediante el software Pack Calculation Pro Student de IPU.

Pack Calculation es una aplicación para comparar el consumo anual de energía de los sistemas de refrigeración. La aplicación compara diferentes sistemas basados en una ubicación geográfica, considerando:

- La eficiencia de los sistemas definidos se evalúa cada hora del año (= 8,760 puntos operativos)
- Se seleccionaron los datos meteorológicos del Aeropuerto Juan Santamaría.
- Se seleccionó un sistema de expansión directa.
- Se utilizaron los datos del fabricante de los compresores del sistema original HCFC-22, correspondiente al modelo *Bitzer OSN-7441*.

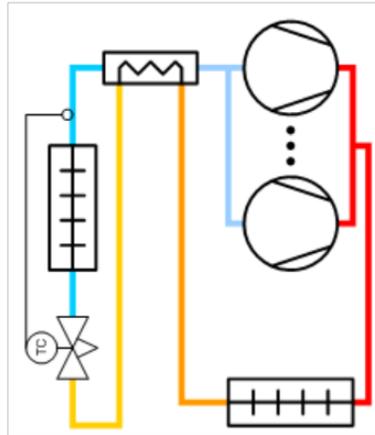
Figura 18. Vista de compresor de tornillo de HCFC-22.



Fuente: (UNDP, 2018)

En la siguiente figura se muestra el esquema del sistema de expansión directa con HCFC-22.

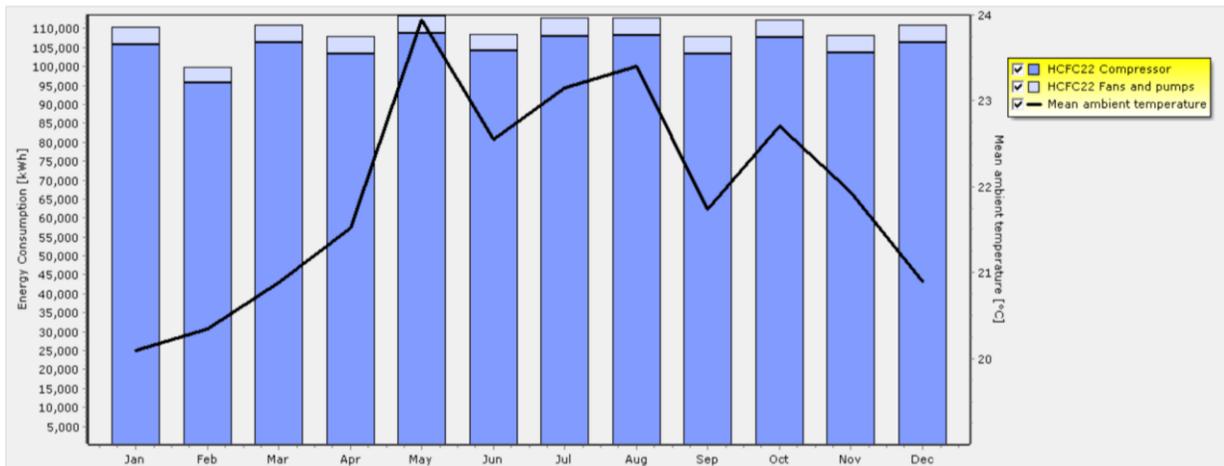
Figura 19. Modelo del Sistema HCFC-22.



Fuente: Software Pack Calculation Pro Student.

Por medio de la simulación, se determinó el consumo energético mensual de los compresores, tal y como se muestra en la siguiente figura:

Figura 20. Simulación del consumo energético anual de los compresores del sistema HCFC-22.



Fuente: Software Pack Calculation Pro Student.

El consumo energético anual de los compresores fue estimado en 1,316,333 kWh/año, lo cual corresponde con el 70% del consumo total del sistema original HCFC-22. Mediante la simulación, se estimó el coeficiente de desempeño (COP) en 2.04.

El software Pack Calculation Pro permite modelar los sistemas NH₃/CO₂ en cascada. Sin embargo, se excluyó del presente estudio, debido a que su configuración es limitada para analizar el sistema con recirculación de CO₂ tipo *brine* y considerar únicamente los compresores de amoníaco.

Se realizó el cálculo del COP del sistema actual (NH₃/CO₂) para evaluar la eficiencia de los compresores, ya que son los equipos que demandan la mayor cantidad de energía del sistema de refrigeración. Se consideraron las combinaciones de distintas temperaturas y diferentes relaciones de compresión del sistema NH₃/CO₂, para lo cual se realizó una división entre los valores de capacidad de refrigeración de cada compresor y la potencia requerida para hacer ese trabajo.

Para el cálculo se utilizaron los datos de la empresa proveedora de los equipos, Mayekawa de Centroamérica S.A., obteniendo los siguientes valores para cada compresor:

Tabla 15. Datos de los compresores del sistema NH₃/CO₂.

TIPO DE COMPRESOR	MODELO	REFRIGERANTE	CAPACIDAD FRIGORÍFICA (KW)	POTENCIA TOTAL (KW)	COEFICIENTE DE DESEMPEÑO (COP)
Compresor tornillo (SCU-01)	N170JS-V	NH ₃	163.7	67.1	2.44
Compresor tornillo (SCU-02)	N170JS-V	NH ₃	163.7	67.1	2.44
Compresor recíprocante (RC01)	N4WA	NH ₃	91.42	19.54	4.68
Total			572.56	153.74	

Fuente: Mayekawa.

Para los compresores tipo tornillo, el COP es de 2.44, bajo una condición de temperatura de evaporación de -28.9 °C y temperatura de condensación de 35 °C, operando a 3,550 r.p.m, desplazan el equivalente a 163.7 kW de refrigeración y demandan 67.1 kW, respectivamente. Para el compresor recíprocante, su COP es de 4.68, esto porque ese compresor trabaja a una temperatura de evaporación de -3.9°C y una temperatura de condensación de 35°C.

Considerando la capacidad frigorífica total y la potencia total requerida combinados de ambos sistemas NH₃/CO₂, se obtiene un valor promedio del coeficiente de rendimiento (COP) de 2.72, lo que indica que por cada kW eléctrico se producen 2.72 kW de refrigeración.

Para el sistema original HCFC-22 se obtuvo un coeficiente de desempeño (COP) de 2.04, por lo que el valor mayor obtenido para el sistema NH₃/CO₂ permitió demostrar que el equipo es más eficiente, debido a que desplaza más cantidad de energía para intercambio por unidad de potencia absorbida.

4.5 Comparación de los sistemas

El sistema de refrigeración original (HCFC-22) permitía alcanzar una temperatura promedio de -11.6°C en la cámara fría de almacenamiento de producto terminado, para un almacenamiento máximo de 150 toneladas de producto terminado y con capacidad de refrigeración de 176 kW (50 TR). El sistema HCFC-22 presentaba un rendimiento de 1.49 kW/ton, 4.46 kW/TR y 0.029 kW/m³.

Con la sustitución tecnología a partir del 2018, se ha logrado aumentar la eficiencia del sistema, alcanzando una temperatura promedio de -18.21°C. Además, ha permitido aumentar la cantidad de producto almacenado en la cámara fría hasta 245 toneladas, con una capacidad de refrigeración de 359,4 kW (102.2 TR). Se demostró el aumento de la eficiencia energética, logrando alcanzar valores de 1.92 kW/TR, 0.80 kW/ton y 0.026 kW/m³.

A continuación se presenta un cuadro comparativo entre el sistema HCFC-22 y el sistema NH₃/CO₂ en cascada:

Tabla 16. Comparación del sistema original (HCFC-22) y el sistema actual (NH₃/CO₂ en cascada).

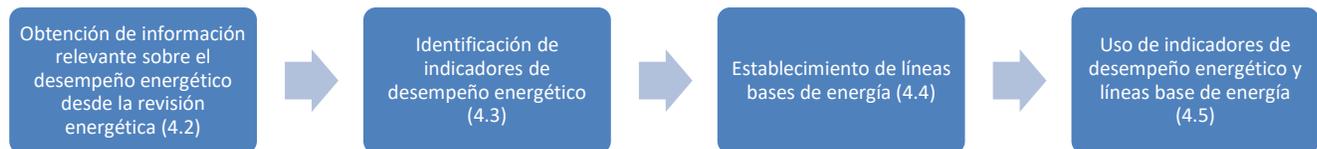
PARÁMETROS	HCFC-22	NH ₃ /CO ₂ CASCADA
Capacidad de refrigeración	176 kW (50 TR)	359,4 kW (102.2 TR)
Potencia eléctrica total	223.05 kW	195.89 kW
Capacidad de almacenamiento	150 ton	245 ton
Temperatura media cámara de congelado	-11.62°C	-18.01°C
Kilowatts de energía por toneladas de refrigeración	4.46 kW/TR	1.92 kW/TR
Kilowatts de energía por tonelada de producto terminado congelado	1.49 kW/ton	0.80 kW/ton
Kilowatts de energía por metro cúbico	0.029 kW/m ³	0.026 kW/m ³
Coefficiente de desempeño	2.04	2.72

CAPÍTULO V: INDICADORES DE DESEMPEÑO ENERGÉTICO

El Sistema de Gestión de la Energía de PINOVA está basado en la norma *INTE/ISO 50001:2018*, la cual establece como requisito la determinación de los indicadores de desempeño energético (IDEn), así como el establecimiento de una o varias líneas base de energía (LBEn). Los IDEn y LBEn constituyen elementos interrelacionados que permiten la medición y por lo tanto, la demostración de mejoras del desempeño energético (INTECO, 2018),

Como orientación sobre cómo cumplir con los requisitos de ISO 50001 relacionadas con los IDEn y LBEn, se utilizó como referencia la norma *ISO 50006:2014 Sistemas de gestión de la energía - Medición del rendimiento energético mediante líneas de base de energía e indicadores de rendimiento energético - principios generales y directrices*. Los pasos de la norma en los que se basa el presente análisis se presentan a continuación (ISO, 2014):

Figura 21. Pasos de la Norma ISO 50006:2014.



Fuente: (ISO, 2014).

5.1 Línea base de energía

Las líneas base de energía (LBEn) son referencias cuantitativas utilizadas para comparar los valores de los IDEn en el tiempo y para cuantificar los cambios en el desempeño energético, es decir, es la línea de referencia del antes y después de implementar el sistema NH₃/CO₂ en cascada.

PINOVA ha establecido el procedimiento *PG-SHE-0002 Planificación energética* donde se incluyen los pasos para la determinación y actualización de los indicadores de desempeño energético, según se indica a continuación (Florida Retail, 2020):

- a) Determine un período (muestra) representativo y obtenga las variables relevantes que afectan en forma significativa el consumo de energía.

- b) Las variables relevantes son determinadas haciendo una normalización con el consumo de energía, cuyo valor de probabilidad (PValue) sea menor a 0.1 y se obtenga una correlación ajustada (R^2) mayor a 0.5 para el modelo obtenido. Como excepción la normalización puede no ser necesaria cuando no se cuenta con los datos y/o períodos adecuados de las variables que presuntamente son relevantes, permitiéndose el uso del promedio como consumo base, si su error promedio es menor al 10% (Florida Retail, 2020).
- c) Seguidamente se valida el IDEn como la energía real dividida entre la energía esperada para determinar la máxima desviación posible.
- d) Con base en la muestra de datos se obtiene (n) el máximo y mínimo de cada variable, mismos que definen la representatividad del modelo.

Como instrumentos complementarios, PINOVA ha establecido los formularios llamado ***R-SHE-0004 Determinación Línea base energética e IDEn*** y ***R-SHE-0005 Seguimiento de Línea base energética e IDEn***.

En seguimiento al procedimiento establecido en el SGen y a los lineamientos de las normas ISO 50001 e ISO 50006, se procedió a establecer y modelar la línea base de consumo energético del sistema de refrigeración de producto terminado, según se detalla a continuación:

- Se utilizaron los datos de consumo energético de los años 2016 y 2017, correspondientes a los dos últimos años de operación del sistema HCFC-22. Se consideró un consumo correspondiente al 25.28% del total facturado en dicho periodo (Ver gráfico 2).
- Como variables potencialmente relevantes se utilizaron los valores de temperatura de la cámara de congelado, grados días de refrigeración (temperatura base de 27°C) y los kilogramos de producto congelado, correspondientes al periodo indicado.
- Se realizó un análisis de regresión línea múltiple para el modelamiento de los datos de consumo de energía con respecto a las variables relevantes, con el fin de comparar el desempeño energético bajo condiciones equivalentes. La normalización de las variables relevantes se basó en los criterios incluidos en el Procedimiento ***PG-SHE-0002*** y consistentes con el U.S. Department of Energy (2019):
 - a. El modelo PValue es menor a 0.10 basado en el F-test.
 - b. Todas las variables relevantes tienen un PValue menor a 0.20

- c. Al menos una variable tiene un PValue menor a 0.10.
- d. La correlación ajustada (R^2) es mayor a 0.5.

En la siguiente tabla se presentan los valores correspondientes al periodo entre el año 2016 y 2017 para el sistema original HCFC-22.

Tabla 17. Variables independientes para la aplicación de la regresión lineal múltiple en el periodo 2016-2017.

MES	PRODUCTO CONGELADO (kg)	TEMPERATURA CÁMARA (°C)	CCD (27°C)	CONSUMO (kWh)
Enero-2016	1,420,534.66	-12.62	1.3	150,027.15
Febrero-2016	1,498,227.69	-10.72	1.3	144,029.79
Marzo-2016	1,501,567.72	-9.82	6.6	154,117.24
Abril-2016	1,502,722.00	-9.62	6	151,591.33
Mayo-2016	1,580,117.19	-9.6	2.2	157,041.08
Junio-2016	1,521,822.67	-8.81	0.3	152,509.31
Julio-2016	1,623,437.69	-10.83	0.4	151,490.20
Agosto-2016	1,609,719.10	-10.65	1	152,776.80
Septiembre-2016	1,466,467.13	-11.09	1.2	141,638.38
Octubre-2016	1,575,703.26	-10.38	0.1	149,962.17
Noviembre-2016	1,640,719.55	-13.83	0.1	153,171.19
Diciembre-2016	1,581,751.87	-13.2	0	146,950.09
Enero-2017	1,523,520.36	-14.79	0.1	145,788.39
Febrero-2017	1,406,962.86	-14.39	1.4	148,051.62
Marzo-2017	1,716,035.81	-13.44	3.1	152,031.49
Abril-2017	1,379,925.83	-12.72	3.9	137,572.56
Mayo-2017	1,713,406.76	-12.46	0.9	155,488.52
Junio-2017	1,688,079.28	-12.27	0.5	154,035.83
Julio-2017	1,754,479.71	-12.96	0.1	163,686.91
Agosto-2017	1,609,527.99	-12.64	0.1	158,303.15
Septiembre-2017	1,647,039.99	-11.57	0.5	163,591.35
Octubre-2017	1,639,445.31	-13.19	0.7	168,276.07
Noviembre-2017	1,757,210.56	-12.15	0	158,219.97
Diciembre-2017	1,801,995.15	-10.92	0.1	156,304.62

Fuente: Florida Retail.

El análisis de Regresión Lineal Múltiple se realizó mediante el software de estadística MiniTab 21.1. Con base en los resultados, se obtuvo la siguiente ecuación de regresión:

Figura 22. Ecuación de regresión lineal.



Fuente: Software Minitab 21.1.

A continuación se muestran los resultados del análisis de varianza obtenido mediante el software MiniTab.

Figura 23. Análisis de Varianza.

Análisis de Varianza

<u>Fuente</u>	<u>GL</u>	<u>SC Ajust.</u>	<u>MC Ajust.</u>	<u>Valor F</u>	<u>Valor p</u>
Regresión	2	5.13414E+11	2.56707E+11	4389.77	0.000
Producto congelado (kg)	1	7996563272	7996563272	136.74	0.000
Temperatura (°C)	1	204046984	204046984	3.49	0.076
Error	20	1169570436	58478522		
Total	22	5.14584E+11			

Fuente: Software Minitab 21.1.

Según los resultados de la regresión mostrada en la figura 22, el valor de F es mayor a 1 y el Pvalue es menor a 0.1, por tanto, al menos uno de los coeficientes (variables relevantes) es significativo para el modelo.

Para las pruebas individuales de las variables independientes, se obtuvieron los siguientes resultados:

Figura 24. Coeficientes del modelo.

Coeficientes

<u>Término</u>	<u>Coef</u>	<u>EE del coef.</u>	<u>Valor T</u>	<u>Valor p</u>	<u>FIV</u>
Producto congelado (kg)	0.08232	0.00704	11.69	0.000	47.86
Temperatura (°C)	-1734	928	-1.87	0.076	47.86

Fuente: Software Minitab 21.1.

Como se muestra en la figura, ambas variables tienen un PValue menor a 0.10, lo que implica que ambas aportan explicación de la variación de y (energía consumida), es decir, tienen relación lineal con y. Ambas variables son estadísticamente significativas y se deben mantener en el modelo.

A continuación se presenta el resumen del modelo:

Figura 25. Resumen del modelo basado en el análisis de regresión lineal múltiple.

Resumen del modelo			
S	R-cuadrado	R-cuadrado(ajustado)	R-cuadrado (pred)
7647.13	99.77%	99.75%	99.72%

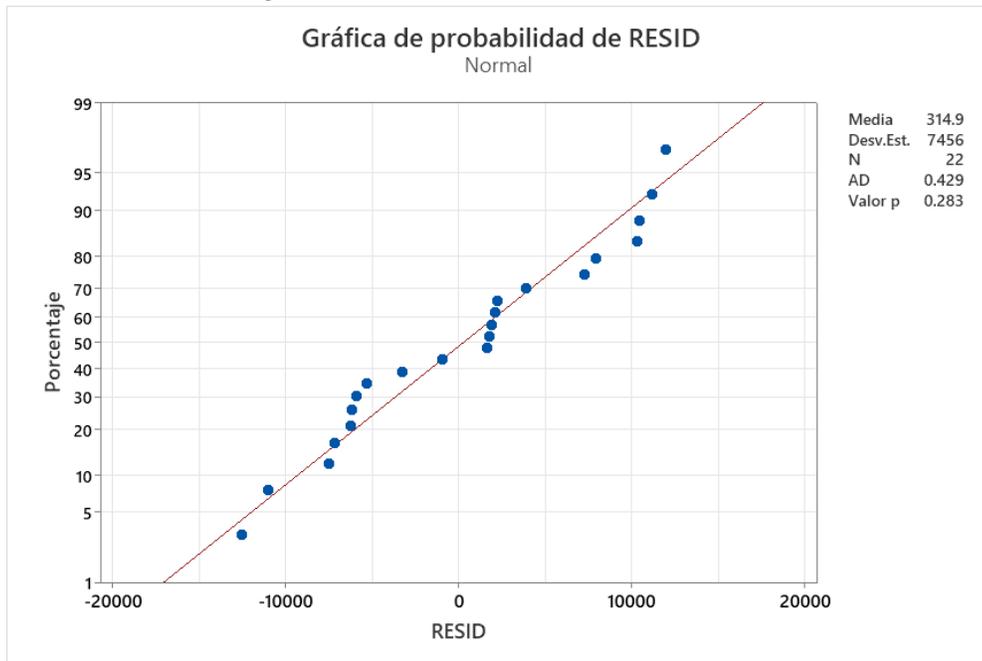
Fuente: Software Minitab 21.1.

El análisis comprueba que se cumple el criterio relacionado a una correlación ajustada (R^2) mayor a 0.5. Con un R^2 de 99.75%, se demuestra que la ecuación de regresión logra explicar la variación del consumo de energía eléctrica (y) con respecto a las variaciones de temperatura y las toneladas de producto almacenado en la cámara de refrigeración.

Para obtener el mejor modelo y obtener el mayor valor del R^2 ajustado, se utilizó el método de eliminación hacia atrás (Backward). Con base en este método, se excluyeron los datos de grados días de refrigeración, ya que se encontró que no es una variable estadísticamente significativa para el modelo. Además, se eliminaron los datos de marzo y abril del año 2016, por considerarse datos dispersos con respecto a la tendencia.

Se realizó la prueba de normalidad a los residuos utilizando el software Minitab. Se obtuvo un Pvalue mayor a 0.1, por lo cual se comprueba que los datos de la muestra se ajustan a una distribución normal.

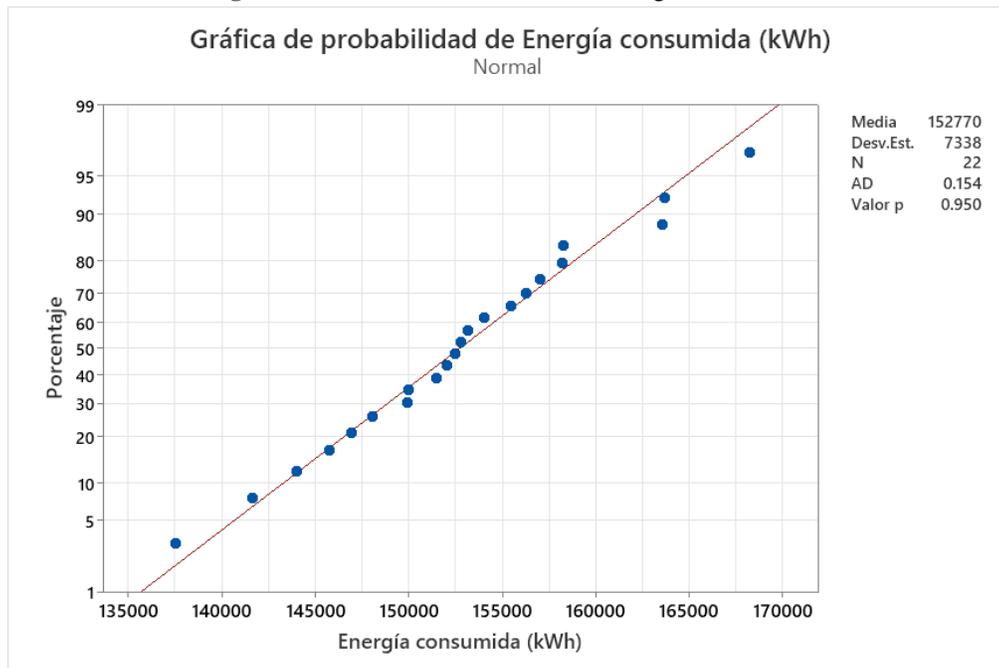
Figura 26. Prueba de normalidad de los residuos.



Fuente: Software Minitab 21.1.

La prueba de normalidad para la variable de energía consumida muestra una distribución normal, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura:

Figura 27. Distribución normal de la energía consumida.



Fuente: Software Minitab 21.1.

Se concluye que la LBEn arroja datos que permiten normalizar estadísticamente la relación del consumo de energía eléctrica del sistema HCFC-22 con las variables relevantes aplicadas para el análisis del USE 2.

La ecuación de regresión lineal permite generar pronósticos del consumo de energía, por lo que se utilizará para comparar datos del consumo energético mensual estimado con el real.

$$E = 0.08232 - 1734 T \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde:

E = Energía eléctrica consumida (kWh)

P = Cantidad de producto congelado (kg)

T = Temperatura de la cámara de congelado (°C)

5.2 Indicadores de desempeño energético

Los IDEn son establecidos por la empresa PINOVA en el marco del SGen con el fin de medir su desempeño energético, en relación con la eficiencia energética, el uso de la energía, el consumo de energía y la demanda de potencia.

La empresa ha establecido que los cambios en el desempeño energético se miden con indicadores de desempeño energético con respecto a la línea base energética y se contienen dentro del formulario **R-SHE-0005 Seguimiento de Línea base energética e IDEn**.

En la presente investigación, se realizó una comparación de los IDEn en el tiempo, con el fin de determinar si el desempeño energético ha cambiado debido al cambio tecnológico introducido con el sistema NH₃/CO₂ en cascada.

Siguiendo la Norma ISO 50006, para el cálculo de mejoras del desempeño energético se determinó el porcentaje de cambio, es decir, la variación en los valores del periodo de línea base (indicador estimado) al período de referencia seleccionado (indicador real), expresado como un porcentaje del valor de LBEn. Un valor positivo del porcentaje del IDEn, indica que existe mejora en el desempeño energético.

La ecuación que expresa dicha relación es la siguiente:

$$\text{Cambio porcentual} = \frac{\text{Indicador estimado} - \text{Indicador real}}{\text{Indicador estimado}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 3})$$

Se estableció un IDEn para el USE 2 relacionado al sistema de refrigeración de la cámara de producto terminado, considerando variables significativas que afectan directamente al USE y el desempeño energético.

Con base en la ecuación de regresión lineal (ecuación 2) fue posible comparar los valores del indicador estimado del consumo de energía eléctrica con el indicador real.

Para la estimación del IDEn, se utilizaron valores semanales del periodo comprendido entre marzo del 2020 y agosto del 2021, los cuales se presentan en el Apéndice 3. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 18. Estimación del cambio porcentual del IDEn con respecto a la LBEn.

AÑO	SEMANA	FECHA	CONSUMO REAL DE ENERGÍA EN USE 2 (kWh)	CONSUMO ESPERADO DE ENERGÍA EN USE 2 (kWh)	IDEn
2020	13	16/03 - 22/03	30,977.56	54,463.39	43%
2020	14	23/03 - 29/03	31,160.17	54,651.64	43%
2020	15	30/03 - 05/04	22,508.97	54,131.29	58%
2020	17	13/04 - 19/04	29,667.56	54,081.57	45%
2020	18	20/04 - 27/04	34,924.33	50,830.29	31%
2020	19	28/04 - 03/05	30,957.28	54,426.52	43%
2020	20	11/05 - 17/05	30,363.81	51,064.26	41%
2020	21	18/05 - 24/05	30,218.95	48,057.66	37%
2020	22	25/05 - 31/05	31,126.70	45,194.78	31%
2020	23	01/06 - 07/06	31,009.85	40,390.95	23%
2020	24	08/06 - 14/06	30,862.32	42,969.01	28%
2020	25	15/06 - 21/06	30,955.82	45,391.90	32%
2020	26	22/06 - 28/06	28,241.22	41,350.33	32%
2020	27	29/06 - 05/07	30,375.02	36,477.14	17%
2020	28	06/07 - 12/07	30,750.67	41,834.17	26%
2020	29	13/07 - 19/07	30,505.40	44,304.22	31%
2020	30	20/07 - 27/07	35,463.00	46,759.80	24%
2020	31	28/07 - 02/08	26,134.25	48,382.36	46%
2020	32	03/08 - 09/08	30,263.13	47,672.21	37%
2020	33	10/08 - 16/08	33,465.84	49,442.17	32%

AÑO	SEMANA	FECHA	CONSUMO REAL DE ENERGÍA EN USE 2 (kWh)	CONSUMO ESPERADO DE ENERGÍA EN USE 2 (kWh)	IDEn
2020	34	18/08 - 23/08	25,980.92	50,257.41	48%
2020	35	24/08 - 30/08	30,143.09	48,009.51	37%
2020	36	31/08 - 06/09	30,537.14	40,307.74	24%
2020	37	07/09 - 13/09	35,087.00	45,489.26	23%
2020	38	15/09 - 20/09	26,198.45	45,849.03	43%
2020	39	21/09 - 27/09	31,198.97	51,656.22	40%
2020	40	28/09 - 04/10	30,172.78	48,170.98	37%
2020	41	05/10 - 11/10	30,460.78	50,028.90	39%
2020	42	12/10 - 18/10	26,582.38	47,007.62	43%
2020	43	19/10 - 25/10	30,880.26	54,760.16	44%
2020	44	26/10 - 01-11	30,394.91	54,649.03	44%
2020	45	02/11 - 08/11	30,207.89	57,539.72	48%
2020	46	09/11 - 15/11	29,935.01	49,850.41	40%
2020	47	16/11 - 22/11	29,537.08	54,644.60	46%
2020	48	23/11 - 29/11	28,624.22	48,459.29	41%
2020	49	30/11 - 6/12	21,814.45	39,096.70	44%
2020	50	7/12 - 13/12	17,971.38	34,673.59	48%
2021	4	18/01 - 24-01	29,060.95	53,091.39	45%
2021	5	25/01 - 31-01	27,657.60	56,099.52	51%
2021	6	01/02 - 07/02	27,220.12	48,700.24	44%
2021	7	08/02 - 14/02	26,811.90	45,665.86	41%
2021	8	22/02 -28/02	28,535.14	49,437.80	42%
2021	9	01/03 - 07-03	28,927.33	52,113.45	44%
2021	10	08-03 - 14-03	28,612.08	52,112.38	45%
2021	11	15/03 - 21/03	28,656.91	51,516.16	44%
2021	12	22/03 - 28/03	28,855.26	53,473.98	46%
2021	13	29/03 - 04/04	28,199.21	48,880.93	42%
2021	14	05/04 - 11/04	32,849.48	50,916.38	35%
2021	15	12/04 - 18/04	30,013.99	48,135.75	38%
2021	16	19/04 - 25/04	29,767.45	49,599.43	40%
2021	17	26/04 - 03/05	32,815.95	52,692.51	38%
2021	18	04/05 - 09/05	25,655.08	51,663.20	50%
2021	19	10/05 - 16/05	28,851.43	48,786.23	41%
2021	20	17/05 - 23/05	28,973.79	47,843.05	39%
2021	21	24/05 -30/05	28,763.25	48,519.97	41%
2021	22	31/05 - 06/05	27,047.46	45,475.07	41%
2021	23	07/06 - 13/06	29,671.69	48,605.77	39%
2021	24	14/06 - 20/06	29,436.28	45,217.22	35%

AÑO	SEMANA	FECHA	CONSUMO REAL DE ENERGÍA EN USE 2 (kWh)	CONSUMO ESPERADO DE ENERGÍA EN USE 2 (kWh)	IDEn
2021	25	21/06 - 27/06	29,004.44	45,048.61	36%
2021	26	28/06 - 04/07	27,010.37	45,033.77	40%
2021	27	05/07 - 11/07	27,767.81	44,576.62	38%
2021	28	12/07 - 18/07	29,008.94	46,484.40	38%
2021	29	19/07 - 26/07	32,675.34	50,148.13	35%
2021	30	27/07 - 02/08	30,084.40	48,521.53	38%

Fuente: Elaboración propia.

El valor promedio del porcentaje de cambio se estima en un 39%, con lo cual se demuestra una mejora del desempeño energético entre el periodo de línea base y el actual periodo de estudio.

Según la hipótesis alternativa de la presente investigación, el sistema NH₃/CO₂ en cascada genera una reducción del consumo eléctrico en 20% en comparación con el sistema HCFC-22. Con base en los resultados obtenidos, se logra comprobar que el porcentaje de ahorro energético es superior al 20%, donde el consumo de energía eléctrica se encuentra directamente afectado por las variables relevantes de temperatura de la cámara de congelación de producto terminado y las toneladas de producto terminado almacenado.

Con base en el método propuesto para determinar y actualizar los IDEn del USE 2, se deberá realizar el seguimiento y registro en el formulario establecido por la empresa denominado *SHE-0005 Seguimiento de Línea base energética e IDEn*.

La Norma ISO 50006 establece que la comunicación de cambios en el desempeño energético debe presentarse con base en las necesidades de los usuarios, mostrando generalmente los IDEns, LBEns y un valor de meta energética. Para este fin, PINOVA ha establecido el procedimiento *PG-SHE-0003 Comunicación Interna y Externa sobre Asuntos Ambientales y Energéticos* (Florida Retail, 2020).

Según lo establecido en el procedimiento ***PG-SHE-0002 Planificación energética*** (Florida Retail, 2020), la línea base debe ser revisada cuando suceda al menos una de las siguientes condiciones:

- a. Los IDEn ya no reflejan el desempeño energético de la organización; es decir, cuando el período en evaluación excede los máximos y mínimos registrados en el registro vigente ***R-SHE-0004 Determinación de Línea base energética e IDEn*** (Florida Retail, 2020).
- b. Cuando hayan existido los siguientes cambios importantes:
 - b.1. Aumento en los metros cuadrados de construcción en más de un 10%
 - b.2. Incremento en las líneas de producción.
 - b.3. Sustitución de tipos de energía.
- c. Transcurridos más de 1 año de establecida.

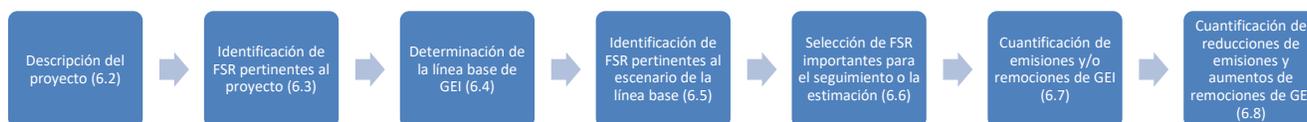
El seguimiento, medición, análisis y evaluación del desempeño energético y del SGen forman parte del compromiso corporativo de PINOVA en la búsqueda de la excelencia energética. La presente investigación ha contribuido con este objetivo, mediante el desarrollo de una herramienta para el monitoreo y seguimiento de la mejora del desempeño energético en la empresa.

CAPÍTULO VI: EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Para la determinación de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero se utilizó la norma *INTE/ISO 14064-2:2019 Gases de Efecto Invernadero - Parte 2: Especificación con orientación, a nivel de proyecto, para la cuantificación, el seguimiento y el informe de la reducción de emisiones o el aumento en las remociones de gases de efecto invernadero*. Dicha norma detalla los principios y requisitos para determinar las líneas base, y hacer seguimiento, cuantificar e informar las emisiones a nivel de proyecto, centrándose en los proyectos de GEI o en actividades basadas en proyectos diseñados específicamente para reducir las emisiones de GEI y/o aumentar las remociones de GEI (INTECO, 2019).

Los requisitos de la norma en los que se basa el presente análisis se presentan a continuación:

Figura 28. Requisitos de la INTE/ISO 14064-2:2019 Gases de Efecto Invernadero - Parte 2 utilizados en la investigación.



Fuente: INTECO, 2019.

6.1 Descripción del proyecto

Para el presente análisis, se considera el proyecto original ejecutado por la empresa PINOVA en conjunto con el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, denominado “Conversión de la Cámara de Producto Terminado de HCFC-22 a NH₃/CO₂ en cascada, en la compañía Premezclas Industriales para Panadería S.A.”.

El objetivo de dicho proyecto estuvo enfocado en eliminar el uso del refrigerante HCFC-22 propulsor del agotamiento de la capa de ozono y sus emisiones de CO_{2eq}, mediante la sustitución del sistema de refrigeración de la cámara de producto terminado y antecámaras. Por tanto, el tipo de acción de mitigación de gases de efecto invernadero responde al desplazamiento de un servicio más intensivo en GEI mediante el uso de tecnología energéticamente más eficiente.

Los detalles de la sustitución tecnológica se describen en el Capítulo IV.

6.2 Identificación de las fuentes, sumideros y reservorios (FSR) pertinentes al proyecto

La norma *INTE/ISO 14064-2:2019* requiere la identificación y evaluación de:

- Fuentes de gases de efecto invernadero (GEI): corresponde al proceso que libera un GEI hacia la atmósfera.
- Sumideros: se refiere al proceso que remueve un GEI de la atmósfera.
- Reservorios: corresponde a un componente, distinto a la atmósfera, que tiene la capacidad de acumular los GEI y de almacenarlos y liberarlos.

Se consideraron las fuentes de emisión de gases de efecto invernadero bajo los siguientes criterios:

- La fuente de GEI está controlada por la empresa.
- El tipo y nivel de las actividades del proyecto y del escenario de línea base son equivalentes.
- Se tienen datos disponibles o se puede hacer un seguimiento de las fuentes de forma rentable.

Por tanto, se seleccionaron las fuentes relacionadas a la operación del sistema de refrigeración original (HCFC-22), así como las emisiones resultado de la recarga de refrigerante de los equipos. Se excluyeron las fuentes de GEI no pertinentes para al proyecto, correspondientes a la producción de los refrigerantes, transporte, manufactura de los equipos y disposición final.

Las fuentes identificadas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 19. Fuentes de emisiones de GEI del sistema HCFC-22.

FUENTE	DESCRIPCIÓN	GEI
Refrigerantes	Recarga de refrigerante HCFC-22 en el sistema de refrigeración	CO ₂
Lubricantes	Mantenimiento de equipos electromecánicos	CO ₂
Electricidad	Consumo eléctrico del sistema de refrigeración	CO ₂

Fuente: Florida Retail.

Para el presente análisis no se identificaron sumideros ni reservorios de GEI pertinentes para el proyecto.

6.3 Determinación de la línea base de GEI

Según la norma *INTE/ISO 14064-2:2019*, la línea base de GEI “es una referencia cuantitativa de emisiones y/o remociones que habrían ocurrido en ausencia de un proyecto que proporcione una base para la comparación con las emisiones y/o remociones del proyecto” (INTECO, 2019).

En la determinación de la línea base se utilizó la herramienta metodológica denominada Cálculo de emisiones de línea de base, proyecto y fugas derivadas del uso de refrigerantes - Tool 28 (UNFCCC, 2017), bajo la siguiente ecuación:

$$LB_x = C_{ref, LB} \times FE_{ref, LB} \times PCG_{ref, LB} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

LB_x = Emisiones de referencia por fugas físicas de refrigerante del equipo de referencia en el año x (tCO_{2e}/año)

$C_{ref, LB}$ = Cantidad anual promedio de refrigerante utilizado en la línea de base para reemplazar el refrigerante que se ha fugado (toneladas/año)

$FE_{ref, LB}$ = Factor de emisión

$PCG_{ref, LB}$ = Potencial de calentamiento global

Para la determinación de la línea base de GEI se utilizaron datos anuales del 2016, tal y como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 20. Registros históricos por fuente de emisión para el año 2016.

FUENTE DE EMISIÓN	UNIDADES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	CONSUMO ANUAL
HCFC-22	kg	54.43	13.61	149.69	108.86	204.12	231.34	122.47	176.90	27.22	68.04	81.65	149.69	1,388.02
Lubricantes	L	0.00	34.07	34.07	0.00	0.00	71.92	0.00	0.00	0.00	7.57	7.57	7.57	162.77
Electricidad	kWh	150,016	144,019	154,106	151,580	157,030	152,498	151,479	152,766	141,628	149,951	153,160	146,939	1,805,175

Fuente: Florida Retail.

Para la cuantificación de las emisiones, se utilizaron los factores de emisión nacionales generados por el Instituto Meteorológico Nacional e IPCC, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 21. Factores de emisión.

CATEGORÍA DE FUENTE	FACTOR DE EMISIÓN	UNIDAD DE MEDICIÓN	REFERENCIA
Refrigerante (HCFC-22)	1810	ton CO ₂ e / kg refrigerante	IPCC
Lubricantes	0.5101	kg CO ₂ / L lubricante	IMN, 2016
Energía eléctrica	0.0557	kg CO ₂ e / kWh	IMN, 2017

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional.

Además, se utilizaron los datos de IMN correspondientes al potencial de calentamiento global para los gases en análisis.

Tabla 22. Potenciales de calentamiento global.

GAS	POTENCIAL DE CALENTAMIENTO		REFERENCIA
	HORIZONTE: 100 AÑOS		
CO ₂	1		IMN, 2016
CH ₄	21		IMN, 2016
N ₂ O	310		IMN, 2016
HCFC-22	1,760		IPCC, 2014

Fuente: Instituto Meteorológico Nacional.

A continuación se muestra la cuantificación de emisiones de GEI de línea base:

Tabla 23. Cálculo de la línea base.

FUENTE	CATEGORÍA	TON CO _{2e}		APORTE POR FUENTE (%)
		KG	TONELADAS	
Refrigerantes	HCFC-22	2,512,309.0	2,512.31	96.15%
Lubricantes	Aceites	83.0	0.08	0.00%
Electricidad	Refrigeración	100,548.2	100.55	3.85%
Total		2,612,940.2	2,612.9	100%

Fuente: Elaboración propia.

6.4 Cuantificación de las emisiones y/o remociones de GEI

Las emisiones del proyecto se calcularon con base en la siguiente ecuación (UNFCCC, 2017):

$$EP_x = C_{ref,P,x} \times FE_{ref,P} \times PCG_{ref,P} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

$EP_x =$ Emisiones del proyecto por fugas físicas de refrigerante del equipo del proyecto en el año x (tCO_{2e}/año)

$C_{ref,P,x} =$ Cantidad anual promedio de refrigerante utilizado en el año x para reemplazar el refrigerante que se ha fugado (toneladas/año)

$FE_{ref,P}$ Factor de emisión

$PCG_{ref,P} =$ Potencial de calentamiento global

Para la cuantificación se utilizaron los datos correspondientes al sistema NH₃/CO₂ en cascada. El cálculo de las emisiones del proyecto (Ec. 5) se basa en el mismo periodo de la línea base (Ec. 4), correspondiente al año 2016. Sin embargo, debido a que el sistema NH₃/CO₂ ha operado desde el año 2018, en el análisis se utilizó el periodo actual. Bajo esta consideración, se identificaron los datos de actividad por fuente de emisión correspondientes al periodo comprendido entre setiembre 2020 y agosto 2021, tal y como se muestra a continuación.

Tabla 24. Registros por fuente de emisión para el periodo setiembre 2020 - agosto 2021.

Fuente de Emisión	Unidad	2020				2021								Consumo Anual	
		Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago		
Refrigerante (CO ₂)	kg	0.00	0.00	0.00	500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	500.00
Lubricantes	L	0.00	0.00	41.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	75.71	0.00	0.00	0.00	0.00	117.35
Electricidad	kWh	131,771	126,850	130,878	94,494	136,159	109,828	122,627	128,285	128,153	123,804	122,160	132,948	1,487,957	

Fuente: Florida Retail.

En este periodo únicamente se reportaron recargas de CO₂, cuyo Potencial de Calentamiento Global es 1. Por otro lado, no se registraron recargas de NH₃, cuyo Potencial de Calentamiento Global es 0. Para la cuantificación de las emisiones, se utilizaron los factores de emisión nacionales generados por el Instituto Meteorológico Nacional en el 2021, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 25. Factores de emisión.

CATEGORÍA DE FUENTE	FACTOR DE EMISIÓN	UNIDAD DE MEDICIÓN	REFERENCIA
Lubricantes	2.505	kg CO ₂ e / L Combustible	IMN, 2021
Lubricantes	0.104	g CH ₄ / L Combustible	IMN, 2021
Lubricantes	0.021	g N ₂ O / L Combustible	IMN, 2021
Energía eléctrica	0.0282	kg CO ₂ e / kWh	IMN, 2021

Fuente: (Instituto Meteorológico Nacional, 2021)

A continuación se muestra la cuantificación de emisiones de GEI:

Tabla 26. Cuantificación de emisiones de GEI del proyecto.

FUENTE	CATEGORÍA	Ton CO _{2e}		APORTE POR FUENTE (%)
		kg	Ton	
Refrigerantes	CO ₂	500.0	0.50	1.17%
Lubricantes	Aceites	294.0	0.29	0.69%
Electricidad	Refrigeración	41,960.4	41.96	98.14%
Total		42,754.3	42.8	100%

Fuente: Elaboración propia.

6.5 Cuantificación de reducciones de emisiones y aumentos de remociones de GEI

La reducción de emisiones es calculada como la diferencia entre las emisiones de línea base y las emisiones del proyecto, usando la siguiente ecuación:

$$RE_x = LB_x - EP_x \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

RE_x = Reducción de emisiones en el año x (tCO_{2e} /año)

BE_x = Emisiones de línea base en el año x (tCO_{2e} /año)

EP_x = Emisiones del proyecto en el año x (tCO_{2e} /año)

Por tanto, la reducción de emisiones para el periodo de estudio por la implementación del proyecto se estimó en 2,570.1 toneladas CO_{2e}, para su compensación se requeriría al menos 118,225 árboles.

Estos resultados muestran que la implementación del sistema NH₃/CO₂ en cascada ha sido clave en la gestión de la huella de carbono de la empresa, alineada con el compromiso empresarial hacia la carbono neutralidad, así como a las metas país en el uso de refrigerantes con bajo o cero Potencial de Calentamiento Global contempladas en el Plan Nacional de Descarbonización.

CAPÍTULO VII: EVALUACIÓN FINANCIERA

Se realizó una evaluación financiera con el fin de identificar, valorar y comparar los costos y ahorros asociados a la sustitución del sistema de refrigeración HFCF-22 por el sistema NH₃/CO₂ en cascada. Asimismo, con el fin de generar información financiera útil para el sector RAC, se analizaron dos escenarios con las siguientes opciones de financiamiento:

Tabla 27. Escenarios de financiamiento.

ESCENARIOS	CONSIDERACIONES
Escenario 1: Financiamiento No Reembolsable	<ul style="list-style-type: none">• Escenario real correspondiente al apoyo financiero de cooperación internacional por el Fondo Multilateral del Protocolo de Montreal que fue implementado por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo en Costa Rica• Monto de \$524,000.
Escenario 2: Financiamiento Reembolsable	<ul style="list-style-type: none">• Escenario hipotético. Se considera un crédito con el Banco de Costa Rica, 6% interés, 1 año de gracia.• 80% financiamiento + 20% de Presupuesto Extraordinario.

Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis se consideró un plazo de 10 años, bajo los siguientes supuestos:

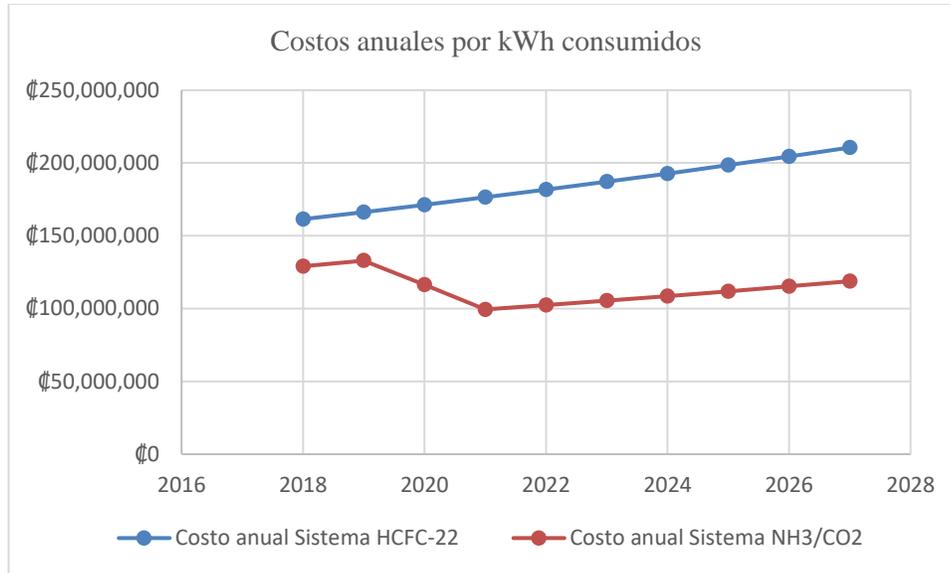
- Valor de la inflación del 3%.
- Impuesto de renta del 30%.
- Para el cálculo de la depreciación se consideró una vida útil de 15 años.
- Tasa de rentabilidad mínima aceptable (TREMA) del 9.2%.
- Tipo de cambio para el año 2017 de 542 ¢/\$ y para el año 2020 de 615 ¢/\$.
- Inversión inicial de \$943,000 correspondientes al Sistema NH₃/CO₂.
- Inversión de \$30,000 en el año 2020 para el reemplazo del aislamiento del equipo de enfriamiento de la cámara de producto terminado.

Para cálculo del ahorro de los costos en energía eléctrica se usaron las siguientes consideraciones (Ver Apéndice 4.1):

- Costo de 0.16 \$/kWh para la tarifa T-MT para el año 2017.
- Reducción de un 29.5% de los costos por la entrada de la tarifa T-MTb a partir de julio 2020 para el sistema implementado NH₃/CO₂ en cascada.

En el siguiente gráfico se observa la comparación de los costos anuales por consumo de energía eléctrica para el sistema original (HCFC-22) versus el sistema actual (NH₃/CO₂ en cascada).

Gráfico 12. Costos anuales por kWh consumidos.



Fuente: Elaboración propia.

Para cálculo del ahorro de los costos en mantenimiento se usaron las siguientes consideraciones (Ver Apéndice 4.2):

- Crecimiento del consumo de HCFC-22 del 8% anual.
- Costo del cilindro de HCFC-22 de ₪62,266 para el año 2017.
- Costo del kg de CO₂ de ₪2000 (2017).
- Costo del kg de NH₃ de ₪3250 (2017).

El ahorro ambiental está relacionado a la disminución de los costos por concepto de compensación de las emisiones de gases de efecto invernadero como parte la certificación en Carbono Neutralidad (Ver Apéndice 4.3). Entre los supuestos se consideraron:

- Por cada tonelada de CO_{2eq}, PINOVA asume un costo de \$7.5 para compensación de sus emisiones de gases de efecto invernadero.

- Aumento anual de 8% en el total de GEI para el sistema HCFC-22, incluyendo emisiones por recarga de refrigerante y consumo de electricidad.
- Se consideró un total de recarga en 10 años de 400 kg CO₂ y 140 kg de NH₃.

7.1 Escenario 1: Financiamiento No Reembolsable

El presente análisis corresponde al escenario real del proyecto de sustitución del sistema de refrigeración de la cámara de producto terminado, con un costo de inversión inicial de \$943,000, de los cuales \$524,000 fueron aportados por el Fondo Multilateral del Protocolo de Montreal y \$419,000 por PINOVA.

A continuación se muestran los resultados para el financiamiento no reembolsable.

Tabla 28. Análisis con financiamiento no reembolsable.

SISTEMA NH ₃ /CO ₂	PERIODO ANUAL										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
- Costos Totales	-€511,106,000	-€34,073,733	-€34,073,733	-€52,223,733	-€34,073,733	-€34,073,733	-€34,073,733	-€34,073,733	-€34,073,733	-€34,073,733	-€34,073,733
Costos de Inversión	€511,106,000	-	-	€18,150,000	-	-	-	-	-	-	-
Obras											
Equipos											
Otros											
Depreciación	-	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733
Ahorros Totales		€51,216,672	€53,900,350	€76,870,781	€104,632,740	€109,545,054	€114,780,420	€123,507,475	€132,813,112	€139,922,562	€158,229,646
Ahorro Energía		€32,380,667	€33,352,087	€54,886,738	€76,978,447	€79,287,800	€81,666,434	€84,116,427	€86,639,920	€89,239,118	€91,916,291
Ahorro Ambiental		€11,131,798	€12,035,987	€13,011,698	€14,067,158	€15,206,176	€16,436,315	€16,132,443	€19,199,700	€20,749,322	€22,422,913
Ahorro por Mantenimiento		€7,704,207	€8,512,276	€8,972,345	€13,587,135	€15,051,078	€16,677,671	€23,258,605	€26,973,492	€29,934,122	€43,890,442
= Flujo antes de impuestos		€17,142,938	€19,826,617	€24,647,048	€70,559,006	€75,471,321	€80,706,687	€89,433,742	€98,739,379	€105,848,828	€124,155,913
-Impuesto sobre la Renta	-	-	-	€7,394,114	€21,167,702	€22,641,396	€24,212,006	€26,830,123	€29,621,814	€31,754,649	€37,246,774
= Flujo después de impuestos		€17,142,938	€19,826,617	€17,252,933	€49,391,305	€52,829,925	€56,494,681	€62,603,619	€69,117,565	€74,094,180	€86,909,139
+ Depreciación / Amortización		€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733
+ Financiamiento No Reembolsable	€284,008,000										
= Flujo Neto Actualizado	-€227,098,000	€51,216,672	€53,900,350	€51,326,667	€83,465,038	€86,903,658	€90,568,414	€96,677,353	€103,191,298	€108,167,913	€120,982,872
Valor Actual Neto		€46,901,714	€45,200,820	€39,416,236	€58,696,748	€55,966,077	€53,412,257	€52,211,513	€51,034,277	€48,988,564	€50,176,170
PRIFD		€180,196,286	€134,995,466	-€95,579,231	-€36,882,483	€19,083,594	€72,495,852	€124,707,365	€175,741,642	€224,730,206	€274,906,376

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29. Indicadores financieros para el financiamiento no reembolsable.

INDICADOR	VALOR OBTENIDO
TREMA	9.20%
VAN del Flujo Efectivo	₡ 502,004,376
(-) Inversión	₡ (227,098,000)
VAN del Proyecto	₡ 274,906,376
TIR	28%

Fuente: Elaboración propia.

Considerando el financiamiento no reembolsable por ₡284,008,000 (\$524,000) y una TREMA del 9.20%, la inversión se logra recuperar en 5 años con una tasa de retorno (TIR) del 28%. Por tanto, la inversión tiene una rentabilidad aceptable.

7.2 Escenario 2: Financiamiento Reembolsable

Con el fin de presentar un escenario hipotético que pueda servir de referencia a las empresas y partes interesadas del Sector RAC, se consideró adicionalmente un financiamiento con el Banco de Costa Rica bajo el siguiente esquema:

Tabla 30. Esquema de financiamiento reembolsable.

FUENTE DE FINANCIAMIENTO	PORCENTAJE	MONTO TOTAL
Préstamo BCR	80%	₡408,884,800
Presupuesto Extraordinario	20%	₡102,221,200
Total	100%	₡511,106,000

Fuente: Elaboración propia.

Las condiciones del financiamiento a través del Banco de Costa Rica se indican a continuación:

Tabla 31. Condiciones financiamiento reembolsable.

CONDICIONES DEL CRÉDITO	VALOR
Préstamo	₡408,884,800
Interés	6%
Año Gracia	1
Plazo	7
Interés 1er año	₡24,533,088
Monto Préstamo	₡433,417,888
Cuota (anual)	₡ 77,640,321

Fuente: Elaboración propia.

En el Apéndice 4.4 se muestra el cálculo de amortización de la deuda. A continuación se muestran los resultados para el financiamiento reembolsable.

Tabla 32. Análisis financiero con financiamiento reembolsable.

SISTEMA NH ₃ /CO ₂	PERIODO ANUAL										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
- Costos Totales	€(511,106,000)	€(60,078,807)	€(56,980,692)	€(71,846,690)	€(50,215,648)	€(46,525,744)	€(42,614,445)	€(38,468,468)	€(34,073,733)	€(34,073,733)	€(34,073,733)
Costos de Inversión	€511,106,000	-	-	€18,150,000	-	-	-	-	-	-	-
Obras											
Equipos											
Otros											
Pago de Intereses		€26,005,073	€22,906,958	€19,622,957	€16,141,915	€12,452,010	€8,540,712	€4,394,735	-	-	-
Depreciación	-	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733
Ahorros Totales		€51,216,672	€53,900,350	€76,870,781	€104,632,740	€109,545,054	€114,780,420	€123,507,475	€132,813,112	€139,922,562	€158,229,646
Ahorro Energía		€32,380,667	€33,352,087	€54,886,738	€76,978,447	€79,287,800	€81,666,434	€84,116,427	€86,639,920	€89,239,118	€91,916,291
Ahorro Ambiental		€11,131,798	€12,035,987	€13,011,698	€14,067,158	€15,206,176	€16,436,315	€16,132,443	€19,199,700	€20,749,322	€22,422,913
Ahorro por Mantenimiento		€7,704,207	€8,512,276	€8,972,345	€13,587,135	€15,051,078	€16,677,671	€23,258,605	€26,973,492	€29,934,122	€43,890,442
= Flujo antes de impuestos		-€8,862,135	-€3,080,342	€5,024,091	€54,417,092	€63,019,311	€72,165,975	€85,039,007	€98,739,379	€105,848,828	€124,155,913
-Impuesto sobre la Renta	-	-	-	€1,507,227	€16,325,128	€18,905,793	€21,649,793	€25,511,702	€29,621,814	€31,754,649	€37,246,774
= Flujo después de impuestos		-€8,862,135	-€3,080,342	€3,516,864	€38,091,964	€44,113,517	€50,516,183	€59,527,305	€69,117,565	€74,094,180	€86,909,139
+ Depreciación / Amortización		€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733	€34,073,733
+ Credito	€408,884,800										
- Pago Principal		€51,635,248	€54,733,363	€58,017,365	€61,498,406	€65,188,311	€69,099,609	€73,245,586	-	-	-
= Flujo Neto Actualizado	€(102,221,200)	€(26,423,649)	€(23,739,971)	€(20,426,768)	€10,667,291	€12,998,940	€15,490,307	€20,355,452	€103,191,298	€108,167,913	€120,982,872
Valor actual neto		€(24,197,481)	€(19,908,334)	€(15,686,705)	€7,501,767	€8,371,335	€9,135,329	€10,993,153	€51,034,277	€48,988,564	€50,176,170
PRIFD		€(126,418,681)	€(146,327,015)	€(162,013,720)	€(154,511,952)	€(146,140,617)	€(137,005,288)	€(126,012,135)	€(74,977,858)	€(25,989,294)	€24,186,876

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33. Indicadores financieros para el financiamiento reembolsable.

INDICADOR	VALOR OBTENIDO
TREMA	9.20%
VAN del Flujo Efectivo	€ 126,408,076
(-) Inversión	€ (102,221,200)
VAN del Proyecto	€ 24,186,876
TIR	11%

Fuente: Elaboración propia.

Considerando una TREMA del 9.20%, la inversión se logra recuperar al año 10 con una tasa de retorno (TIR) del 11%. Por tanto, el proyecto es económicamente viable.

Por tanto, se logra comprobar la factibilidad económica de la implementación del sistema NH₃/CO₂ en cascada, tanto en el escenario con financiamiento no reembolsable, como para el escenario con financiamiento crediticio. El análisis permitió comparar las alternativas tecnológicas con la finalidad de apoyar la toma de decisiones de inversión para la empresa como para el sector RAC, demostrando que la alternativa con refrigerantes naturales permite maximizar el flujo de efectivo de la empresa.

Por tanto, el sistema NH₃/CO₂ en cascada, con CO₂ recirculado tipo *brine*, es una solución tecnológica y económicamente viable, que puede ser implantada en las empresas medianas manufactureras en Costa Rica, como una solución definitiva ante el proceso de eliminación de refrigerantes HCFC y de control de los refrigerantes HFC's aprobado en la Enmienda de Kigali del Protocolo de Montreal.

CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

En la presente investigación se realizó una evaluación de la sustitución del sistema de refrigeración HCFC-22 (R-22) por un sistema NH₃/CO₂ (R-717 / R-744) en cascada con CO₂ recirculado (tipo *brine*) en la cámara de producto terminado y antecámaras de la empresa PINOVA. Las siguientes conclusiones se extrajeron con base en las observaciones, el análisis teórico y la evaluación de la instalación a escala industrial con datos entre enero del 2016 a agosto del 2021:

- Con la implementación del sistema de refrigeración basado en el uso de NH₃/CO₂ en cascada, con CO₂ recirculado tipo *brine*, se estima una reducción del 39% en el consumo de energía eléctrica en comparación con el sistema original HCFC-22, entre el periodo de línea base y el actual periodo de estudio.
- El coeficiente de desempeño calculado (COP) del sistema original HCFC-22 corresponde a un valor de 2.04, mientras que el sistema actual NH₃/CO₂ (R-717 / R-744) en cascada con CO₂ recirculado (tipo *brine*), presenta un valor mayor correspondiente a un COP de 2.72, siendo este último más eficiente desde el punto de vista energético que el sistema original HCFC-22, ya que desplaza más cantidad de energía para intercambio por unidad de potencia absorbida.
- Con base en el análisis de regresión lineal múltiple, se logró establecer la línea base de energía (LBEn) con datos que permiten normalizar estadísticamente la relación del consumo de energía eléctrica del sistema de refrigeración, con las variables relevantes correspondientes a la temperatura de la cámara de producto terminado (°C) y la cantidad de producto terminado almacenado (kg).
- La sustitución del sistema de refrigeración HCFC-22 por el sistema NH₃/CO₂, generó una reducción de 2,570.1 toneladas CO_{2eq} con respecto al año base 2016, debido al desplazamiento de una tecnología más intensiva en GEI, por una tecnología energéticamente más eficiente con uso de refrigerantes naturales.
- Se demostró la factibilidad económica del proyecto de sustitución tecnológica, con una inversión inicial de \$943,000, el financiamiento no reembolsable del Fondo Multilateral del Protocolo de

Montreal por ₡284,008,000 (\$524,000) y una TREMA del 9.20%, la inversión se logra recuperar en 5 años, con una tasa de retorno (TIR) del 28%. Con el fin de contar con escenarios de referencia para otros proyectos a escala nacional y regional, se logró validar el escenario hipotético con financiamiento crediticio. Considerando un financiamiento reembolsable del 80% del monto total, la inversión se lograría recuperar al año 10, con una tasa de retorno (TIR) del 11%.

8.2 Recomendaciones

- La empresa PINOVA debe asegurar la medición, control, seguimiento y evaluación continua del consumo energético para el USE 2 y sus variables relevantes, según los procedimientos establecidos en el SGE. Para el seguimiento del modelo desarrollado en el presente estudio, se recomienda el uso de la herramienta ofimática MS Excel, que permite realizar cálculos de regresión lineal múltiple.
- Brindar seguimiento al proyecto de reemplazo del aislamiento en el sistema NH₃/CO₂ en cascada del equipo de enfriamiento de la cámara de producto terminado, así como el monitoreo del desplazamiento parcial de la operación en horas punta. Se recomienda validar la reducción de energía, la eficacia del proyecto y los ahorros económicos respectivos.
- Implementar el control operacional y monitoreo del manejo de las aperturas de la puerta de la cámara de producto terminado de PINOVA, como una variable potencialmente relevante.
- A través de la colaboración del Ministerio de Ambiente y Energía y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo, se recomienda promover la transferencia de conocimientos de los resultados de este proyecto piloto a nivel nacional, así como la capacitación para técnicos de refrigeración, profesionales en ingeniería y personas empresarias tomadoras de decisiones del sector RAC. Además, se recomienda compartir estos conocimientos como el sector bancario nacional, para promover el diseño de nuevos créditos verdes dirigidos al financiamiento de tecnologías de refrigeración basadas en refrigerantes naturales.

BIBLIOGRAFÍA

- Aghazadeh Dokandari , D., Setayesh Hag, A., & Mahmoudi, S. (2014). Thermodynamic investigation and optimization of novel ejector-expansion CO₂/NH₃ cascade refrigeration cycles (novel CO₂/NH₃ cycle). *International Journal of Refrigeration*, 46, 26-36.
- Alcance N°128 Gaceta N°125. (30 de junio de 2021).
- Aminyavari , M., Najafi, B., & Shirazi, A. (2014). Exergetic, economic and environmental (3E) analyses, and multiobjective optimization of a CO₂/NH₃ cascade refrigeration system. *Applied Thermal Engineering* , 65, 42-50.
- ASHRAE. (2014). *ASHRAE Position Document on Natural Refrigerants*. Georgia, USA.
- ASHRAE. (2017). *Ammonia as a Refrigerant*.
- Bansal, P., & Jain, S. (2007). Cascade systems: past, present, and future. *ASHRAE Trans*, 113 (1), 245–252.
- Bellido, A. (2016). *Estudio del comportamiento del refrigerante R-744 en procesos de transferencia de calor realizados en intercambiadores de placas montados en una instalación de refrigeración*.
- Bingming, W., Huagen, W., Jianfeng, L., & Ziwen, X. (2009). Experimental investigation on the performance of NH₃/CO₂ cascade refrigeration system with twin-screw compressor. *International Journal of Refrigeration* , 32, 1358–1365.
- BUN-CA. (2009). *Manual técnico: Refrigeración comercial*. San José, Costa Rica.
- CICR. (2017). *Manual de refrigeración y climatización eficiente*.
- Cuesa Construcciones Hu S.A. (2017). *Conversión de la cámara de producto terminado de Premezclas Industriales para Panadería S.A. de HCFC22 A NH₃/CO₂ en dos etapas, sistema tipo brine*.
- DCC. (2020). *Premezclas Industriales para Panadería, S.A.*
- DCC. (2020). *Programa País Carbono Neutralidad 2.0, Categoría Organizacional*.

- DIGECA. (2013). *Plan de Gestión para la eliminación de HCFC en Costa Rica 2013 - 2030*. San José, Costa Rica.
- DIGECA. (2021). *Sustancias agotadoras de la capa de ozono*. Obtenido de <http://www.digecca.go.cr/areas/sustancias-agotadoras-de-la-capa-de-ozono-protocolo-de-montreal-oficina-tecnica-del-ozono>
- Dopazo, J., & Seara, J. (2011). Experimental evaluation of a cascade refrigeration system prototype with CO₂ and NH₃ for freezing process applications. *International Journal of Refrigeration*, 34, 257-267.
- Dopazo, J., Fernández-Seara, J., Francisco J. Uhía., J., & Uhía, F. (2009). Theoretical analysis of a CO₂-NH₃ cascade refrigeration system for cooling applications at low-temperatures. *Applied Thermal Engineering, Elsevier*, 29(8-9), 1577.
- FIFCO. (2018). *Reporte Integrado 2018*. San José, Costa Rica.
- FIFCO. (2020). *Reporte Integrado 2020*.
- Florida Retail. (2020). *Manual del Sistema de Gestión de Energía*. Planta Florida Retail.
- Florida Retail. (2020). *PG-SHE-0002 Planificación energética. Versión 2*.
- Florida Retail. (2020). *PG-SHE-0003 Comunicación Interna y Externa sobre Asuntos Ambientales y Energéticos, Versión V6*.
- Florida Retail. (2020). *R-SHE-0004 Determinación Línea base energética e IDEn*.
- Florida Retail. (2020). *R-SHE-0006 Registro Plan de recopilación y medición energética, Versión 1*.
- Florida Retail. (2021). *R-SHE-0002 Definición y Seguimiento de Planes de Acción, Versión 2*.
- Getu, H., & Bansal, P. (2008). Thermodynamic analysis of an R744–R717 cascade refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, 31(1), 45–54.
- GIZ. (2015). *Sistemas de Refrigeración: Tutorial para el trabajo en campo*.

- Gullo, P., Tsamos, K., Hafner, A., Geb, Y., & Tassoub, S. (2017). State-of-the-art technologies for transcritical R744 refrigeration systems – a theoretical assessment of energy advantages for European food retail industry. *Energy Procedia*, 123, 46-53.
- Instituto Meteorológico Nacional. (2021). *Factores de emisión de gases de efecto invernadero* (Vol. 11a edición).
- INTECO. (2018). *INTE/ISO 50001:2018 Sistemas de gestión de la energía - Requisitos con orientación para su uso* (Segunda Edición ed.).
- INTECO. (2019). *INTE/ISO 14064-2:2019 Gases de Efecto Invernadero -Parte 2: Especificación con orientación, a nivel de proyecto, para la cuantificación, el seguimiento y el informe de la reducción de emisiones o el aumento en las remociones de gases de efecto invernadero*.
- IPU. (2020). *IPU*. Recuperado el 12 de Octubre de 2020, de Pack Calculation Pro: <https://www.ipu.dk/products/pack-calculation-pro/>
- ISO. (2014). *ISO 50006:2014 Energy management systems - Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI) - General principles and guidance* (First Edition ed.).
- Lee, T., Liu, C., & Chen, T. (2006). Thermodynamic analysis of optimal condensing temperature of cascade-condenser in CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems. *International Journal of Refrigeration*, 19, 1100-1108.
- Likitthammanit, M. (2007). *Experimental investigations of NH₃/CO₂ cascade and transcritical CO₂ refrigeration systems in supermarkets*. Dissertation, KTH School of Energy and Environmental Technology, Stockholm, Sweden.
- Lorentzen, G. (1994). Revival of carbon dioxide as a refrigerant. *International Journey of Refrigeration*, 17 (5), 292–301.

- Melo, J. C. (2016). *Aplicaciones seguras y eficientes en sistemas de refrigeración con NH₃/CO₂*.
- MINAE. (2017). *Gestión y uso seguro de refrigerantes*.
- MinAmbiente. (2014). *Manual de buenas prácticas en refrigeración*. Bogotá, Colombia.
- Multilateral Fund. (2021). *Multilateral Fund for the Implementation of the Montreal Protocol*. Obtenido de <http://www.multilateralfund.org/>
- Rawat, K., Kshetri, R., Khulve, H., & Pratiha, A. (2015). Parametric Study of R744-R717 Cascade Refrigeration System. *International Journal for Research in Emerging Science and Technology*, 2(7), 101-106.
- Rezayan, R., & Behbahaninia, A. (2011). Thermo-economic optimization and exergy analysis of CO₂/NH₃ cascade refrigeration systems. *Energy*, 36, 888–895.
- U.S. Department of Energy. (2019). *Guidance for the SEP 5000ITM Program Measurement & Verification Protocol: 2019. Superior Energy Performance 5000ITM(SEP 5000ITM)*. Obtenido de https://betterbuildingsolutioncenter.energy.gov/sites/default/files/attachments/SEP_50001_MV_Protocol_2019_Guidance.pdf
- UNDP. (2014). *Demonstration project for conversion from HCFC-22 technology to ammonia/CO₂ technology in the manufacture of two-stage refrigeration systems for cold storage and freezing applications at Yantai Moon Group Co. Ltd.*
- UNDP. (2018). *Replacement of a HCFC-22 refrigeration system by a R-717/R-744 (NH₃/CO₂) system in cold storage warehouse finished product of Premezclas Industriales para Panadería S.A. San José, Costa Rica.*
- UNFCCC. (2017). *Calculation of baseline, project and leakage emissions from the use of refrigerants* (Version 01.0 ed.).

- USAID. (2011). *Guía de prácticas de eficiencia energética en los sistemas de refrigeración industrial*.
- Yilmaz, B., Mancuchan, E., & Erdonmez, N. (2018). A Parametric Study on a Subcritical CO₂/NH₃ Cascade Refrigeration System for Low Temperature Applications. *Journal of Energy Resources Technology*, 140.

APÉNDICES

Apéndice 1. Instalaciones del sistema de refrigeración NH₃/CO₂.

A continuación se presentan los equipos del sistema de refrigeración NH₃/CO₂ en cascada, según la información levantada en la visita del 05 de febrero del 2021.

Figura 29. Vista general del sistema de refrigeración NH₃/CO₂.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 30. Compresores de tornillo para NH₃.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 31. Compresor recíprocante para NH_3 .



Fuente: Elaboración propia.

Figura 32. Tanque termosifón de NH_3 .



Fuente: Elaboración propia.

Figura 33. Sistema de recirculación de CO₂.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 34. Unidad condensadora e intercambiador de casco y placa.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 35. Evaporadores de CO2.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 36. Tubería de alimentación y retorno de CO2 con aislamiento térmico.



Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 2. Datos de consumo mensual de energía eléctrica y demanda.

Tabla 34. Consumo mensual de energía eléctrica y demanda.

MES	ENERGÍA (KWH/MES)			POTENCIA (KW/MES)		
	PUNTA	VALLE	NOCTURNO	PUNTA	VALLE	NOCTURNO
Enero-2016	129035	229445	234939	1152,41	1176,14	1033,55
Febrero-2016	125820	225538	218339	1201,90	1155,14	1071
Marzo-2016	130808	239616	239173	1161,58	1245,09	1157,94
Abril-2016	130981	239459	229166	1162,21	1170,33	1034,32
Mayo-2016	134843	245096	241223	1153,32	1174,32	1102,78
Junio-2016	131298	238354	233585	1092,84	1118,95	1025,85
Julio-2016	128609	235458	235139	1144,92	1146,32	1034,95
Agosto-2016	131798	238159	234338	1093,89	1137,71	1087,03
Septiembre-2016	122002	219571	218665	1129,45	1122,31	989,1
Octubre-2016	128892	231806	232464	1015,00	1056,23	905,17
Noviembre-2016	129688	232380	243787	1073,24	1079,12	998,06
Diciembre-2016	126460	229409	225379	1126,44	1143,03	984,13
Enero-2017	127185	226580	222888	1074,01	1082,06	942,34
Febrero-2017	127575	229539	228491	1211,84	1050,7	1134,7
Marzo-2017	132212	238133	231002	1049,09	1050,7	934,92
Abril-2017	119921	213651	210584	1109,57	1116,08	1045,87
Mayo-2017	135191	244157	235673	1098,02	1088,92	937,65
Junio-2017	133776	237245	238254	1154,51	1122,31	991,13
Julio-2017	141766	246498	259185	1139,53	1151,5	1047,62
Agosto-2017	136143	243020	246991	1153,18	1145,76	1015,77
Septiembre-2017	141261	251892	253918	1217,44	1201,27	1103,48
Octubre-2017	143980	258685	262936	1327,97	1263,22	1149,4
Noviembre-2017	133634	240775	251416	1270,43	1290,59	1052,03
Diciembre-2017	132248	238970	247031	1073,87	1108,45	1003,24
Enero-2018	130548	236480	238096	1093,89	1143,8	996,24
Febrero-2018	122088	215336	216219	1105,72	1081,15	997,5
Marzo-2018	136496	242926	243882	1215,38	1232,18	1145,03
Abril-2018	137527	244496	240393	1181,25	1199,1	1093,58
Mayo-2018	139691	252072	258891	1279,43	1261,58	1161,83
Junio-2018	145966	260421	292578	1244,78	1246,35	1164,45
Julio-2018	145520	264773	290206	1218,00	1224,83	1197
Agosto-2018	149765	270119	287937	1212,23	1226,93	1183,35
Septiembre-2018	147070	262121	269325	1247,93	1261,05	1217,48
Octubre-2018	136994	253986	272565	1255,28	1242,68	1176
Noviembre-2018	133484	245396	267789	1220,10	1244,25	1204,88
Diciembre-2018	124173	229142	249381	1175,48	1246,88	1199,1
Enero-2019	135715	250062	256375	1174,95	1208,03	1141,88
Febrero-2019	103782	187584	197031	1095,68	1154,48	1089,9
Marzo-2019	119688	225538	250986	1127,70	1194,38	1135,58
Abril-2019	115526	216248	224569	1181,25	1212,75	1199,1
Mayo-2019	142328	260632	274973	1250,55	1288,35	1228,5
Junio-2019	137480	248946	260043	1261,58	1287,83	1227,98
Julio-2019	146512	264613	269878	1289,93	1273,12	1203,3
Agosto-2019	142686	257191	268108	1219,05	1299,9	1182,83
Septiembre-2019	138628	246967	257077	1251,60	1257,38	1229,55
Octubre-2019	140463	249146	262346	1299,38	1190,7	1121,93
Noviembre-2019	132044	236416	248272	1179,68	1217,48	1152,38
Diciembre-2019	136184	244767	255074	1251,08	1296,75	1232,7
Enero-2020	135895	244239	252872	1228,50	1241,63	1242,68
Febrero-2020	121879	223195	227102	1234,28	1265,25	1219,05
Marzo-2020	139650	249337	259538	1230,08	1223,25	1215,9
Abril-2020	99586	178005	174016	1208,55	1239	1230,08
Mayo-2020	118167	217731	210178	1258,43	1247,93	1122,98
Junio-2020	117568	212409	204702	1247,93	1252,13	1123,5
Julio-2020	132610	245150	231921	1194,90	1212,75	1074,68
Agosto-2020	118000	214821	204680	1174,43	1182,83	1133,48

MES	ENERGÍA (KWH/MES)			POTENCIA (KW/MES)		
	PUNTA	VALLE	NOCTURNO	PUNTA	VALLE	NOCTURNO
Septiembre-2020	119586	212850	208776	1183,35	1201,73	1133,48
Octubre-2020	126778	225761	221560	1114,58	1180,73	1064,18
Noviembre-2020	115323	208819	205979	1202,25	1202,78	1075,73
Diciembre-2020	112346	205727	186077	1197,53	1218,53	1082,03
Enero-2021	115704	219665	214308	1200,68	1233,75	1108,8
Febrero-2021	96344	185938	182337	1045,8	1104,6	1002,75
Marzo-2021	123151	236388	228125	1078,35	1107,75	1019,03
Abril-2021	113359	215546	209246	1066,8	1130,85	994,35
Mayo-2021	113042	219117	217193	1047,38	1079,4	972,83
Junio-2021	123380	228217	223952	1043,18	1094,1	1029
Julio-2021	123008	229827	221131	1,066	1119,3	1056,83
Agosto-2021	109360	209310	202368	1052,63	1110,9	1022,18

Fuente: Florida Retail.

Apéndice 3. Datos semanales de temperatura y peso de producto terminado en la cámara fría.

Tabla 35. Registros semanales de temperatura y producto terminado en la cámara fría.

AÑO	SEMANA	FECHA	PESO PROMEDIO EN BODEGA (TON)	TEMPERATURA (°C)
2020	13	16/03 - 22/03	239.35	-20.05
2020	14	23/03 - 29/03	257.39	-19.30
2020	15	30/03 - 05/04	258.15	-18.96
2020	17	13/04 - 19/04	249.72	-19.33
2020	18	20/04 - 27/04	206.70	-19.50
2020	19	28/04 - 03/05	235.65	-20.20
2020	20	11/05 - 17/05	246.08	-17.77
2020	21	18/05 - 24/05	245.29	-16.07
2020	22	25/05 - 31/05	220.84	-15.58
2020	23	01/06 - 07/06	181.26	-14.69
2020	24	08/06 - 14/06	196.80	-15.44
2020	25	15/06 - 21/06	208.20	-16.29
2020	26	22/06 - 28/06	205.87	-14.07
2020	27	29/06 - 05/07	139.27	-14.42
2020	28	06/07 - 12/07	192.03	-15.01
2020	29	13/07 - 19/07	196.12	-16.24
2020	30	20/07 - 27/07	218.66	-16.59
2020	31	28/07 - 02/08	242.78	-16.38
2020	32	03/08 - 09/08	262.13	-15.05
2020	33	10/08 - 16/08	249.43	-16.67
2020	34	18/08 - 23/08	248.62	-17.18
2020	35	24/08 - 30/08	257.75	-15.45
2020	36	31/08 - 06/09	169.57	-15.20
2020	37	07/09 - 13/09	257.86	-13.99
2020	38	15/09 - 20/09	251.10	-14.52
2020	39	21/09 - 27/09	228.54	-18.94
2020	40	28/09 - 04/10	203.59	-18.12
2020	41	05/10 - 11/10	239.25	-17.49
2020	42	12/10 - 18/10	241.73	-15.63
2020	43	19/10 - 25/10	298.51	-17.41
2020	44	26/10 - 01/11	283.73	-18.05
2020	45	02/11 - 08/11	306.81	-18.62
2020	46	09/11 - 15/11	273.43	-15.77
2020	47	16/11 - 22/11	293.74	-17.57
2020	48	23/11 - 29/11	265.86	-15.32

AÑO	SEMANA	FECHA	PESO PROMEDIO EN BODEGA (TON)	TEMPERATURA (°C)
2020	49	30/11 - 6/12	236.68	-11.31
2020	50	7/12 - 13/12	271.68	-7.10
2021	4	18/01 - 24-01	299.98	-16.38
2021	5	25/01 - 31-01	318.34	-17.24
2021	6	01/02 - 07/02	219.25	-17.68
2021	6	08/02 - 14/02	193.59	-17.15
2021	8	22/02 -28/02	256.24	-16.35
2021	9	01/03 - 07-03	279.74	-16.77
2021	10	08-03 - 14-03	278.83	-16.82
2021	11	15/03 - 21/03	271.67	-16.81
2021	12	22/03 - 28/03	289.26	-17.11
2021	13	29/03 - 04/04	216.69	-17.90
2021	14	05/04 - 11/04	282.81	-15.94
2021	15	12/04 - 18/04	252.24	-15.79
2021	16	19/04 - 25/04	275.55	-15.52
2021	17	26/04 - 03/05	282.37	-16.98
2021	18	04/05 - 09/05	245.02	-18.16
2021	19	10/05 - 16/05	232.91	-17.08
2021	20	17/05 - 23/05	229.61	-16.69
2021	21	24/05 -30/05	249.80	-16.12
2021	22	31/05 - 06/05	236.33	-15.01
2021	23	07/06 - 13/06	243.93	-16.45
2021	24	14/06 - 20/06	247.02	-14.35
2021	25	21/06 - 27/06	257.96	-13.73
2021	26	28/06 - 04/07	260.26	-13.62
2021	27	05/07 - 11/07	238.82	-14.37
2021	28	12/07 - 18/07	225.99	-16.08
2021	29	19/07 - 26/07	244.97	-17.29
2021	30	27/07 - 02/08	254.83	-15.88

Fuente: Florida Retail.

Apéndice 4. Ahorros económicos

Apéndice 4.1. Consumo de energía eléctrica.

Tabla 36. Estimación de ahorros económicos asociados al consumo de energía eléctrica.

	PERIODO ANUAL										
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
kWh Sistema HCFC-22	1,861,351	1,861,351	1,861,351	1,861,351	1,861,351	1,861,351	1,861,351	1,861,351	1,861,351	1,861,351	1,861,351
Total costos anuales (€)		€161,416,316	€166,258,805	€171,246,569	€176,383,966	€181,675,485	€187,125,750	€192,739,522	€198,521,708	€204,477,359	€210,611,680
kWh Sistema NH ₃ /CO ₂		1,487,957	1,487,957	1,487,957	1,487,957	1,487,957	1,487,957	1,487,957	1,487,957	1,487,957	1,487,957
Total costos anuales (€)		€129,035,648	€132,906,718	€116,359,831	€99,405,520	€102,387,685	€105,459,316	€108,623,095	€111,881,788	€115,238,242	€118,695,389
Ahorro (€)		€32,380,667	€33,352,087	€54,886,738	€76,978,447	€79,287,800	€81,666,434	€84,116,427	€86,639,920	€89,239,118	€91,916,291

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 4.2. Mantenimiento

Tabla 37. Estimación de ahorros económicos asociados a mantenimiento.

	PERIODO ANUAL										
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Sistema HCFC-22											
Cantidad de refrigerante (cilindros)	76	82	89	96	103	112	121	130	141	152	164
Costo Cilindro	€62,266	€85,304	€87,863	€90,499	€123,983	€127,703	€131,534	€180,201	€185,608	€191,176	€261,911
Costo por HCFC-22	€4,732,181	€7,001,735	€7,788,730	€8,664,183	€12,819,526	€14,260,440	€15,863,314	€23,471,359	€26,109,540	€29,044,252	€42,973,876
Otros Gastos de Mantenimiento	€6,066,403	€6,248,395	€6,435,847	€6,628,922	€6,827,790	€7,032,624	€7,243,603	€7,460,911	€7,684,738	€7,915,280	€8,152,738
Total de Costos (€) Sistema HCFC-22	€10,798,584	€13,250,130	€14,224,577	€15,293,106	€19,647,316	€21,293,064	€23,106,916	€30,932,270	€33,794,278	€36,959,532	€51,126,614
Sistema NH₃/CO₂											
Cantidad de refrigerante (Kg NH ₃)	-	-	-	-	-	-	-	140	-	-	0
Cantidad de refrigerante (Kg CO ₂)	-	-	-	200	-	-	-	€200	€0	€0	€0
Costo Refrigerantes (€)	-	€0	€0	€437,091	€0	€0	€0	€1,051,542	€0	€0	€0
Otros Mantenimiento	-	€5,545,923	€5,712,301	€5,883,670	€6,060,180	€6,241,986	€6,429,245	€6,622,123	€6,820,786	€7,025,410	€7,236,172
Total de Costos (€) Sistema NH₃/CO₂	-	€5,545,923	€5,712,301	€6,320,761	€6,060,180	€6,241,986	€6,429,245	€7,673,665	€6,820,786	€7,025,410	€7,236,172
Total Ahorro en Mantenimiento (€)		€7,704,206.77	€8,512,275.94	€8,972,344.78	€13,587,135.48	€15,051,078.46	€16,677,671.10	€23,258,605.00	€26,973,491.56	€29,934,122.40	€43,890,441.90

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 4.3. Compensación de emisiones de gases de efecto invernadero

Tabla 38. Estimación de ahorros económicos asociados a compensación de emisiones de GEI.

	PERIODO ANUAL										
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027
Sistema NH₃/CO₂											
Cantidad de refrigerante (Kg CO ₂)	-	-	-	200	-	-	-	200	-	-	-
Cantidad de refrigerante (Kg NH ₃)	-	-	-	-	-	-	-	140	-	-	-
Ton CO ₂	-	-	-	0.20	-	-	-	401.58	-	-	-
Costo Compensación (€)	€0	€0	€0	€813	€0	€0	€0	€1,632,423	€0	€0	€0
Sistema HCFC-22											
Cantidad de refrigerante (Kg R22)	2,512	2,713	2,930	3,165	3,418	3,691	3,987	4,306	4,650	5,022	5,424
Costo Compensación (€)	€10,212,540	€11,029,543	€11,911,907	€12,864,859	€13,894,048	€15,005,572	€16,206,018	€17,502,499	€18,902,699	€20,414,915.01	€22,048,108.22
Ahorro (€)	€10,212,540	€11,029,543	€11,911,907	€12,864,046	€13,894,048	€15,005,572	€16,206,018	€15,870,076	€18,902,699	€20,414,915	€22,048,108
Sistema NH₃/CO₂											
Ton CO ₂ por electricidad	0	41.96	41.96	41.96	41.96	41.96	41.96	41.96	41.96	41.96	41.96
Costo Compensación (€)	€0	€170,567	€170,567								
Sistema R22											
Ton CO ₂ por electricidad	101	109	117	127	137	148	160	172	186	201	217
Costo Compensación (€)	€252,613	€272,822	€294,648	€318,219	€343,677	€371,171	€400,865	€432,934	€467,569	€504,974	€545,372
Ahorro (€)	€252,613	€102,254	€124,080	€147,652	€173,109	€200,604	€230,297	€262,366	€297,001	€334,407	€374,805
Ahorro ambiental total (€)	€10,465,153	€11,131,798	€12,035,987	€13,011,698	€14,067,158	€15,206,176	€16,436,315	€16,132,443	€19,199,700	€20,749,322	€22,422,913

Fuente: Elaboración propia.

Apéndice 4.4. Financiamiento Reembolsable

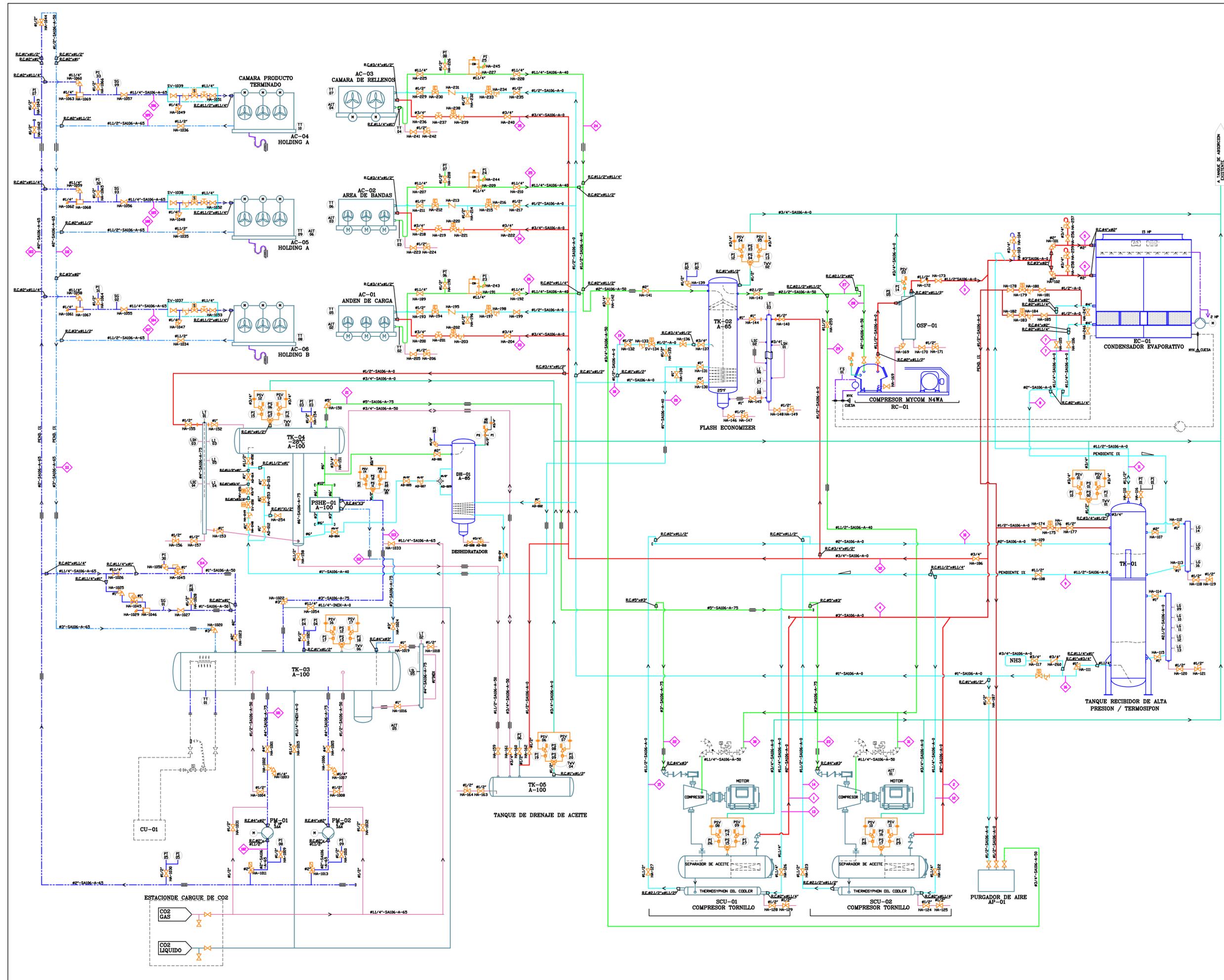
Tabla 39. Servicio de la deuda (intereses sobre saldo).

AÑO	SALDO DEUDA	CUOTA	INTERÉS	AMORTIZACIÓN DEUDA
2017				
2018	€433,417,888	€77,640,321	€26,005,073	€51,635,248
2019	€381,782,640	77,640,321	€22,906,958	€54,733,362.79
2020	€327,049,277	77,640,321	€19,622,957	€58,017,364.56
2021	€269,031,913	77,640,321	€16,141,915	€61,498,406.43
2022	€207,533,506	77,640,321	€12,452,010	€65,188,310.82
2023	€142,345,195	77,640,321	€8,540,712	€69,099,609.46
2024	€73,245,586	€77,640,321	€4,394,735	€73,245,586
TOTAL			€110,064,360	€433,417,888

Fuente: Elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Diagrama de flujo del Sistema NH₃/CO₂ en cascada tipo *brine*



SCU-01/02 COMPRESOR TORNILLO MARCA MAYEKAWA MODELO N70-1A-12 CAPACIDAD 136.7 TR / BHP / RPM MOTOR 3V-ENT-344/460V/60Hz Te: -38°C / 4°C PESO VACIO Kg PESO OPERACION Kg	BC-01 COMPRESOR RECIPROCANTE MARCA MAYEKAWA MODELO N4VA CAPACIDAD 84.7 TR Te: -38°C TO 35°C PESO VACIO Kg PESO OPERACION Kg
AC-01 EVAPORADOR N43 MARCA GUNTER MODELO S-ACON 051C/37-HE-M CAPACIDAD 9 TR MOTOR 3V-ENT-344/460V/60Hz Te: -38°C / 4°C PESO VACIO Kg PESO OPERACION Kg	AC-02 EVAPORADOR N43 MARCA GUNTER MODELO S-ACON 046C/37-HE-M CAPACIDAD 8 TR MOTOR 3V-ENT-344/460V/60Hz Te: -38°C / 4°C PESO VACIO Kg PESO OPERACION Kg
AC-03 EVAPORADOR N43 MARCA GUNTER MODELO S-ACON 051C/37-HE-M CAPACIDAD 6.5 TR MOTOR 3V-ENT-344/460V/60Hz Te: -38°C / 4°C PESO VACIO Kg PESO OPERACION Kg	AC-04/05 EVAPORADOR C02 MARCA GUNTER MODELO S-CPON 082B/30 CAPACIDAD 24.4 TR MOTOR 3V-ENT-344/460V/60Hz Te: -38°C / 4°C PESO VACIO Kg PESO OPERACION Kg
AC-06 EVAPORADOR C02 MARCA GUNTER MODELO S-CPON 082B/30 CAPACIDAD 25 TR MOTOR 3V-ENT-344/460V/60Hz Te: -38°C / 4°C PESO VACIO Kg PESO OPERACION Kg	PM-01/02 BOMBAS DE C02 MARCA TEBUCRU MODELO B43-25F4G-0405 SSI-E CAPACIDAD 7.250 m ³ / h MOTOR 3V-ENT-344/460V/60Hz Te: -38°C / 4°C PESO VACIO Kg PESO OPERACION Kg
TK-01 TANQUE ALTA PRESION / TERMOFISON MARCA PHILLIPS MODELO HPTV-3040 TAMAÑO Ø762 x 3048 mm (L) Te: 35°C AIS 0 PESO VACIO 1500 Kg PESO OPERACION 4500 Kg	TK-02 TANQUE FLASH ECONOMIZER MARCA PHILLIPS MODELO ICV-1696 TAMAÑO Ø762 x 3048 mm (L) Te: -4°C AIS 65 PESO VACIO 450 Kg PESO OPERACION 700 Kg
TK-03 TANQUE DE RECIRCULACION C02 MARCA PHILLIPS MODELO SF30-3092 TAMAÑO Ø762 x 3048 mm (L) Te: 15°C AIS 100mm PESO VACIO 1000 Kg PESO OPERACION 4000 Kg	TK-04 TANQUE TRAMPA DE SUCCION MARCA PHILLIPS MODELO S700-3092 TAMAÑO Ø762 x 3048 mm (L) Te: 15°C AIS 100mm PESO VACIO 800 Kg PESO OPERACION 1200 Kg
TK-05 TANQUE DE ACEITE MARCA PHILLIPS MODELO ISP TAMAÑO Ø504 x 635 mm (L) Te: 15°C AIS 5 PESO VACIO 200 Kg PESO OPERACION 400 Kg	AP-01 PURGADOR MARCA PARKER MODELO V300
PSHE-01 UNIDAD CONDENSADORA DE C02 MARCA VANTERUS SERIAL 47638 MODELO PSHE-350/1/1 CAPACIDAD 20 TR Te: 25°C C02, 15°C NH3 PESO VACIO 1200 Kg PESO OPERACION 1200 Kg	BC-01 CONDENSADOR EVAPORATIVO MARCA EVAPCO MODELO GATC-841 CAPACIDAD 640 kW Te: 35°C PESO VACIO 4500 Kg PESO OPERACION 5500 Kg

NOMENCLATURA	NOMENCLATURA
VALVULA DE SERVICIO RECTA VALVULA DE SERVICIO ANGULAR VALVULA CHECK EN LINEA VALVULA SOLENOIDE FILTRO VALVULA MOTORIZADA VALVULA DE SEGURIDAD VALVULA DE CIERRE RAPIDO VALVULA DE BELLA VALVULA CHECK FILTRO CON BRIDAS VALVULA DE BALANCE DISCO DE RUPTURA FILTRO SECAnte VALVULA STOP CHECK VALVULA REGULADORA VALVULA DUAL	VALVULA TRES VIAS INDICADOR DE TEMPERATURA TRANSMISOR DE TEMPERATURA SWITCH DE FLUIDO INDICADOR DE NIVEL TIPO DE BUEY INDICADOR DE NIVEL TIPO COLUMNA SWITCH FLUJADOR CONTROLADOR ELECTRONICO DE NIVEL TRANSMISOR DE PRESION INDICADOR DE PRESION-MANOMETRO TRANSMISOR DE PRESION R.C. REDUCCION COPA R.E. REDUCCION EXCENTRICA BRIDA CIEGA SWITCH DE PRESION INDICADOR DE HUMEDAD VALVULA REGULADORA VALVULA CHECK VALVULA REGULADORA PRESION DIFERENCIAL

NOTAS:

- DIAMETRO DE LA TUBERIA MATERIAL AISLAMIENTO DE LA TUBERIA TIPO DE FLUIDO
 PARA TUBERIA Ø1/2" A Ø1 1/2" SCH-80
 PARA TUBERIA Ø2" A Ø10" SCH-40
- SUMINISTRADO POR EL CLIENTE
- ØA-100 HACE REFERENCIA AL ESPESOR DE LOS TANQUES Y TUBERIAS.

10					
9					
8					
7					
6					
5					
4					
3					
2					
1					
0					
REVISION	FECHA	DESCRIPCION	DIBUJO	REVISO	APROBO
01	15/10/2017		N/A		
FORMATO	BI		10		
N.º PROYECTO	N.º DE PLANO	N.º DE HOJA			
CP-4400	PL-CP-4400-01	1 / 1			
PROYECTO PINOVA MUSMANNI S.A.					
CONTIENE: DIAGRAMA DE FLUJO SISTEMA DE REFRIGERACION CON CO2 2017					