CONGELADOR DE PLACAS: DISEÑO Y MODELADO

CARLOS EDUARDO ORREGO ALZATE

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MANIZALES

FACULTAD DE CIENCIAS Y ADMINISTRACION

1996

CONGELADOR DE PLACAS: DISEÑO Y MODELADO

CARLOS EDUARDO ORREGO ALZATE

Trabajo presentado como requisito parcial para optar por el título de Especialista en Ciencia y Tecnología de Alimentos.

Director:Ingeniero
MARIO VELASQUEZ

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE MANIZALES

FACULTAD DE CIENCIAS Y ADMINISTRACION

1996

TABLA DE CONTENIDO

		Página
PRESENTACION		1
CAPITULO I:	OBJETIVOS Y METODOLOGIA	3
1.1	OBJETIVOS	3
1.2	METODOLOGIA	3
1.2.1	Tipo de investigación	3
1.2.2	Definición de los objetos y áreas de estudio	4
1.2.3	Lugar de desarrollo	5
1.2.4	Período de ejecución	5
1.2.5	Fuentes de información	5
1.2.6	Criterios de confiabilidad de datos e información	6
1.2.7	Parámetros principales de diseño	6
1.2.8	Criterios de evaluación de los equipos	7

Página

1.2.9 Pruebas de diseño 8

1.3 INSTRUMENTOS 9

1.3.1 De medida 9

1.3.2 De diseño 10

1.4 FASES DEL DISEÑO 10

1.4.1 Especificación de las condiciones de proceso 11

1.4.2 Equipos 11

1.4.3 Diseño de elementos 11

1.4.4 Ejecución 11

1.4.5 Pruebas 12

1.5 CRONOGRAMA DE EJECUCIÓN 14

CAPITULO II : MARCO TEORICO 16

2.1 Termofísica 16

2.2 Mecanismos de transferencia de calor 17

2.2.1 Conducción 17

2.2.2 Convección 18

2.2.3 Radiación 19

2.3 Aspectos tecnológicos de la congelación de alimentos 20

2.4 La transferencia de calor en la congelación 21

2.5 Equipos de congelación 29

Página

2.6 El congelador de placas 30

2.7 La producción de frío 32

2.8 Líquidos refrigerantes 33

CAPITULO III: MEMORIAS DEL DISEÑO 35

3.1 EQUIPOS 35

3.1.1 Selección del tipo de congelador 35

3.1.2 Desagregación del sistema 35

3.1.2.1 Baño termostatado refrigerado 36

3.1.2.2 Congelador de placas . Primera aproximación 37

3.2 PRUEBAS DEL BAÑO TERMOSTATADO 40

3.2.1 Selección del líquido refrigerante 40

3.2.2 Potencia del BTR 47

3.3 LA CONSTRUCCIÓN DEL CONGELADOR 49

3.3.1 Prototipo 1 49

3.3.2 Prototipo 2 51

3.3.3 Prototipo 3 52

3.3.4 Prototipo 4 53

3.3.5 Prototipo 5 54

3.3.6 Prototipo 6 54

Página

CAPITULO IV: CALCULOS Y PRUEBAS 56

4.1 PROPIEDADES FÍSICAS 56

4.2 TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE PLACA Y PROPILENGLICOL 58

4.3 TIEMPO DE CONGELACIÓN 61

4.3.1 Modelo de Plank 62

4.3.2 Modelo de Cleland y Earle 63

4.4 CAIDA DE PRESION DEL REFRIGERANTE 64

4.5 PRUEBAS 65

4.5.1 Pruebas hidráulicas 66

4.5.2 Pruebas de transferencia de calor 66

4.5.2.1 Curvas de enfriamiento 68

CAPITULO V : ANALISIS 78

5.1 ANALISIS DE RESULTADOS 78

5.1.1 Teoría vs práctica 78

5.1.2 Acerca del proceso de diseño 79

5.2 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 80

BIBLIOGRAFIA 83

ANEXO 1 . FOTOGRAFIAS 86

ANEXO 2 . ESPECIFICACIONES 89

ANEXO 3. PRACTICA DE CONGELACION 90

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO I

		Página
1.1	Secuencia de diseño	13
1.2	Cronograma	15

CAPITULO II

2.1	Etapas de la congelación	21
2.3	Determinación de P de los Números de Plank y de Stefan	27
2.4	Determinacion de R de los numeros de Plank y Stefan	28
2.5	Determinación de W del Número de biot y del factor de forma β	28
2.6	Tipos de congeladores industriales	30
2.7	Esquema de un congelador de placas	30
2.8	Ciclo de refrigeración mecánica	33

CAPITULO III

3.1	Esquema general del sistema de congelación propuesto y diseñado	36
3.2	Diseño inicial	39

Página

3.3	Vista en planta de la placa de enfriamiento. Escala 1:25	40
3.4	Enfriamiento de líquidos refrigerantes.Propilenglicol	45
3.5	Enfriamiento de líquidos refrigerantes.Etanol	46
3.6	Plano del congelador	50
3.7	Incremento del área de contacto serpentín-placa	52
3.8	Sistema de llenado	53
3.9	Conexión de placas en paralelo	54
3.10	Conexión de placas en serie	55
3.11	Comparación de placa inferiuor	55

CAPITULO IV

4.1	Curvas de enfriamiento para tres condiciones	71
4.2	Congelación de mustras en la bandeja grande	73
4.3	Congelación de muestras en la bandeja pequeña	75
4.4	Congelación de muestras en el prototipo 6	77

LISTA DE TABLAS

CAPITULO III

		Página
3.1	Viscosidad de líquidos refrigerantes	42
3.2	Enfriamiento de líquidos refrigerantes	44
3.3	Potencia disponible del BTR	48

CAPITULO IV

4.1	Propiedades físicas	57
4.2	Datos y cálculos iniciales	58
4.3	Longitud equivalente	65
4.4	Pruebas	67
4.5	Comparación de curvas de enfriamiento para tres condiciones	70
4.6	Congelación de muestras en la bandeja grande	72
4.7	Congelación de muestras en la bandeja pequeña	74
4.8	Pruebas del prototipo 6	76

CAPITULO V

5.1	Comparación de cálculos y desempeño del prototipo 6	78
5.2	Análisis de la secuencia de diseño	79

RESUMEN EJECUTIVO

La congelación de alimentos es uno de los métodos de preservación mas utilizados y aceptados porque, bien ejecutada, no involucra alteraciones importantes en las características organolépticas y nutricionales de los productos, utilizando solamente un procedimiento físico.

Este documento presenta la memoria del diseño y construcción de un congelador de placas para planta piloto. Hará parte de los elementos necesarios para disponer de una miniplanta para ensayos de congelación y liofilización en las plantas piloto, área de alimentos, de la Universidad Nacional Sede Manizales. Se relaciona la secuencia completa del diseño, fabricación, pruebas mecánicas y de transferencia de calor, ajustes , presentación , características finales del prototipo y una guía de práctica de congelación.

CREDITOS

En las tareas que concluyeron con la puesta en operación del congelador de placas contribuyeron :

El Comité de Investigaciones y desarrollo Científico de la Sede Manizales, en donde se tiene inscrita la investigación " Técnicas de Congelación y Liofilización ", de la cual el congelador es uno de los elementos previstos para construír . Además de la financiación de los materiales y, servicios necesarios, se contó , para el monitoreo de algunos de los ensayos con el apoyo de los auxiliares de dicha investigación, Marcela López y Aldemar Riascos, ambos estudiantes de la carrera de Ingeniería Química.

La fabricación del aparato se hizo en el taller de la Universidad Nacional Sede Manizales .

Las fotografías de este documento son del Arquitecto Mario Sanabria, profesor de la Universidad Nacional.

PRESENTACION

La industria de alimentos , tanto en el país como en el mundo es, y será uno de los sectores mas dinámicos en esta época y en el futuro inmediato. Entre las 200 industrias mas importantes de Colombia hay 65 del sector de alimentos (incluyendo bebidas, café, ingenios y molineras) [1]. A nivel mundial, distintos analistas señalan que el crecimiento de la oferta de alimentos, incluyendo procesados será insuficiente para la demanda en ascenso de mas y mejores productos, destacando como uno de los factores causantes de este panorama la inserción de un numero creciente de población con mayor capacidad de demanda por alimentación variada y de calidad, como es el caso de los países del suroriente Asiático y la China[2].

El sector de los alimentos congelados es uno de los más dinámicos de la industria alimentaria de los países desarrollados. En nuestro país aún presenta una cobertura muy limitada pero es de prever un consumo creciente a medida que aumente el número de mujeres trabajadoras, disminuya el tamaño de la unidad familiar y, consecuentemente crezca la demanda de comidas rápidas.

---

[1] --Las líderes del mercado.Revista DINERO,N° 37,Bogotá,1996,p.140-196.

[2] --The new economics of food.Bussines Week,Ed Internacional,New York,1996,p32-39.

La simplicidad de la técnica de la congelación induce normalmente a creer que no presenta problemas. En realidad se requiere de conocimiento suficiente de equipos y productos, para que el consumidor relacione la calidad del congelado con la del alimento original. En cuanto a los equipos, no existe una tradición en el país para el diseño y apropiación de la tecnología avanzada de conservación , y en particular la de la congelación, en donde , para comenzar, se conoce poco sobre el comportamiento de los alimentos autóctonos congelables, y menos aún acerca de los parámetros de ingeniería básica que harían posible el diseño óptimo de equipos para cada producto. La especificidad de los hábitos alimentarios locales hace necesarios trabajos que permitan afrontar con éxito la exigencia de los consumidores nacionales por su comida tradicional, cuando un número creciente de ellos demande más opciones de comidas rápidas.

El prototipo que se fabricó hará parte de los equipos piloto de la planta de alimentos de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, inicialmente como parte de los elementos mínimos para el trabajo investigativo en congelación y liofilización, soporte de actividades para la línea de profundización de alimentos y el postgrado en Ciencia y Tecnología de alimentos.

CAPITULO I. OBJETIVOS Y METODOLOGIA

1.1 OBJETIVOS

a) Diseñar, construir y poner en funcionamiento un prototipo de congelador de placas.

b) Aplicar los conocimientos adquiridos en el postgrado, en el área de la Tecnología de los alimentos congelados.

c) Cumplir uno de los requisitos para adquirir el título de Especialista en Ciencia y Tecnología de Alimentos.

1.2 METODOLOGIA

1.2.1 Tipo de investigación

Es aplicada . No se pretende desarrollar novedades técnicas. El propósito es aplicar el estado de arte en equipos de congelación al diseño de una unidad simple que haga tal

función. El tipo de conocimiento que se pretende obtener está relacionado con el de aprendizaje y apropiación tecnológica de la comparación teórico-práctica en los aspectos de diseño, fabricación, modelamiento, ajuste y puesta en marcha de la unidad.

Es de desarrollo y desagregación tecnológica: Aunque el equipo a diseñar y fabricar cumplirá únicamente la función de congelar alimentos, todos los elementos accesorios necesarios para su operación (unidad de refrigeración, recirculación, sistema de almacenamiento de muestras, selección de líquido refrigerante e instrumentación) fueron diseñados o adquiridos luego del análisis que permitió su adaptación óptima y además su utilización en otras áreas del procesamiento de alimentos y plantas piloto.

1.2.2 Definición de los objetos y áreas de estudio

Area principal : Congelación

Areas específicas : Equipos
Congelación
Medios refrigerantes

Uso:

Para alimentos. Para las pruebas del equipo se utilizará agua como material de propiedades físicas conocidas para la cotejación de los modelos propuestos y en prueba.

1.2.3 Lugar de desarrollo

Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. Plantas piloto de Ingeniería Química. Visitas industriales de estudio y apoyo a la Fábrica de Café Liofilizado y Cenicafé.

1.2.4 Período de ejecución

12 meses, segundo semestre de 1995 y primero de 1996.

1.2.5 Fuentes de información

Bibliográfica: Disponible en las bibliotecas de los lugares de desarrollo del proyecto y en las bases de datos de las redes de información a las que está conectada la Universidad Nacional y la biblioteca Británica.

Catálogos: De fabricantes de equipos relacionados.

Leybold - Haeraus (Al)

Balzers (Al)

Stokes (U.S.A.)

Cole Parmer (U.S.A.)

Julabo (Al)

De asesorías: Se contó con la colaboración de algunos profesionales , a saber: Alonso Gutiérrez (Fábrica de Café Liofilizado) y Mario Velasquez (Universidad Nacional).

Las referencias particulares se encontrarán en la bibliografía.

1.2.6 Criterios de confiabilidad de datos e información

Tanto para los datos correspondientes a medidas como los suministrados por el material escrito o expertos, se aceptaron como confiables cuando al menos una pareja de cifras de un mismo parámetro estuvo dentro de un rango máximo de ± 5% alrededor de su valor medio.

Cuando no fué posible la obtención explícita de un parámetro se utilizaron modelos predictivos,declarando el valor de aproximación o errores involucrados.

1.2.7 Parámetros principales de diseño:

Del material a congelar :Temperatura de congelación, masa, calor específico, y conductividad térmica .

Del líquido refrigerante: Masa,calor específco,conductividad térmica y viscosidad

De los equipos:Velocidades de congelación y retiro de energía, caudal y caída de presión de fluido refrigerante, temperatura y tiempo.

Geometrías (materiales y equipos).

1.2.8 Criterios de evaluación de los equipos

Deben distinguirse las partes y/o equipos dentro de dos categorías:

Aquellos que en el ejercicio de desagregación se decidió adquirirlos.

Los diseñados y fabricados.

Para unos y otros la evaluación se hizo a partir de su puesta en operación y de la cotejación de sus especificaciones solicitadas (o definidas) vs las obtenidas en su operación.

En general los parámetros más importantes son las variables definidas como independientes (temperaturas - tiempos) y las relacionadas con la capacidad: masa, caída de presión, potencia. En cualquier caso se realizaron al menos cuatro pruebas en diferentes condiciones de operación (definidas las variables dependientes) y se consideraron aceptables desviaciones hasta de un 5% en relación con los esperados para los parámetros independientes según los modelos escogidos.

1.2.9 Pruebas del diseño:

Para la verificación del funcionamiento del equipo se realizaron las siguientes pruebas:

Pruebas hidráulicas:

PH1. La primera inspección se realizó visualmente operando el equipo en el modo de circulación externa (flujo de refrigerante : baño-serpentines-baño) , a temperatura ambiente del refrigerante (19-20ºC) .

PH2. La medición del consumo de potencia se tomó como una variable indicadora de la mayor o menor exigencia sobre la bomba de recirculación debida en este caso, exclusivamente a la caída de presión por líneas de empalme baño-congelador. El equipo utilizado fué una pinza voltiamperimétrica convencional que se ubicó alrededor del cable de energía de alimentación del baño; las temperaturas del refrigerante fueron la ambiente y a -15ºC . El parámetro de comparación fué el consumo en vatios. Bajo las mismas circunstancias se hicieron medidas del baño mientras operaba en el modo de recirculación interna

Pruebas de transferencia de calor(PT)

Se hicieron medidas de dos tipos. Las primeras fueron ensayos de temperatura-tiempo de los equipos:

PT1. Con las bandejas llenas, sin aislamiento.

PT2. PT1, con aislamiento.

PT3. Un segundo tipo de pruebas de transferencia de calor lo constituyeron las mediciones de las temperaturas superficiales de distintos puntos del congelador utilizando para ello un termómetro infrarrojo . Se logró obtener así un perfil de temperaturas para las placas enfriadoras que permitió hacer ajustes en el sistema de serpentines y evaluar sus efectos en la búsqueda de uniformidad y menor temperatura superficial para el favorecimiento de la transferencia de calor. Estas pruebas se realizaron con los prototipos 2 en adelante pues el termómetro infrarrojo solo estuvo disponible a partir del mes de abril, cuando ya se habían hecho los ajustes al primer prototipo.

1.3 INSTRUMENTOS

1.3.1 De medida:

Tiempos:Para la medición de tiempos, un reloj común.

Temperaturas: Las correspondientes a las del medio refrigerante y muestra a congelar se determinaron mediante los sensores incorporados en el baño termostatado refrigerado (error $\pm$ 0.1ºC). Para algunas pruebas se utilizó un termometro infrarrojo marca RAYTEK(error $\pm$ 1ºC).

Dimensiones : Flexómetro comercial para las medidas mas largas (error $\pm$ 1mm): para las medidas de calibres un nonio o pie de rey (error $\pm$ 0.02mm)

1.3.2 De diseño

Modelos matemáticos : Existen numerosos modelos matemáticos en la literatura (ver marco teórico). Las pruebas de operación fueron cotejadas con dos modelos para verificar su correspondencia con el equipo construido utilizando una muestra de propiedades físicas suficientemente conocidas como el agua pura.

1.4 FASES DEL DISEÑO

A continuación se relacionan las diversas fases que desarrolló la metodología propuesta:

1.4.1 Especificación de las condiciones de proceso:

a) Tamaño, forma y materiales a congelar.

b) Temperaturas de alimentación, final, de medio refrigerante.

c) Rangos de presiones internas y de medio refrigerante.

d) Caudales, ratas de enfriamiento.

e) Propiedades físicas de sustancia a congelar .

1.4.2 Equipos:

a) Alternativas tecnológicas. Selección macro de sistema.

b) Desagregación: elementos. tamaños.

c) Definición de compra de elementos: prueba de operación.

d) Definición de elementos de diseño

1.4.3 Diseño de elementos:

a) Bases teóricas generales.

b) Simplificaciones. Diseño (Desarrollo) o selección de modelos.

c) Primer diseño. Evaluación. Ajustes.

1.4.4 Ejecución

a) Compras y chequeo de equipos y elementos

b) Diseño teórico. Diseño mecánico .

c) Fabricación. Interventoría.

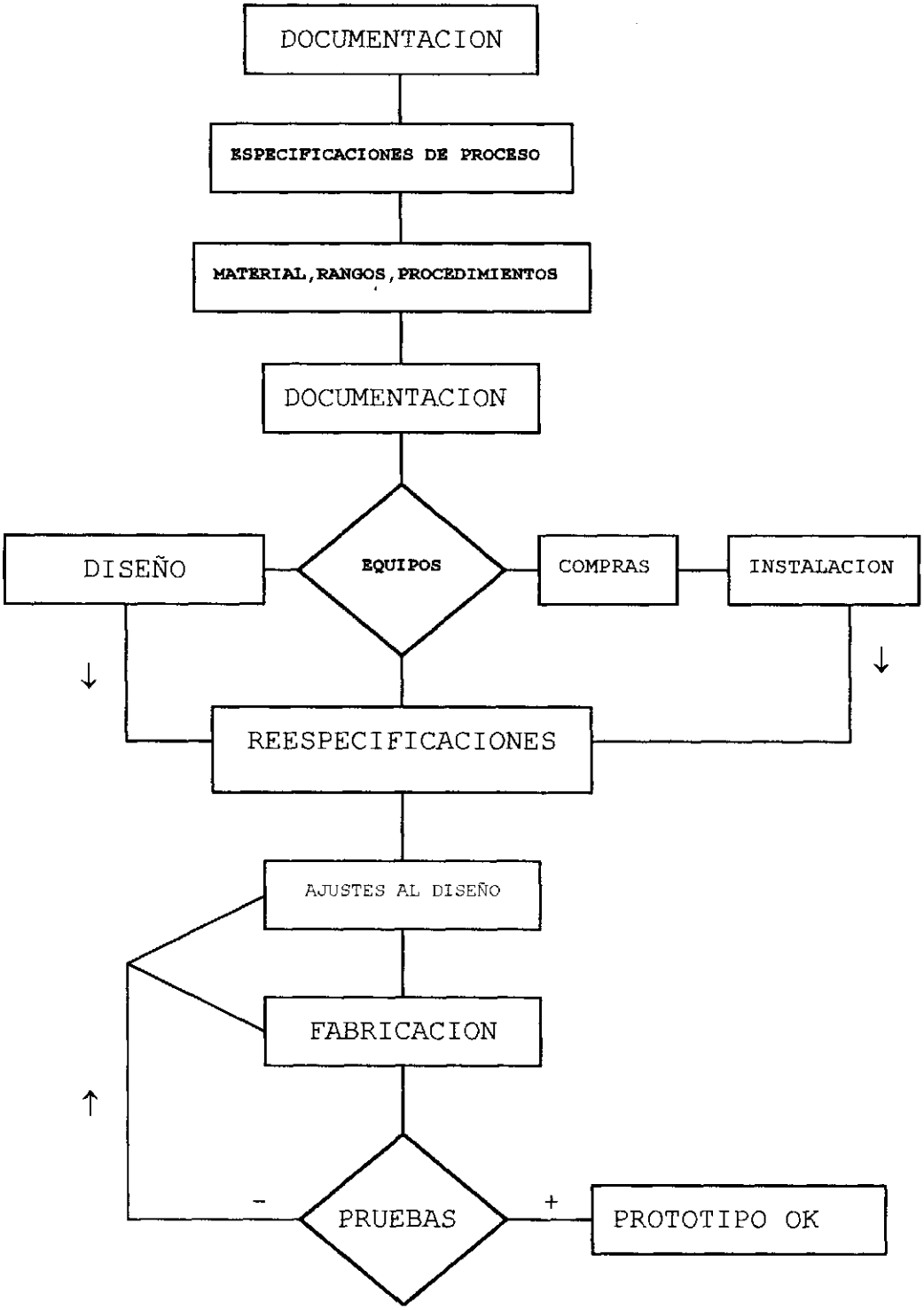
d) Instalación. Ensamble. Accesorios.

1.4.5 Pruebas

El proceso de diseño es de continua rètroalimentación. Por ello las fases descritas no necesariamente se siguieron en un orden riguroso .

Una visión esquemática de las etapas del diseño se muestra en el siguiente diagrama

FIGURA 1.1
SECUENCIA DE DISEÑO



1.5 CRONOGRAMA DE EJECUCION

1.5.1 Documentación

1.5..2 Inscripción del trabajo de grado

1.5.3 Recepción de asesoría

1.5.4 Alternativas tecnológicas. Selección. Pre-diseños. Ajustes.

1.5.5 Desagregación.

1.5.6 Cotizaciones y compras.

1.5.7 Pruebas de equipos. Ajustes. Verificaciones.

1.5.8 Diseño del congelador de placas.

1.5.9 Construcción, instalación de equipos y accesorios.

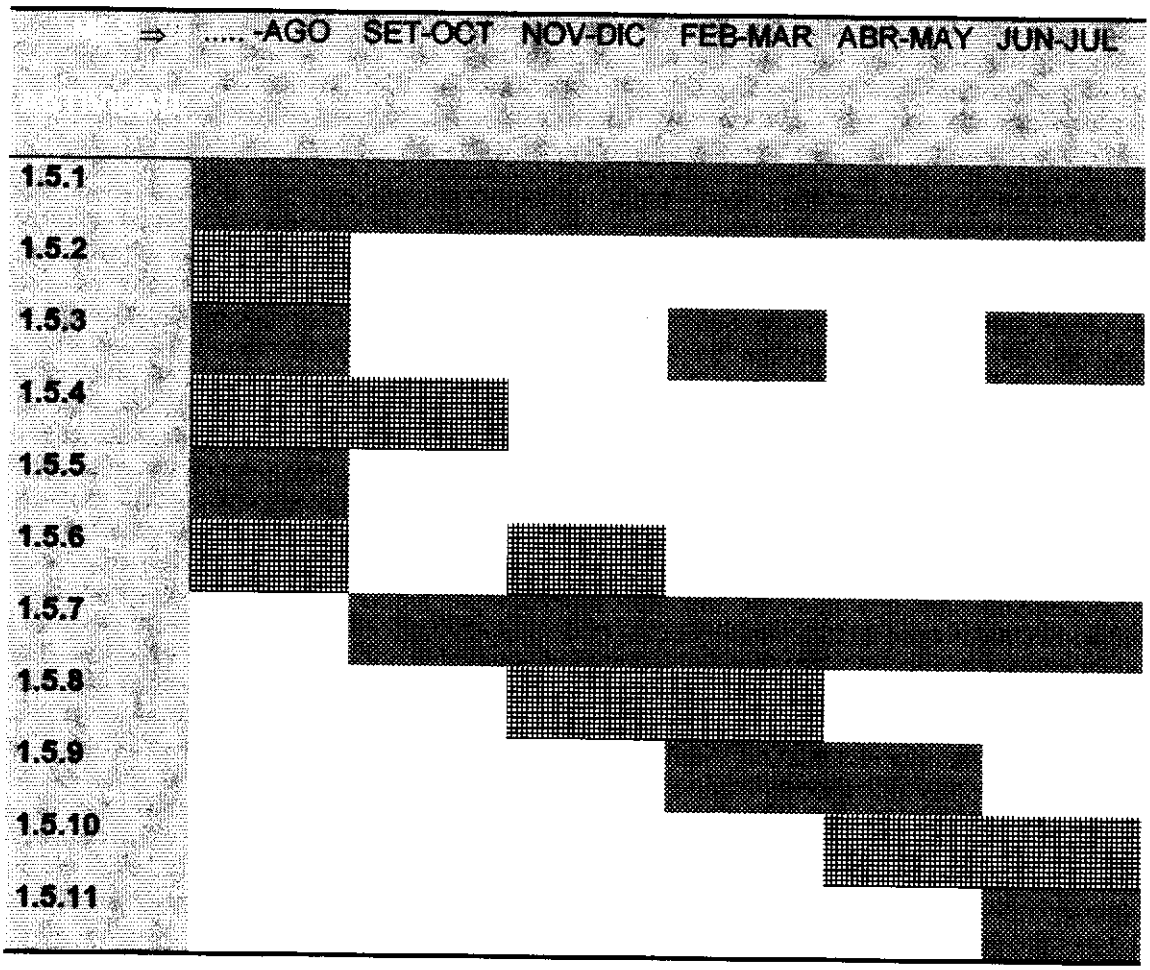
1.5.10 Pruebas. Puesta en marcha.

1.5.11 Elaboración de manual de operación e informe.

Referido a las actividades anteriores, el siguiente fué el cronograma de ejecución.

FIGURA 1.2

CRONOGRAMA



CAPITULO II : MARCO TEORICO

2.1 TERMOFÍSICA

Durante el proceso de enfriamiento de una sustancia líquida pura ocurren dos tipos de cambios: primero el sistema no cambia de fase donde disminuye la temperatura según la relación:

$$\Delta t = \frac{q}{mc}$$

m = Masa del producto

c = Calor específico

q = calor (sensible)

Δt = Cambio de temperatura

Al llegar a la temperatura de fusión o congelación, o a la presión de trabajo se presenta un cambio de fase (líquido - sólido) en donde no hay cambio de temperatura a pesar de la existencia de un flujo calórico. Allí:

$q = m\, h_{sl}$

h_{sl} = Calor latente de fusión o congelación.

q = Calor (latente)

Si se continua retirando calor se vuelve a la situación descrita por la expresión de calor sensible teniendo en cuenta que ahora el calor específico es el de la fase sólida.

2.2 MECANISMOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Este fenómeno puede verificarse mediante uno o más de los tres mecanismos siguientes: conducción, convección o radiación.

2.2.1 Conducción

En ella la transmisión de energía se verifica mediante la transferencia de movimiento entre moléculas adyacentes. El retiro de calor sensible de un producto ya congelado ilustra una situación en donde este mecanismo es el predominante.

La ecuación básica para la conducción es la ley de Fourier:

$$\frac{q_x}{A} = -k\frac{dT}{dx} \qquad \text{Ec. 2 .1}$$

q_x = Velocidad de transferencia de calor en la dirección x.

A = Area de la acción transversal normal a la dirección del flujo de calor.

T = Temperatura absoluta.

x = Distancia.

k = Conductividad térmica.

2.2.2 Convección:

Hay acá transporte de calor a través de una fase y la mezcla macroscópica de porciones calientes de un gas o líquido. El fluido que retira el calor para producir la congelación de un material utiliza el mecanismo de convección; sin embargo a través de la pared sólida que separa el fluido enfriador del material el mecanismo es la conducción.

El coeficiente convectivo de transferencia de calor está dado por:

$$q = h\,A(T - Tw) \qquad \text{Ec.2 .2}$$

T = Temperatura del fluido.

Tw = Temperatura de la pared en contacto con el fluido.

h = Coeficiente convectivo.

Hay convección forzada cuando el flujo del material se produce por bombas o ventiladores. Cuando el flujo es libre se denomina convección natural.

2.2.3 Radiación

Este mecanismo no requiere de medio físico para la transferencia de calor pues ocurre por ondas electromagnéticas. Para las situaciones de este proyecto, este mecanismo no es relevante.

Los tres tipos de velocidad de transferencia de calor obedecen al mismo tipo de ecuación básica:

$$\textbf{Velocidad de transferencia de calor} = \frac{Fuerza.impulsora}{\mathrm{Re}sistencia} = \frac{\Delta t}{R} \qquad \text{Ec 2 .3}$$

La remoción de calor desde la superficie de un alimento lo hace un medio refrigerante. La naturaleza del proceso de trasmisión de calor desde su superficie se describe por una condición de frontera que a su vez está definida según el tipo de enfriador que se utilice.

Para un congelador de placas el elemento que retira calor es una placa enfriada internamente por un refrigerante. Esta situación se describe como una condición de frontera de temperatura constante.

2.3 ASPECTOS TECNOLÓGICOS DE LA CONGELACIÓN DE ALIMENTOS

Como en el caso de sustancias puras, en este proceso primero se verifica la eliminación del calor sensible por enfriamiento y luego se retira el calor latente durante la congelación que el la porción más considerable; pueden presentarse otros efectos como calor de disolución de sales que casi siempre son muy pequeñas.

Las curvas entalpia-temperatura-composición para la congelación de alimentos demuestran que el proceso no se verifica a temperatura precisa. Es decir no hay un punto de congelación definido con un solo calor latente de congelación.

Se discrimina el proceso en tres etapas:

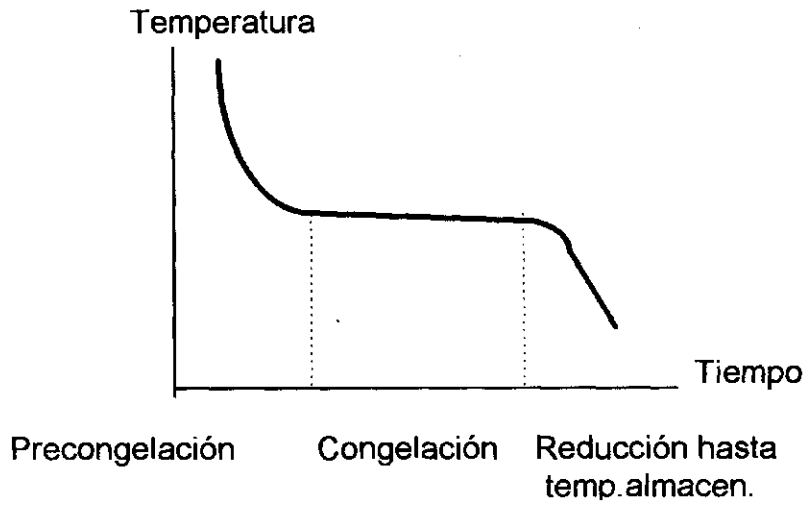
Precongelación: El período desde el comienzo del enfriamiento hasta que comienza a cristalizarse el agua.

Congelación es el período durante el cual la temperatura del material es más o menos constante (cambio de fase).

Reducción de temperatura: El tiempo transcurrido desde el momento en que se ha cogelado la mayor parte del agua del material , hasta que alcanza la temperatura de almacenamiento.

FIGURA 2.2

ETAPAS DE LA CONGELACION



2.4 LA TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA CONGELACIÓN

Durante la precongelación, la reducción de temperatura obedece la ley de Fourier de transferencia de calor por conducción (Ec 2.1).

La remoción de calor para procesos no estacionarios se describe considerando el balance de calor de un elemento infinitesimal.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla.(k \nabla T) \qquad \text{Ec. 2.4}$$

La forma exacta de los operadores vectoriales de la Ec.2. 4 depende del sistema de coordenadas que se use. Se conocen soluciones analíticas de esta ecuación para el caso de geometrías simples[3,4,5]

En la congelación, estando de por medio un cambio de fase, las ecuaciones normales de conducción para estado inestable no pueden usarse para la predicción del tiempo de congelación. La solución analítica del problema es compleja por la variación de las propiedades físicas con la temperatura, la variación del grado de congelación respecto de la temperatura y otros factores. normalmente se describe esta etapa como de remoción de calor por conducción, con cambio de fase.El calor se retira del alimento por el medio de enfriamiento que utilice el congelador; la naturaleza de tal proceso se describe normalmente como una condición de frontera, que a su vez depende del tipo de congelador utilizado.

En el caso de un congelador de placas el medio refrigerante son las placas metálicas, que son enfriadas por un fluído. Se acostumbra describir esta situación como una condición de frontera de temperatura constante:

$$T_a = T_s \qquad \text{Ec 2.5}$$

Para T_a = Temperatura ambiente, y T_s = Temperatura superficial.

---

[3] **Martin,H.** Instationaere Waermeleitung in ruhenden Korpern *VDI-Waremeatlas* 7th edn. VDI-Verlag Düselforf ,1994, ECI-Ec24

[4] **Carlaw,H.S., Jaeger,J.C.**Conduction of heat in solids Clarendon Press,Oxford,1967

[5] **Yilmaz,T.**Equations for heating and cooling of bodies of vaious shapes *Int.J.Of Refrig.*Vol 18,N°6,pp 395-402.Elsevier Science,1995

En la congelación por contacto directo el calor retirado de la superficie por convección es:

$$-k\frac{dT}{dx} = h(T_a - T_s) \qquad \text{Ec 2 .6}$$

El coeficiente de transferencia de calor convectivo, h, según un resumen de los trabajos experimentales de diversos autores, varía entre 10 y 67 W/m^2 °K para congelación con aire, hasta 420 o 440 W/m^2 °K para congelación con salmuera[6].

Para tener en cuenta las resistencias de los materiales de empaque se han usado condiciones de frontera de tipo convectivo,tanto para congeladores de placas como para otros congeladores de contacto:

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_{Pelicila}} + \left(\frac{d}{k}\right)_{Empaque} \qquad \text{Ec 2 .7}$$

2.4.1 Modelo simplificado de Plank

La solución aproximada proporcionada por Planck, que suele ser suficiente para propósitos de ingeniería. Sus suposiciones son:

---

[6] **Arce,J.A.,y Sweat,V.E.** Survey of published heat transfer coefficients encountered in food processes. *ASHRAETransactions*,86(2),p.235

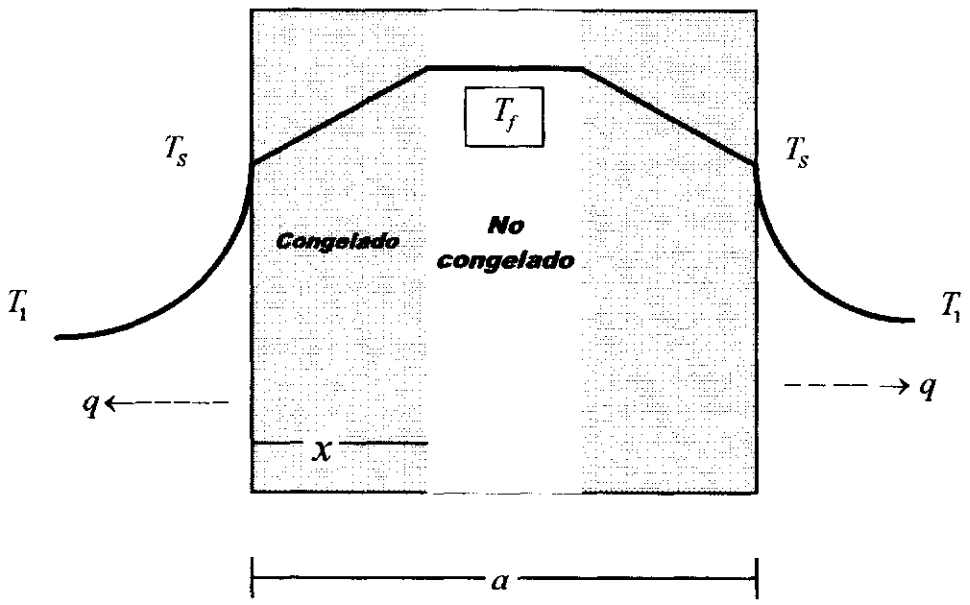
En t =tiempo = 0 se inicia en la etapa de congelación. El material está a la misma temperatura.

Todo el material se congela en el punto de congelación, con un calor latentete constante.

El calor transferido por conducción en la capa congelada es pequeño, siendo un proceso seudoestable.

FIGURA 2.2

PERFIL DE TEMPERATURAS DURANTE LA CONGELACIÓN



$$t = \frac{\lambda \rho}{T_f - T_i}\left(\frac{P a}{h} + \frac{R a^2}{k}\right) \qquad \text{Ec 2.8}$$

h = Coeficiente de transferencia de calor superficial

k = Conductividad térmica del material congelado

a = Espesor de la placa a congelar

t = Tiempo de congelación

λ = Calor latente de fusión del material

ρ = Densidad

$T_f - T_i$ = Diferencia entre las temperaturas de congelación del alimento y la placa refrigerante.

$P = \frac{1}{2}$ para placas infinitas, $\frac{1}{6}$ para una esfera, $\frac{1}{4}$ para un cilindro infinito.

$R = \frac{1}{8}$ para placas infinitas, $\frac{1}{24}$ para una esfera, $\frac{1}{16}$ para un cilindro infinito.

Las mayores limitaciones de la ecuación de Plank están alrededor de los valores numéricos de sus constantes. Así los datos de densidad, calor de fusión, temperatura inicial de congelación y conductividad térmica son de difícil consecusión para muchos alimentos.

2.4.2 Modelo de Cleland y Earle

Una modificación (entre las muchas propuestas) de la expresión de Plank es la propuesta por Cleland y Earle [7] .

Definiendo:

---

[7] **Sing,R.Heldman,D.**Introduction to food engineering.*Academic Press*,San Diego,1984,p.201-207

N_{Fo} = Número de Fourier = $\frac{\alpha t}{a^2}$ Ec 2 .9

N_{Bi} = Número de Biot = $\frac{h_c a}{k}$ Ec 2 .10

N_{St} = Número de Stefan = $\frac{c_{pi}\left(T_f - T_\infty\right)}{\Delta H}$ Ec 2.11

la ecuación de Plank se presenta en forma adimensional:

$$N_{Fo} = P\left(\frac{1}{N_{Bi}N_{St}}\right) + R\left(\frac{1}{N_{St}}\right)$$ Ec 2 .12

El efecto del calor sensible por encima de la temperatura de congelación se contabiliza por medio de otro númedo adimensional.

N_{Pl} = Número de Plank = $\frac{C_{pu}\left(T_i - T_f\right)}{\Delta H}$ Ec 2.13

Las relaciones experimentales entre estos cuatro números se pueden desarrollar en cartas que se muestran a continuación.

FIGURA 2.3

DETERMINACIÓN DE P DE LOS NÚMEROS DE PLANK Y DE STEFAN

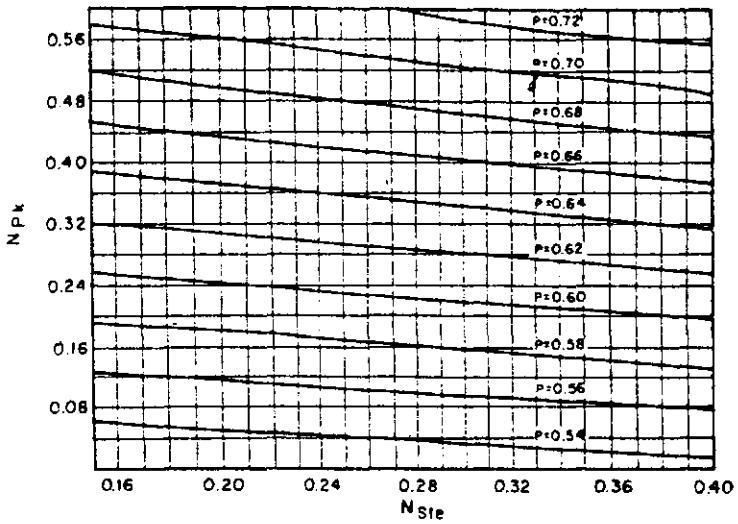


FIGURA 2.4

DETERMINACION DE R DE LOS NUMEROS DE PLANK Y STEFAN

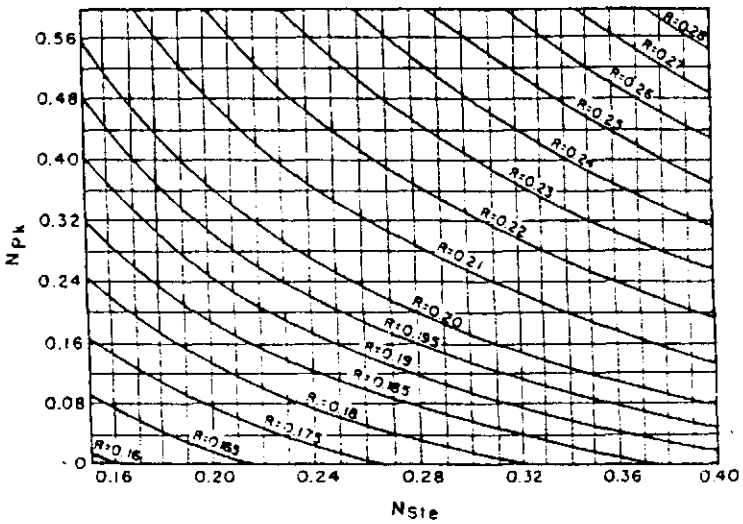
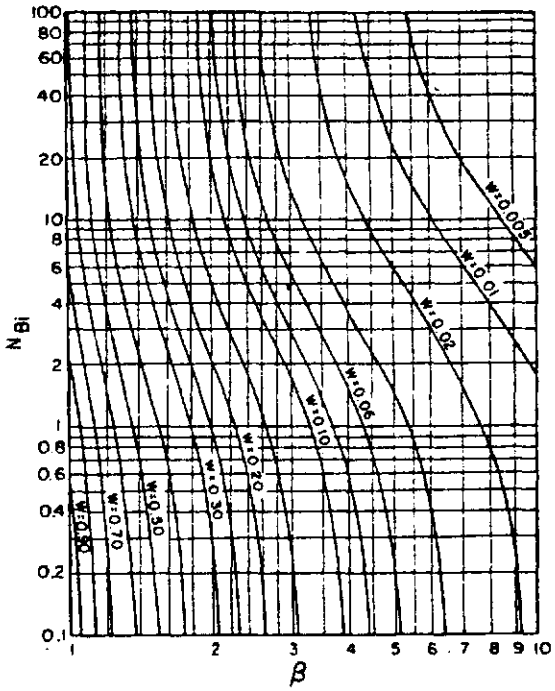


FIGURA 2.5

DETERMINACION DE W DEL NUMERO DE BIOT Y DEL FACTOR DE FORMA β



La influencia de la forma del producto a congelar se tiene en cuenta con las dimensiones equivalentes de transferencia de calor DETC, por la expresión.

$$DETC = 1 + W_1 + W_2 \qquad \text{Ec.2.15}$$

este valor se relaciona con las dimensiones del producto mediante las figuras mostradas. Los factores de forma para ladrillos rectangulares son:

$$\beta_1 = \frac{d_1}{a}$$
$$\beta_2 = \frac{d_2}{a} \qquad \text{Ecs.2 .16}$$

Donde d_1 y d_2 son el ancho y el largo del ladrillo respectivamente y a es su espesor.

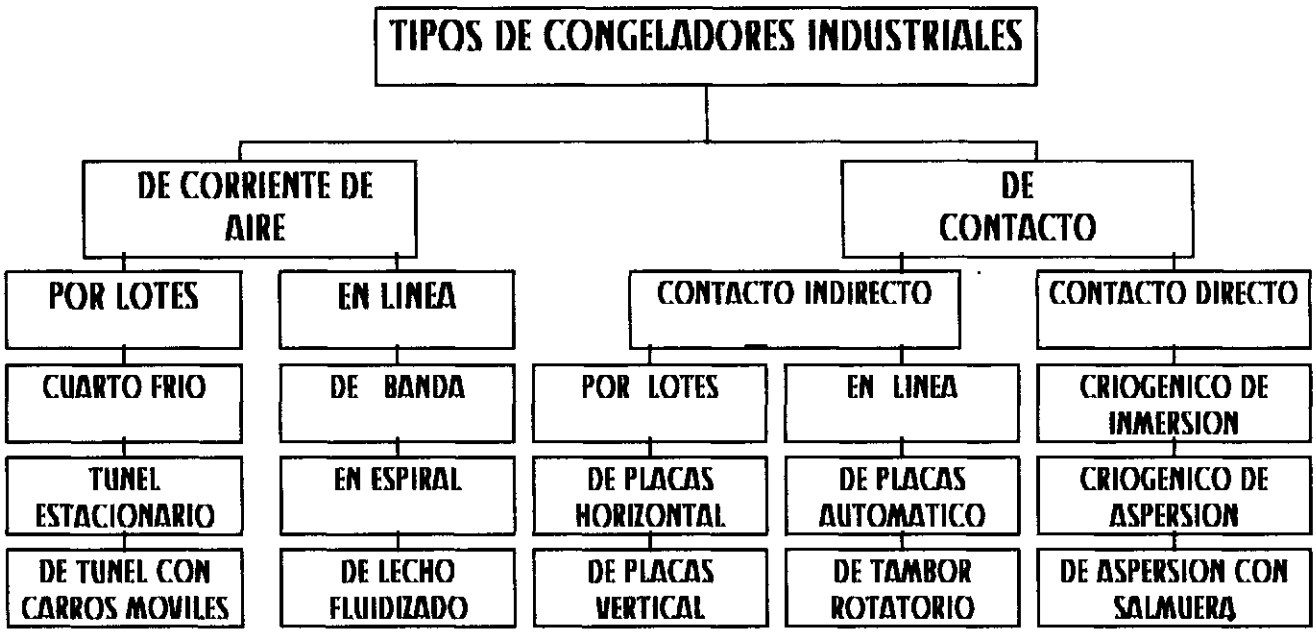
El *DETC* puede incorporarse a la ecuación 2.12 así:

$$t_f = \frac{a^2}{(DETC)\alpha}\left(\frac{1}{N_{Bi}N_{St}}\right) + \frac{a^2 R}{(DETC)\alpha}\left(\frac{1}{N_{St}}\right) \qquad \text{Ec 2.17}$$

2.5 EQUIPOS DE CONGELACIÓN

Hay tres grandes tipos de congeladores: de ráfaga de aire, de contacto directo y de contacto indirecto. En la figura siguiente resume algunos modelos según esa clasificación.

FIGURA 2.6

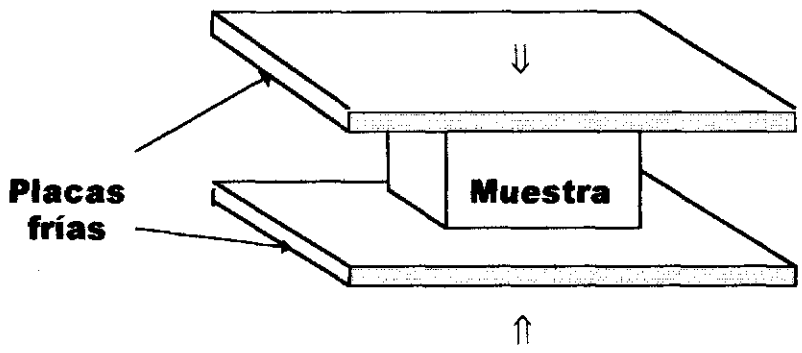


2.6 EL CONGELADOR DE PLACAS (CP).

Estos equipos son los más comunes de los congeladores de contacto.

FIGURA 2.7

ESQUEMA DE UN CONGELADOR DE PLACAS



En la figura se muestra un esquema de un CP en donde el producto está entre dos placas refrigeradas (en muchos casos el producto está empacado). La transferencia de calor entre las placas y el producto puede mejorarse incrementando la presión. Pueden operar en forma discontinua para lo que ofrecen gran flexibilidad pues pueden manejar diversos tipos de productos y formas geométricas.

Existen principalmente dos tipos de congeladores de placas: el congelador de placas horizontales y el congelador de placas verticales. Ambos tipos pueden ser manuales o automáticos. El típico congelador industrial de placas horizontales manual tiene 15 - 20

placas. El producto es colocado sobre bandejas metálicas, o en otros sistemas, y transportado hasta el congelador donde se carga manualmente entre las placas.

El congelador de placas vertical se utiliza principalmente para congelación de producto en bloques de 10 - 15 kg ; consiste en varias placas de congelación verticales formando compartimentos en un envase abierto por la parte superior. El producto es simplemente alimentado por la parte superior y los bloques son, tras la congelación, descargados o bien por la parte superior o por el fondo de la parte inferior.

2.7 LA PRODUCCIÓN DE FRÍO

El frío se obtiene de diversas maneras dentro de las que sobresalen:

a) La descompresión adiabática de un gas.

b) La evaporación de un líquido.

c) La descompresión isentálpica de un gas real.

d) La disolución de ciertos gases o sales.

e) El paso de una corriente eléctrica a través de la unión de dos metales diferentes.

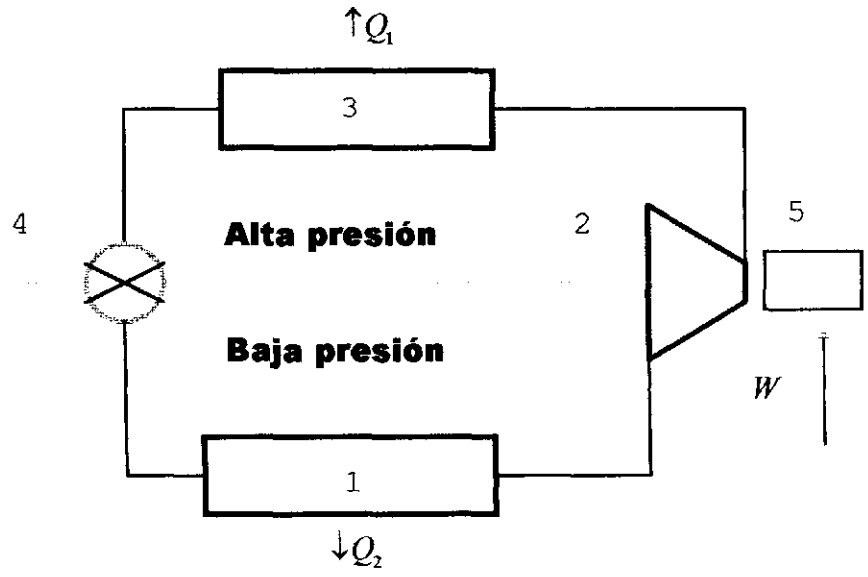
Hoy se encuentran más extendidos comercialmente los dos primeros métodos.

Para el proyecto se utilizó la unidad de refrigeración de un baño termostado . En ella el fluido refrigerante describe un ciclo de compresión mecánica como el que esquematiza en la figura 2.8.

Allí el refrigerante como gas fluye desde el evaporador (1) hasta el compresor (2), que es accionado por un motor (5). El compresor descarga el gas a la presión de condensación y el gas pasa a líquido en el condensador (3). El calor se elimina desde el condensador hacia el aire. Desde el condensador el refrigerante líquido pasa por la válvula de expansión (4), que regula el flujo de refrigerante que será evaporado en el evaporador y mantiene la diferencia de presiones entre el lado de alta y baja presión del circuito. Durante el ciclo el fluido recibe una cantidad de calor Q_2 y entrega una cantidad Q_1 a la fuente caliente, recibiendo un trabajo W:

FIGURA 2.8

CICLO DE REFRIGERACION MECANICA



$$W = Q_1 - Q_2$$

La eficiencia del sistema esta dada por

$$e = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$$

2.8 LÍQUIDOS REFRIGERANTES (LR)

Para enfriar el congelador de placas se utilizará un LR (brine en terminología inglesa de refrigeración). El LR es un líquido enfriado por un refrigerante que se circula hacia el congelador en donde circula como fluido de transferencia de calor. Con este sistema incorporado en un baño termostatado con circulación externa se garantiza un control adecuado de la temperatura (± 0.1 °C), pérdidas mínimas de refrigerante por manipulación y toxicidad mínima para el caso de contaminación accidental del alimento sujeto a congelación.

La selección del LR dependerá de varios factores:

a) Seguridad: toxicidad e inflamabilidad.

b) Punto de congelación: suficientemente bajo para operar sin dificultad a la temperatura requerida.

c) Costo.

d) Uso.

e) Comportamiento térmico.

f) Corrosividad.

Entre los líquidos refrigerantes más usados en alimentos están las soluciones acuosas de Cloruro de sodio, Propilen glicol, Cloruro de calcio y etanol.

CAPITULO III: MEMORIAS DEL DISEÑO

3.1 EQUIPOS

Atendiendo la metodología declarada en el primer capítulo, se darán los detalles del proceso de desagregación, cálculos,fabricación y puesta en operación del congelador de placas.

3.1.1 Selección del tipo de congelador

Como se anotó en la justificación , la razón de la escogencia del congelador de placas fue la necesidad de disponer de un equipo que permitiera preparar muestras congeladas para un liofilizador que está en proceso de diseño dentro de las actividades de la investigación "Técnicas de congelación y liofilización", a cargo del autor de este trabajo. En la liofilización se requiere conocer la "historia" del proceso de congelación. La posibilidad de establecer perfiles de congelación y controlar el tiempo de esta operación es un soporte indispensable para los futuros ensayos de liofilización.

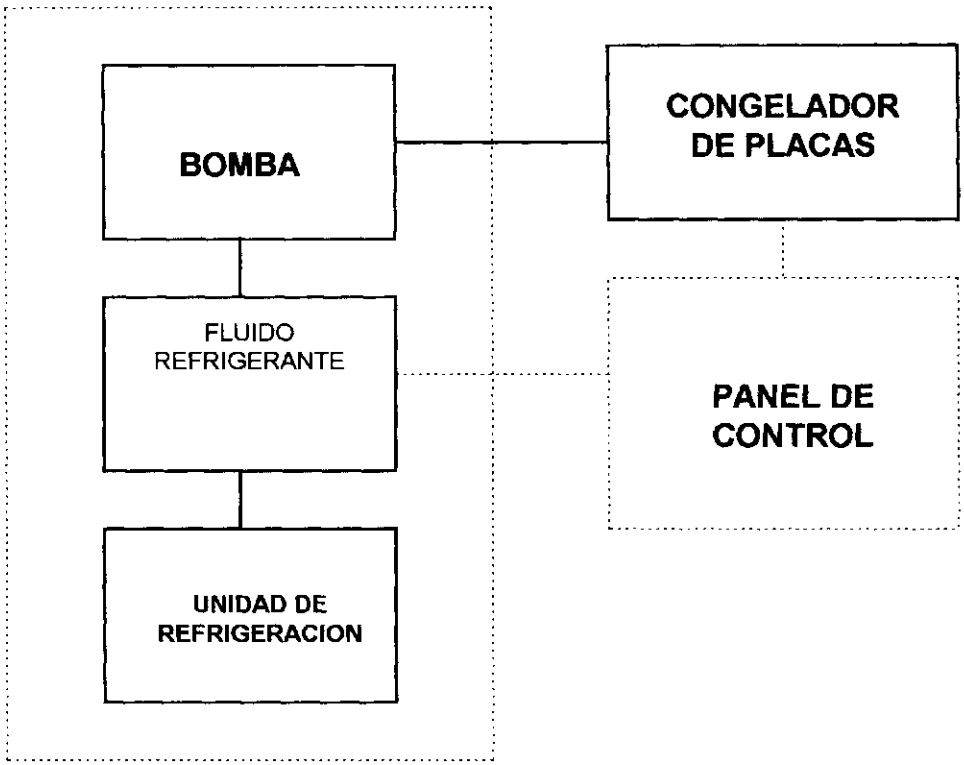
Un congelador de placas ofrecía la alternativa mas simple que cumpliera estas condiciones, siendo un criterio adicional de decisión la utilización de un baño

refrigerante para la operación tanto del congelador como del condensador del liofilizador, lo que racionalizaba el costo del sistema completo.

Estas razones condujeron a proponer un sistema de congelación que se muestra esquemáticamente a continuación.

FIGURA 3.1

ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA DE CONGELACIÓN PROPUESTO Y DISEÑADO



3.1.2 Desagregación del sistema

3.1.2.1 Baño termostatado refrigerado (BTR)

Estos criterios condujeron a la adquisición de un baño termostatado que permite control de temperaturas entre los rangos de -35ºC y 200ºC. Lógicamente, para el problema de este trabajo solo interesa su capacidad de refrigeración.

Las especificaciones nominales del equipo son las siguientes:

Marca : COLE-PARMER

Rango de tmperaturas	-35 a 200ºC
Estabilidad de la temperatura	± 0.01 ºC
Precisión del display de temperatura	± 0.25 ºC
Rata de flujo de la bomba duplex	20 litros/min
Perfiles de temperatura programables	
Potencia de calentamiento	1000 vatios
Potencia de refrigeración a 0ºC	450 vatios

3.1.2.2 Congelador de placas

Tomada la decisión de utilizar el BTR como fuente de frío para congelación y liofilización, las especificaciones de estos últimos equipos, sobre los cuales recaería el proceso de diseño, están condicionadas por la potencia , caudal de fluído refrigerante y temperatura mínima de operación. Las elección del congelador de placas, condicionaba además es espesor de las muestras a congelar, que, según la literatura disponible le asignaba un valor máximo de 5 cm. para operaciones industriales. Se determinó utilizar espesores ojalá variables, comprendidos en un rango entre 0.5 y 3.0 cm.

El tamaño definido en el primer diseño, cumplió estas condiciones . Los cálculos , para el caso de una muestra de agua, de espesor de 1.0 cm, son los siguientes:

Temperatura de líquido refrigerante: - 18ºC (*)

Potencia disponible a -18ºC : 150 vatios(*)

Rangos de coeficientes de transf.

superf. de calor h para cong.placas: 100 a 400 vatios/m ^{2} ºC

Valor escogido para cálculos : 200 vatios/m ^{2} ºC

Tiempo de congelación esperado : Alrededor de 20 min ó 1200 s

(*) Tomado de los datos de prueba del BTR

200 vat= $hA(T_p - T_c)$ =200 $A(18)$

A = 0.055 m ^{2}

Que para una geometría cuadrada daría una longitud de lado de 0.235 m.

El tiempo de congelación estaría dado por:

Masa de agua en volúmen : (0.055)(0.01)m ^{3} (1000 Kg/ m ^{3})= 0.55 Kg.

Calor de congelación del agua : 332863 J/Kg

Energía requerida para congelar 0.55 Kg : 183075 J

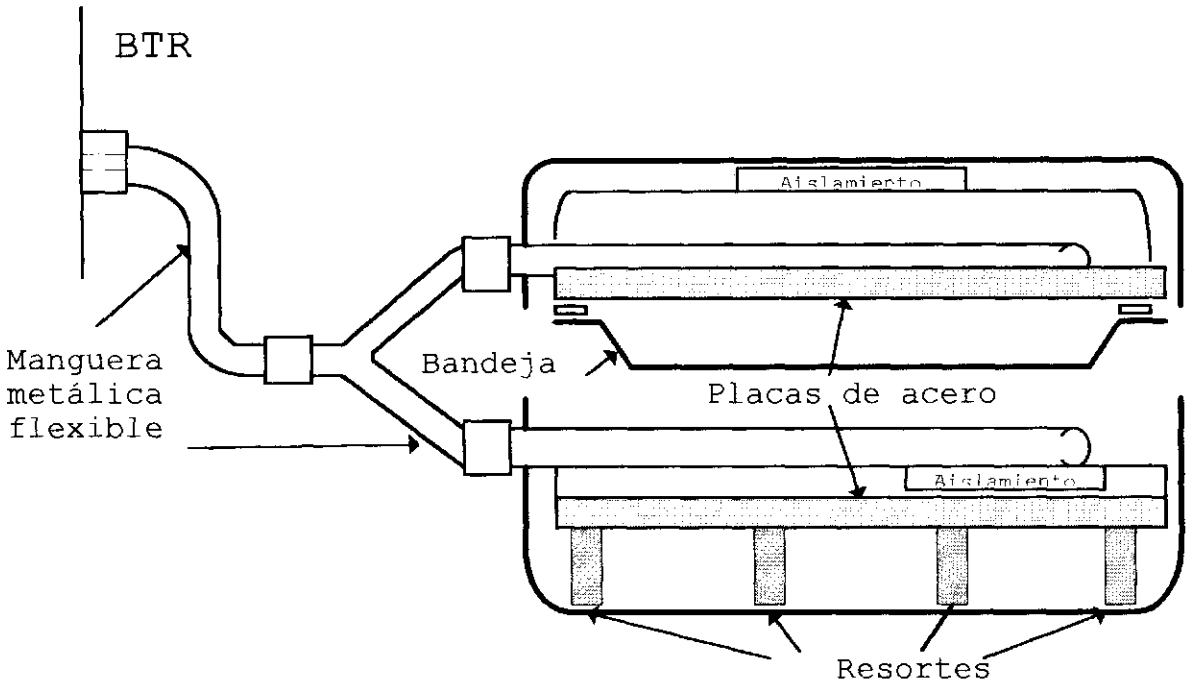
Tiempo de congelación : 133145 J / 200 vatios = 915 s $\approx$ 15.3 min

Este valor ideal se tomó como base para la primera aproximación al tamaño del equipo, que sugiere una placa de 20x20x1 cm.

El diseño inicial propuesto fué el siguiente :

FIGURA 3.1

DISEÑO INICIAL



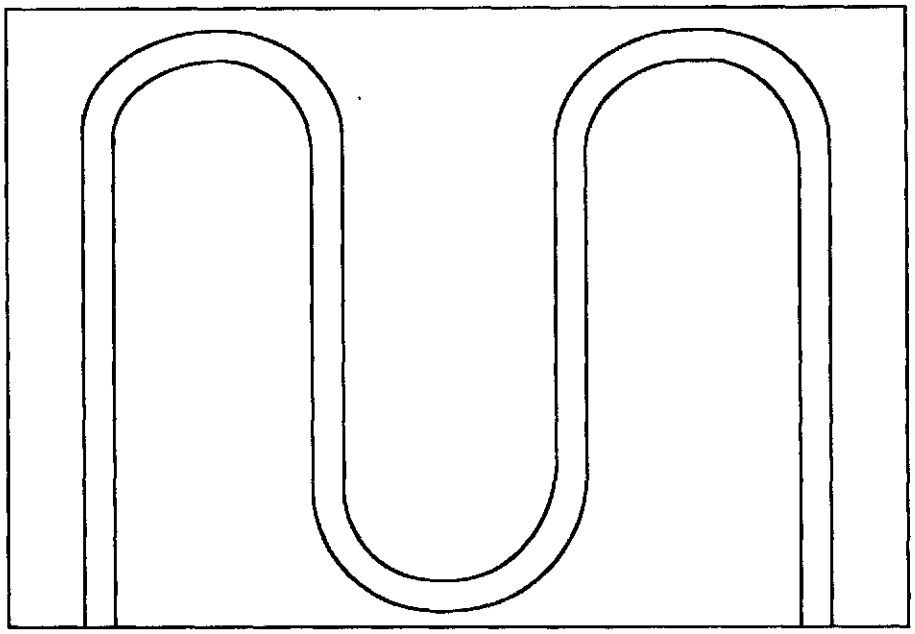
Del BTR se conectaría, mediante mangueras flexibles , el congelador, construído en acero inoxidable 304, lámina 1.5 mm . Las placas se construirían en el mismo material, pero en calibre 2mm

Las placas se ordenaron construír de 30 cm. por 20 cm.

Las bandejas se fabricaron con alturas de 1.0 y 2.0 cm.

Las mangueras se unirían a un serpentín, también en acero inoxidable, según el siguiente arreglo

FIGURA 3.3
VISTA EN PLANTA DE LA PLACA DE ENFRIAMIENTO. ESCALA 1:2.5



3.2 Pruebas del baño termostatado

3.2.1 Selección del líquido refrigerante

Dentro de las alternativas recomendadas en la sección 2.2.10, se descartaron las soluciones salinas por los problemas de manipulación y corrosión. Entre los líquidos orgánicos se descartó el metanol por el riesgo de intoxicación y contaminación de los alimentos ; finalmente, se analizaron las soluciones acuosas de etanol (45 ° GL) y propilen glicol (65 % vol).

Para ello se hicieron dos tipos de ensayos. La determinación de la variación de la viscosidad con el descenso de la temperatura, y el desempeño del baño con los dos sistemas por el perfil de tiempo temperatura cuando se fijó la temperatura de control en -35ºC y el volumen de solución en 11 litros. En este último caso se hizo un ensayo de congelación por inmersión en bolsas plásticas (dimensiones 10x5 cm) llenas de agua destilada, sensando , mediante un termosensor externo, el perfil del proceso de congelación.

a) Variación de la viscosidad de las soluciones

Como precaución para evitar un ascenso inconveniente de viscosidad que pusiera en peligro la bomba de recirculación del baño se determinó el incremento de viscosidad debido al descenso de temperatura mediante la medida del flujo de un volumen definido a través de una pipeta de 10ml. suspendida verticalmente

El caudal que fluye por un tubo capilar de longitud *L* y radio *R* (orificio de la pipeta) es inversamente proporcional a la viscosidad μ está dado por:

$$\dot{V} = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 \mu L}$$ = volumen de la pipeta/tiempo[8] Ec.3.1

Como durante la operación de vaciado de la pipeta la caída de presión media ΔP es la misma , puede afirmarse que la viscosidad es directamente

[8] **Sing,P.Heldman,R.**Introduction of food engineering.Academic Press.Ca.,1984,p32

proporcional al tiempo Los resultados obtenidos para el tiempo de vaciado de una pipeta de 10 ml fueron:

TABLA 3.1

VISCOSIDAD DE LÍQUIDOS REFRIGERANTES Para una solución

Etanol-agua destilada (45°G.L.)

TEMPERATURA (°C)	TIEMPO(S)
12,4	9,92
9,6	10,26
5,7	10,64
2,2	10,59
-0,6	11,06
-3,3	11,49
-7,3	11,74
-11,7	12,56
-14,9	13,49
-16,7	14,36
-19,6	15,74
-22,3	16,10
-23,4	17,09

Solución (60%) de propilenglicol-agua):

TIEMPO (SEG)	TEMP. °C
25	18,3
29	8,5
45	-2,7
54	-10,6
60	-14,8
91	-18,9
98	-20,8
109	-25,2

Esta información se utilizó para valorar la viscosidad del propilen-glicol al 60%,pues no fué posible conseguirla en la literatura.

De la tabla 3.1, el valor (interpolado) para el tiempo en 8.5ºC del etanol agua fué de 10.35 s, para un caudal $\dot{V}$ de 0.97 ml/s. lo que corresponde a un valor de α en la Ec. 3.1 de 4.64 cp.ml/s, teniendo en cuenta que la viscosidad para la solución alcohólica es de 4.5 cp[9] . Con este valor, y aplicando la misma ecuación para el valor del propilen glicol correspondiente a 8.5ºC , se obtiene un valor de 13.4 cp para ésa viscosidad.

Se obtuvo así la siguiente tabla de viscosidades para el propilen-glicol-agua :

Temperatura(ºC)	8.5	-14.8	-20.2	-25.2
Cp ó Pa.sx10^{3}	13.4	27.7	45.3	50.2

b) Curvas de enfriamiento

Se realizaron pruebas de enfriamiento para verificar alguna ventaja térmica al usar una u otra solución , y además determinar la potencia del baño y compararla con la reportada por el proveedor del baño.

En los ensayos se congelaron por inmersión muestras de 50 y 100 gr de agua, empacadas en bolsas de polietileno de 10 x 5 cm, introduciéndoles la sonda de temperatura para determinar su proceso de congelación.

---

[9] **PERRY,H.,CHILTON,**C.(ED).Chemical Engineers·Handbook.5ªEd,McGrawHill,1975.Fig.3-45

TABLA 3.2

ENFRIAMIENTO DE LIQUIDOS REFRIGERANTES

PRUEBAS DE CONGELACIÓN POR INMERSION

Muestras de 50 y 100 gr en baños de etanol- agua (45ºGL) y propilen-glicol-agua(60% en vol)

	PROPILENGLICOL-AGUA				ETANOL-AGUA			
TIEMPO(S)	Masa de 50 gramos		Masa de 100 gramos		Masa de 50 gramos		Masa de 100 gramos	
	T.agua(50g)	T. baño(50g)	T.agua(100g	T. baño(100	T.agua(50g)	T.baño(50g)	T. agua(100g)	T.baño(100g)
0	18.3	18.7	18.3	18.7	20.1	19.2	16.5	16.2
300	11.5	8.7	13.1	13.2	14.9	14	13.8	11.9
600	7.2	3.3	10.5	7.4	8.5	5.5	8.8	6.4
900	4.2	-1.5	4.6	1	6.7	9.2	5	1.8
1200	-0.6	-6	1.8	-3.9	4.9	0.9	1.4	-1.8
1500	-0.1	-9.9	-0.1	-8.1	1.4	-2.7	-0.1	-6.4
1800	-0.2	-12.8	-0.1	-11.3	-2.1	-6.4	-0.1	-10.1
2100	-1.2	-14.7	-1	-14	-0.1	-9.6	-0.9	-12.8
2400	-7.3	-16.9	-3.5	-16.1	-0.1	-12.1	-5	-15.1
2700	-13	-18.5	-6.5	-17.9	-0.2	-13.9	-8.8	-16.8
3000	-15.5	-19.8	-9.1	-19	-0.2	-15.8	-12.4	-18.5
3300	-18.9	-21.2	-13.6	-20.7	-9.2	-17.3	-16.5	-19.7
3600	-21.5	-22.2	-16.3	-21.9	-16.9	-18.5	-19.5	-21
3900	-22.5	-22.9	-18.5	-22.8	-18.3	-19.6	-20.1	-22
4200	-23.2	-23.6	-19.7	-23.5	-19.5	-20.6	-21.3	-22.8
4500	-23.8	-24.2	-21	-24	-20.6	-21.6	-22.5	-23.7
4800	-24.2	-24.6	-22.3	-24.5	-21.3	-22.2	-24	-24.5
5100	-24.5	-24.8	-24.5	-25	-21.9	-22.9	-24.4	-24.3
5400	-24.7	-25	-24.7	-25.1	-22.5	-23.5	-24.8	-25
5700	-24.9	-25	-24.7	-25.1	-23	-24	-24.8	-25
6000	-25	-25.1	-24.8	-25.1	-23.6	-24.5	-24.8	-25
6300	-25.1	-25.1	-24.7	-25	-23.7	-24.6	-24.8	-25
6600	-25.1	-25.1	-24.7	-25	-23.8	-24.6	-24.8	-25
6900	-25.1	-25.1	-24.7	-24.9	-23.9	-24.7	-24.8	-25
7200	-25.1	-25.1	-24.7	-24.9	-23.9	-24.7	-24.8	-25

FIGURA 3.4

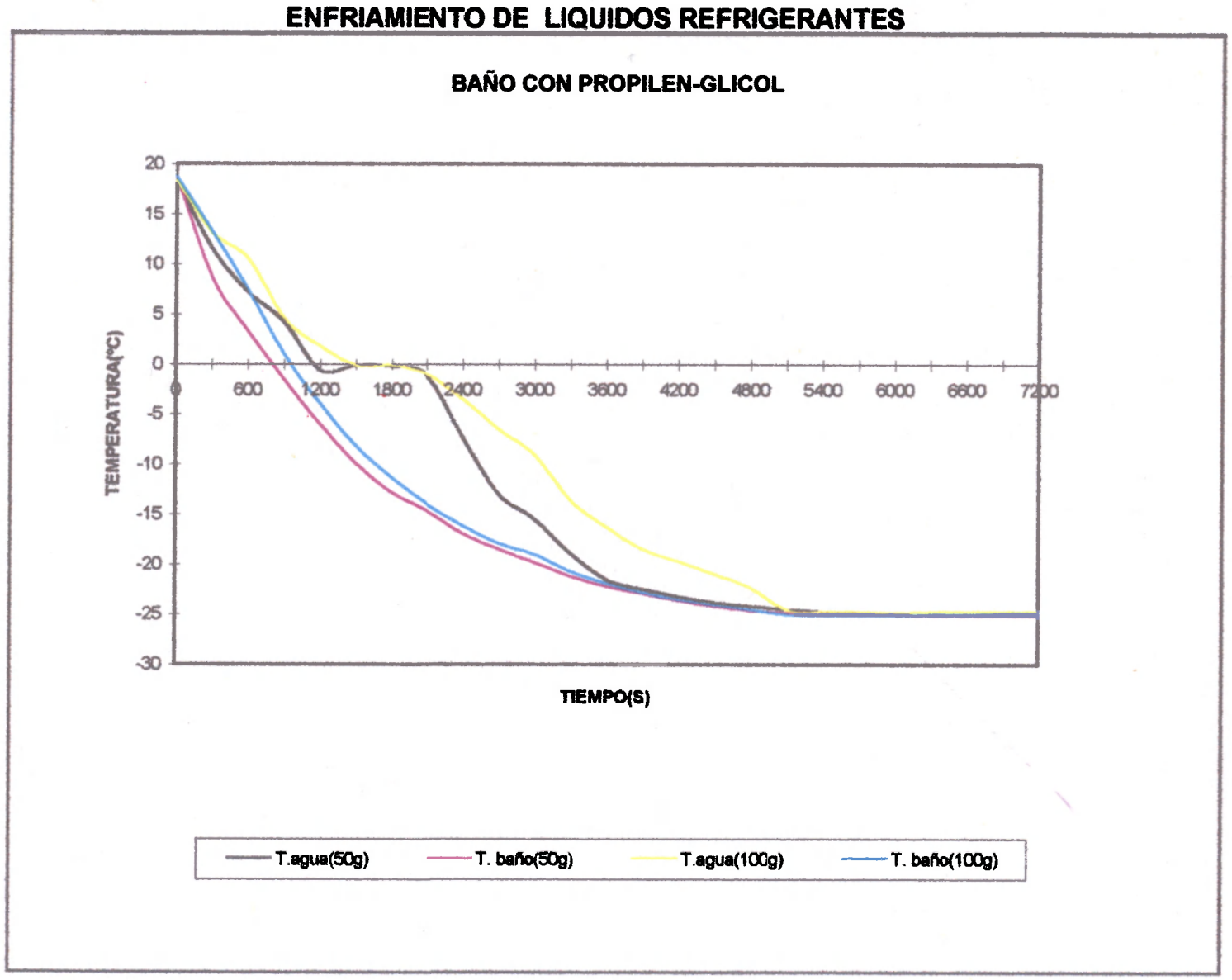
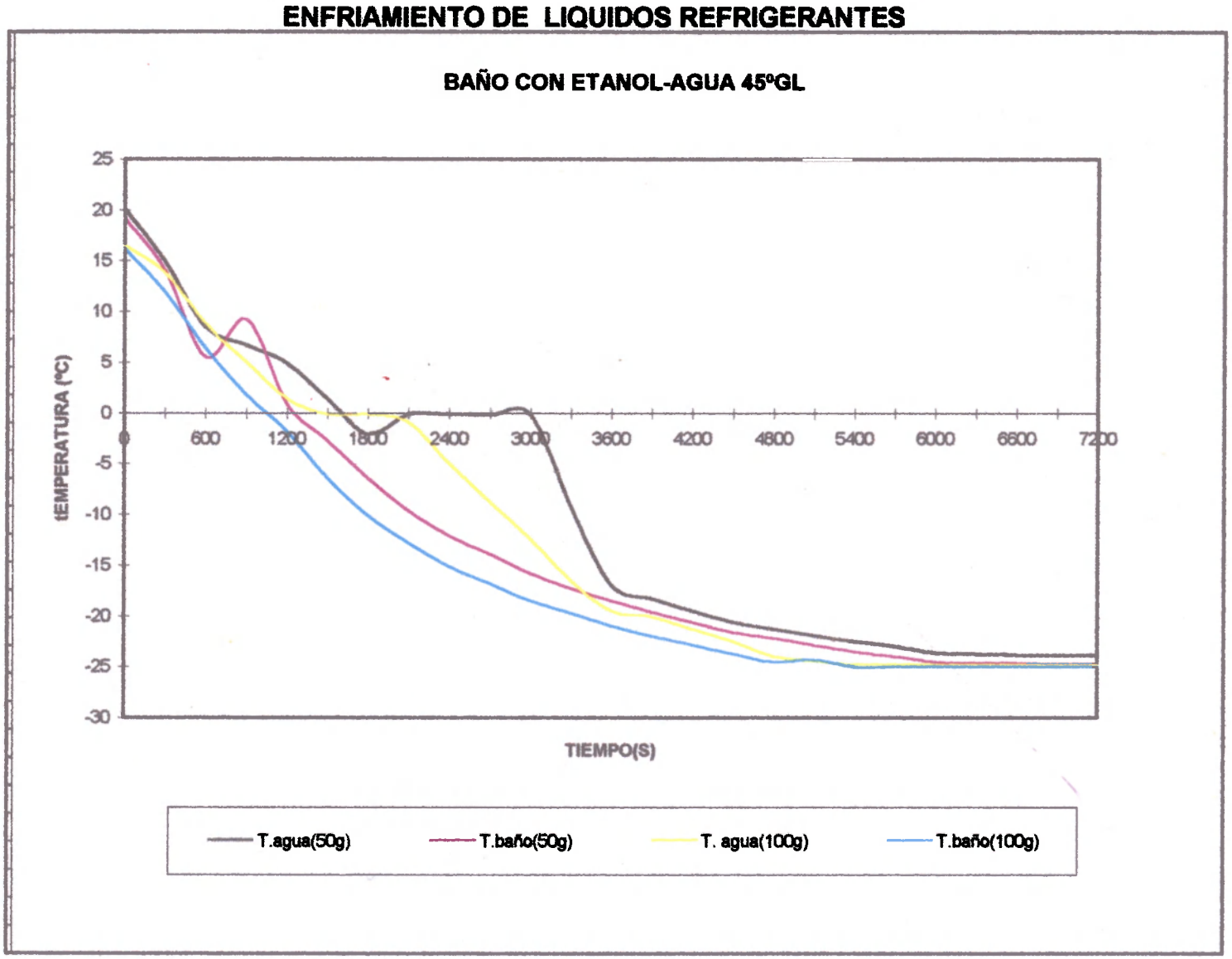

ENFRIAMIENTO DE LIQUIDOS REFRIGERANTES
BAÑO CON PROPILEN-GLICOL
TEMPERATURA(°C)
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
0
600
1200
1800
2400
3000
3600
4200
4800
5400
6000
6600
7200
TIEMPO(S)
T.agua(50g)
T. baño(50g)
T.agua(100g)
T. baño(100g)

FIGURA 3.5


ENFRIAMIENTO DE LIQUIDOS REFRIGERANTES
BAÑO CON ETANOL-AGUA 45ºGL
tEMPERATURA (ºC)
25
20
15
10
5
0
-5
-10
-15
-20
-25
-30
0
600
1200
1800
2400
3000
3600
4200
4800
5400
6000
6600
7200
TIEMPO(S)
T.agua(50g)
T.baño(50g)
T. agua(100g)
T.baño(100g)

De la información anterior parece concluirse que, por el menor incremento e n la viscosidad con el descenso de temperatura, debiera de escogerse el sistema etanol-agua. Sinembargo, se presentaron dos inconvenientes que indujeron a la elección del segundo sistema:

A -25ºC se observó tendencia a formación de cristales para la solución etanólica.

A medida que transcurría el tiempo la solución de alcohol perdía concentración rápidamente.

3.2.2 Potencia del BTR

La verificación de la potencia disponible en el baño se hizo determinando la potencia media disponible para la operación en los experimentos descritos en la tabla y gráficas anteriores.

Los cálculos respectivos para una muestra de masa m=50 gramos son:

Calor retirado al líquido refrigerante por la unidad de refrigeración del baño:

11 litros de solución etanol-agua 45°G.L.

Densidad de la solución a 10°C : 0.94042 g/ml

Masa de la solución : 10344.6 gramos

Cp de la mezcla a 3°C : 0.9418 cal/g.°C

Q = 10344.62 gramos* 0.9418 cal/g.°C* (19.2+24.7)°C

Q = 427720.9 calorías = 1790867 Joules

Potencia media (en 114 min-medidos) = 261.82 W

Calor consumido por el agua para congelarse:

Calor sensible

De 20,1 a -0,6°C (líquido)

Cp del agua : 4,2 KJ/Kg KC

Q = 0,05 Kg * 4,2 KJ/Kg K * (20,1 + 0,6)

Q = 4,347 KJ

Calor latente de congelación

Calor latente de fusión : 6013,4 KJ/Kgmol

Q = 0,05 Kg * 6013,4KJ/Kgmol / 18 Kg/Kgmol

Q = 16,704 KJ

Calor sensible del hielo

De -0,2 a -23,9 °C

Cp : 2,014 KJ/Kg K

Q = 0,05 Kg* 2,014 KJ/Kg K*(-0,2+23,9)°C

Q = 2,407 KJ

CALOR TOTAL RETIRADO = 23458 JOULES

PARA 114 MIN , POTENCIA MEDIA = 3,43 W

TABLA 3.3

POTENCIA DISPONIBLE DEL BTR

CEDIDA AL L.REFR.	MUESTRA (GR)	ENERGIA LIQUIDO	ENERGIA C.FAEE	ENERGIA HIELO	POTENCIA MUESTRA
261.8	50	4347	16704	2407	3.43
283.9	100	7056	33408	4975	8.25

Se concluye que la energía disponible (Set point BTR entre -30 y -35ºC) está entre 250 y 290 vatios

3.3 LA CONSTRUCCION DEL CONGELADOR

Todos los materiales, excepto el aislamiento, fueron conseguidos en Manizales. El congelador fué fabricado en el taller mecánico de la Universidad Nacional Sede Manizales. Los serpentines en acero y su soldadura a las placas se contrataron en un taller de la ciudad.

La unidad de refrigeraciön utilizada fué el BTR marca Cole parmer con capacidad nominal de refrigeración de 450 vatios a 0ºC y 250 a -15ºC.

El líquido refrigerante : Propropilen glicol en agua con concentración del 60 % en volúmen.

En la figura 3.6 se detalla el plano del equipo construído, en escala 1: 2.5.

La historia de su construcción incluye varias fases en donde hubo que hacer importantes ajustes sobre el prototipo original. Para la descripción de este proceso, el equipo en cada una de ellas se denominará como prototipo n , variando n de 1 hasta 6.

3.3.1 Prototipo 1

Durante el transcurso de su fabricación se hicieron algunos ajustes al diseño original como consecuencia de varias circunstancias dentro de las que se incluyen la imposibilidad de consecución de las mangueras flexibles metálicas y limitaciones de maquinado de acero en el taller.

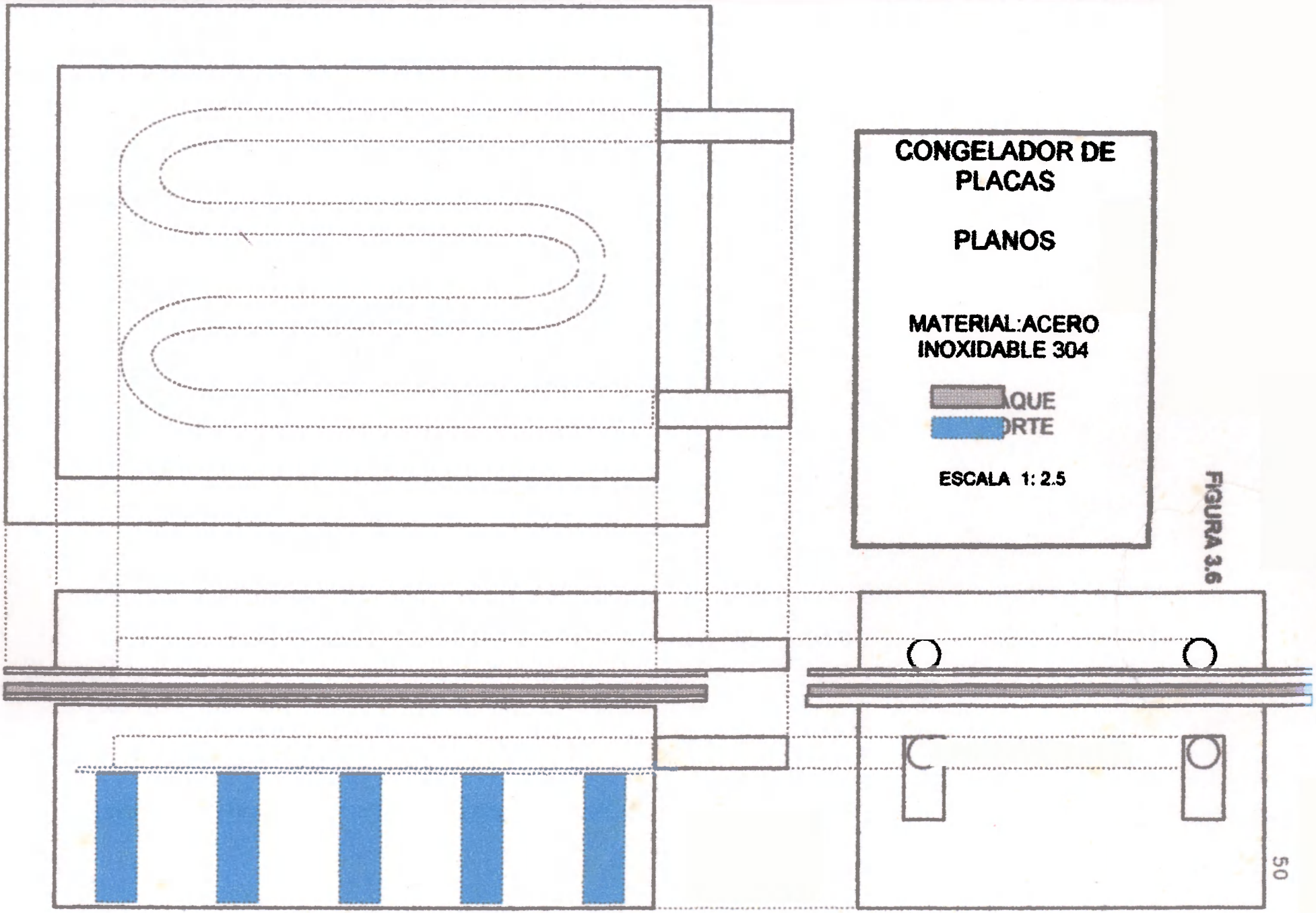

CONGELADOR DE PLACAS
PLANOS
MATERIAL:ACERO INOXIDABLE 304
QUE
RTE
ESCALA 1: 2.5

FIGURA 3.6

Las líneas de conexión entre el baño y el congelador y serpentines de refrigeración fueron en cobre (¼ plg) .Los acoples entre los tubos de cobre y el baño termostatado fueron de bronce.

El prototipo, con el mismo diseño de la figura 3.6, fué modificado por que el contacto de los serpentines sobre las placas y bandeja fué insuficiente para producir congelación de las muestras. La falta de rigidez del cobre agravaba el ya deficiente contacto inicial, al presentar deformaciones por la manipulación.

La propuesta de utilizar cobre en lugar de acero fue hecha por los mecánicos del taller de la U. Nacional, por la facilidad de hacer los serpentines en tal material, siendo su conductividad térmica aún mejor que la del acero.

Bandejas portamuestras de 30 x20 cm . Se fabricaron dos unidades con dos diferentes profundidades (y tamaño de muestra), de 1 y 2 cm. En la fotografía Nº 1 se pueden observar estos elementos.

3.3.2 Prototipo 2

Este equipo se diferenció del primero porque incluyó los serpentines de acero 304, $\frac{3}{8}$ de plg, Sch 80 , que fueron doblados y soldados como se muestra en la figura 3.6 en un taller mecánico de la ciudad,

Se utilizaron para sus pruebas las mismas bandejas ; las tuberías de conexión entre el BTR y el congelador fueron las mismas (de cobre) del prototipo1 .

Este equipo se modificó principalmente porque , aunque mejoró la transferencia de calor, la congelación de las muestras aún era demasiado prolongada y precaria. Se observó que la ubicación del equipo detrás del BTR, donde se exponía a la corriente

de aire caliente del ventilador de la unidad de refrigeración, debía cambiarse. Ya que las conexiones en líneas de cobre no lo permitían, se buscó otro material que las reemplazara.

3.3.3 Prototipo 3

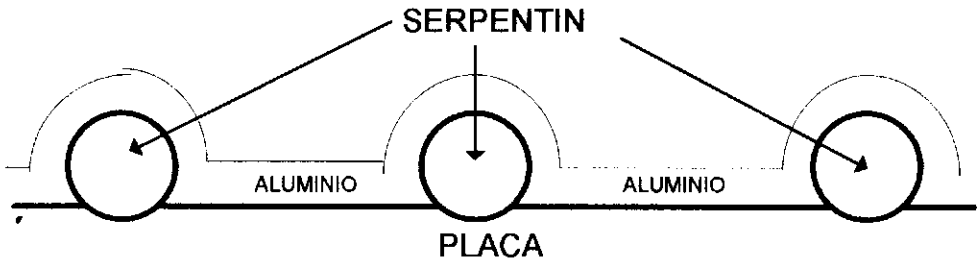
Se mandaron a fabricar las conexiones entre el BTR y el congelador en manguera de nylon de $\frac{3}{8}$, tal como se observan en el prototipo 5 (Ver fotografía Nº 2).

Otra mejora que se le hizo al equipo consistió en la colocación de papel de aluminio entre el serpentín y la placa. En la figura 3.7 se ilustra esquemáticamente esta acción que buscó la disminución de la resistencia conductiva mediante una " expansión del área" de contacto entre el serpentín y la placa sobre la que está soldado. Ver además la fotografía Nº 3.

De esta manera el prototipo 3 quedó alejado de la corriente de aire caliente del BTR , mejoró el área efectiva de transferencia y disminuyó las pérdidas por las líneas de conexión . Esta última afirmación se corrobora de la comparación entre los depósitos de escarcha de los tubos de cobre y las mangueras de nylon

FIGURA 3.7

INCREMENTO DEL AREA DE CONTACTO SERPENTIN-PLACA



3.3.4 Prototipo 4

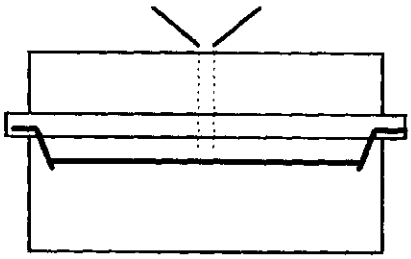
Aún con todos los ajustes relatados se seguía presentando un problema que entorpecía la congelación : la presencia de burbujas de aire en la parte superior de la bandeja.

Este problema se solucionó cambiando el sistema de llenado y la colocación de los empaques del congelador.

El sistema de llenado inicial fue el colocar la bandeja, vaciar el agua y tapar. La manipulación y la deficiencia de los empaques hacía que se presentara rebose del agua y, finalmente, grandes burbujas que aislaban la placa superior en tal forma que podían hacer imposible la congelación de la muestra. Se cambió el sistema introduciendo primero la bandeja, tapando y vaciando el agua por el orificio de la sonda de temperatura, primero mediante una manguera delgada y luego por un embudo plástico.

FIGURA 3.8

SISTEMA DEL LLENADO



Las bandejas fueron acondicionadas con empaques de silicona negra tal como se puede observar en la fotografía 1.

3.3.5 Prototipo 5

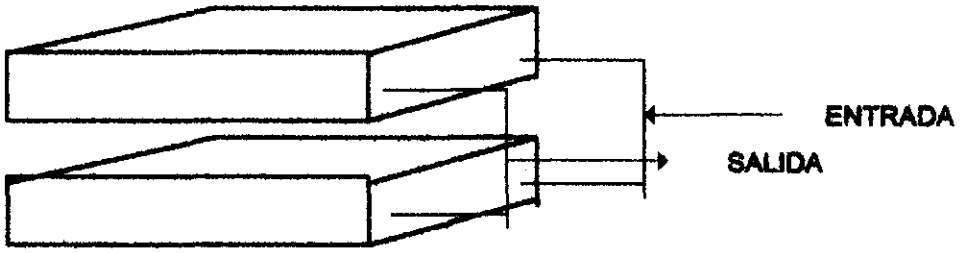
El prototipo 4 con aislamiento se muestra en la fotografía Nº 4 . Se utilizó para ello espuma de poliolefina (comercialmente ARMAFLEX) .

3.3.6 Prototipo 6

Todos los prototipos anteriores tuvieron la conexión de sus platos con el BTR en paralelo como se muestra :

FIGURA 3.9

CONEXIÓN DE PLACAS EN PARALELO



El prototipo 6 tiene el esquema de conexiones de la figura 3.10 . La razón por la que se modificó el flujo del refrigerante fue la de buscar una mas alta velocidad dentro de los serpentines mejorando así las condiciones para la transferencia de calor.

Adicionalmente la placa inferior fue invertida y soportada sobre una lámina icopor encima de otra placa delgada de madera. La comparación de esta novedad respecto de la forma como se hallaba la placa inferior en los otros prototipos se muestra en la figura 3.11 .

FIGURA 3.10

CONEXIÓN EN SERIE

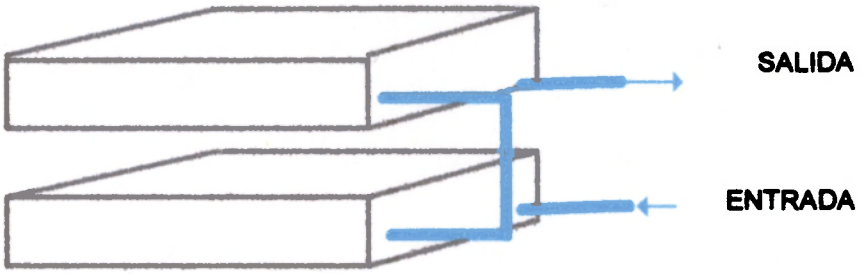
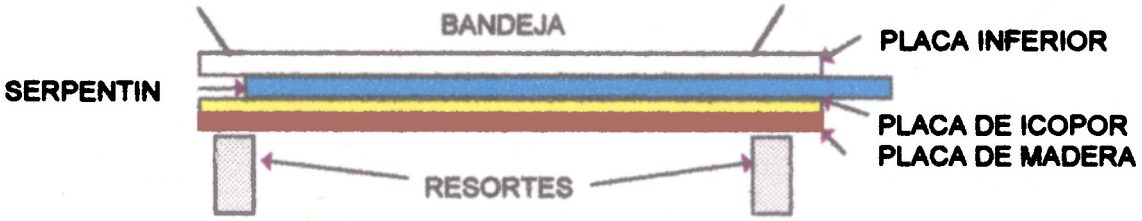


FIGURA 3.11

COMPARACIÓN DE POSICIONES DE LA PLACA INFERIOR

Arreglo de la placa inferior para los prototipos 1 a 5



Arreglo de la placa inferior para el prototipo 6

CAPITULO IV : CALCULOS Y PRUEBAS

En este capítulo se desarrollarán los cálculos según los modelos de transferencia de calor y congelación expuestos en el marco teórico.

4.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES

Para facilitar la solución a los problemas planteados se relacionan en la tabla 4.1 los valores de los parámetros físicos del agua, el hielo, el propilenglicol y el acero.
Los datos proceden de las referencias 9,10,15 y 17 de la bibliografía. De acuerdo con los criterios de confiabilidad declarados en la metodología, cuando existieron discrepancias se tomaron los valores en donde coincidían dos de las referencias. Si se tuvieron sólo dos valores diferentes, se promediaron verificando que el resultado no estuviera alejado en mas del 5% de cada una de los datos originales .
En cuanto a la solución de propilenglicol-agua , debido a la ausencia de información se utilizaron, para las viscosidades ,los datos obtenidos en el aparte 3.1.3.1 a, página 43. La densidad se calculó en forma ponderada , tomando como bases las densidades del agua y del propilenglicol puro a 0°C. Finalmente, los valores de capacidad calorífica y conductividad térmica se asumieron similares a la

solución del 60% de etilenglicol-agua, luego de verificar la cercanía de las cifras de viscosidad y densidad (medida y calculada) con las del propilenglicol.

TABLA 4.1
PROPIEDADES FÍSICAS

PROPIEDAD			VALOR	UNIDADES
AGUA (0ºC)				
Calor latente de fusión			334100	Julios/Kg
Densidad			999.9	Kg/m^3
Capacidad calorífica			4220	J/KgºC
Conductividad térmica			0.569	vatios/mºC
Viscosidad			1.7921	cp ó $(Pa.s)10^3$
HIELO				
Densidad	(0ºC)		916.2	Kg/m^3
	(-12ºC)		919.4	Kg/m^3
Capacidad calorífica	(0ºC)		2093	J/KgºC
	(-12ºC)		2014	J/KgºC
Conductividad térmica	(0ªC)		1.28	vatios/mºC
	(-25ºC)		2.42	vatios/mºC
PROPILEN-GLICOL				
Densidad (puro)	(20ºC)		1040	Kg/m^3
(60%)	(20ºC)	*	1030	
(60%)	(-15ºC)	**	1040	Kg/m^3
Capacidad calorífica	(60% ,0ºC)	***	2930.2	J/KgºC
(60%,-15ºC)		***	2846.5	
Conductividad térmica	(60%,0ªC)	***	0.398	vatios/mºC
(60%,-15ºC)		***	0.407	vatios/mºC
Viscosidad	(60%,8.5ºC)	****	13.4	cp ó $(Pa.s)10^3$
(60%,-14,8ºC)		****	27.7	cp ó $(Pa.s)10^3$
(60%,-25.2ºC)		****	50.2	cp ó $(Pa.s)10^3$
ACERO INOXIDABLE 304 (0ºC)				
Densidad			7849	Kg/m^3
Capacidad calorífica			461	J/KgºC
Conductividad térmica			13.8	vatios/mºC

* Calculada

* Calculada con base en la tendencia del etilen glicol

*** Del etilenglicol al 60%

**** Medida

4.2 TRANSFERENCIA DE CALOR ENTRE LA PLACA Y EL PROPILENGLICOL

TABLA 4.2
DATOS Y CÁLCULOS INICIALES (TODOS EN UNIDADES SI)

DATO Y/O CÁLCULO	VALOR	
Longitud mangueras de conexión	2.4	
Longitud serpentín(ambas caras)	2.1	
Diámetro ext. serpentín 3/8 S. 80	0.0135	
Diámetro int. serpentín 3/8 S. 80	0.01024	
Area interna de transferencia de calor (lateral de serpentines)	0.068	
Area externa de transferencia de calor (lateral de serpentines)	0.089	
Area interna seccional de serpentín (para flujo de refrigerante)	8.24×10^{-5}	
$\frac{\mu c_p}{k}$ = Nº Plandtl	193.7	
Dimensiones internas de la bandeja (y la muestra a congelar)	0.3x0.2x0.01	
Temperatura de placas T_i	-11	
MODALIDAD DE FLUJO	SERIE	PARALELO
PROTOTIPO	1 A 5	6
Caudal (20 lt/min: 2 serpentines)	1.67×10^{-4}	3.34×10^{-4}
Velocidad de flujo interna	2.02	4.04
Nº Reynolds	777	1553

Sea q el flujo de calor retirado por las placas a la muestra, medido en vatios

Las resistencias que debe atravesar ésa energía son

R_1 = Resistencia convectiva en el interior del serpentín

R_2 = Resistencia conductiva por la pared del serpentín

R_3 = Resistencia conductiva por la lámina de las placas

R_4 = Resistencia convectiva superficial entre la placa y el material

R_5 = Resistencia conductiva de la muestra en la congelación

Las últimas dos resistencias son las que tratan los modelos de congelación presentados en el marco teórico (Plank y Cleland y Earle). Puesto que se tomaron las medidas de la temperatura superficial de la placa superior, se considerará, a partir de tal información , el problema de las tres primeras resistencias.

Cálculo de R_1:

D/L = 4.9×10^{-3}

$N_{RE} x N_{Pr} x$ D/L = 737 para flujo en paralelo

=1475 para flujo en serie

Entonces:

$$N_{Nu} = 1.86\left(N_{Re} N_{Pr} D / L\right)^{0.33}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$$ =16.8 [10] para flujo en paralelo

=21.2 para flujo en serie

Tomando $\frac{\mu}{\mu_w}$ = 1 (suponiendo que no varía en forma importante la temperatura entre la entrada y la salida , y la temperatura de la pared del tubo-w- sea igual a la promedia para el propilenglicol)

---

[10] **Sing,Heldman**.Introduction to Food Engineering. Academic Press.!984.pp124

$h = \frac{N_{Nu}k}{D}$ = 16.8x0.407/0.01024= 667.7 vatios/m ^{2} °C. Serie

= 842.6 vatios/m ^{2} °C. Paralelo

El valor correspondiente a R_1 es:

$R_1 = \frac{1}{hA_i} = \frac{1}{667.7(0.068m^2)} = 2.2(10^{-2})^o C / vatio$. Paralelo

=1.75(10^{-2})°C/ vatio. Serie

Donde el área se calculó como $(\pi\phi_i)L$, para L=2.1 m.

Cálculo de R_2 y R_3:

$R_2 = (\phi_2 - \phi_1) / 2kA_{ml}$

=(3.26x10^{-3})/(2)(!3.8)(0.078)=1.51x10^{-3} °C/vatio. Serie y paralelo

$R_3 = \frac{\Delta X}{kA}$ =(1.5x10^{-3})/(13.8x0.12) = 9.06x10^{-4}. Serie y paralelo

La suma de las tres primeras resistencias dá:

$R_1 + R_2 + R_3$ = 0.024 °C/ vatio en serie y 0.021 °C/vatio en paralelo.

Estos valores dan muy cercanos a los de la primera resistencia, que es la preponderante. Debe tenerse en cuenta que en realidad no está disponible toda el área de transferencia para los serpentines pues apenas hay un contacto tangencial entre ellos y la placa refrigerante puntos de la soldadura), que fue mejorado por la envoltura en papel de aluminio descrita en la página 52 (prototipo 3, figura 3.7). Suponiendo que con esta medida

se aprovecha el 50% del área de transferencia de los serpentines, los nuevos valores de la suma de las tres primeras resistencias son 0.048 ºC/vatio para flujo en serie y 0.042 ºC/vatio para flujo en paralelo.

La medida de la temperatura superficial de la placa superior dio un desfase de 7ºC ± 1ºC por encima de la temperatura del baño(que en los ensayos fue de unos -18 ºC durante la congelación de las muestras), supuesta aproximadamente igual a la temperatura interior de los tubos.

El flujo de calor a través de la tres primeras resistencias sería

$$q = \frac{\Delta T}{\mathrm{Re}sistencia} = \frac{7^{\circ}C}{0.048^{\circ}C / vatio} = 145.8 \text{ vatios en serie}$$

$$= 166.7 \text{ vatios en paralelo}$$

Estos valores corresponden aproximadamente a alrededor del 60% de la potencia media disponible para enfriamiento por el baño medida en la sección 3.1.2.

4.3 TIEMPO DE CONGELACIÓN

Para hacer intervenir las otras dos resistencias se presenta la dificultad de desconocer la manera de evaluar la resistencia superficial asociada a la presencia de aire o impurezas entre la muestra y la placa. La última resistencia, que corresponde al material puede evaluarse mediante los modelos de congelación propuestos en el marco teórico.

Suponiendo que sea mínima la cuarta resistencia, el tiempo de congelación para una muestra de 750 gramos (bandeja pequeña) se calcularía así:

4.3.1 Modelo Plank

Con el flujo de energía calculado de 145.8 ó 166.7 vatios puede suponerse que el valor del coeficiente superficial de la ecuación 2.8:

$h = \dfrac{q}{A(T_F - T_i)}$ =145.8/(0.12x11)= 110.5 vatios/m^2 ºC , en serie

= 126.3 vatios/m^2 ºC , en paralelo

Para A=0.12 el área de las dos placas y 11º de diferencia de temperatura entre la placa y la muestra en proceso de congelación(valor promedio en los ensayos del prototipo 6).

El tiempo de congelación es:

$$t = \frac{\lambda \rho}{T_f - T_i}\left(\frac{P a}{h} + \frac{R a^2}{k}\right) \qquad \text{Ec 2.8}$$

Donde

h = Coeficiente de transferencia de calor superficial (110.5 ó 126.3)

k = Conductividad térmica del material congelado= 1.28 vatios/mºC

a = Espesor de la placa a congelar= 0.01 m

t = Tiempo de congelación (s)

λ = Calor latente de fusión del material = 334100 J/kg

ρ = Densidad= 916.2 Kg/m^3

$T_f - T_i$ = Diferencia entre las temperaturas de congelación de la muestra y la placa refrigerante.= 11ºC

$P = \frac{1}{2}$ **para placas infinitas**, $\frac{1}{6}$ para una esfera, $\frac{1}{4}$ para un cilindro infinito.

$R = \frac{1}{8}$ **para placas infinitas**, $\frac{1}{24}$ para una esfera, $\frac{1}{16}$ para un cilindro infinito.

Así:

t = 1525 s = 25.4 min para flujo en paralelo

t = 1358 s = 22.6 min para flujo en serie

4.3.2 Modelo de Cleland y Earle

N_{Bi} = Número de Biot $= \frac{h_c a}{k}$ = 0.86 paralelo Ec 2 .10

= 0.99 en serie

N_{St} = Número de Stefan = $\frac{c_{phielo}\left(T_f - T_{placa}\right)}{\Delta H}$ =0.069 serie o paralelo.

El efecto del calor sensible por encima de la temperatura de congelación se contabiliza por medio de otro número adimensional.

N_{Pl}= Número de Plank = $\frac{C_{pagua}\left(T_{n.aguai} - T_f\right)}{\Delta H} = \frac{4220(18-0)}{334100}$

= 0.23 serie o paralelo.

La ecuación de Plank se presenta en forma adimensional:

$$N_{Fo} = P\left(\frac{1}{N_{Bi}N_{St}}\right) + R\left(\frac{1}{N_{St}}\right)$$ = 11.0 en paralelo Ec 2 .12

= 9.9 en serie

Para P y R 0.52 y 0.16 respectivamente, leídos en fig.2.3 y 2.4.

La influencia de la forma del producto a congelar se tiene en cuenta con las dimensiones equivalentes de transferencia de calor DETC, por la expresión.

$DETC = 1 + W_1 + W_2$ Ec.2.15

este valor se relaciona con las dimensiones del producto mediante las figuras mostradas. Los factores de forma para ladrillos rectangulares son:

$$\beta_1 = \frac{d_1}{a} = 30$$
$$\beta_2 = \frac{d_2}{a} = 20 \qquad \text{Ecs.2 .16}$$

Donde d_1 y d_2 son el ancho y el largo del ladrillo respectivamente y a es su espesor.

El valor de W1 y W2 en este caso tienden a cero, por lo que el *DETC* es 1

$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ = 6.6x10^{-7}, difusividad térmica del hielo

El *DETC* puede incorporarse al Número de Fourier así:

N_{Fo} = Número de Fourier = $\frac{DETC\,\alpha t}{a^2}$ Ec 2 .9 ó

$$t_f = \frac{a^2}{(DETC)\alpha}\left(\frac{1}{N_{Bi}N_{St}}\right) + \frac{a^2 R}{(DETC)\alpha}\left(\frac{1}{N_{St}}\right) \qquad \text{Ec 2.17}$$

Usando la Ec 2.9 se tiene:

t = 1666.7 s ó 27.8 min para flujo en paralelo

t = 1500 s ó 25 min para flujo en serie

Estos valores incluyen el tiempo de enfriamiento desde 18ºC a 0ºC de las muestras.

4.4 CAÍDA DE PRESIÓN DEL REFRIGERANTE

Tomando los datos del aparte 4.2 (pág. 58), y para el arreglo en serie , se tiene:

Factor de fricción (flujo laminar)

$$f = \frac{16}{N_{Re}} = 0.01$$

Longitud de la línea :

TABLA 4.3

LONGITUD EQUIVALENTE

TRAYECTO	LONGITUD O NUMERO	L_{EQUIV} / D	L_{EQUIV}
Mangueras	2.4 m		2.4 m
Serpentines	2.1 m		2.1 m
Codos 90°	2	35	0.73 m
Retorno en U	7	75	5.46 m
		TOTAL	10.7 m

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre la salida y la succión del baño, que están a la misma altura, y a la misma presión, se tiene:

$$\frac{\Delta P_f}{\rho} = 2fv^2 \frac{L}{D} = 2X0.01X(4.04)^2 \text{ X } 10.7/\ 0.0104 \ = 335.8 \text{ Julios / Kg}$$

Con un caudal de $3.34x10^{-4}$ m^3 /s ó 0.35 Kg/s de flujo másico de propilenglicol-agua (Densidad 1040 kg/ m^3) se puede obtener la potencia requerida:

POTENCIA = 335.8 X 0.35 = 117.5 vatios

4.5 PRUEBAS

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Termoquímica de la Universidad Nacional Sede Manizales. Cada prototipo se probó con la siguiente metodología.

4.5.1 Pruebas hidráulicas(PH)

PH1. La primera inspección se realizó visualmente operando el equipo en el modo de circulación externa (flujo de refrigerante : baño-serpentines-baño) , a temperatura ambiente del refrigerante (19-20°C) .

PH2. La medición del consumo de potencia se tomó como una variable indicadora de la mayor o menor exigencia sobre la bomba de recirculación debida en este caso, exclusivamente a la caída de presión por líneas de empalme baño-congelador. El equipo utilizado fue una pinza voltiamperimétrica convencional que se ubicó alrededor del cable de energía de alimentación del baño; las temperaturas del refrigerante fueron la ambiente y a -15°C . El parámetro de comparación fue el consumo en vatios. Bajo las mismas circunstancias se hicieron medidas del baño mientras operaba en el modo de recirculación interna

4.4.2 Pruebas de transferencia de calor(PT)

Se hicieron medidas de dos tipos. Las primeras fueron ensayos de temperatura-tiempo de los equipos:

PT1. Con las bandejas llenas, sin aislamiento.

PT2. PT1, con aislamiento.

PT3. Un segundo tipo de pruebas de transferencia de calor lo constituyeron las mediciones de las temperaturas superficiales de distintos puntos del congelador utilizando para ello un termómetro infrarrojo . Se logró obtener así un perfil de temperaturas para las placas enfriadoras que permitió hacer ajustes en el sistema

de serpentines y evaluar sus efectos en la búsqueda de uniformidad y menor temperatura superficial para el favorecimiento de la transferencia de calor. Estas pruebas se realizaron con los prototipos 2 en adelante pues el termómetro infrarrojo solo estuvo disponible a partir del mes de abril, cuando ya se habían hecho los ajustes al primer prototipo.

TABLA 4.2

PRUEBAS

PRUEBAS/PROTOTIPO	P.1	P.4	P.5	P.6
PH1(NO FUGAS)	OK	OK	OK	OK
PH2:CIRC.INT(Vatios)	60-100	60-100	60-100	60-100
PH2:CIRC.EXT(Vatios)	80-140	80-140	80-140	100-160
PT3.TEMP.PL.SUP.	ND	-8ºC	-11ºC	-9ºC
PT3.TEMP.PL.INF.	ND	ND	ND	-12ºC

En la tabla anterior se relaciona un resumen de algunas pruebas practicadas sobre cuatro de los prototipos.

La prueba hidráulica 1 (PH1) fue la verificación de la capacidad de transporte baño-congelador-baño a todas las temperaturas de operación. El detalle del procedimiento para chequeo de la variación de la viscosidad se dio en las pruebas del baño termostatado (capítulo III). No se presentaron inconvenientes distintos de los ajustes normales para controlar pequeñas fugas.

La prueba hidráulica 2 (PH2) se hizo colocando una pinza voltamperimétrica cuando el equipo estaba en el modo de circulación interna (sin conexión al congelador, BTR operando internamente) y externa. La medida directa se hizo leyendo el amperaje en una pinza marca KYORITZU,modelo 2608; el valor de la

potencia consumida se encontró multiplicando las lecturas por 110 voltios, voltaje estabilizado de AC al que estuvo conectado el BTR. Se presentan los rangos de las lecturas para las distintas temperaturas de operación, desde la ambiente, correspondiendo las mayores a las temperaturas mas bajas.

La prueba de transferencia de calor PT3 consistió en la determinación , luego de la estabilización de la temperatura mínima de operación del BTR en el modo de circulación externa, para un set point de -35ºC, de la temperatura de la placa superior del congelador (la inferior fue inaccesible,excepto para el prototipo 6) mediante un termómetro infrarrojo (marca RAYTEK ST4L) previamente calibrado. El error de la lectura fue de $\pm$ 1ºC.

Esta prueba se hizo además sobre el prototipo 4, en diversos puntos de su superficie, encontrándose fluctuaciones entre 6ºC y 15ºC, según el punto sensado del exterior del aparato. En los prototipos 5 y 6 se repitió la prueba sobre el aislamiento para un resultado satisfactorio de 12 a 19ºC, siendo la temperatura inferior la detectada en las cercanías de las pequeñas áreas que quedaron sin este recubrimiento.

4.5.2.1 Curvas de enfriamiento

La actividad central de los ensayos fueron las curvas de enfriamiento. Idealmente se debía llegar a obtener curvas similares a las de congelación por inmersión en el baño (Capítulo III , figuras 3.4 y 3.5). Sinembargo, por distintos factores que se relacionarán brevemente mas adelante, no fue posible alcanzar en forma reproducible curvas de ése tipo en los primeros cinco prototipos.

En la tabla 4.5 se muestran los datos para tres curvas típicas de enfriamiento correspondientes a los prototipos 1 (Sepentín en Cobre : Cu), 4 (serpentín en acero,sin aislamiento) y 5 (Serpentín en acero, con aislamiento). La gráfica correspondiente puede observarse en la figura 4.1. Nótese que solamente en la curva de la muestra en el baño con aislamiento se alcanzaron temperaturas inferiores a 0ºC (T.M. Ai) .

En las tablas 4.6 y 4.7 y sus gráficas correspondientes de las figuras 4.2 y 4.3, se muestran los resultados de los procesos de enfriamiento de muestras en las bandejas grande (1300 $\pm$ 50 gr de muestra) y pequeña (800 $\pm$ 50 gr de muestra). Los tiempos de congelación superáron los 100 minutos en todos los casos, llegándose hasta 180 minutos para congelación completa de la muestra mayor.

Con el prototipo 6 se alcanzó una aproximación razonable a los tiempos de congelación previstos en los cálculos teóricos. En la tabla 4.8 y su gráfica correspondiente, figura 4.4 se observan los resultados finales para la congelación , utilizando las dos bandejas.

Respecto de esta última gráfica debe notarse la disminución en el tiempo de congelación de la muestra en la bandeja pequeña, que pasó de 55 minutos a 25-30 minutos, al incrementar la presión de ajuste de las placas y cambiar las mangueras de conexión que presentaban pliegues luego de su utilización y manipulación en los numerosos ensayos.

TABLA 4.5
CURVAS DE ENFRIAMIENTO PARA TRES CONDICIONES

COMPARACION DE CURVAS DE ENFRIAMIENTO PARA TRES CONDICIONES

	SERPENTIN EN COBRE		SERPENTIN EN ACERO		CON AISLAMIENTO	
	T. BAÑO(Cu)	T.M.(Cu)	T. BAÑO(Ac)	T.M.(Ac)	T. BAÑO(Ai)	T.M.(Ai)
TIEMPO (S)						
0	1.6	17.7	-9.7	19.1	-17	12
300	-2.7	16.7	-10.6	12.2	-16.7	7.5
600	-6.7	16.3	-11.5	8	-16.6	5
900	-9.9	16	-12.2	5.6	-16.7	2.7
1200	-12.5	15.6	-13	4.3	-16.8	1.4
1500	-14.2	15.1	-13.4	3.5	-16.8	0.9
1800	-15.6	14.6	-13.7	2.9	-16.9	0.6
2100	-17	14.1	-14	2.7	-17	0.4
2400	-17.9	13.5	-14.2	2.5	-17.2	0.3
2700	-18.1	12.9	-14.4	2.3	-17.3	0.2
3000	-18.2	12.2	-14.6	2.1	-17.5	0.1
3300	-18.3	11.6	-14.8	1.9	-17.9	0.1
3600	-18.3	10.9	-14.9	1.7	-18.1	-0.1
3900	-18.3	10.2	-15	1.5	-18.2	0
4200	-18.3	9.4	-15.1	1.3	-18.3	0
4500	-18.3	8.6	-15.1	1.1	-18.4	-0.1
4800	-18.3	8	-15.2	0.9	-18.4	-0.1
5100	-18.3	7.2	-15.2	0.7	-18.5	-0.3
5400	-18.3	6.5	-15.2	0.5	-18.6	-0.5
5700	-18.4	5.7	-15.2	0.3	-18.7	-0.7

FIGURA 4.1
CURVAS DE ENFRIAMIENTO PARA TRES CONDICIONES

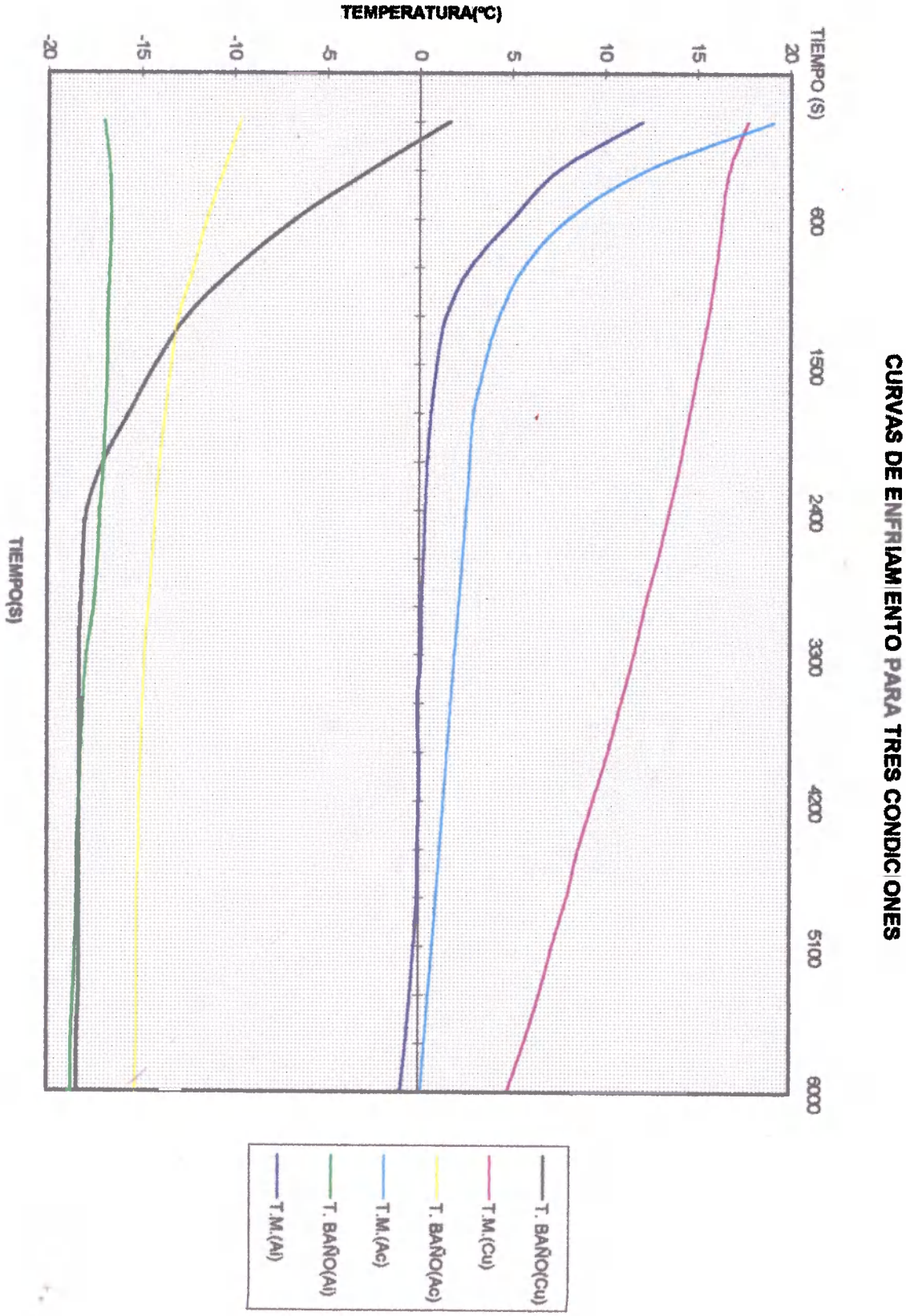


TABLA 4.6
CONGELACIÓN DE MUESTRAS EN LA BANDEJA GRANDE

TEMPERATURAS (ºC) CONGELACION EN BANDEJA GRANDE				
TIEMPO(S)	BAÑO 1	MUESTRA 1	BAÑO 2	MUESTRA 2
0	-17	12	13.1	18.2
300	-16.7	7.5	8.2	16.3
600	-16.6	5	3.1	14
900	-16.7	2.7	-0.2	12.2
1200	-16.8	1.4	-3.3	10.2
1500	-16.8	0.9	-7	7.5
1800	-16.8	0.5	-9.3	5.2
2100	-16.9	0.2	-11.6	3.3
2400	-17	0.1	-12.6	2.5
2700	-17.1	0.1	-13.4	2.3
3000	-17.2	0	-14.5	2
3300	-17.3	0	-15	1.7
3600	-17.4	0	-15.4	1.4
3900	-17.5	0	-15.8	1
4200	-17.6	0.1	-16.1	0.7
4500	-17.7	0	-16.3	0.4
4800	-17.8	-0.1	-16.5	0.1
5100	-18	-0.1	-16.6	0
5400	-18.2	-0.1	-16.7	0
5700	-18.3	-0.2	-16.8	-0.2
6000	-18.3	-0.2	-16.9	-0.4

FIGURA 4.2
CONGELACIÓN DE MUESTRAS EN LA BANDEJA GRANDE

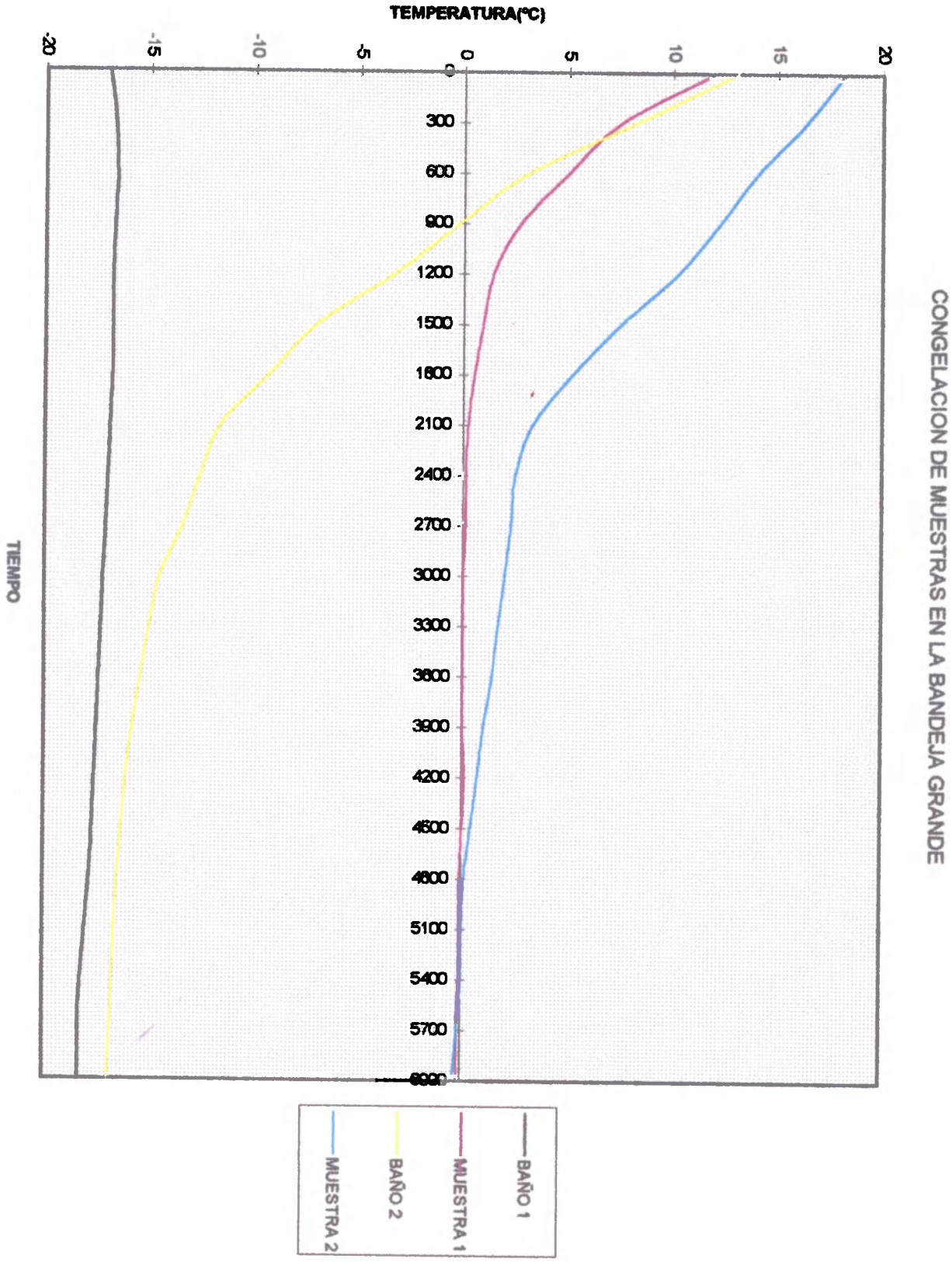


TABLA 4.7
CONGELACIÓN DE MUESTRAS EN LA BANDEJA PEQUEÑA

TEMPERATURAS (ºC) CONGELACION EN BANDEJA PEQUEÑA				
TIEMPO(S)	BAÑO 1	MUESTRA 1	BAÑO 2	MUESTRA 2
0	-21	19.4	-20	12
300	-19.5	12.7	-18.9	8.4
600	-19.1	7.9	-18.7	5.3
900	-19	4.9	-18.5	2.4
1200	-19	2.5	-18.5	1
1500	-18.9	1.9	-18.5	0.8
1800	-18.9	1.5	-18.6	0.6
2100	-19	1.3	-18.6	0.5
2400	-19.1	1.1	-18.6	0.3
2700	-19.2	0.9	-18.7	0.2
3000	-19.2	0.7	-18.7	0.1
3300	-19.3	0.6	-18.7	0
3600	-19.4	0.3	-18.7	-0.1
3900	-19.5	0.1	-18.8	-0.1
4200	-19.5	0	-18.8	-0.1
4500	-19.5	0	-18.9	-0.1
4800	-19.5	-0.1	-18.9	-0.2
5100	-19.5	-0.1	-18.9	-0.2
5400	-19.5	-0.2	-18.9	-0.2
5700	-19.5	-0.3	-19	-0.2

FIGURA 4.3
CONGELACIÓN DE MUESTRAS EN LA BANDEJA PEQUEÑA

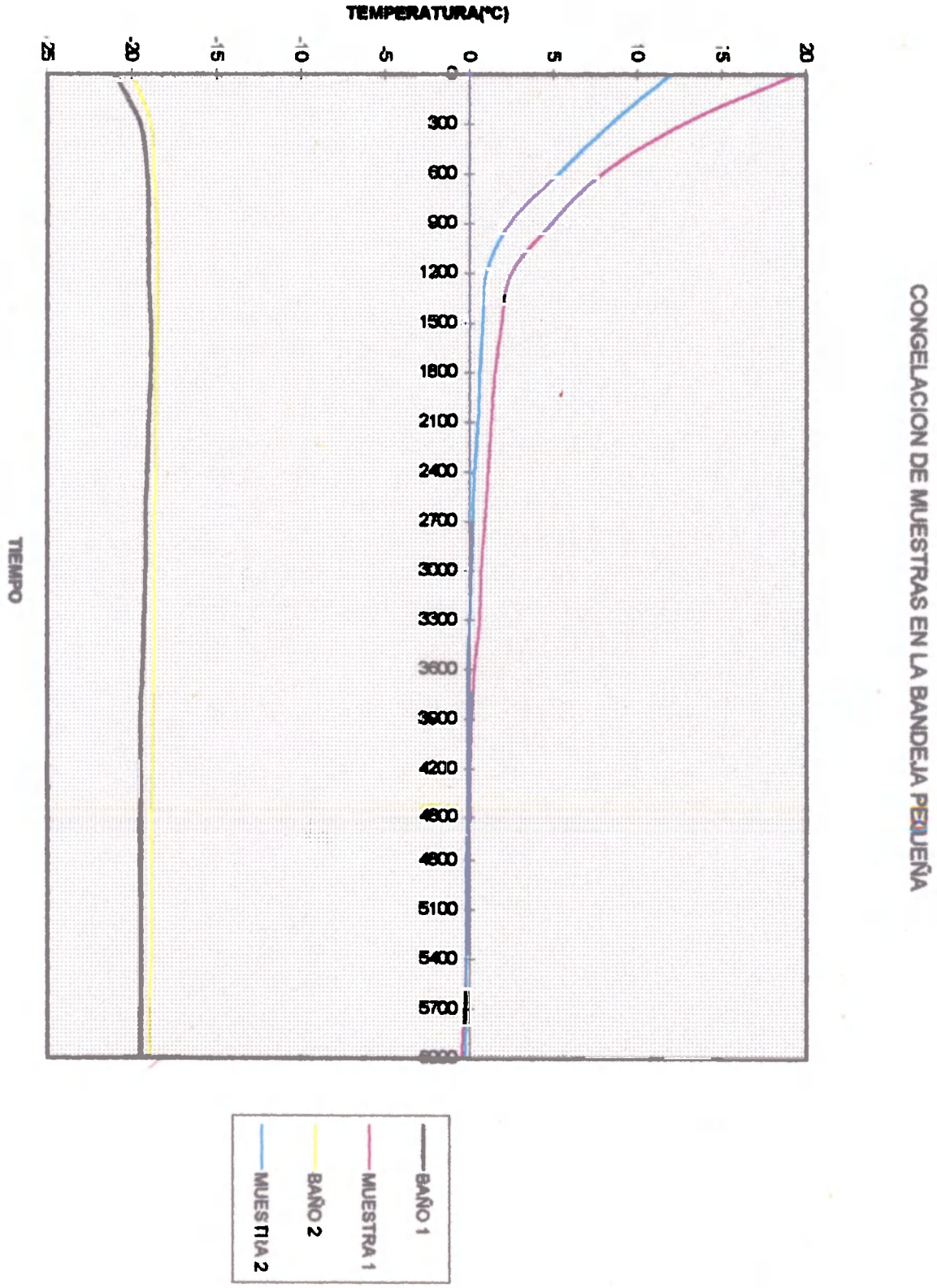
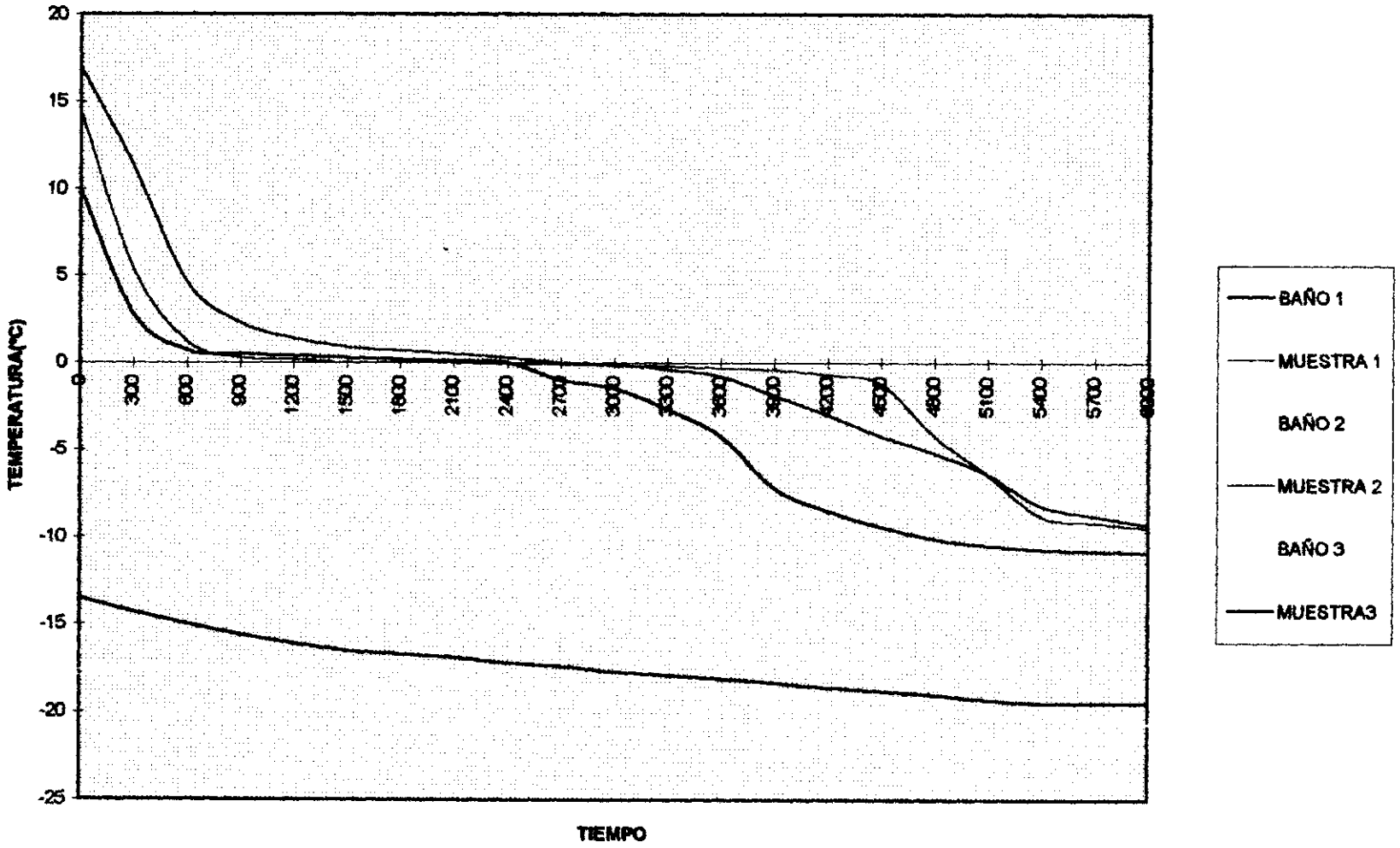


TABLA 4.8
PRUEBAS DEL PROTOTIPO 6

	TEMPERATURAS (ºC) CONGELACION EN BANDEJA PEQUEÑA PROTOTIPO 6					
TIEMPO(S)	BAÑO 1	MUESTRA 1	BAÑO 2	MUESTRA 2	BAÑO 3	MUESTRA3
0	-13.5	14.5	-17.9	17	-17.6	10
300	-14.3	5.4	-17.6	11.3	-17.6	2.8
600	-15	1.2	-17.5	4.6	-17.5	0.7
900	-15.6	0.3	-17.7	2.3	-17.6	0.5
1200	-16.1	0.2	-17.9	1.4	-17.6	0.4
1500	-16.5	0	-18	0.9	-17.7	0.3
1800	-16.7	0	-18.2	0.7	-17.7	0.2
2100	-16.9	0	-18.4	0.5	-17.9	0.1
2400	-17.2	-0.1	-18.6	0.3	-18.1	0
2700	-17.4	-0.1	-18.9	0	-18.4	-1
3000	-17.7	-0.2	-19.1	-0.1	-18.6	-1.5
3300	-17.9	-0.2	-19.4	-0.4	-18.9	-2.7
3600	-18.1	-0.3	-19.6	-0.8	-19.2	-4.2
3900	-18.3	-0.4	-19.8	-1.9	-19.4	-7.2
4200	-18.6	-0.7	-20	-3	-19.6	-8.5
4500	-18.8	-1.2	-20.2	-4.2	-19.8	-9.4
4800	-19	-4.2	-20.4	-5.2	-20	-10.1
5100	-19.3	-6.4	-20.5	-6.4	-20.2	-10.5
5400	-19.5	-8.8	-20.5	-8.2	-20.4	-10.7
5700	-19.5	-9.2	-20.5	-8.8	-20.6	-10.8
6000	-19.5	-9.5	-20.6	-9.3	-20.7	-10.9

FIGURA 4.4
PRUEBAS DEL PROTOTIPO 6



CAPITULO V : ANÁLISIS

5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1.1 Teoría vs práctica

TABLA 5.1

COMPARACIÓN DE CÁLCULOS Y DESEMPEÑO DEL PROTOTIPO 6

		UNIDADES	CALCULO TEÓRICO	VALOR REAL	ERROR(%)
COEF.SUPERFICIAL		Vatios/m^2 ºC	126.3	105.5*	19.9%
TIEMPO CONGELACIÓN	MP	Minutos	26	30	13
	MC		22.6		24.7
CAÍDA DE PRESIÓN(MEDIDA COMO POTENCIA)		Vatios	117.5(a - 15ºC)	160(máx lectura)	26.6

MP: Modelo de Plank

MC: Modelo de Cleland y Earle

Para la muestra de 750 gr, bandeja pequeña

*** Calculado así:**

$$h = \frac{Kg.muestra(334100 Jul/kg)}{Area.\Delta Temperatura.Tiempodecongelacion} =$$

=(0.75)(334100)/(0.12)(11)(30x60) = 105.5 vatios/m ^{2} ºC

5.1.2 Acerca del proceso de diseño

En la tabla siguiente se sintetizan problemas , soluciones y resultados observados en la secuencia del diseño:

TABLA 5.2

ANÁLISIS DE LA SECUENCIA DE DISEÑO

PROTOTIPO	PROBLEMAS	ACCIONES	RESULTADO
1	Mínimo enfriamiento	Serpentines de acero por los de cobre	Mejora retiro de energía sin llegar a congelación para tiempos menores de 2 horas
2	Enfriamiento insuficiente	Conexiones en nylon en lugar de cobre	El sistema enfría mas rápidamente pero aún no hay congelación para tiempo < 2horas
3	Enfriamiento insuficiente	Recubrimiento con aluminio de placa y serpentines. Se usan bandejas de 1 y 2 cm de altura.	Escarchado en línea de conexión. Congelación superficial pequeña en muestras de bandeja pequeña
4	Burbujas en proceso de llenado	Cambio de sistema de llenado . El congelador se nivela al hacer esta operación	Congela entre 20 y 30% de muestra en bandeja pequeña para tiempos < 2hr
5	Pérdidas por falta de aislamiento	Aislamiento del congelador con armaflex	Tiempos de congelación completa: M. pequeña: 1.5 hr M.grande: 2.9 hr
6	Baja velocidad de flujo por el serpentín. Mal contacto de base de bandeja inferior	Cambio de sistema de circulación. Inversión de placa inferior. Incremento de presión de cerrado	Tiempo de congelación: M.pequeña: 0.5 hr M.grande: 1.8 hr

5.2 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El proceso de diseño resulta ser un poco mas una labor de artesanía en donde los modelos teóricos se vuelven una meta o referente para la evaluación de las imperfecciones del prototipo en construcción. Sinembargo la absoluta compatibilidad de los resultados con las simplificaciones matemáticas es raras veces alcanzada en la práctica. Para el caso presente en la tabla anterior puede observarse que las desviaciones de la idealidad oscilan entre 13 y 27 %.

El propósito inicial de fabricar un equipo que pudiera manejar tiempos de congelación del orden de 20 a 30 minutos se ha alcanzado para el caso de una muestra de 0.75 Kg.

El prototipo 6 puede evidentemente mejorarse pues , a pesar de los numerosos esfuerzos para su ajuste, todavía adolece de defectos como los siguientes:

La congelación es aún inhomogénea. Para los propósitos de uso como equipo para la preparación de muestras para liofilizar, debe mejorarse esta característica .

El cierre del equipo debe acondicionarse para permitir un ajuste y una presión superiores. Se observó que la mejora de estos parámetros permite reducir los tiempos de congelación.

El elemento para sensar temperatura es muy sensible al posicionamiento. Cuando se modificó la penetración de la punta de la probeta de temperatura en la muestra

se notó una desviación de sus medidas por la estabilización de la temperatura de congelación en cifras diferentes al 0ºC del agua pura.

El líquido del baño aumenta demasiado su viscosidad con el descenso de la temperatura. La repetición de las últimas pruebas con etanol- agua o con mezclas propilenglicol-etanol-agua podría mejorar este factor que afecta grandemente las características de flujo y, consecuentemente la transferencia de calor. Esto sin tener en cuenta la mejora que se pudiera alcanzar con el incremento de la conductividad térmica de la mezcla , que es muy baja para el propilen-glicol-agua.

El aislamiento es deficiente pues aún quedan a al ambiente parte de las conexiones de acceso. Desafortunadamente la acción de aislamiento se hizo en una fase tardía del proceso de ajuste de los prototipos por el incumplimiento del proveedor del material, quien, luego de tres meses, anunció que debía importarlo por no disponer de él en el país.

Este último hecho respalda otra de las conclusiones prácticas de este trabajo: los cronogramas de ejecución, cuando están condicionados al cumplimiento de mecánicos, proveedores y servicios especializados, difícilmente pueden cumplirse teniendo en cuenta que , además de su reconocidísimo incumplimiento, no demuestran mucho interés cuando su cliente es una entidad oficial como la Universidad Nacional . Cuando los pedidos u ódenes de trabajo son pequeños, esta condición se vuelve mas crítica .

Entre los modelos de congelación se adaptó mejor el simplificado de Plank pues se acerca mucho mas al comportamiento del equipo.

Algunas recomendaciones para mejoras y acciones para uso adecuado del equipo son las siguientes:

El aumento del número de Reynolds , que dio muy bajo , podría acometerse mediante el cambio de líquido refrigerante por uno menos viscoso , como ya se mencionó, o también por el uso de un serpentín de menor diámetro. Esta última opción debe considerar la disponibilidad de un taller que haga este doblado sin deteriorar mecánicamente los tubos. La caída de presión subiría significativamente, y la limitación de la potencia de la bomba del BTR sería un factor a considerar.

La alternativa de utilizar cámaras inundadas con el refrigerante(en lugar de serpentín soldado como en este caso) , con una disposición de bafles que asegure turbulencia en su interior , debe considerarse, sobre todo si se quiere resolver el problema de la inhomogeneidad del bloque congelado .

Finalmente no debe descartarse un diseño de congelador de placas vertical, con cámaras inundadas que minimizaría el problema de las burbujas de aire, pues su efecto no sería tan traumático como en el caso del congelador horizontal.

En todo caso , conviene utilizar espesores de lámina superiores a 1.5 mm pues las presiones a las que deben estar sometidas las muestras recomiendan un equipo robusto y poco susceptible a deformaciones.

BIBLIOGRAFÍA

1. ARCE,J.,SWEAT,V.Survey of published heat transfer coefficients encountered in food processes. ASHRAE Transactions,86(2);235

2. CLELAND, D.J.; CLELAND, A.C.; EARLE, R.L. (1986) "Prediction of Freezing and Thawing Times for Foods.- A review" Int. J. Refrigeration, 9 (3), 182.-

3. COLE PARMER.Operators manual of digital programmable circulating bath.USA 1994.

4. COLEGIO OFICIAL DE INGENIEROS DE MURCIA . Curso de Ingeniería del frío. AMV Ediciones. 2da. Edición. Madrid 1993

5. COWELL,N.,NAMOR, m. Heat transfer coefficients in plate freezing: the effect of packaging materials.IIF-IIR,Commision BI,CI,C2.Bressanone.1974;45-49

6. FENNER,R. Plate freezer.UK Patent application GB 2145805A.1985.

7. FLORES, E.,MASCHERONI,R. Determination of heat transfer coefficients for continuous belt freezers.Journal of food Science.Vol 53 nº 6 ,1988; 1872-1876.

8. GOLDBLITH, REY, ROTHMAYR (Ed.) Freeze drying and Advanced Food Technology. Academic Press. London. 1975

9. GEANKOPLIS,C. Procesos de transporte y operaciones unitarias.Cía. Ed.Continental.México 1982.

10.HAYES,G. Manual de datos para ingeniería de alimentos. Acribia.Zaragoza 1987.

11.LOPEZ. Instalaciones frigoríficas en las industrias agroalimentarias. AMV Ediciones, Madrid 1994

12.MALLETT C.P. (Editor). Tecnología de los Alimentos Congelados. AMV Ediciones, Madrid. 1994

13.MADRID, GOMEZ, SANTIAGO. Refrigeración, congelado y envasado de Alimentos. AMV Ediciones, Madrid. 1994

14.MARTIN,H. Instationarae Waermeleitung in ruheden Korpern.VDI-Verlag.Dusseldorf.VDI Waremeatlas.7ª Ed. 1994; EC1-EC24.

15.PERRY,H.,CHILTON,C.ED. Chemical Engineer's Handbook. McGraw Hill.Tokyo.5ªEd.1975.

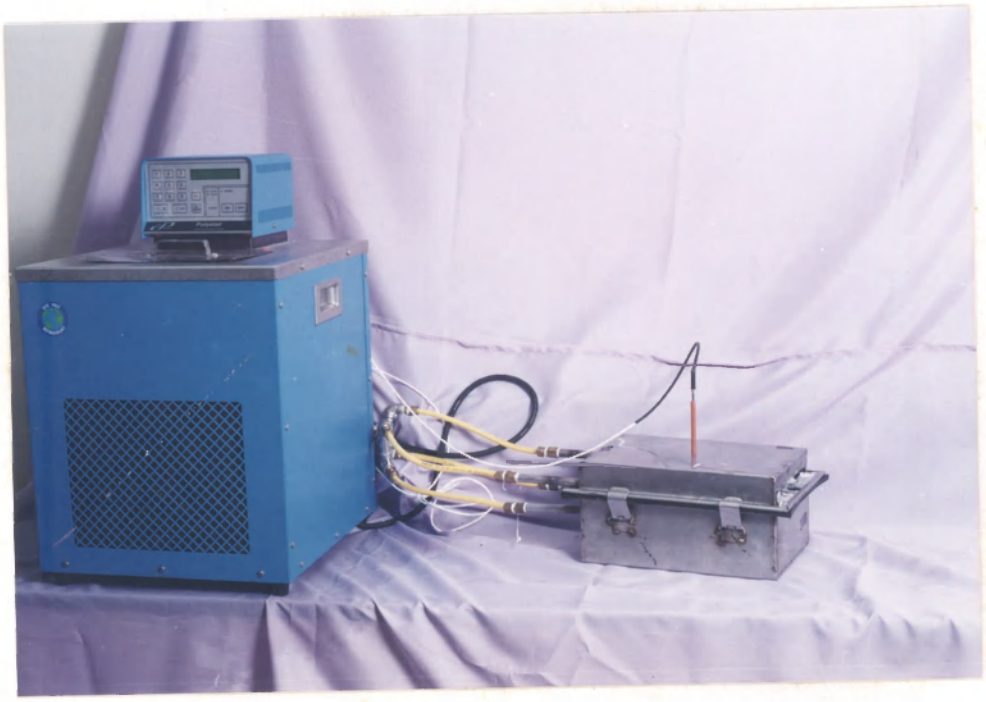
16.SANZ, P.D.; MASCHERON, RH; DOMINGUEZ, M.; DE VINUESA, SG (1986) "Time Temperature Prediction Curves of Foodstuffs by Means of the Z-Transfer Function Method". Int 5. Refrigeration, 9(2), 89-92.

17.SING,R.,HELDMAN,D. Introduction to food engineering. Academic press.San Diego 1984.

18. YILMAZ,T. Equations of heating and cooling of bodies of various shapes.Elsevier Science.Intl.Journal of refrigeration.Vol 18 Nº 66 1995; 395-402.

ANEXO 1 : FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1 : Baño termostatado refrigerado (BTR)



Fotografía 2 : Congelador y BTR

Fotografía 3 : Serpentín cubierto en papel de aluminio

Fotografía 4 : Bandejas portamuestras

Fotografía 5 : Termómetro infrarrojo y nivel

Fotografía 6 : Prototipo 6

ANEXO 2 : ESPECIFICACIONES

Equipo :	Congelador de placas
Dimensiones:	30x25x16.5 cm
Materiales:	Acero inoxidable 304
	Espuma polimérica de aislamiento
	Nombre comercial : Armaflex.
Líquido refrigerante :	Solución de propilenglicol-agua al 60% peso
Temperatura de operación:	Entre -10° y -20° C
Capacidad de refrigeración:	Muestras de 750 y 1300 gr
	Tiempos mínimos de congelación:
	25 min para 750 gr
	55 min para 1300 gr
Coeficiente superfical de transferencia de calor :	100 $\pm$ 10 vatios/°C m^2
Baño Termostatado :	Marca Cole Parmer de 450 vatios de capacidad de enfriamiento a 0°C

ANEXO 3 :PRACTICA DE CONGELACIÓN

OBJETIVO

Determinación del coeficiente de conductividad térmica de un alimento en el proceso de congelación.

MARCO TEÓRICO

El coeficiente de conductividad térmica en la congelación es un parámetro sobre el que la información disponibles es escasa. Un modelo muy utilizado por su simplicidad para la descripción del proceso de la congelación es el de Plank. Una de las fallas de tal modelo es la escasez de información acerca de los parámetros que intervienen en dicha ecuación , uno de ellos ,la conductividad térmica.

Considerando una placa infinita de material de un espesor *l* con una distribución de temperatura arbitraria en t=tiempo =0. Poniendo en contacto la cara situada en x=l con un fluído en agitación mantenido a temperatura θ_0 para t>0 , la cara en x=0

completamente aislada, y denominando h el coeficiente de transferencia de calor entre el fluido y la placa, se cumple que:

$$h = -m\rho c l + \frac{m^2 \rho^2 c^2 l^3}{3k^2}$$, donde

$m =$ pendiente de la línea asintótica a la curva $\ln(\theta - \theta_0)$ vs tiempo

$\rho =$ Densidad del material congelado

$c =$ Calor específico del material congelado

$l =$ Espesor de la muestra

$k =$ Conductividad térmica

La expresión anterior tiene un máximo de error del 3.2 %[1]

MATERIALES Y EQUIPOS:

Baño termostatado refrigerado (BTR)

Sonda externa de temperatura (SET)

Congelador de placas

Embudo

Nivel

Cronómetro

---

[1] **Namor,M.Cowell,N.** Heat transfer coefficients in plate freezing. The effect of packaging materials.IFF-IRR ,1974,p45-50

PROCEDIMIENTO

1. Verificaciones :

Chequee si está correcto el nivel del congelador(debe estar completamente horizontal) . Haga lo mismo para la altura de líquido refrigerante dentro del BTR.Finalmente conecte o ajuste la SET.

2. Conecte y prenda el BTR en el modo de sensado de temperatura exterior.Fije la temperatura a controlar (Set point) en -35 °C.

3.Permita que la temperatura interna del BTR llegue a -18°C. Esto le tomará de 15 a 20 minutos.

4. Mientras transcurre el tiempo para el enfriamiento del baño proceda a introducir la bandeja con precaución de que encaje apropiadamente entre la tapa y la base del congelador. Cierre el congelador y llene con agua a través del embudo introducido por el orificio superior de la tapa del congelador.Cuando la bandeja está completamente llena se observa que drena un poco de agua por el rebose lateral de la bandeja.

5. Tome los datos de tiempos vs temperatura a partir del momento en el que se ha llenado la bandeja y la temperatura interior del baño sea de -18°C

6. Permita que la muestra llegue a -1°C. Esto tomará alrededor de una hora.

7. Apague el BTR y abra el congelador. Verifique si la congelación fue completa.Describa el bloque congelado respecto de su homogeneidad.

8. Repita los pasos 1 al 7 para la muestra problema.

ANÁLISIS DE LOS DATOS

Ajuste de datos de temperatura:

Grafique $\theta - \theta_0$ para el agua. Identifique la parte de la curva en la que ocurre el cambio de fase (parte aproximadamente horizontal). Tome la temperatura media de congelación,trazando la mejor línea horizontal en la zona del cambio de fase de la curva. Si tal valor difiere de 0 °C ajuste los valores de la tabla de datos sumando o restando tal desviación (generalmente esto último es lo que sucede). Este error se debe a que la sonda externa del baño es larga y , aunque el extremo inferior está en contacto con la muestra, el resto de la sonda atraviesa el congelador y su aislamiento, que están a una temperatura superior.

Gráficas:

Grafique el $\ln(\theta - \theta_0)$ vs t para las temperaturas corregidas del agua y de la muestra problema. Determine el valor de *m*

Resultados:

Con los valores de las constantes físicas del agua y el espesor de la bandeja, determine con la Ecuación 1 el coeficiente de transferencia de calor superficial.

Utilizando este valor , y la misma ecuación halle el valor de k de la muestra problema y su temperatura media de congelación.