



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO®

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE  
DURANGO**  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL  
VALLE DEL GUADIANA**



**"CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE CONTENEDOR CRIOGÉNICO  
AJUSTABLE PARA ALMACENAR PAJILLAS DE SEMEN BOVINO"**

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el

grado de

**Maestría en Ingeniería**

**Presenta:**

MARTÍN ALEJANDRO ESPINOZA UC

**Director de tesis**

FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA

**Co-Director**

EDUARDO GAMERO INDA

Durango, Dgo. México, Octubre 2024



Victoria de Durango, Dgo., a **15 / Noviembre / 2024.**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
DEPI / C / 503 / 2024.

ASUNTO: Autorización de Impresión de Tesis de Maestría.

**C. MARTÍN ALEJANDRO ESPINOZA UC**  
**No. DE CONTROL G09040970**  
**PRESENTE.**


De acuerdo al reglamento en vigor y tomando en cuenta el dictamen emitido por el jurado que le fue asignado para la revisión de su trabajo de tesis para obtener el **Grado de Maestro en Ingeniería**, esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le autoriza la impresión del mismo, cuyo título es:

**“CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE CONTENEDOR CRIOGÉNICO AJUSTABLE PARA EL ALMACENAMIENTO DE PAJILLAS DE SEMEN BOVINO”**

Sin otro particular de momento, quedo de Usted.

**ATENTAMENTE.**

*Excelencia en Educación Tecnológica®*  
*“La Técnica al Servicio de la Patria”*



**C. FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



FJGG'ammc.



Instituto Tecnológico de Durango  
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Victoria de Durango, Dgo., a **15 / Noviembre / 2024.**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
DEPI / C / 502 / 2024.  
ASUNTO: Autorización de Tema de Tesis de Maestría.

**C. MARTÍN ALEJANDRO ESPINOZA UC**  
**No. DE CONTROL G09040970**  
**PRESENTE.**

Con base en el Reglamento en vigor y teniendo en cuenta el dictamen emitido por el Jurado que le fue asignado, se le autoriza a desarrollar el tema de tesis para obtener el **Grado de Maestro en Ingeniería** cuyo título es:


**“CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE CONTENEDOR CRIOGÉNICO AJUSTABLE PARA EL ALMACENAMIENTO DE PAJILLAS DE SEMEN BOVINO”**

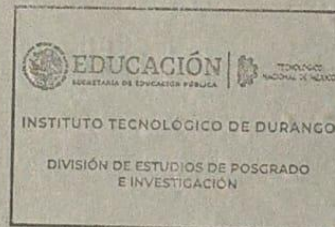
CONTENIDO:

	RESUMEN
CAPÍTULO I	INTRODUCCIÓN
CAPÍTULO II	MARCO TEÓRICO
CAPÍTULO III	METODOLOGÍA
CAPÍTULO IV	RESULTADOS
CAPÍTULO V	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
	REFERENCIAS

**ATENTAMENTE.**

*Excelencia en Educación Tecnológica®*  
*“La Técnica al Servicio de la Patria”*

  
**C. FRANCISCO JAVIER GODÍNEZ GARCÍA**  
**JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



FJGG'ammc.



Blvd. Felipe Pescador No. 1930 Ote., Durango, Dgo., C.P. 34080 Tels. 618-818-69-36  
e-mail: [deposgrado@itdurango.edu.mx](mailto:deposgrado@itdurango.edu.mx) [tecnn.mx](http://tecnn.mx) | [itdur](http://itdur)



**2024**  
**Felipe Carrillo**  
**PUERTO**

## **Agradecimientos**

Agradezco a todos los catedráticos por compartir su conocimiento conmigo, en especial al Dr. Francisco Javier Godínez García quien fue mi tutor, al M.C. Eduardo Gamero Inda, al M.C. José Antonio Martínez Rivera y al Dr. Rubén Guerrero por guiarme en este camino.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la oportunidad que se me brindó, así como el apoyo económico otorgado para realizar este posgrado.

Agradezco a mi madre María del Rocío por ser mi motor de vida y un apoyo incondicional, a mi hermana Rocío Idali quien siempre me impulsó a seguir adelante y brindarme su apoyo y a mi padre Martín que a pesar de no estar físicamente en éste mundo siempre fue un ejemplo a seguir para mí.

## **Resumen**

El implementar la inseminación artificial en bovinos representa un gran avance en el sector ganadero, debido al mejoramiento genético del ganado que este supone.

Los criocongeladores son dispositivos que son esenciales en esta práctica, éstos siguen un protocolo estricto de congelación establecido para congelar pajillas con contenido de semen bovino para después ser almacenadas por tiempo indefinido y poder ser utilizadas en cualquier momento. En este estudio se diseñó un criocongelador de volumen de almacenamiento ajustable mediante el desplazamiento de un émbolo vertical y se calculó el coeficiente global de transferencia de calor hacia la cámara criogénica mediante el concepto de resistencias térmicas en las diferentes temperaturas de operación y diferentes volúmenes de almacenamiento del equipo, se comprobó la eficacia del aislamiento térmico empleado en la cámara criogénica y la masa de nitrógeno (LN<sub>2</sub>) mínima necesaria para la obtención de las temperaturas requeridas.

***Palabras clave:*** Criocongelador/Inseminación Artificial/Nitrógeno

## **Abstract**

*The implementation of artificial insemination in cattle represents a great advance in the livestock sector, due to the genetic improvement of cattle that this implies. Cryo-freezers are devices that are essential in this practice, they follow a strict freezing protocol established to freeze straws containing bovine semen so that they can be stored for an indefinite period and can be used at any time. In this study, an adjustable storage volume cryo-freezer was designed by means of a vertical plunger and the global coefficient of heat transfer to the cryogenic chamber was calculated by means of the concept of thermal resistances at the different operating temperatures and different storage volumes of the equipment. The effectiveness of the thermal insulation used in the cryogenic chamber and the minimum mass of nitrogen (LN<sub>2</sub>) necessary to obtain the required temperatures were verified.*

**Keywords:** *Cryo-freezer/Artificial insemination/Nitrogen*

## Tabla de contenido

Capítulo 1 Introducción .....	1
1.1 Antecedentes .....	2
1.2 Planteamiento del Problema .....	5
1.3 Justificación .....	6
1.4 Hipótesis de Investigación .....	6
1.5 Hipótesis Nula.....	6
1.6 Hipótesis Alternativa .....	7
1.7 Objetivo General.....	7
1.8 Objetivos Específicos.....	7
Capítulo 2 Marco Teórico .....	7
2.1 Criogenia.....	7
2.2 Gases Criogénicos.....	8
2.3 Nitrógeno .....	9
2.4 Gases y Líquidos.....	11
2.4.1 Líquido Comprimido y Líquido Saturado.....	11
2.4.2 Cambios de Estado.....	11
2.4.3 Ecuación de Estado de Gases Ideales .....	13
2.5 Calorimetría .....	14
2.5.1 Calor Latente de Fusión y Vaporización .....	14

2.6 Congeladores Criogénicos Automáticos.....	15
2.7 Criopreservación de Pajillas de Semen Bovino .....	17
2.7.1 Principio de Congelación de Material Biológico.....	17
2.8 Sistema Termodinámico .....	19
2.9 Propiedades de un Sistema.....	20
2.9.1 Propiedades Extensivas.....	21
2.9.2 Propiedades Intensivas.....	22
2.10 Ley Cero de la Termodinámica.....	24
2.11 Transferencia de Calor .....	24
2.11.1 Mecanismos de transferencia de calor .....	24
2.12 Resistencia Térmica .....	27
2.13 Coeficiente Global de Transferencia de Calor <b>Q</b> .....	27
2.14 Temperatura de Película .....	27
2.15 Números Adimensionales .....	28
2.15.1 Número de Nusselt.....	28
2.15.2 Número de Grashof.....	28
2.15.3 Número de Prandtl .....	29
2.15.4 Número de Rayleigh .....	29
2.16 Materiales.....	30
2.17 Resiliencia a Bajas Temperaturas .....	31



2.18 Aislamiento térmico.....	33
Capítulo 3 Metodología .....	35
3.1 Generalidades.....	35
3.2 Diseño de la Investigación .....	37
3.2.1 Teórico .....	37
3.2.2 Experimental .....	37
3.3 Enfoque de la Investigación.....	37
3.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos .....	37
3.5 Técnicas de Procesamiento de Datos .....	38
3.6 Herramientas Para el Procesamiento de Datos .....	38
3.7 Método de Investigación.....	38
3.8 Diseño .....	39
3.8.1 Características Geométricas.....	39
3.9 Formulación Matemática .....	45
3.9.1 Coeficiente Global de Transferencia de Calor Q.....	45
3.9.2 Cálculo de Resistencias Térmicas.....	46
3.9.3 Eficacia de Aislamiento Térmico.....	54
3.9.4 Masa de Nitrógeno en Cámara Criogénica .....	56
3.10 Programa de Congelación.....	56
3.11 Procedimiento Experimental.....	58

3.12 Censado de Temperatura.....	63
Capítulo 4 Resultados .....	67
4.1 Ganancia de Calor en Volúmenes de Almacenamiento.....	67
4.2 Masa de Nitrógeno .....	68
4.3 Gasto Volumétrico de Nitrógeno .....	69
Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones .....	70
Referencias.....	72

## Índice de figuras

Figura 1.1 Criocongelador criogénico programable .....	4
Figura 1.2 Pajillas para inseminación artificial.....	5
Figura 2.1 Nitrógeno líquido.....	10
Figura 2.2 Diferencia de espaciamento entre moléculas de sólidos, líquidos y gases.....	12
Figura 2.3 Cambios de fase en una sustancia .....	13
Figura 2.4 Cambio de temperatura con el tiempo.....	14
Figura 2.5 Principio de funcionamiento de criocongelador.....	15
Figura 2.6 Interior de criocongelador .....	16
Figura 2.7 Sistema termodinámico .....	19
Figura 2.8 Tipos de sistemas termodinámicos.....	20
Figura 2.9 Cámara criogénica y aislamiento térmico .....	34
Figura 3.1 Flujo de calor hacia cámara criogénica .....	36
Figura 3.2 Representación gráfica de criocongelador elaborado mediante el software SOLIDWORKS® .....	40
Figura 3.3 Corte longitudinal del equipo criogénico elaborado mediante el software SOLIDWORKS® .....	41
Figura 3.4 Corte transversal de cámara criogénica elaborado mediante el software SOLIDWORKS® .....	43
Figura 3.5 Representación gráfica de émbolo elaborado mediante el software SOLIDWORKS® .....	44

Figura 3.6 Protocolo de criogenización de pajillas de semen bovino .....	57
Figura 3.7 Protocolo de criogenización .....	58
Figura 3.8 Instalación de aislamiento térmico .....	59
Figura 3.9 Émbolo .....	60
Figura 3.10 Instalación del émbolo en equipo criogénico .....	61
Figura 3.11 Émbolo instalado .....	62
Figura 3.12 Censado de temperatura en depósito de nitrógeno .....	63
Figura 3.13 Censado de temperatura en cámara criogénica .....	64
Figura 3.14 Manómetro y válvula de alivio .....	65
Figura 3.15 Equipo criogénico y accesorios .....	66
Figura 4.1 Ganancia de calor en volúmenes de almacenamiento .....	67
Figura 4.2 Masa de nitrógeno mínima requerida para diferentes temperaturas y volúmenes de almacenamiento .....	68
Figura 4.3 Gasto volumétrico de N <sub>2</sub> .....	69

## Índice de tablas

Tabla 1 Materiales admitidos.....	31
Tabla 2 Fragilidad en materiales.....	32
Tabla 3 Conductividad térmica en aislamientos térmicos .....	34
Tabla 4 Características de equipo criogénico .....	42
Tabla 5 Suma de resistencias .....	53

## Capítulo 1 Introducción

El sector ganadero ocupa un lugar de gran importancia para el desarrollo económico del país, dentro de sus principales actividades están la cría, el tratamiento y la reproducción de animales domésticos con fines de producción para el consumo humano. La ganadería provee de productos cárnicos y la fabricación de lácteos, alimentos que se aprovechan en grandes cantidades en la población. Como actividad del sector primario en México, la cría y la explotación de animales tuvo un valor de 859,118 mdp en 2019, es decir, el 3.7% del PIB total del país. Al interior, la agricultura registró 555,717 mdp, o sea el 64.6%.

(INEGI, 2019)

Los datos anteriores evidencian la necesidad de prestar especial atención a los esfuerzos realizados para mantener y apoyar la creciente demanda de productos de origen bovino a través de la mejora en la calidad del ganado, lo que se ha buscado lograr mediante el uso de semen de toros con alto mérito genético. De ahí que tal necesidad ha resultado en el principal impulso para el desarrollo y perfeccionamiento de tecnologías de almacenamiento de semen bovino

(Santos, 2013)

La búsqueda de la mejora genética ha permitido que en la actualidad exista la tecnología adecuada para su alcance a través de una implementación accesible y eficiente, como en el caso de la inseminación artificial. A través de dicha técnica se puede inseminar a una gran población de vacas con un número reducido y selecto de sementales, lo que se traduce en el progreso genético del rebaño. Para lograr esta tarea, es imprescindible una criopreservación eficaz y exitosa del semen, sin embargo, llevar a cabo esta tarea es difícil, debido a que una gran cantidad de espermatozoides no sobrevive al proceso, la composición de un diluyente y una velocidad de

enfriamiento óptima juegan un rol muy importante para minimizar el estrés celular en los espermatozoides. El almacenamiento efectivo de las muestras seminales se lleva a cabo a temperaturas ultra bajas denominadas criogénicas. Estas temperaturas oscilan entre -100 y -273 grados centígrados, este último denominado cero absoluto. “Tal condición es necesaria ya que gracias a esta se posibilita su transportación a largas distancias y con ello, el material biológico se puede conservar durante tiempo indefinido, incluso después de la muerte del padre.”

(Santos, 2013)

Para lograr exitosamente la criopreservación de las muestras seminales se han diseñado equipos criogénicos, estos son dispositivos que se pueden programar para tener un descenso controlado en la temperatura. Y esto se logra siguiendo el protocolo de congelación correspondiente a cada muestra seminal, para así obtener una muestra congelada que mantenga sus propiedades casi inalteradas, por tanto, con la más alta calidad posible.

Los equipos criogénicos logran alcanzar temperaturas criogénicas utilizando gases licuados, generalmente Nitrógeno líquido (LN<sub>2</sub>) el cual es conducido hacia la cámara criogénica en donde se encuentra el material biológico. Existen equipos criogénicos con diferentes capacidades de almacenamiento y diferentes consumos de nitrógeno por ciclo de operación.

### **1.1 Antecedentes**

Mientras que la tecnología de refrigeración proporciona un medio para reducir la tasa de deterioro de los productos perecederos, el uso de temperaturas mucho más bajas ha demostrado ser un medio para almacenar organismos vivos en un estado de animación suspendida durante períodos prolongados. (Lean, 1995)

En la cría de ganado moderna, el semen criopreservado se utiliza habitualmente para la inseminación artificial. La criopreservación de esperma permite el almacenamiento a largo plazo

de las dosis de inseminación y asegura la reproducción en el momento deseado. Para criopreservar el semen, es necesario procesarlo cuidadosamente para preservar sus funciones vitales después de la descongelación. (Wolkers & Oldenhof, 2015)

Un método utilizado desde que fue inventada la inseminación artificial es el de llevar a cabo la criogenización de pajillas de semen bovino dentro de tanques criogénicos denominados dewar, con nitrógeno líquido estático siendo colocados a diferentes alturas de este, acercando dichas pajillas al nitrógeno líquido en intervalos de tiempo definidos hasta ser sumergidas totalmente en él. Existen referencias que describen varios ritmos de congelamiento que se han realizado experimentalmente y han alcanzado resultados aceptables. Sin embargo, este método tiene desventajas como baja motilidad post descongelación y curvas de enfriamiento difíciles de controlar. (Arango, 2017)

En el segundo método se emplean equipos criogénicos, en los cuales el proceso de criogenización es programable de acuerdo con los requerimientos de las pajillas obtenidas.

Estos equipos criogénicos modernos tienen opciones ilimitadas de programas de congelación  $+0,01$  a  $60$  ° C / minuto, con una precisión de  $0,01$  ° C, y rangos de temperatura de  $40$  ° C a  $-150$  ° C. Una desventaja para considerar es el alto consumo de nitrógeno por ciclo el cual es independiente de la cantidad de pajillas a criopreservar.



En la figura 1 se muestra un criocongelador programable con el cual se lleva a cabo la criogenización del material biológico.



*Figura 1.1 Criocongelador criogénico programable*

En la figura 2 se observan las pajillas utilizadas en el almacenamiento de las muestras de semen bovino



*Figura 1.2 Pajillas para inseminación artificial*

*Fuente: (Diez, 2017)*

## **1.2 Planteamiento del Problema**

El sector ganadero o comúnmente llamado ganadería es una parte del sector primario cuya actividad económica consiste en la cría, domesticación y explotación con fines de producción de diferentes especies de ganado tales como ovino, bovino o vacuno, porcino, caprino, equino, canicultura y avicultura. (López , 2019)

En la actualidad existe una creciente demanda de productos de origen bovino tales como cárnicos y lácteos, por este motivo es imprescindible recurrir a tecnologías para mejorar la calidad del ganado, como lo es la inseminación artificial.

El desarrollo de un criocongelador de almacenamiento ajustable supondría mayores oportunidades para ganaderos de escasos recursos de mejorar la calidad de su ganado.

### **1.3 Justificación**

La producción de muestras seminales es variable ya que depende de varios factores, además, es el factor que determina la capacidad de almacenamiento del criocongelador y el consumo de nitrógeno por ciclo de operación. Existe la posibilidad de tener baja producción de pajillas y una gran capacidad de almacenamiento, lo que supone un consumo excesivo de nitrógeno por ciclo de operación.

Con la finalidad de reducir costos de operación en la criogenización de las muestras seminales, se optó por diseñar un equipo criogénico con una cámara criogénica de volumen ajustable a la cantidad de pajillas existentes, de tal manera que el consumo de nitrógeno líquido será solo el necesario para llevar a cabo la criogenización del material biológico existente en tal volumen de almacenamiento.

### **1.4 Hipótesis de Investigación**

El desarrollo de un equipo criogénico de volumen ajustable reducirá sustancialmente el consumo de nitrógeno líquido por ciclo de operación en la criogenización de pajillas con contenido de semen bovino.

### **1.5 Hipótesis Nula**

El desarrollo de un equipo criogénico de volumen ajustable no reducirá sustancialmente el consumo de nitrógeno líquido por ciclo de operación en la criogenización de pajillas con contenido de semen bovino.

## **1.6 Hipótesis Alternativa**

El desarrollo de un equipo criogénico de volumen ajustable aumentará sustancialmente el consumo de nitrógeno líquido por ciclo de operación en la criogenización de pajillas con contenido de semen bovino.

## **1.7 Objetivo General**

-Evaluar el comportamiento térmico en contenedor criogénico de volumen ajustable utilizado para el almacenamiento de pajillas de semen bovino.

## **1.8 Objetivos Específicos**

-Evaluar las variables termodinámicas en la cámara criogénica durante el proceso de criogenización del material biológico.

-Optimizar el consumo de nitrógeno líquido en los ciclos de congelación dentro de la cámara criogénica para reducir costos de operación.

-Obtener una motilidad óptima del semen bovino post descongelación mediante el protocolo de congelación para ser usado efectivamente en inseminación artificial.

## **Capítulo 2 Marco Teórico**

### **2.1 Criogenia**

La criogenia es la ciencia que se ocupa de la producción y efectos de las temperaturas muy bajas. El prefijo “crío” proviene del griego *Kryos* que significa extremadamente frío y *genea* significa “nacimiento”. En la práctica la criogenia es la ciencia dedicada a la producción de gases, con temperaturas entre -100 y -273 grados centígrados. Actualmente se ha conseguido llegar hasta la temperatura alrededor de -270 grados centígrados.

En la criogenia se utilizan gases licuados a temperaturas extremadamente bajas. El comportamiento de los gases criogénicos en distintos ámbitos y con diferentes materiales genera un desarrollo industrial muy potente en varias áreas de ingeniería.

En el almacenamiento de material biológico, la congelación criogénica tiene ventajas sobre la congelación mecánica; tiempos de congelación más cortos, menor consumo de energía eléctrica, almacenamiento indefinido de material biológico, propiedades inalteradas del producto.

Por el contrario, la congelación por métodos mecánicos hace que haya importantes degradaciones en el producto debido a los largos tiempos de congelación.

(González Pérez, 2014)

## **2.2 Gases Criogénicos**

Existen once gases básicos que pueden licuarse a bajas temperaturas, pero los más usados por motivos de disponibilidad son cuatro; el nitrógeno (N), el oxígeno (O), el helio (He) y el hidrógeno (H). El gas que se utilizará será en función de la temperatura que se desee obtener y el comportamiento fisicoquímico de este. En la congelación y almacenamiento de productos biológicos (criobiología) se utiliza nitrógeno, ya que presenta una serie de ventajas sobre los demás gases criogénicos.

### 2.3 Nitrógeno

El nitrógeno (N<sub>2</sub>) es el componente más alto concentrado en el aire y representa un 78% en volumen, en condiciones normales de presión y temperatura. Este se obtiene por licuación del aire y destilación fraccionada del mismo, lo que lo convierte en un gas criogénico de gran abundancia.

El nitrógeno es un gas inodoro, incoloro e insípido, además de ser un gas que no promueve la combustión (inerte) y no es tóxico. Estas son las razones por las que el nitrógeno es el gas criogénico más utilizado en la criobiología.

En estado líquido y a la presión atmosférica tiene una temperatura criogénica de -196 °C.

Características del Nitrógeno a presión atmosférica:

- Temperatura de ebullición: -195,8 °C = 77,3 °K
- Calor latente de ebullición: 47,56 Kcal/kg
- Presión en punto crítico: 34 bar
- Temperatura en punto crítico: -146,9 °C = 16,2 °K
- Fórmula química: N<sub>2</sub>
- Número atómico: Z=7
- Masa molar: 28,08 g/mol
- Masa volumétrica TPN: 1,25 kg/m<sup>3</sup>

(González Pérez, 2014)

En la figura 3, se muestra el llenado de dewar para el almacenamiento de nitrógeno líquido.



*Figura 2.1 Nitrógeno líquido*

## **2.4 Gases y Líquidos**

### ***2.4.1 Líquido Comprimido y Líquido Saturado***

Cuando se habla de un líquido comprimido o subenfriado, se dice que no está en su punto de evaporación, debido a que no posee la temperatura y presión necesarias para llegar a la ebullición. Cuando un líquido está a punto de evaporarse, estamos ante un líquido saturado, ya que su temperatura y presión son las de su punto de ebullición, punto en el cual, si se agrega más energía, iniciara la evaporación del líquido. (Çengel Y. A., 2015)

### ***2.4.2 Cambios de Estado***

Las sustancias pueden existir en diferentes estados, el estado en el que se encuentra cualquier sustancia es afectada por la temperatura y presión. Los estados principales son sólido, líquido y gaseoso, cada uno con distinta estructura molecular. Los enlaces moleculares son más fuertes en los sólidos y más débiles en los gases, debido a que las moléculas en los primeros están más cercanas entre sí, y en los gases están separadas por distancias relativamente más grandes.

El espaciamiento molecular en la fase líquida es parecido al de la fase sólida, excepto en que las moléculas ya no están en posiciones fijas entre sí y pueden girar y trasladarse libremente. En los líquidos las fuerzas intermoleculares son más débiles en comparación con los sólidos, pero su fuerza es mayor comparada con la de los gases. (Çengel Y. A., 2015)



En la figura 4 se ilustra los diferentes espaciamentos entre moléculas entre sólidos, líquidos y gases

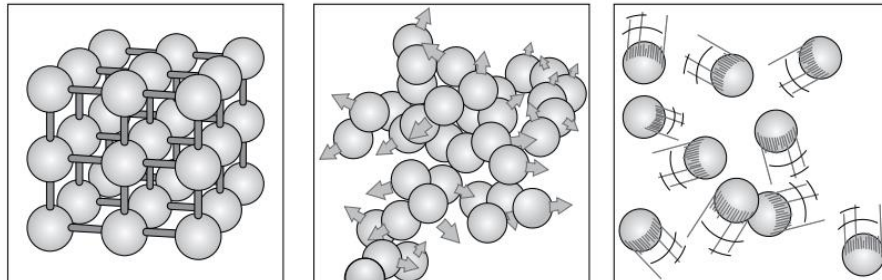


Figura 2.2 Diferencia de espaciamento entre moléculas de sólidos, líquidos y gases

Fuente: (Çengel Y. A., 2011)

Cuando existe un cambio de estado, pueden suceder tres situaciones y permanecer dos estados como se muestra en la figura

- 1.- Sólido + Líquido
- 2.- Líquido + vapor (gas)
- 3.- Sólido + vapor (gas) (Gonzales Pérez, 2013)

En la figura 5 observan los diferentes cambios de estado y las situaciones que pueden suceder en los cambios de fase

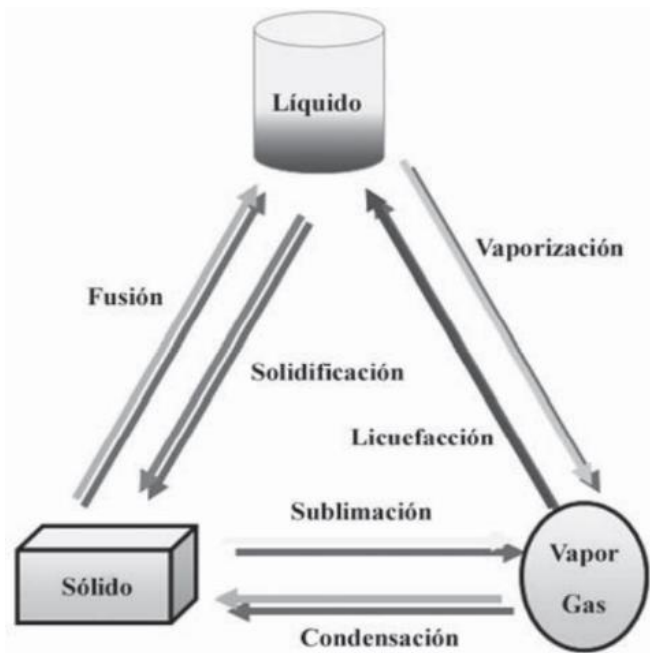


Figura 2.3 Cambios de fase en una sustancia

Fuente: (González Pérez, 2014)

### 2.4.3 Ecuación de Estado de Gases Ideales

Cualquier ecuación que relacione la presión, volumen y temperatura de una sustancia es llamada ecuación de estado. Existen varias ecuaciones de estado algunas simples y otras complejas, estas ecuaciones predicen el comportamiento p-v-t con bastante precisión. La siguiente ecuación será la utilizada.

$$PV = \frac{mRT}{M} \quad (2)$$

En donde:

P= Presión (Atm)

V=Volumen (L)

R= Constante de gases ideales (L·Atm/mol·K)

m= masa (g)

## 2.5 Calorimetría

### 2.5.1 Calor Latente de Fusión y Vaporización

“El calor latente de fusión o vaporización es la cantidad de energía necesaria para derretir o evaporar una masa unitaria de líquido saturado.” (Yunus A. Çengel M. A., 2015)

La palabra latente significa oculta, cuando el cambio de fase es de sólido a líquido es el calor latente de fusión, y cuando el cambio de fase es de líquido a gas es calor latente de vaporización.

La energía requerida es  $Q = mL$  en donde  $m$  es la masa y  $L$  es el calor específico latente de fusión o vaporización requerido para producir el cambio de fase. (Zohuri, 2018)

En la figura 6 se observa el cambio de fase de una sustancia que se da con incremento en la temperatura

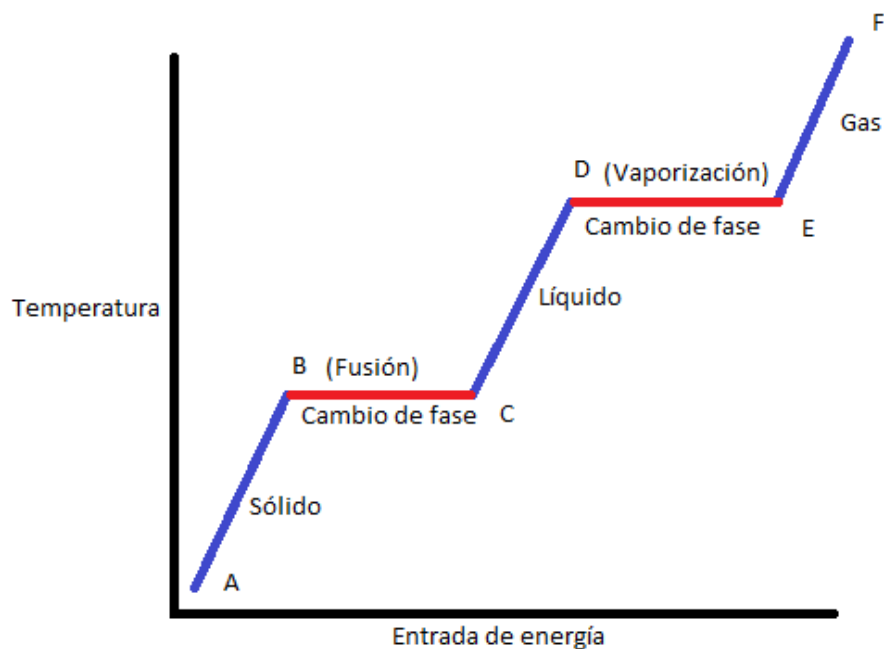
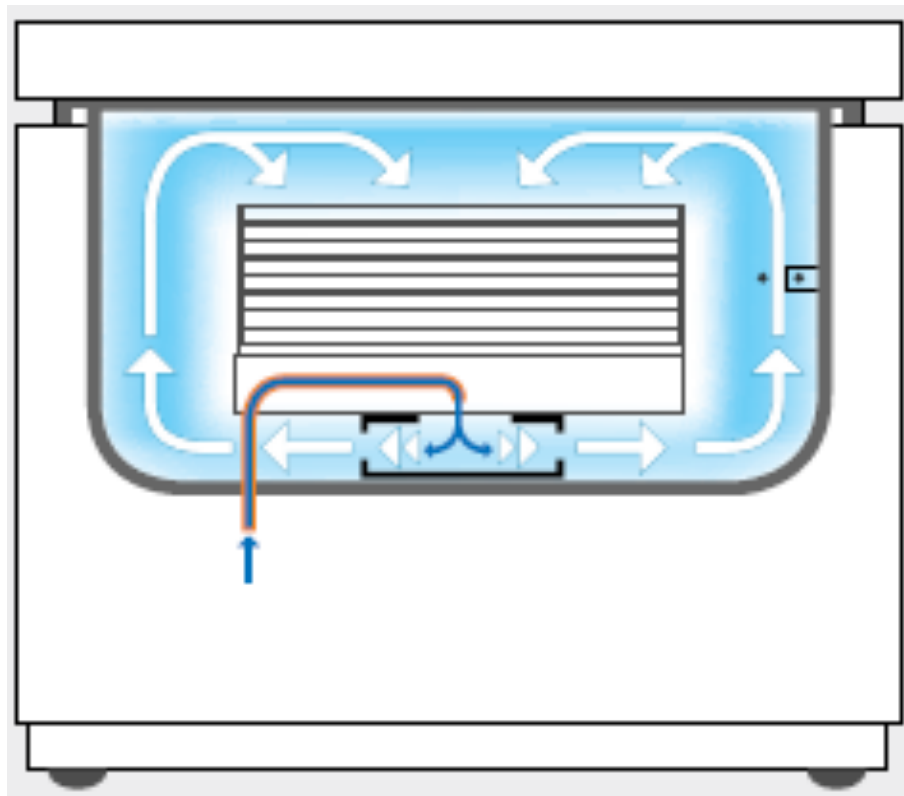


Figura 2.4 Cambio de temperatura con el tiempo

## 2.6 Congeladores Criogénicos Automáticos

El principio de diseño de congeladores criogénicos es de un contenedor rectangular doble, dentro de la carcasa (contenedor grande) está la cámara criogénica (contenedor pequeño) donde se lleva a cabo la congelación del material biológico, entre estos existe un aislamiento térmico de gran eficacia. En la figura 7 se muestra un dibujo de un equipo criogénico programable.

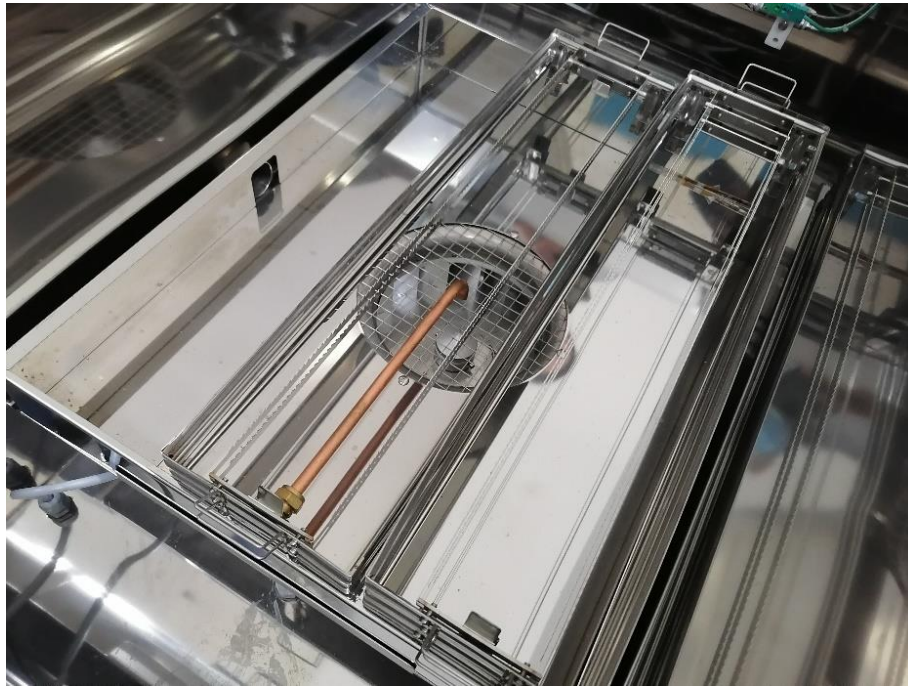


*Figura 2.5 Principio de funcionamiento de criocongelador*

*Fuente: (imvtechnologies)*

El congelador tiene una tapa que cierra herméticamente la cámara criogénica, en esta existen diferentes niveles (racks) donde se colocan las pajillas obtenidas.

El método de congelación utilizado en los equipos criogénicos es conducir nitrógeno en estado líquido a la cámara criogénica mediante una tubería proveniente de un depósito externo criogénico. El nitrógeno líquido es conducido a la cámara criogénica, cae al eje de una turbina que gira a 2750 rpm lo que ocasiona que al contacto con el ambiente y la turbina el nitrógeno se gasifique instantáneamente, lo que garantiza que el nitrógeno además de cambiar de estado será esparcido uniformemente en la cámara criogénica. En la figura 8 se observa el interior de un equipo criogénico programable



*Figura 2.6 Interior de criocongelador*

*Nota. Se observan algunos componentes existentes dentro de la cámara criogénica, como turbina de expansión, conducto de nitrógeno, racks de almacenamiento.*

## **2.7 Criopreservación de Pajillas de Semen Bovino**

La criopreservación del semen bovino es necesaria en la inseminación artificial, la cual es una práctica que permite la utilización y propagación de animales genéticamente superiores y conduce al progreso genético del rebaño. El semen resultado de la eyaculación es obtenido del ganado mediante una vagina artificial, una vez extraído se valoran varios aspectos como concentración y motilidad espermática, después de que la valoración del semen fresco es completada, el semen se diluye en una solución para proteger el esperma, que contiene generalmente yema de huevo, antibióticos y un agente crioprotector, después de la dilución, el esperma es enfriado de temperatura ambiente a 4°C y es mantenido así por aproximadamente 2.5 horas, para después ser depositado en pajillas mediante una máquina selladora luego se coloca en racks dentro de un congelador criogénico para ser congelado siguiendo velocidades de enfriamiento controladas y escalonadas hasta la temperatura de -150 °C y se almacena por tiempo indefinido. (Hastuti, 2016)

Durante el proceso de congelación y descongelación del semen, el esperma puede ser dañado, ya que se forman cristales de hielo intracelulares dentro de este si no se llevan a cabo velocidades de enfriamiento óptimas. (Dalal, Kumar, Dutt, Singh, & Chandolia, 2018)

### ***2.7.1 Principio de Congelación de Material Biológico***

Los congeladores criogénicos modernos usados en el congelamiento de pajillas de semen bovino permiten al usuario personalizar y controlar cada fase en el descenso de la temperatura de acuerdo con los requisitos de la muestra. Para maximizar la fertilidad de las células preservadas, las etapas en el descenso en la temperatura deben ser controladas cuidadosamente, existen diversos factores para que el esperma sufra daños, uno de los más comunes es la formación de cristales de hielo intracelulares. Por lo que el descenso en la temperatura debe estar

perfectamente controlado, el cual debe de adecuarse a las etapas de congelación correspondientes:

#### 1.-Refrigeración líquida:

Durante la etapa líquida (previa al punto de cristalización), la velocidad de enfriamiento debe ser regular para evitar cualquier choque térmico que pueda afectar al material biológico.

#### 2.-Estado líquido a cristalino:

La etapa de formación de cristales, caracterizada por un aumento repentino de la temperatura, es la etapa más crítica en el proceso de congelación.

#### 3.- Enfriamiento hacia cristal estabilizado

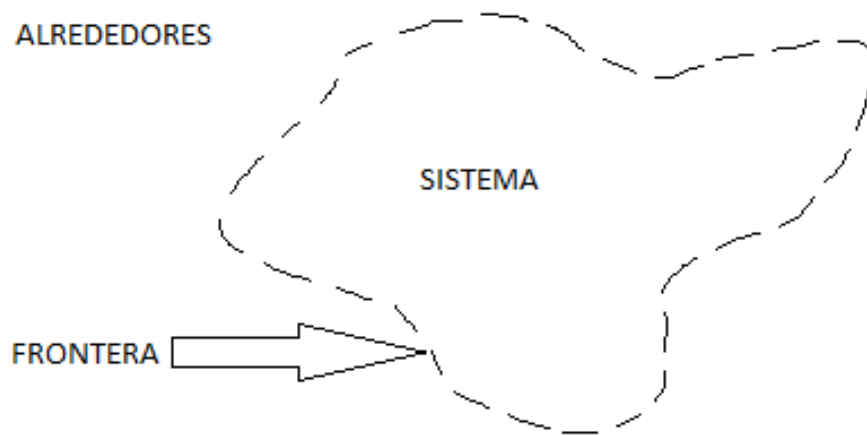
En esta etapa crítica y a la temperatura de  $-110^{\circ}\text{C}$ , los intercambios de calor entre el medio ambiente y el material biológico continúan. El pico más corto posible en la caída de temperatura junto con una congelación uniforme y a alta velocidad, minimiza la destrucción de las membranas celulares asegurando hasta un 10% más espermatozoides viables en comparación con métodos convencionales de criogenización.

#### 4.- Etapa estable desde $-110^{\circ}\text{C}$ hasta $-150^{\circ}\text{C}$

Es en esta etapa donde se congelan las pajillas a  $-150^{\circ}\text{C}$  antes de ser removidas para luego ser depositadas en un contenedor criogénico para su almacenamiento indefinido. Una vez descargadas las pajillas se inicia un programa de recalentamiento y secado de la cámara criogénica mediante una resistencia eléctrica que genera hasta 2,500 Watts, para así volver a reutilizar el equipo en un nuevo ciclo de refrigeración. (Digitcool Programmable automatic freezers , s.f.)

## 2.8 Sistema Termodinámico

Un sistema es una cantidad de materia o una región en el espacio elegida para análisis. La masa o región en las afueras del sistema se define como alrededores. La superficie real o imaginaria que divide al sistema y los alrededores es denominada frontera. En la figura 9 se observa un sistema, su frontera y los alrededores



*Figura 2.7 Sistema termodinámico*

Un sistema cerrado posee una cantidad determinada de masa y ninguna otra puede cruzar su frontera. Es decir, no entra ni sale masa de un sistema cerrado. Pero la energía, en forma de calor (energía), o trabajo puede cruzar la frontera. Existen casos en los que se impide que la energía cruce la frontera, entonces se trata de un sistema cerrado. (Çengel Y. A., 2015)



Existen diferentes tipos de sistemas termodinámicos, en la figura 10 se observa un esquema de los diferentes tipos de sistemas termodinámicos que existen.

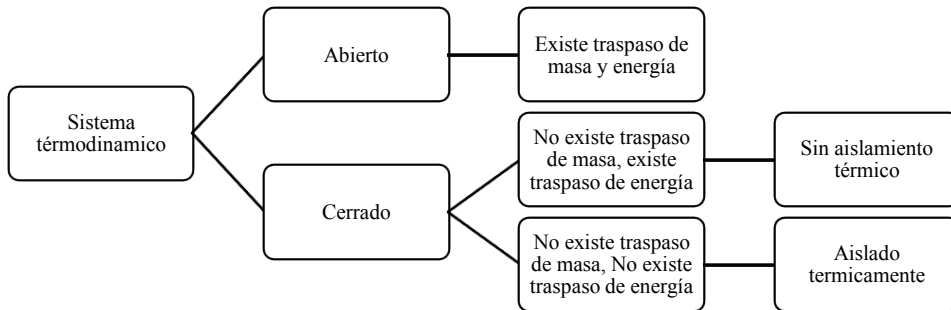


Figura 2.8 Tipos de sistemas termodinámicos

## 2.9 Propiedades de un Sistema

Un sistema termodinámico posee propiedades que lo conforman, un ejemplo son la temperatura, la presión y el volumen. Existen propiedades extensivas e intensivas, las extensivas son aquellas que dependen del tamaño o extensión del sistema y las intensivas son aquellas que no dependen de la masa del sistema. (Çengel Y. A., 2015)

### **2.9.1 Propiedades Extensivas**

**2.9.1.1 Masa.** “La masa ( $m$ ) es la cantidad de materia que contiene un objeto. La masa, a diferencia del peso, no depende de la gravedad. La unidad del sistema internacional para la masa es el kilogramo.” **(Toda materia, 2021)**

**2.9.1.2 Volumen.** “El volumen ( $v$ ) es la medida del espacio tridimensional que ocupa un objeto. En el sistema internacional la unidad de volumen es el metro cúbico ( $m^3$ ). También se usa el litro.” **(Toda materia, 2021)**

**2.9.1.3 Calor.** El calor ( $Q$ ) es la transferencia de energía en la cual incrementa la actividad molecular y se da a través de la frontera del sistema hacia o desde el sistema, es dada por una diferencia de temperatura entre el sistema y sus alrededores, el calor se mide en Joules o calorías. **(Zohuri, 2018)**

**2.9.1.4 Entalpía.** “La entalpía ( $h$ ) es la cantidad de energía que un sistema cede o absorbe de su alrededor. En el sistema internacional la unidad de entalpía es joules (J).” **(Toda materia, 2021)**

**2.9.1.5 Entropía.** La entropía ( $S$ ) se define como una medida de desorden molecular, o aleatoriedad molecular, en pocas palabras esta define el nivel de desorden de un sistema, sus unidades son  $\text{kJ/kg}$ . **(Yunus A. Çengel M. A., 2015)**

**2.9.1.6 Energía interna.** La energía interna ( $U$ ) es una medida de la energía interna almacenada dentro de un material por unidad de volumen. Para la mayoría problemas de transferencia de calor, esta energía consiste solo en energía térmica. La cantidad de la energía térmica almacenada en un cuerpo se manifiesta por su temperatura. **(Zohuri, 2018)**

**2.9.1.7 Difusividad térmica.** La difusividad térmica ( $\alpha$ ) es una propiedad material que describe la velocidad a la que el calor se difunde a través de un cuerpo. Eso es una función de la conductividad térmica del cuerpo y su calor específico. Una térmica alta conductividad aumentará la difusividad térmica del cuerpo, ya que el calor podrá conducir a través del cuerpo rápidamente. sus unidades son  $m^2/s$ .

(Zohuri, 2018)

**2.9.1.8 Expansividad térmica.** La expansión térmica es la tendencia de la materia a cambiar en forma, área y volumen en respuesta a los cambios de temperatura. La temperatura es una función monótona de la energía cinética molecular promedio de una sustancia. Cuando un material se calienta la energía cinética de sus moléculas aumenta, sus moléculas comienzan a vibrar o moverse más, por el contrario, si se enfría, el movimiento molecular es menor y el material se contrae.

(Zohuri, 2018)

**2.9.1.9 Coeficiente de expansión volumétrica.** El Coeficiente promedio de expansión volumétrica o cúbica ( $\beta$ ) es el aumento de volumen que experimenta un cuerpo cuando su temperatura es incrementada en un grado Celsius (**Rodriguez, 2015**)

## **2.9.2 Propiedades Intensivas**

**2.9.2.1 Presión.** La presión (P) se define como la fuerza normal que ejerce un fluido por unidad de área y tiene como unidad los Newton por metro cuadrado ( $N/m^2$ ) también conocido como pascal (Pa). (**Yunus A. Çengel M. A., 2015**)

**2.9.2.2 Temperatura.** La temperatura (T) está relacionada con el movimiento de las moléculas que conforman a un sistema. Conforme la temperatura del sistema aumenta, la actividad molecular también se incrementa; es decir, la velocidad promedio de las moléculas del sistema aumenta, y tiene diferentes escalas de medición, las más usadas son el grado centígrado ( $^{\circ}\text{C}$ ) y el grado Kelvin (K). (Yunus A. Çengel M. A., 2015)

**2.9.2.3 Punto de ebullición.** A una determinada presión, la temperatura a la que una sustancia pura cambia de fase se llama temperatura de saturación. Del mismo modo, a una temperatura determinada, la presión a la que una sustancia pura cambia de fase se llama presión de saturación. (Yunus A. Çengel M. A., 2015)

**2.9.2.4 Calor específico.** “El calor específico ( $C_p$ ) es una propiedad material que indica la cantidad de energía que un cuerpo almacena para cada grado de aumento de la temperatura, por unidad de masa. Sus unidades son J/kg-K” (Zohuri, 2018)

**2.9.2.5 Viscosidad cinemática.** “La viscosidad cinemática ( $\nu$ ) se define como la relación que existe entre la viscosidad dinámica y la densidad, sus unidades son  $\text{m}^2/\text{s}$ ”

**2.9.2.6 Viscosidad dinámica.** “La viscosidad dinámica ( $\mu$ ) también llamada viscosidad absoluta, es la resistencia interna entre las moléculas de un fluido en movimiento y determina las fuerzas que lo mueven y deforman.” (significados, 2022)

**2.9.2.7 Conductividad térmica.** “La conductividad térmica ( $k$ ) es una propiedad material que describe la velocidad a la que fluye el calor dentro de un cuerpo durante una diferencia de temperatura dada. Sus unidades son  $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ .”

(Zohuri, 2018)

## **2.10 Ley Cero de la Termodinámica**

Si dos objetos están en contacto y uno de ellos tiene una temperatura mayor que el otro, el calor se transmitirá del cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura, hasta que los dos alcancen el equilibrio térmico, lo que significa que los dos cuerpos tendrán la misma temperatura, hasta entonces la transferencia de calor termina. El concepto de equilibrio térmico es fundamental para entender la ley cero de la termodinámica, la cual dice:

“Si el objeto A se encuentra en equilibrio térmico con el objeto B y el objeto B se encuentra en equilibrio térmico con el objeto C, entonces el objeto A y el objeto C están en equilibrio térmico.” (Çengel Y. A., 2015)

## **2.11 Transferencia de Calor**

Esta ciencia determina las diferentes razones de transferencia de calor hacia un sistema y desde este, por lo tanto, los tiempos de enfriamiento o de calentamiento, la variación de temperatura. El requisito básico para que ocurra es la diferencia de temperaturas, el desequilibrio térmico.

(Yunus A. Çengel A. J., 2011)

### ***2.11.1 Mecanismos de transferencia de calor***

“El calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. Todos los mecanismos de transferencia de calor requieren de una existencia de una diferencia de temperatura y todos ellos ocurren del medio que posee la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja.” (Yunus A. Çengel A. J., 2011)

### 2.11.1.1 Convección

Esta es dada entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que se encuentra en movimiento y comprende la combinación de los efectos de la conducción y el movimiento de fluidos. Básicamente entre más rápido sea el movimiento del fluido mayor será la transferencia de calor. Se le llama convección natural o libre cuando no existe ningún elemento que force la convección entre la superficie sólida y el fluido y convección forzada cuando el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios artificiales.

(Yunus A. Çengel A. J., 2011)

**2.11.1.1.1 Ley de enfriamiento de Newton.** El efecto global de la convección se puede expresar como el flujo de calor transferido multiplicado por la diferencia global de temperaturas entre la pared y el fluido,  $A$  es el “área de la superficie”, la magnitud  $h$  se denomina “coeficiente de transferencia de calor por convección”

$$q = hA(T_p - T_\infty) \quad (2.1)$$

**2.11.1.1.2 Coeficiente de transferencia de calor por convección “ $h$ ”.** El coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ) natural o forzada es una fuerte función de la velocidad del fluido. Los coeficientes de convección son más altos en la convección forzada que en la natural debido a las velocidades más altas del fluido.

(Yunus A. Çengel A. J., 2011)

Es el parámetro más complicado de obtener en la transferencia de calor por convección, ya que depende de aspectos como:

- Configuración geométrica
- Naturaleza del fluido (gas ó líquido)
- Propiedades físicas (densidad, viscosidades, etc)

- Condiciones del flujo (temperatura, presión, velocidad)
- Flujo laminar o Flujo turbulento
- Flujo interno o externo
- Si existe cambio de fase

(Mejía, 2019 )

### **2.11.1.2 Conducción**

Es la transferencia de energía de las partículas con más energía de una sustancia hacia las adyacentes con menos energía, como resultado de interacciones entre esas partículas.

La conducción se da en los sólidos, líquidos o gases. (Yunus A. Çengel A. J., 2011)

**2.11.1.2.1 Ley de Fourier.** El físico-matemático Joseph Fourier desarrolló la siguiente fórmula utilizada en la transferencia de calor por conducción conocida como “Ley de Fourier”

$$q = -KA \frac{dT}{dX} \quad (2.2)$$

En donde

A= área

k= conductividad térmica

$\frac{dT}{dX}$  = gradiente de temperatura en la dirección del flujo de calor

(Holman, 1998 )

### **2.11.1.3 Radiación**

La radiación es energía que es transmitida mediante radiación electromagnética. Todos los cuerpos emiten radiación electromagnética como resultado de la transición de electrones dentro de sus átomos. (Zohuri, 2018)

## 2.12 Resistencia Térmica

Esta mide la razón de transferencia de calor de un medio teniendo en cuenta la configuración geométrica y las propiedades térmicas del medio, esta se mide en ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ). La ecuación para la conducción de calor a través de una placa plana es la siguiente:

$$Q_{\text{cond-pared}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{pared}}} \quad (2.3)$$

Donde:

$$R_{\text{pared}} = \frac{L}{kA} \quad (2.4)$$

L= Longitud

k= Conductividad térmica

A= Área

(Yunus A. Çengel A. J., 2011)

## 2.13 Coeficiente Global de Transferencia de Calor $\dot{Q}$

“El coeficiente global de transferencia de calor o ganancia de calor se puede definir como el cociente entre la diferencia total de temperaturas y la suma de las resistencias térmicas”:

(Holman, 1998 )

$$\dot{Q} = \frac{(T_1 - T_2)}{R_1 + R_2 + R_3 + R_n \dots} \quad (2.5)$$

## 2.14 Temperatura de Película

La temperatura de película ( $T_f$ ) definida como la media aritmética entre la pared y la temperatura de la corriente libre

$$T_f = \frac{T_p + T_{\infty}}{2} \quad (2.6)$$



## 2.15 Números Adimensionales

### 2.15.1 Número de Nusselt

El llamado número de Nusselt en honor a Wilhelm Nusselt, es quizás el grupo adimensional más importante para la transferencia de calor por convección. El número de Nusselt representa la relación entre la transferencia de calor por convección y la conducción pura y viene dado por:

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (2.7)$$

En donde:

$h$  = coeficiente de transferencia de calor por convección  $W/m^2C$

$L$  = Longitud  $m$

$k$  = conductividad térmica  $W/m^{\circ}C$

(Zohuri, 2018)

### 2.15.2 Número de Grashof

“El número de Grashof se entiende, físicamente, como un grupo adimensional que representa el cociente entre las fuerzas de flotabilidad y las fuerzas viscosas en la corriente de convección natural.” (Holman, 1998 )

$$Gr = \frac{g \cdot \beta (T_s - T_{\infty}) L^3}{\nu^2} \quad (2.8)$$

En donde:

$g$  = Constante gravitacional  $m/s^2$

$\beta$  = Temperatura de película  $K$

$(T_s - T_{\infty})$  = Diferencia de temperatura  $K$

$L$  = Longitud característica  $m$

$\nu$  = Viscosidad Cinemática  $m^2/s$

### 2.15.3 Número de Prandtl

El espesor relativo de las capas límite de velocidad y térmica es por medio de este número adimensional y está basado en propiedades a la temperatura de película

$$Pr = \frac{\text{Difusividad molecular de la cantidad de movimiento}}{\text{Difusividad molecular del calor}} = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.9)$$

Donde:

$\nu$ : viscosidad cinemática  $m^2/s$

$\alpha$ : difusividad térmica  $m^2/s$

(Çengel Y. A., 2015)

### 2.15.4 Número de Rayleigh

El producto del número de Grashof por el número de Prandtl se denomina número de Rayleigh

$$Ra = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu \alpha} = Gr \cdot Pr \quad (2.10)$$

Donde

$g$  = Constante gravitacional  $m/s^2$

$\beta$  = Temperatura de película K

$(T_s - T_\infty)$  = Diferencia de temperatura K

$L$  = Longitud característica

$\nu$ : Viscosidad cinemática  $m^2/s$

$\alpha$ : Difusividad térmica  $m^2/s$

## 2.16 Materiales

El conocimiento de las propiedades físicas de los materiales a bajas temperaturas es de gran importancia en el diseño y construcción de equipos criogénicos.

A menudo, la elección de los materiales para la construcción de equipos criogénicos se dictará teniendo en cuenta las propiedades mecánicas y físicas, como la conductividad térmica (transferencia de calor a lo largo de un miembro estructural), expansividad térmica (expansión y contracción durante el ciclo entre temperatura ambiente y temperaturas bajas), calor específico (capacidad de almacenamiento de energía)

(M. Flynn, 1989)

Los materiales utilizados en sistemas criogénicos deben ser resilientes a bajas temperaturas, resistentes a la corrosión y propiciar un control preciso en la temperatura del sistema de refrigeración, estos son puntos críticos del sistema.

Los equipos criogénicos deben construirse en su mayoría de materiales adecuados teniendo en cuenta los márgenes de temperatura y si fuese en caso presión en los que operará el equipo criogénico, estos deben ser en general resistentes a la corrosión y resistentes a la fragilización. Dependiendo de la función de cada elemento del equipo criogénico se elegirá un material que cumpla con las propiedades mecánicas y térmicas para realizar su función correctamente y sin afectar el control de temperatura en el equipo.

En el caso de estructuras metálicas tales como cámara criogénica, tuberías, carcaza exterior, embolo etcétera. En general se admiten los materiales que se muestran en la tabla 1

Tabla 1 Materiales admitidos

Material	Características
Aceros no aleados o de baja aleación	En aplicaciones a temperaturas ambientales. Aceros no aleados de grano fino hasta una temperatura de -60°C
Aceros aleados de grano fino	Aceros aleados hasta una temperatura de -60°C
Aceros al níquel	Con contenido de 0.5 a 9% de níquel hasta -196°C en función del contenido de níquel
Aceros austeníticos al cromo níquel (Aceros inoxidable)	Aceros austeníticos al cromo-níquel hasta una temperatura de -270°C
Aluminio o aleaciones de aluminio	Con un mínimo de 99.5% de aleación de aluminio
Cobre desoxidado	Con un mínimo de pureza o aleaciones de cobre con más del 50% de cobre
Titanio y aleaciones	En general

### 2.17 Resiliencia a Bajas Temperaturas

Varias de las propiedades de los materiales cambian con la temperatura de una manera repetible y predecible, tal es el caso de la fragilización de los materiales a temperaturas criogénicas por ese motivo la resiliencia de los materiales en la construcción y diseño de equipos criogénicos debe estar garantizada.

Por este motivo el rango de elección de materiales en el diseño criogénico está limitado por el problema de fragilización a baja temperatura. Existen materiales que se vuelven frágiles a temperaturas criogénicas, lo que puede resultar en una falla en el diseño del equipo refrigerador.

Por ello es importante prever los rangos de temperatura y presión los cuales serán repetitivos en uso del equipo criogénico. La elección de los materiales no debe afectar el rendimiento requerido del sistema de refrigeración y la eficiencia del enfriamiento.

En la tabla 2 se mencionan materiales que permanecen dúctiles a bajas temperaturas si son dúctiles a temperatura ambiente y materiales que se vuelven frágiles a bajas temperaturas.

*Tabla 2 Fragilidad en materiales*

Materiales que permanecen dúctiles a bajas temperaturas, si son dúctiles a temperatura ambiente	Materiales que se vuelven frágiles a bajas temperaturas
<p>Cobre, Níquel, Aleaciones Cobre-níquel, Aluminio y sus aleaciones, Aceros auténticos que contengan más del 7% de níquel.</p> <p>Zirconio, Titanio, Metales Fcc, politetrafluoroetileno</p>	<p>Acero , Carbón y aceros de baja aleación, Molibdeno, Niobio, Zinc, la mayoría de los metales bcc, la mayoría de los plásticos</p>

*Tabla adaptada de (Zohuri, 2018)*

## 2.18 Aislamiento térmico

Con el objetivo de minimizar la pérdida de energía criogénica dentro de los equipos criogénicos, es necesario utilizar aislamientos térmicos, los cuales protegen toda la superficie que envuelve la cámara criogénica, con el fin de evitar la interacción de temperaturas entre la cámara criogénica y el medio ambiente. El aislamiento térmico y la transferencia de calor son extremadamente importantes en equipos criogénicos. Los problemas se agravan a medida que desciende la temperatura. En el diseño del equipo criogénico se debe considerar el coeficiente de conductividad térmica del aislamiento, así como de los materiales que lo rodean. El calor puede fluir a través de un aislamiento por la acción simultánea de varios mecanismos diferentes:

- Conducción sólida a través de los materiales que componen el aislamiento y conducción entre los componentes individuales del aislamiento a través de áreas de contacto.
- Conducción de gas en espacios vacíos contenidos dentro del material aislante.
- Radiación a través de los espacios vacíos y a través de los componentes del aislamiento.

Debido a que estos mecanismos de transferencia de calor operan simultáneamente e interactúan entre sí, no es posible superponer los mecanismos separados para obtener una conductividad térmica total. La conductividad térmica de un aislamiento no es estrictamente definible analíticamente en términos de variables como temperatura, densidad y propiedades físicas de los materiales componentes. La elección del aislamiento usado en el equipo criogénico depende de varios factores como robustez, volumen, efectividad del aislamiento, economía. En la figura 11 se observa una ilustración de una cámara criogénica, el aislamiento térmico de esta y la temperatura externa  $T_1$  y la temperatura interna  $T_2$

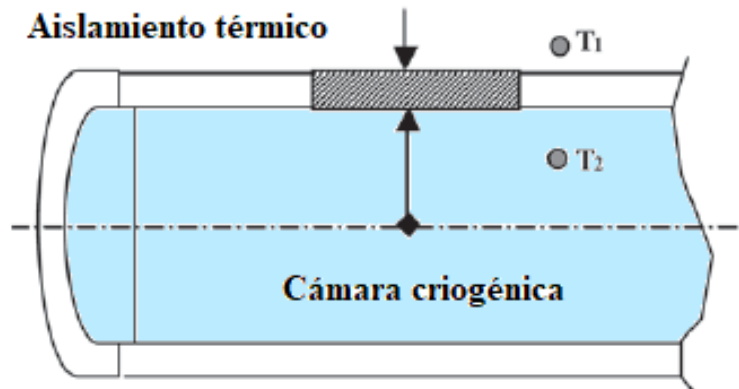


Figura 2.9 Cámara criogénica y aislamiento térmico

Fuente: (González Pérez, 2014)

El aislamiento criogénico se puede subdividir convenientemente en cinco categorías: (1) vacío, (2) aislamiento multicapa, (3) aislamiento en polvo y fibroso, (4) aislamiento de espuma y (5) aislamientos para fines especiales. (González Pérez, 2014)

En la tabla 3 se observa los diferentes tipos de aislamientos utilizados en equipos criogénicos.

Tabla 3 Conductividad térmica en aislamientos térmicos

Coeficientes conductividad sin vacío									
Unidad	mW/cm K	W/m K	W/cm K	kc/h m C	cal/cm s C	BTUin/ft <sup>2</sup> h	BTU/ft h F	BTU/in h	BTU/ft h R
Perlita fina	250	0,0250	0,000250	0,0215	0,0000597	0,1734	0,0144	0,0012039	0,0207
Poliuretano	291	0,0291	0,000291	0,0250	0,0000695	0,2018	0,0168	0,0014014	0,0241
Poliestireno	291	0,0291	0,000291	0,0250	0,0000695	0,2018	0,0168	0,0014014	0,0241
Masa vidrio	500	0,0500	0,000500	0,0430	0,0001194	0,3467	0,0289	0,0024079	0,0415
Fibra vidrio	250	0,0250	0,000250	0,0215	0,0000597	0,1734	0,0144	0,0012039	0,0207
Santocel	170	0,0170	0,000170	0,0146	0,0000406	0,1179	0,0098	0,0008187	0,0141
Carbonato mg	250	0,0250	0,000250	0,0215	0,0000597	0,1734	0,0144	0,0012039	0,0207
Lana vidrio	330	0,0330	0,000330	0,0284	0,0000788	0,2288	0,0191	0,0015892	0,0274

Tabla tomada de (González Pérez, 2014)

## **Capítulo 3 Metodología**

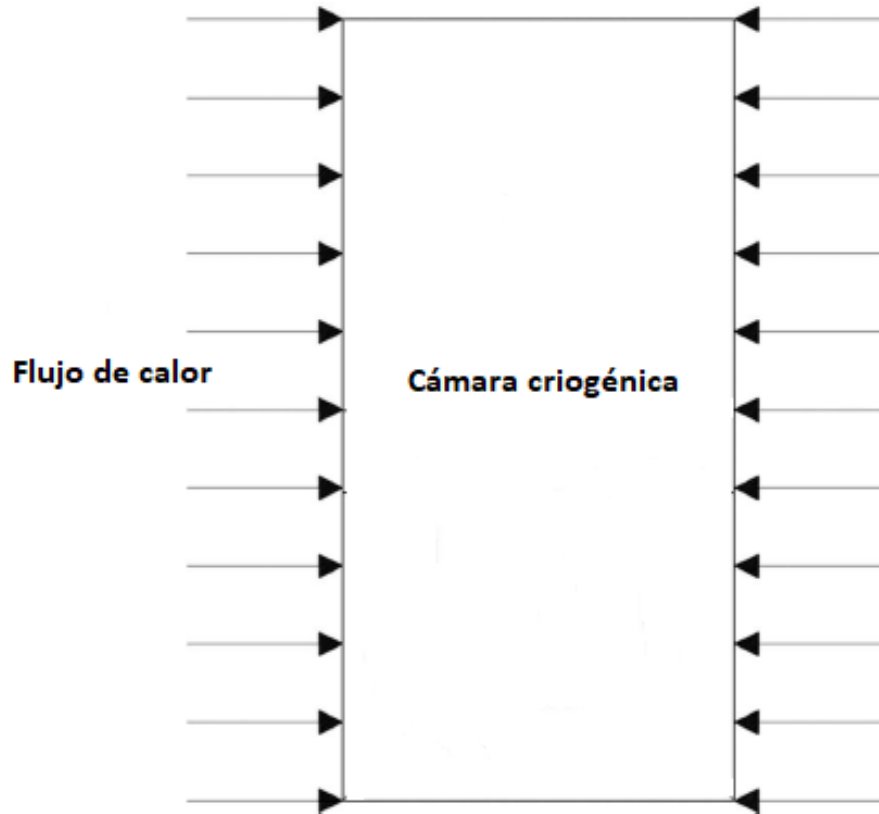
Se define metodología como: “Una herramienta en el campo de la investigación, que por su estructura y contenidos abordan los elementos básicos que guían un proyecto de manera metodológica y didáctica.”

(Secretaria de Marina , s.f.)

### **3.1 Generalidades**

Por norma general se sabe que el calor siempre fluye del objeto caliente al frío mediante tres posibles mecanismos de transferencia; conducción, convección y radiación. En el diseño de un equipo criogénico el principal problema es reducir el flujo de calor hacia este, ya que el calor fluye desde el ambiente hacia la cámara criogénica del equipo por convección natural con el aire atmosférico que lo rodea, lo que ocasiona que el control en el descenso en la temperatura se vuelva complejo debido al gradiente de temperatura entre la cámara y el ambiente. El calor que fluye a la cámara afecta directamente al control de temperatura y el consumo de nitrógeno líquido (LN<sub>2</sub>) utilizado en cada ciclo de operación. En la figura 12 se ilustra el flujo de calor hacia la cámara criogénica por convección natural con el ambiente.





*Figura 3.1 Flujo de calor hacia cámara criogénica*

*Figura adaptada de (Vishnu S B, 2019)*

Dado lo anterior, es imprescindible que los equipos criogénicos cuenten con un aislamiento térmico eficaz que permita seguir el protocolo establecido en la congelación de pajillas de semen bovino y con ello, tener un buen rendimiento de nitrógeno por ciclo de operación.

El equipo criogénico cuenta con una válvula de alivio de presión, una conexión para la entrada de nitrógeno y una turbina de expansión ubicada la superficie del émbolo para homogenizar el nitrógeno en fase gaseosa dentro de la cámara criogénica.

## **3.2 Diseño de la Investigación**

La caracterización térmica del equipo criogénico se realizó mediante dos enfoques:

### ***3.2.1 Teórico***

En el cual se calculó el coeficiente global de transferencia de calor, la masa de nitrógeno en fase gaseosa existente en la cámara criogénica y el gasto volumétrico de nitrógeno requerido.

### ***3.2.2 Experimental***

En el cual se diseñaron los componentes del equipo; cámara criogénica, aislamiento térmico, tapa hermética, émbolo, carcasa externa. Se evaluó el comportamiento del nitrógeno dentro de la cámara y los efectos que este tiene en los materiales de los que está compuesto el equipo.

## **3.3 Enfoque de la Investigación**

El presente estudio corresponde al enfoque de tipo cuantitativo puesto que para la obtención de resultados se precisa seguir un conjunto de procesos que implica recolección de datos que permitan probar hipótesis a partir de una medición numérica y su análisis.

“El enfoque cuantitativo utiliza la recolección y el análisis de datos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis establecida previamente, y confía en la medición numérica, el conteo y frecuentemente en el uso de la estadística para establecer con exactitud patrones de comportamiento en una población” (Hernandez Sampieri, 2014)

## **3.4 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos**

Un instrumento de recolección de datos es en principio:

Cualquier recurso de que pueda valerse el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información. De este modo el instrumento sintetiza en sí toda la labor de la investigación, resume los aportes del marco teórico al seleccionar datos que corresponden a los indicadores y, por lo tanto, a las variables o conceptos utilizados. (Sabino, 1992)

Las medidas de todo el equipo criogénico (longitudes, diámetros, radios, espesores) fueron obtenidas con una cinta métrica y un vernier. Para obtener la medición de la temperatura dentro y fuera de la cámara criogénica se utilizó un multímetro. Para el diseño del émbolo se tomaron en cuenta varios factores como dimensiones de la cámara criogénica en las cuales se desplazaría este, volumen de almacenamiento requerido en cada nivel. Para elegir los materiales de cuales estaría fabricado el equipo y el aislamiento térmico, se tomaron en cuenta ciertas propiedades térmicas como conductividad térmica, resiliencia a bajas temperaturas y contracción térmica.

### **3.5 Técnicas de Procesamiento de Datos**

La técnica que se utilizará en el procesamiento de los datos será la estadística descriptiva que consiste en “un conjunto de procedimientos que tienen por objeto presentar masas de datos por medio de tablas, gráficos y/o medidas de resumen” (Riesco)

### **3.6 Herramientas Para el Procesamiento de Datos**

Una herramienta es un medio físico que nos permite anotar o cuantificar la información para obtener e ilustrar los resultados obtenidos de ganancia de calor en el sistema, masa de nitrógeno y gasto volumétrico, se utilizó el programa Microsoft office Excel.

### **3.7 Método de Investigación**

El nitrógeno líquido tiene una temperatura de ebullición de  $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$  a presión atmosférica y un calor latente de vaporización o entalpía de vaporización extremadamente bajo ( $48\text{cal/gr}$ ) en comparación con el agua ( $540\text{cal/gr}$ ), lo cual quiere decir que se requiere muy poca energía para evaporarlo y aumentar su temperatura, por lo cual es de vital importancia disminuir en lo posible los flujos de calor convectivos hacia la cámara criogénica para poder tener un buen control en la temperatura y un buen rendimiento de nitrógeno por ciclo de operación en la criogenización de las pajillas de semen bovino. Es necesario calcular la eficacia del aislamiento térmico,

determinar la ganancia de calor que hay en el sistema a diferentes temperaturas de operación y en diferentes volúmenes de almacenamiento, la masa de nitrógeno mínima dentro de la cámara criogénica, así como el gasto volumétrico necesario para mantener dicha temperatura.

### **3.8 Diseño**

En el diseño del equipo criogénico se emplearon materiales especiales resilientes a las temperaturas ultra bajas de operación, resistentes a la corrosión y a la fluctuación en la presión interna del equipo. Los materiales utilizados en la construcción del equipo son; Acero Inoxidable 304 AISI y hojas de poliuretano.

El Acero inoxidable 304 AISI es acero austenítico contiene 8% de níquel y 18% de cromo, posee una conductividad térmica relativamente baja ( $14.9\text{W/mK}$ ), es resiliente hasta una temperatura de  $-270^{\circ}\text{C}$ . La cámara criogénica, la carcasa exterior, así como la tapa y el émbolo están fabricados de este material.

Las hojas de poliuretano son un eficaz aislamiento térmico, el poliuretano es un polímero y posee una baja conductividad térmica ( $0.023\text{W/mK}$ ), se utilizó debido a su capacidad de acoplarse entre la cámara criogénica y la carcasa exterior del equipo.

#### ***3.8.1 Características Geométricas***

El equipo es de forma cilíndrica vertical, mide 83cm de largo y 41.7cm de diámetro exterior, dentro de este se encuentra la cámara criogénica, en donde se coloca las pajillas con contenido de semen bovino, la cual es de forma cilíndrica con un diámetro de 35.5 cm y una altura modificable de 30cm, 40cm y 50cm. En la figura 13 se muestra un dibujo del criocongelador mediante el software de diseño SOLIDWORKS.



*Figura 3.2 Representación gráfica de criocongelador elaborado mediante el software SOLIDWORKS®*

Nota. El equipo criogénico es de forma cilíndrica vertical, posee una tapa hermética, una cámara criogénica, una conexión para la entrada de nitrógeno, una válvula de alivio con manómetro y un émbolo.

En la figura 14 se observa un corte longitudinal del criocongelador y sus componentes.

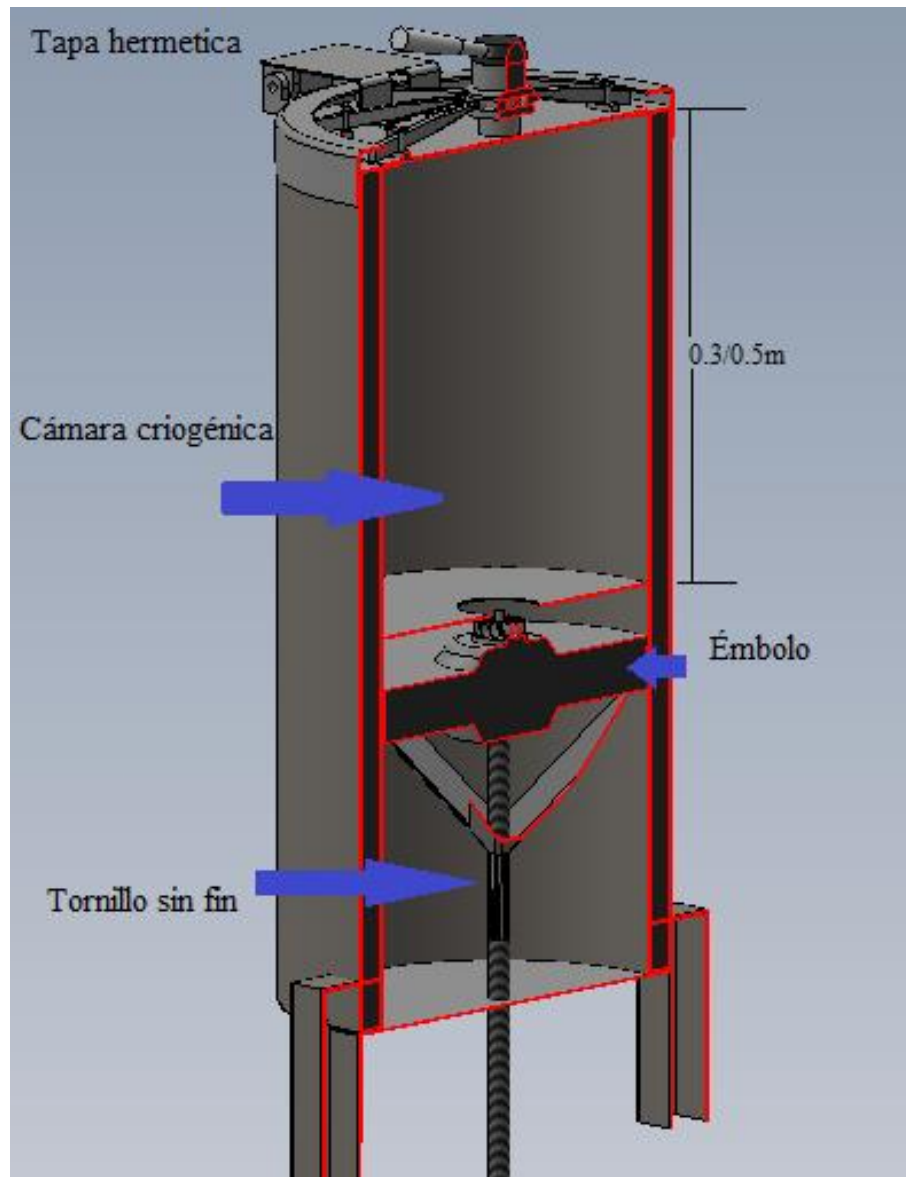


Figura 3.3 Corte longitudinal del equipo criogénico elaborado mediante el software SOLIDWORKS®

En la tabla 4 se muestran las características del equipo criogénico

*Tabla 4 Características de equipo criogénico*

Radio 1 (r1)	0.1775m		
Radio 2 (r2)	0.1801m		
Radio 3 (r3)	0.2075m		
Radio 4 (r4)	0.2085m		
Altura (L)	0.30m	0.40m	0.50m
Volumen	29.69Lts	35.59Lts	49.48Lts
Criógeno	LN <sub>2</sub>		
Presión Max	1 atm		
Rango de temperatura	26/-150°C		

La pared cilíndrica de la cámara criogénica se encuentra entre el radio1 y el radio2, tiene un espesor de 2.6mm, el aislamiento térmico tiene un espesor de 2.74cm, este se encuentra entre el radio3 y radio2, y la carcasa exterior se encuentra entre el radio4 y radio3 con un espesor de 1mm. En la figura se observa un corte transversal del equipo criogénico.

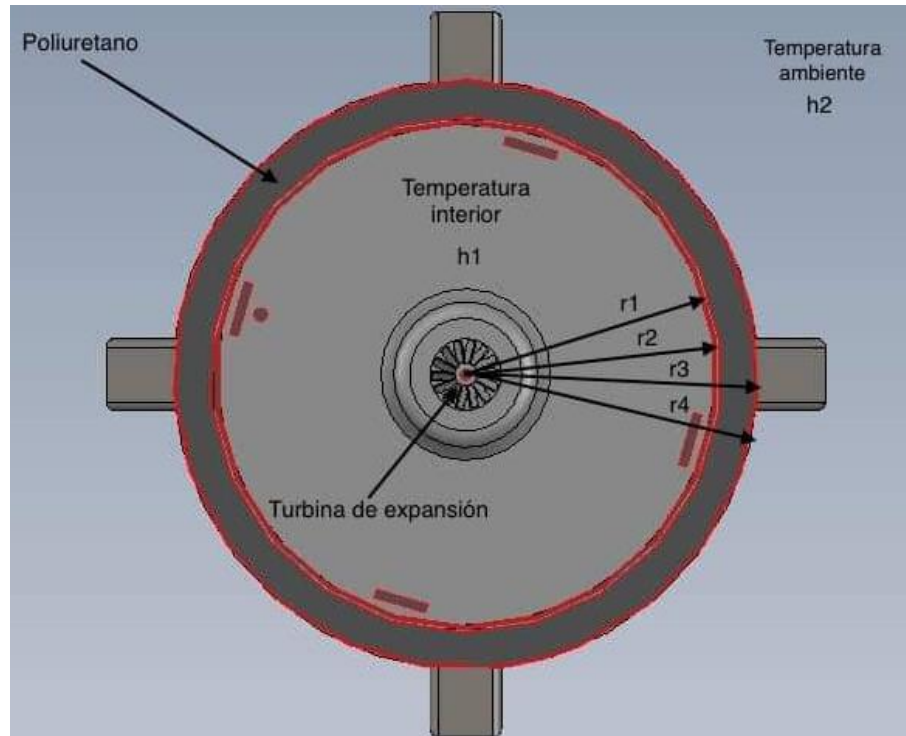


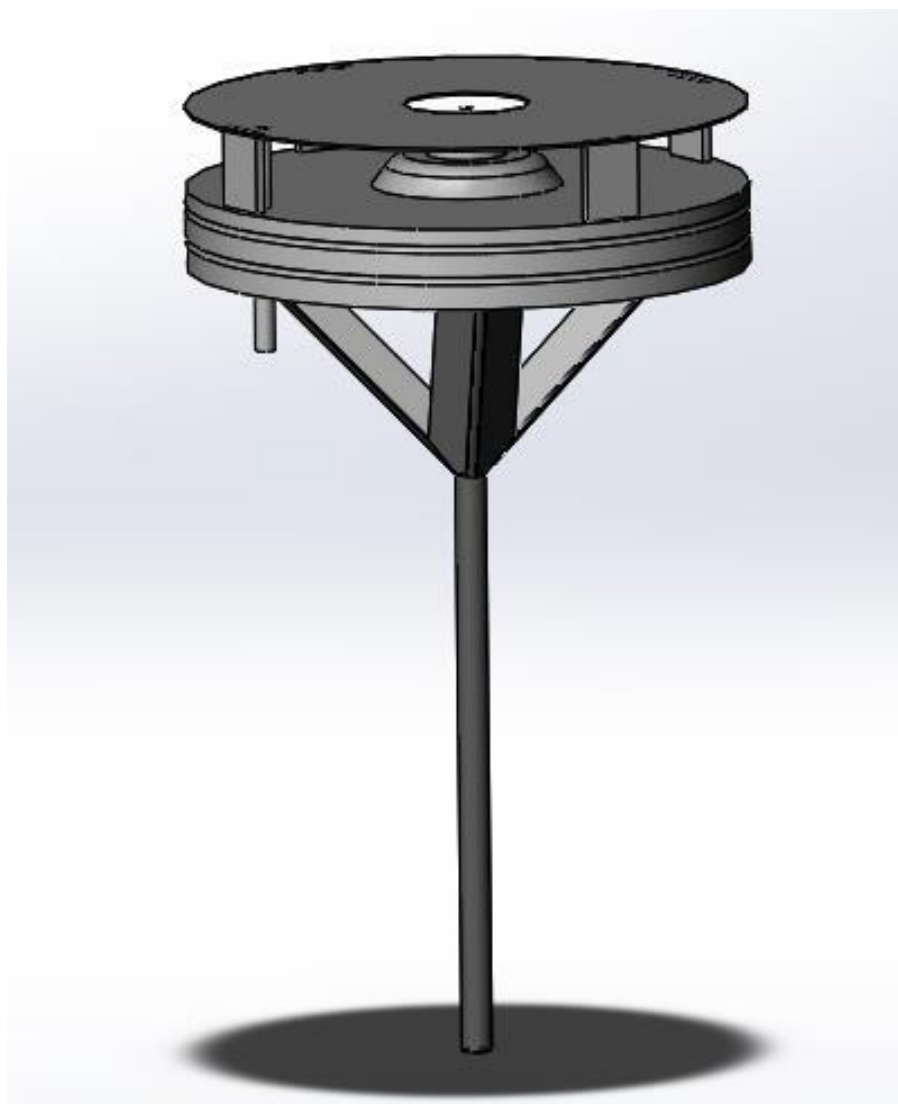
Figura 3.4 Corte transversal de cámara criogénica elaborado mediante el software SOLIDWORKS®

*Nota. La turbina de expansión se encuentra en la parte superior del émbolo.*

El émbolo de acero inoxidable que se desplaza verticalmente por las paredes de la cámara es impulsado por un motor. Este modula el volumen de almacenamiento y posee una turbina de expansión la cual sirve para homogenizar la masa de nitrógeno gasificada existente en la cámara criogénica.



En la figura 16 se muestra el émbolo instalado en el equipo criogénico.



*Figura 3.5 Representación gráfica de émbolo elaborado mediante el software SOLIDWORKS®*

### 3.9 Formulación Matemática

#### 3.9.1 Coeficiente Global de Transferencia de Calor Q

Se desarrolla el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor  $\dot{Q}$  (ganancia de calor) en la cámara criogénica a una temperatura de  $-150^{\circ}\text{C}$  (123K) en el volumen de almacenamiento mínimo de esta (29.69 L) con 0.30m de profundidad y  $26^{\circ}\text{C}$  (299K) en el ambiente. La transferencia de calor global  $\dot{Q}$  se calcula como el cociente entre la diferencia total de temperaturas y la suma de las resistencias térmicas

$$\dot{Q} = \frac{(T_{\infty o} - T_{\infty i})}{R_{\text{Total}}}$$

En donde:  $T_{\infty o} - T_{\infty i}$  = Temperatura ambiente – Temperatura en cámara

$$\Delta T = 26^{\circ}\text{C} - (-150^{\circ}\text{C}) = 176^{\circ}\text{C}$$

Y dividirlo entre la suma de las resistencias que existen entre el interior de la cámara criogénica y el medio ambiente:

$$R_{\text{Total}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_n$$

$$R_{\text{Total}} = R_{\text{Convección-interna}} + R_{\text{Cámara}} + R_{\text{aislante}} + R_{\text{Carcasa externa}} + R_{\text{Convección-externa}}$$

El cálculo de la resistencia total requiere la estimación de cada una de las resistencias térmicas, y para ello se utiliza la Ley de Fourier empleando la relación apropiada para el área de transferencia de calor para un cilindro

$$A = 2\pi rL$$

De modo que la Ley de Fourier se escribe

$$q_r = -kA \frac{dT}{dr} \quad \text{Sustituyendo:} \quad q_r = -2\pi krL \frac{dT}{dr}$$

La solución a esta ecuación es:

$$q = \frac{2\pi k r L (T_i - T_e)}{\ln(r_e/r_i)}$$

y la resistencia térmica en un cilindro de material x es dada por:

$$R_{\text{tér}} = \frac{\ln(r_e/r_i)}{2\pi L k} \quad (3)$$

Para la resistencia de calor por convección en una pared cilíndrica se emplea:

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{2\pi r L h} \quad (3.1)$$

En la fórmula anterior la cual es utilizada para calcular la resistencia a la convección, está involucrado el coeficiente de transferencia de calor por convección h.

### **3.9.2 Cálculo de Resistencias Térmicas**

#### **3.9.2.1 Resistencia 1**

Es necesario determinar el coeficiente convectivo h en el interior de la cámara criogénica a -150°C (123K) con las características correspondientes a esta. Todas las propiedades termodinámicas evaluadas son del aire atmosférico a la temperatura media de la capa límite.

$T_f = T_{\infty 1} + T_{\infty 2}/2$  que se denomina temperatura de película, en este caso es de -62°C (211K).

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección “h” dentro de la cámara criogénica se hace uso de un enfoque teórico, el cual implica resolver las ecuaciones de la capa límite para una geometría en particular. Es importante establecer si se trata de convección natural o forzada. El cálculo del coeficiente convectivo se determina a partir de número de Nusselt, el cual estará en función del número de Grashof (Gr), número de Prandtl (Pr), número de Rayleigh (Ra) y una constante (C)

$$Nu = \frac{hL}{k} = C(GrPr)^n = CRa_L^n \quad (3.2)$$

*Correlación empírica para conducción de calor por convección natural a través de una placa vertical*

Para determinar el número de Nusselt involucrado en el cálculo del coeficiente convectivo h de la cámara criogénica, se utilizó la correlación empírica de una placa vertical isoterma en convección natural

*Ecuación 2. Número de Nusselt para un cilindro vertical en convección natural (Holman, 1998 )*

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.3)$$

la cual se puede utilizar en cilindros verticales si se cumple la siguiente condición:

$$D \geq \frac{35L}{Gr_L^{1/4}} \quad (3.4)$$

Sustituyendo valores se obtiene que:

$$0.355m \geq \frac{35(0.30m)}{(-26823.76)_L^{1/4}}$$

Se cumple la condición:  $0.355m \geq -0.8204m$

Cálculos de Ra, Pr y Gr respectivamente:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta (T_s - T_\infty) L^3}{\nu \alpha}$$

Sustituyendo valores:

$$Ra = \frac{(9.81 \text{ m/s}^2)(0.004793 \text{ K}^{-1})(123\text{K}-299\text{K})(0.30\text{m})^3}{(0.00000833 \text{ m}^2/\text{s})(0.00001137 \text{ m}^2/\text{s})}$$

$$Ra = -2356871511.67999$$

El número de Prandtl:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{K}$$

Sustituyendo valores:

$$Pr = \frac{(0.000013883 \text{ Pa/s})(1005.924 \text{ J/kgK})}{(0.0190 \text{ W/mK})}$$

$$Pr = 0.735$$

El número de Grashof:

$$Gr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2}$$

Sustituyendo valores:

$$Gr = \frac{(9.81 \text{ m/s}^2)(0.004793 \text{ K}^{-1})(123\text{K}-299\text{K})(0.30\text{m})^3}{(0.0000083304 \text{ m}^2/\text{s})^2}$$

$$Gr = -26823.76$$

Se sustituyen los valores en la correlación empírica correspondiente para determinar el número de Nusselt:

$$\text{Nu} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387(-2356871511.67999)^{1/6}}{\left[1 + (0.4920.735)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$\text{Nu} = 121.8898$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección se despeja de la fórmula del número de Nusselt, en el cual está involucrado en Número de Nusselt obtenido, la conductividad térmica y la longitud característica de la cámara criogénica.

$$h_{\text{interno}} = \frac{\text{Nu}K}{L} \quad (3.5)$$

Sustituyendo valores:

$$h_i = \frac{(121.8898)(0.0190 \text{ W/mK})}{(0.30\text{m})}$$

$$h_i = 7.7196 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Obtenido el coeficiente de convección interno, se calcula la primera resistencia térmica con la siguiente fórmula:

$$R_{\text{convección interna}} = \frac{1}{2\pi r L h_i} \quad (3.6)$$

Sustituyendo valores:

$$R_{\text{convección interna}} = \frac{1}{2\pi(0.1775\text{m})(0.30\text{m})(7.719^\circ\text{C})}$$

$$R_{\text{convección interna}} = 0.387169 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

### 3.9.2.2 Resistencia 2

En esta resistencia está involucrada la pared cilíndrica de la cámara criogénica la cual es de acero inoxidable AISI 304 con una conductividad térmica de 14.9W/mK y tiene un radio interno de 0.1775m y un radio externo de 0.1801m, con un espesor de 0.0026m (2.6mm).  $R_{\text{cilindro1}}$  se calcula con la siguiente expresión:

$$R_{\text{cámara criogénica}} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (3.7)$$

Sustituyendo valores:

$$R_{\text{cámara criogénica}} = \frac{\ln(0.1801/0.1775)}{2\pi(0.30\text{m})(14.9 \text{ W}/\text{m}^\circ\text{C})}$$

$$R_{\text{cámara criogénica}} = 0.000517^\circ\text{C}/\text{W}$$

### 3.9.2.3 Resistencia 3

En la tercera resistencia se encuentra el aislamiento térmico, en este caso son capas de poliuretano que se encuentra entre los radios 2 y 3, con una conductividad térmica de 0.023W/mK y un grosor de 0.0274m (27.4mm).

$$R_{\text{poliuretano}} = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi kL} \quad (3.8)$$

Sustituyendo valores

$$R_{\text{poliuretano}} = \frac{\ln(0.2075\text{m}/0.1801\text{m})}{(2)(\pi)(0.023 \text{ W/m}^\circ\text{C})(0.30\text{m})}$$

$$R_{\text{poliuretano}} = 3.266576^\circ\text{C/W}$$

### 3.9.2.4 Resistencia 4

Está fabricada de acero inoxidable AISI 304, se encuentra entre los radios 3 y 4, con un espesor de 0.001m (1mm).

$$R_{\text{carcasa externa}} = \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi kL} \quad (3.9)$$

Se sustituyen valores:

$$R_{\text{carcasa externa}} = \frac{\ln(0.2085\text{m}/0.2075\text{m})}{(2)(\pi)(14.9 \text{ W/m}^\circ\text{C})(0.30\text{m})}$$

$$R_{\text{carcasa externa}} = 0.000171^\circ\text{C/W}$$



### 3.9.2.5 Resistencia 5

Involucra el cálculo del coeficiente convectivo  $h$  para un cilindro vertical en contacto con el aire atmosférico a  $26^{\circ}\text{C}$ , en este caso se utilizó una ecuación simplificada para el cálculo de este, la temperatura superficial del criocongelador es de  $0^{\circ}\text{C}$  y se obtiene con la siguiente formula:

$$h_o = 1.42 \left( \frac{\Delta T}{L} \right)^{1/4} \quad (3.10)$$

Se sustituyen los valores:

$$h_o = 1.42 \left( \frac{(26^{\circ}\text{C} - 0^{\circ}\text{C})}{0.30\text{m}} \right)^{1/4}$$

$$h_o = 4.3326 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Se calcula la última resistencia:

$$R_{\text{convección externa}} = \frac{1}{2\pi r_4 L h_o} \quad (3.11)$$

Se sustituyen los valores:

$$R_{\text{convección externa}} = \frac{1}{(2)(\pi)(0.2085\text{m})(0.30\text{m})(4.33 \text{ W/m}^2\text{C})}$$

$$R_{\text{convección externa}} = 0.587631^{\circ}\text{C/W}$$

### 3.9.2.6 Suma de Resistencias Térmicas

Calculadas las resistencias térmicas, se suman. En la tabla 5 se muestran los resultados de la suma de las resistencias térmicas y el resultado de la resistencia total

*Tabla 5 Suma de resistencias*

Resistencia	Resultado
$R_{\text{convección-interna}}$	$0.387169^{\circ}\text{C}/\text{W}$
$R_{\text{cámara}}$	$0.000517^{\circ}\text{C}/\text{W}$
$R_{\text{poliuretano}}$	$3.266576^{\circ}\text{C}/\text{W}$
$R_{\text{carcasa externa}}$	$0.000171^{\circ}\text{C}/\text{W}$
$R_{\text{convección-externa}}$	$0.587278^{\circ}\text{C}/\text{W}$
$R_{\text{Total}}$	$4.241712^{\circ}\text{C}/\text{W}$

Con la obtención de la suma de las resistencias térmicas  $R_{total}$ , y el diferencial de temperaturas ( $\Delta T$ ) es posible calcular el coeficiente global de transferencia de calor  $\dot{Q}$

$$\dot{Q} = \frac{(T_{\infty o} - T_{\infty i})}{R_{Total}}$$

Sustituyendo valores se tiene:

$$\dot{Q} = \frac{26^{\circ}\text{C} - (-150^{\circ}\text{C})}{4.241712^{\circ}\text{C}/\text{W}}$$

$$\dot{Q} = 41.4926 \text{ W}$$

El resultado es 41.4926 Watts o Joules por segundo, este es el coeficiente global de transferencia de calor (ganancia de calor) que está entrando a la cámara criogénica cuando se alcanza la temperatura más baja de operación  $-150^{\circ}\text{C}$  (123K) desde el ambiente a  $26^{\circ}\text{C}$  (299K) en el volumen de almacenamiento de 29.69 Litros.

### ***3.9.3 Eficacia de Aislamiento Térmico***

Para determinar el aumento de temperatura que existe a través de cualquier resistencia térmica, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\Delta T = \dot{Q} R_x \tag{3.12}$$

En donde  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura entre la cara interna y la cara externa del material que provee la resistencia térmica,  $\dot{Q}$  es el coeficiente global de transferencia de calor estacionario y  $R$  es la resistencia térmica involucrada.

$$\Delta T = \dot{Q} R_{\text{cámara-criogénica}} = (41.4926\text{W})(0.000517^{\circ}\text{C}/\text{W}) = 0.0214516742^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T = \dot{Q} R_{\text{poliuretano}} = (41.4926\text{W})(3.266576^{\circ}\text{C}/\text{W}) = 135.53873133^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta T = \dot{Q}R_{carcasa-externa} = (41.4926W)(0.000171^{\circ}C/W) = 0.0070952346^{\circ}C$$

Es decir, las temperaturas entre la superficie interior y exterior de la cámara criogénica difieren en  $0.02145^{\circ}C$ , las temperaturas en la cara interior y exterior del aislamiento térmico difieren en  $135.53873^{\circ}C$  y las temperaturas en la carcasa exterior difieren en  $0.0070952346^{\circ}C$ .

La resistencia térmica que ofrece la cámara criogénica y la carcasa exterior se pueden considerar despreciables en comparación con la que ofrece el poliuretano, lo cual es de esperarse ya que cualquier metal es buen conductor del calor a pesar de que el acero inoxidable 304 es un metal con baja conductividad térmica. El aislamiento térmico de un equipo criogénico siempre provee la mayor resistencia térmica. El gradiente de temperatura entre en ambiente y la cámara criogénica es de  $176^{\circ}C$ , para determinar la diferencia de temperaturas entre la cámara criogénica y el ambiente se suman las resistencias de los dos cilindros, el poliuretano y el ambiente y se multiplica por  $\dot{Q}$  :

$$\Delta T_{Tinterna-Texterna} = (41.4926W) (3.8545543^{\circ}C/W) = 159.9354^{\circ}C$$

Existe una diferencia de temperatura de  $159.9354^{\circ}C$  entre la cámara criogénica a  $-150^{\circ}C$  y la superficie del equipo que se encuentra en contacto con el ambiente a  $26^{\circ}C$ , el gradiente entre la cámara criogénica y el ambiente es de  $176^{\circ}C$ . Debido a que no existe aislamiento térmico perfecto, es normal que exista un gradiente pequeño de temperatura entre la cámara y el exterior.

En este caso, si consideramos que solo existe solo un 10% de diferencia de temperatura entre el interior de la cámara a  $-150^{\circ}C$  y el ambiente a  $26^{\circ}C$  se puede considerar que es aislamiento térmico eficaz.

### 3.9.4 Masa de Nitrógeno en Cámara Criogénica

La masa de nitrógeno gasificado existente en la cámara criogénica en el volumen de almacenamiento de 29.69 Litros a temperaturas  $-150^{\circ}\text{C}$  (123K) a presión atmosférica es determinada por la ecuación de los gases ideales:

$$PV = \frac{mRT}{M}$$

Despejando:

$$m = \frac{PVM}{RT} \quad (3.13)$$

Sustituyendo valores:

$$m = \frac{(1\text{atm})(29.69\text{L})(28\text{ g/mol})}{(0.082\text{ L}\cdot\text{Atm/mol}\cdot\text{K})(123\text{K})}$$

$$m = 82.423\text{g}$$

A una temperatura de 123 K ( $-150^{\circ}\text{C}$ ) en el volumen de almacenamiento de 29.69L existen por lo menos 82.423 gramos de nitrógeno en fase gaseosa dentro de la cámara criogénica.

### 3.10 Programa de Congelación

En base a el programa de congelación establecido en el manual del equipo criogénico “Digitcool IMV” se realizó un esquema en el cual se observan los segmentos en los cuales está dividido el protocolo de congelación del material biológico y una gráfica que muestra el descenso en la temperatura dentro de la cámara criogénica.

En la figura 17 se ilustra el protocolo de criogenización dentro de la cámara criogénica

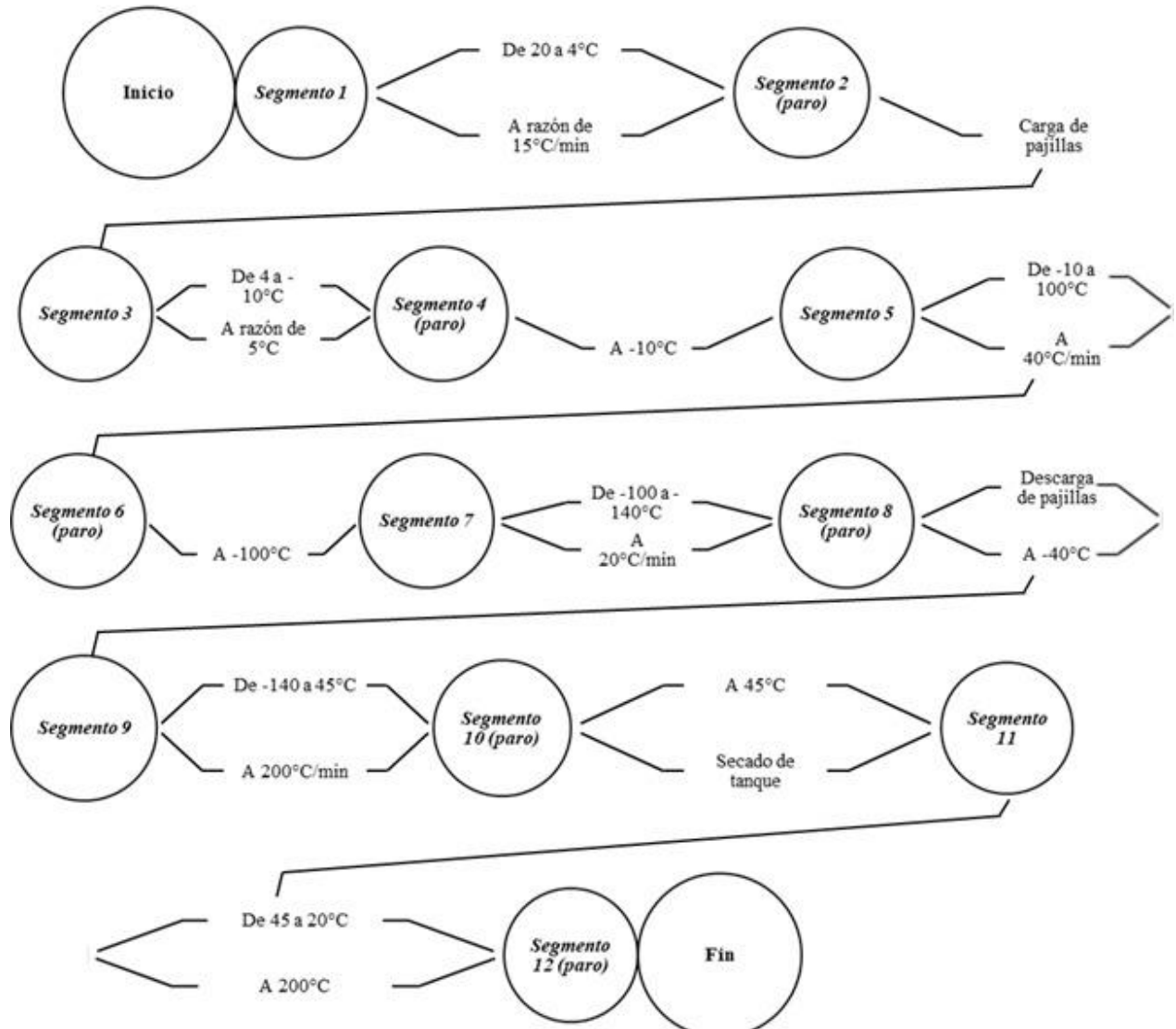


Figura 3.6 Protocolo de criogenización de pajillas de semen bovino

El protocolo de criogenización se puede representar en una gráfica temperatura/tiempo se representa en la figura 18

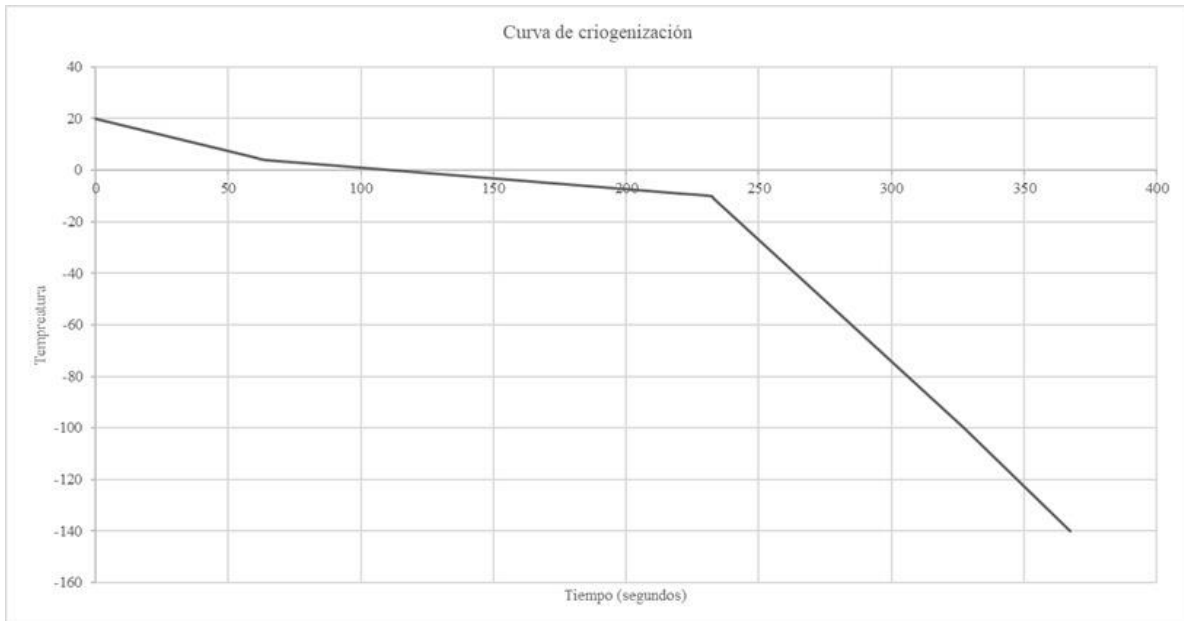


Figura 3.7 Protocolo de criogenización

### 3.11 Procedimiento Experimental

La cámara criogénica es fabricada de forma cilíndrica, entre esta y la carcasa exterior se colocaron capas de poliuretano. Se utilizaron hojas de poliuretano como aislamiento térmico debido a su baja conductividad y gran capacidad de adaptarse al contorno que lo rodea.

En la figura 19 se observa la instalación del aislamiento térmico en el equipo criogénico.



*Figura 3.8 Instalación de aislamiento térmico*

En la figura 20 se observa el aislamiento térmico instalado



*Figura 3.9 Aislamiento térmico instalado*



El émbolo fabricado en su totalidad de acero inoxidable posee un tornillo sin fin con el cual se desplaza de forma vertical por las paredes internas de la cámara modificando el volumen de almacenamiento en el cual se depositarán las pajillas con contenido de semen bovino.

En la figura 21 se observa el émbolo que se introducirá en el equipo criogénico.



*Figura 3.9 Émbolo*

Posteriormente se introduce el émbolo dentro del equipo criogénico por la parte superior de este. En la figura 22 se muestra como se introdujo el émbolo dentro de la cámara criogénica.



*Figura 3.10 Instalación del émbolo en equipo criogénico*

Cuando el émbolo es colocado dentro de la cámara criogénica de criocongelador, se coloca un sello provisional para realizar pruebas de medición de temperatura entro de la cámara criogénica.

En la figura 23 se observa en émbolo instalado.



*Figura 3.11 Émbolo instalado*

Una vez colocado el émbolo dentro de la cámara, se cierra la tapa hermética del criocongelador y este es conectado mediante una válvula al depósito de nitrógeno líquido y la temperatura obtenida es censada mediante un multímetro.

### 3.12 Censado de Temperatura

El depósito de nitrógeno líquido no cuenta con un aislamiento térmico eficaz lo que hace que el nitrógeno se encuentre en estado gaseoso cerca de la válvula de ingreso a la cámara, lo que da como resultado un difícil control en la temperatura. En la figura 24 se muestra un experimento en donde se censo la temperatura en la salida del depósito de nitrógeno.



*Figura 3.12 Censado de temperatura en depósito de nitrógeno*

*Nota. Las puntas del multímetro son introducidas dentro del depósito de nitrógeno para censar la temperatura*

En la figura 25 se observa el censado de temperatura en la cámara criogénica.

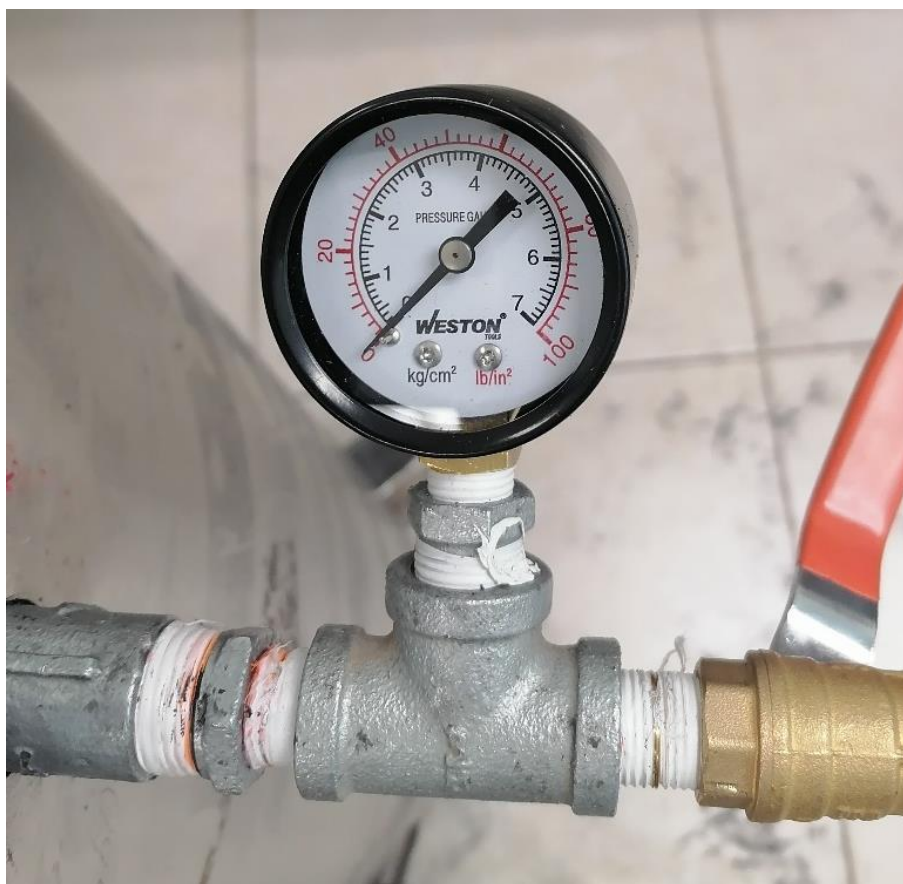


*Figura 3.13 Censado de temperatura en cámara criogénica*

*Nota. El nitrógeno es conducido desde el depósito de N<sub>2</sub> hacia la cámara, la temperatura es censada mediante un multímetro*

Debido a que el nitrógeno se expande rápidamente en forma gaseosa, es necesario monitorear la presión generada dentro del equipo criogénico, por tal motivo es instalado un manómetro y una válvula de alivio.

En la figura 26 se observa el manómetro instalado y la válvula de alivio instalados en el equipo.



*Figura 3.14 Manómetro y válvula de alivio*

En la figura 27 se observa el equipo criogénico y los accesorios mencionados con anterioridad.



*Figura 3.15 Equipo criogénico y accesorios*

## Capítulo 4 Resultados

### 4.1 Ganancia de Calor en Volúmenes de Almacenamiento

Se realizaron los cálculos para determinar la ganancia de calor en el sistema en los tres volúmenes de almacenamiento (29.69L, 35.59L y 49.48L) a diferentes temperaturas de operación 273K (0°C), 198K (-75°C) y 123K (-150°C). Los resultados son mostrados en la gráfica que se muestra en la figura 28.

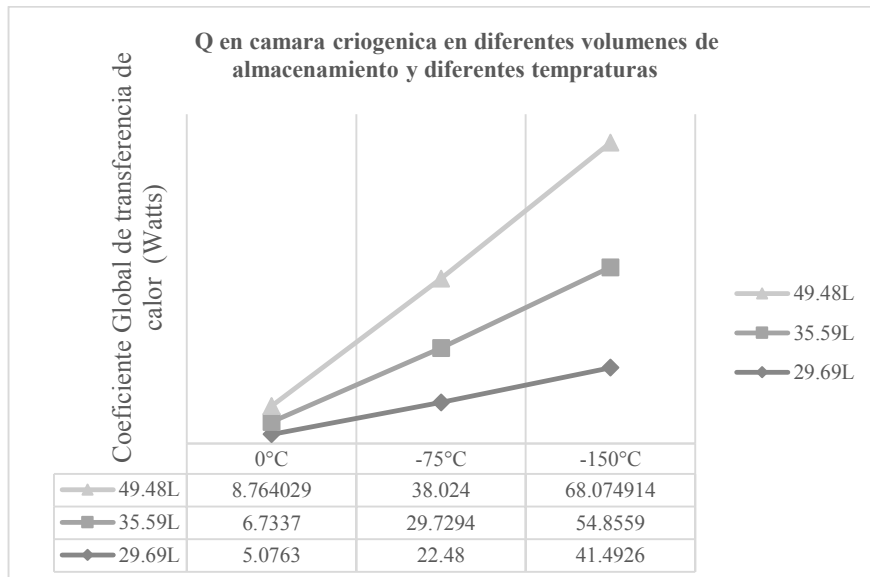


Figura 4.1 Ganancia de calor en volúmenes de almacenamiento

Los resultados indican que a medida que se incrementa el gradiente de temperatura (descenso en de la temperatura dentro de la cámara criogénica y el ambiente) y el volumen de almacenamiento, se observa un aumento sustancial en el coeficiente global de transferencia de calor.



## 4.2 Masa de Nitrógeno

Se realizaron los cálculos para determinar la masa mínima de nitrógeno existente dentro de los tres volúmenes de almacenamiento para el rango de temperaturas de operación del equipo que va desde 299K (26°C) hasta 123K(-150°C), Estos resultados son mostrados en la gráfica 2. La cantidad de nitrógeno dentro de la cámara criogénica se puede ver afectada por varios factores como la constante despresurización del equipo, los flujos de calor hacia el sistema, la temperatura de los materiales, etc. Se observa que, para obtener una temperatura más baja en un volumen de almacenamiento mayor, se requiere mayor cantidad de nitrógeno dentro de la cámara. En la gráfica que se muestra en la figura 29 se observa la masa de nitrógeno mínima para diferentes temperaturas y volúmenes de almacenamiento.

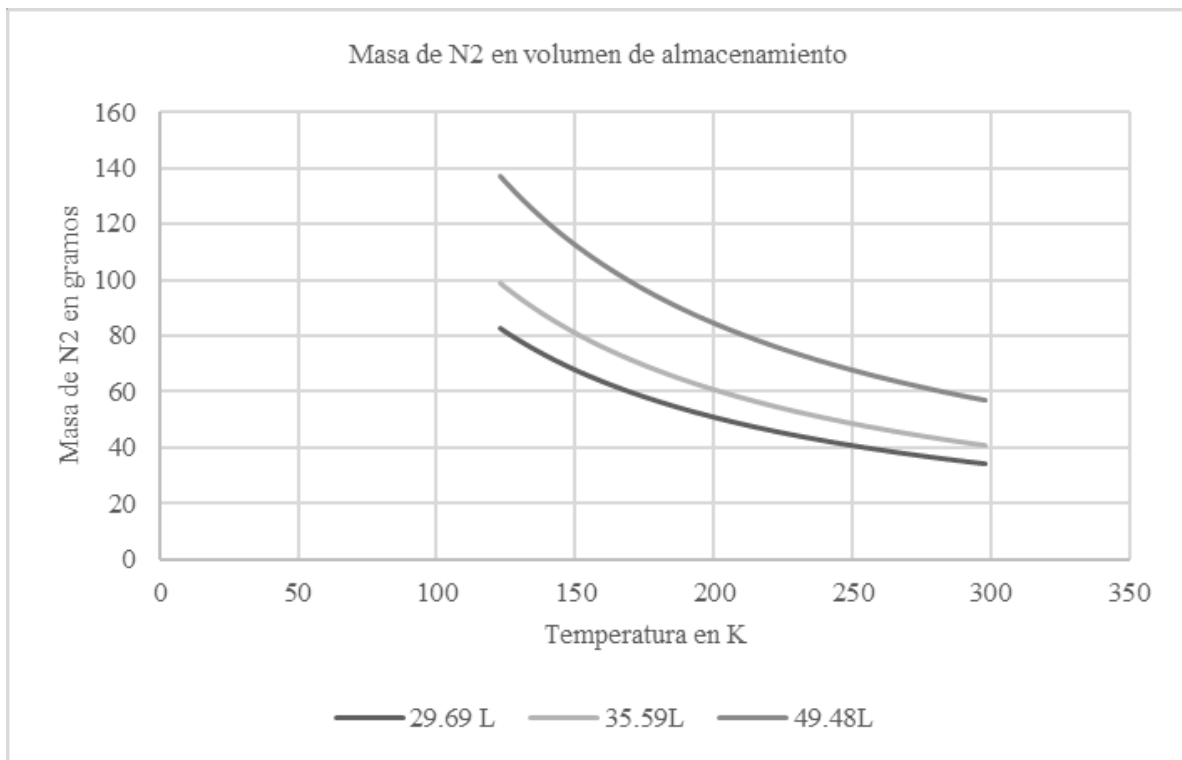


Figura 4.2 Masa de nitrógeno mínima requerida para diferentes temperaturas y volúmenes de almacenamiento

### 4.3 Gasto Volumétrico de Nitrógeno

Para mantener la temperatura que se desea, es necesario un flujo de nitrógeno constante a la cámara criogénica. Se calculó el gasto volumétrico de nitrógeno líquido en litros por segundo que se debe descargar en la cámara en cada volumen de almacenamiento en todo el rango de temperatura de funcionamiento del dispositivo. Un litro de nitrógeno equivale a 0.8083 kilogramos. En la figura, se muestra los litros de nitrógeno por segundo necesarios para mantener la temperatura en cada volumen de almacenamiento. En la figura 30 se observa el gasto volumétrico obtenido necesario para mantener cierta temperatura.

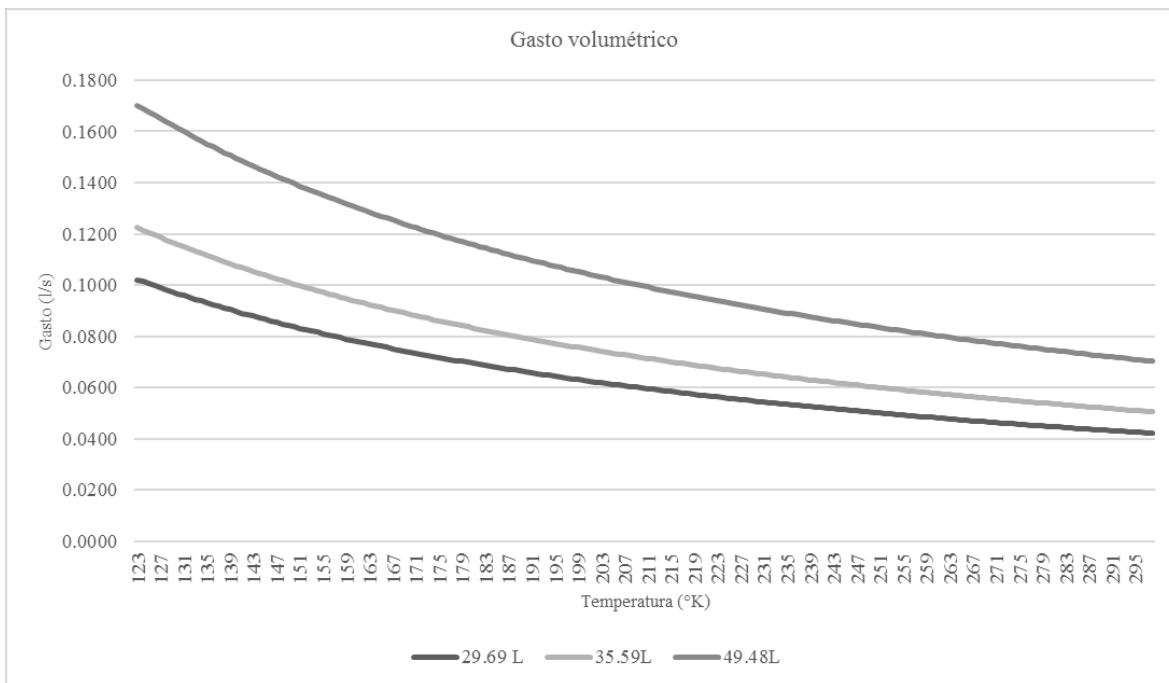


Figura 4.3 Gasto volumétrico de N2

## **Capítulo 5 Conclusiones y Recomendaciones**

La implementación de un sistema criogénico de volumen ajustable eficiente tendrá un impacto positivo en la ganadería ya que al hacer más viable económicamente el uso de tecnologías como la inseminación artificial se podrá mejorar la calidad del ganado en lugares de bajos recursos, de este estudio se pudo concluir lo siguiente.

El protocolo de criogenización de las pajillas de semen bovino que tiene lugar en la cámara criogénica puede ser controlado con mayor facilidad debido a que el aislamiento térmico del criocongelador es considerado eficaz, no obstante, siempre existirá un flujo de calor hacia la cámara debido a que no existe aislamiento térmico perfecto. Para reducir aún más los flujos de calor convectivos hacia la cámara criogénica, se podrá implementar vacío entre la cámara y la carcasa externa.

Se concluye que existe un aumento en la ganancia de calor a menores temperaturas y volúmenes de almacenamiento mayores, a pesar de que el aislamiento térmico del criocongelador posee una eficacia del 90% esto es debido al aumento en el gradiente de temperatura que se genera en el cambio de volumen.

El gasto volumétrico de nitrógeno está en función del volumen de almacenamiento y la temperatura, a menor temperatura y mayor volumen de almacenamiento el requerimiento de nitrógeno gaseoso aumenta.

En base a los experimentos realizados, se concluye que para poder llevar a cabo el protocolo de criogenización estrictamente, es necesario manipular la evaporación de nitrógeno líquido dentro del depósito de nitrógeno.

En los cálculos para obtener la masa de nitrógeno existente en el sistema, se utilizó la presión atmosférica como medida de presión constante dentro de la cámara criogénica, puesto que la cámara y el émbolo poseen imperfecciones las cuales son usadas como desfogue de presión, permitiendo no usar una válvula de alivio de presión.

## Referencias

(s.f.). Obtenido de [www.imv-technologies.com](http://www.imv-technologies.com)

Arango, J. (2017). *Development of an Automation and Control System for Bovine Semen*.  
TECCIENCIA.

Çengel , Y. A. (2015). *Termodinámica* . México : Mc Graw Hill Education.

Çengel, Y. A. (2011). *Transferencia de calor y masa* . México : Mc Graw Hill .

Dalal, J., Kumar, A., Dutt, R., Singh, G., & Chandolia, R. (2018). Different Cooling Rates for Cryopreservation of Semen in Various Livestock Species: A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* , 9.

Diez, I. (16 de Enero de 2017). *Contexto ganadero* . Obtenido de <https://www.contextoganadero.com/ganaderia-sostenible/aspectos-tener-en-cuenta-al-seleccionar-una-pajilla-de-toro>

*Digitcool Programmable automatic freezers* . (s.f.). Obtenido de [www.imv-technologies.com](http://www.imv-technologies.com)

González Pérez, R. (2014). *Criogénia: Cálculo de equipos recipientes a presión*. Díaz de Santos

Hastuti. (2016). The Role of Diluents in Maintaining Quality of Bull Sperm. *Chalaza Journal of Animal Husbandry*, 7.

Hernandez Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación*. México: Mc Graw Hill.

Holman, J. (1998 ). *Transferencia de calor* . España : Mc Graw Hill .

INEGI. (29 de Agosto de 2019). *CEDRSSA*. Obtenido de [http://www.cedrssa.gob.mx/post\\_el\\_-n-sector\\_agropecuario\\_en\\_el\\_pib-n\\_-segundo\\_trimestre\\_de\\_2019-\\_.htm](http://www.cedrssa.gob.mx/post_el_-n-sector_agropecuario_en_el_pib-n_-segundo_trimestre_de_2019-_.htm)

Lean, J. D. (1995). *Cryopreservation and freeze-drying protocols*. Totowa NJ: Humana press.

López , J. (30 de Abril de 2019). *Economipedia*. Obtenido de <https://economipedia.com/definiciones/sector-ganadero.html>

M. Flynn, K. D. (1989). *Cryogenic Process Engineering*. New York : International Cryogenics Monograph Series.

Mejía, A. D. (2019 ). *Youtube* . Obtenido de [https://www.youtube.com/watch?v=Cz1j-\\_PWbK4](https://www.youtube.com/watch?v=Cz1j-_PWbK4)

Riesco, J. M. (s.f.). *CONCEPTOS BÁSICOS DE ESTADÍSTICA*. 6.

Rodriguez, J. M. (Septiembre de 2015 ). Obtenido de <https://core.ac.uk/download/55527748.pdf>

Sabino, C. (1992). *El proceso de la investigación* . Caracas : Panamericana .

Santos, M. V. (2013). *Cryoletters*. Obtenido de <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/investigacion/how-important-are-internal-temperature.pdf>

*Secretaria de Marina* . (s.f.). Obtenido de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/133491/METODOLOGIA\\_DE\\_INVESTIGACION.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/133491/METODOLOGIA_DE_INVESTIGACION.pdf)

significados. (10 de Agosto de 2022). Obtenido de <https://www.significados.com/viscosidad-dinamica-y-cinematica/>

Toda materia, c. e. (23 de 07 de 2021). *Toda materia*. Obtenido de

<https://www.todamateria.com/propiedades-intensivas-y-extensivas-de-la-materia/>

Vishnu S B, S. B. (2019). Experimental and Numerical Investigation of. *Energy Sources* , 16.

Wolkers, W. F., & Oldenhof, H. (2015). *Cryopreservation and Freeze Drying protocols*.

Hannover, Germany : Humana press.

Yunus A. Çengel, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa*. México : Mc Graw Hill .

Yunus A. Çengel, M. A. (2015). Termodinámica . En *Espaciamiento entre moléculas* (pág. 110).

México : Mc Graw Hill.

Zohuri, B. (2018). *Physics of cryogenics* . New México, Alburquerque : Elsevier Inc.