



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUATITLAN

Comportamiento del Nitrógeno Líquido-Gas y sus  
Condiciones Operativas para el Diseño de una Cámara  
Criogénica.

TESIS

Que para obtener el título de  
Ingeniero en Alimentos

P R E S E N T A

José Federico Haen Hernández Cruz

ASESOR: I.Q. GUILLERMO MARTÍNEZ MORUA

COASESOR: I.Q. GUADALUPE FRANCO RODRIGUEZ

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2018



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

### **Agradecimientos:**

Primeramente, agradezco a Dios por el espíritu de ciencia, a las ánimas conquistadoras que me dieron la fuerza y voluntad, a la UNAM por ser una casa de estudios, por darme la oportunidad de estudiar la ciencia en los alimentos. A mis padres Federico Hernández Banda por ser un padre que me apoyo con todo su amor para seguir superándome, Magdalena Cruz Sanchez mi madre que siempre estuvo presente en mi corazón y recordarme que todo se puede hacer bien a mis hermanos que siempre hacen feliz mi vida.

A los profesores I.Q. Guillermo Martínez Morua y I.Q. Guadalupe Franco Rodríguez por ayudarme y guiarme en este camino de titulación.

A mis sinodales Dra. Abigail Martínez Estrada, I.A. María Guadalupe López Franco y M.C. Leticia Zuñiga Gómez por su aportación al presente trabajo.

A todos mis profesores que me formaron en cada materia, gracias por su labor, a mis compañeros que me dieron tantas alegrías y experiencias.

Agradeciendo al taller de sistemas frigoríficos por prestar sus instalaciones para experimentar el proyecto de nitrógeno líquido-gas.

Resumen	11
Antecedentes	12
Introducción	14
<b>CAPITULO I. MARCO TEORICO</b>	<b>16</b>
1.1    Nitrógeno descripción general y propiedades químicas	16
1.2.    Congelación con nitrógeno líquido	17
1.3    Tanque de almacenamiento Dewar	19
1.4    Equipos de congelación criogénica	21
1.5.    Armarios de congelación	21
1.6.    Túneles de congelación	22
1.7.    Proceso de congelación del túnel	26
1.8.    Ley de Gay-Lussac	27
1.9    Ley de Charles	27
<b>CAPITULO II    Metodología de experimentación</b>	<b>29</b>
<b>2.1</b> Cuadro metodológico	29
<b>2.2</b> Materiales y Métodos	30
<b>2.3</b> Desarrollo y resultados	36
2.3.1. Actividades Pre-eliminables	36
2.3.2Desarrollo objetivo Particular 1	38
2.3.3 Resultados para muros y techo	50
<b>2.4</b> Desarrollo objetivo Particular 2	55
<b>CAPITULO III. Análisis de Resultados.</b>	<b>65</b>
3.1    Tratamiento estadístico	65
3.2    Análisis de resultados por cuadrante	69
3.3.    Calculo de carga calórica	70
3.4.    Análisis de Resultados para techo y muro.	74
3.4.1. Carga calórica de la cámara criogénica	75
3.4.2. Calor del nitrógeno líquido	75
3.4.3 Calor del Nitrógeno gaseoso	77
3.5.    Análisis de resultados de entalpías	77
3.6    Análisis de resultados sobre el Diagrama de Molliere	79
3.7    Ley de Charles y Gay-Lussac	86
Conclusiones	99
Anexos	101
Referencias	122

## Índice de Figuras

### Capítulo 1

Figura. 1 Cuello Dewar.....	19
Figura. 2 Sistema de extracción.....	20
Figura. 3 Volumen en función de la temperatura ley de Charles.....	28
Figura. 4 Diagrama de actividades preliminares.....	30
Figura. 5 Diagrama de proceso del O.P.1.....	31
Figura. 6 Diagrama de proceso del O.P.2 .....	32
Figura. 7 Grados de apertura .....	36
Figura. 8 Diagrama de la válvula en aperturas de 18° y 20°.....	36
Figura. 9 Vaso de p.p. 250 mL.....	37
Figura. 10 Isométrico de cámara criogénica.....	39
Figura. 11 Isométrico en vista Superior del diagrama de cámara criogénica....	40
Figura. 12 Isométrico en vista Lateral del diagrama de cámara criogénica.....	40
Figura. 13 Isométrico en vista Frontal del diagrama de cámara criogénica.....	41
Figura.14 Cámara criogénica construida.....	41
Figura. 15 Equipo de extracción de nitrógeno líquido con cámara de aislamiento listo para operar.....	41
Figura.16 Cámara criogénica con su base y calibrador.....	42
Figura. 17 División real de los cuadrantes. ....	43
Figura. 18 Divisiones de cuadrantes dentro de la cámara .....	43
Figura. 19 Grafica de posición de la manija 18° tiempo de apertura 10 segundos.....	46
Figura. 20 Grafica Posición de la Manija de 18° tiempo de apertura 20 segundos.....	47
Figura. 21 Grafica Posición de la manija 20° tiempo de apertura 10 segundos.....	48
Figura. 22 Grafica Posición de la manija 20° tiempo de apertura 20 segundos.....	49
Figura. 23 Pared de la cámara criogénica.....	50

Figura. 24 Grafica Posición de la manija 18° tiempo de apertura 10 segundos para todas las paredes de la cámara.....	53
Figura. 25 Grafica Posición de la Manija 18° tiempo de apertura 20 segundos para todas las paredes de la cámara.....	53
Figura. 26 Grafica Posición de la manija 20° tiempo de apertura 10 segundos para todas las paredes de la cámara.....	54
Figura. 27 Grafica Posición de la manija 20° tiempo de apertura 10 segundos para todas las paredes de la cámara.....	54
Figura. 28 Trozos de melón cortados de manera cilíndrica.....	56
Figura. 29 Medidas de corte en cm.....	56
Figura. 30 Experimentación con alimento.....	75
Figura. 31 Grafica Zona Alta posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura repetición1.....	58
Figura. 32 Melón después de la experimentación.....	58
Figura. 33 Grafica Zona Alta posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura repetición2.....	59
Figura. 34 Melón después de la experimentación. ....	59
Figura. 35 Grafica Zona Alta posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura repetición3.....	60
Figura. 36 Melón después de la experimentación.....	60
Figura. 37 Melón con termopar tipo "J" en la zona inferior de la cámara .....	61
Figura. 38 Grafica “Zona baja de la cámara (1)” posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura.....	62
Figura. 39 Grafica “Zona baja de la cámara (2)” posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura.....	62
Figura. 40 Melón después de la experimentación en la zona inferior de la cámara.....	63
Figura. 41 Grafica “Zona Baja de la cámara (3)” posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura.....	63
Figura. 42 Melón después de la experimentación en la zona inferior de la cámara.....	64
Figura. 43 Diferencia de Enfriamiento en los melones en forma de cilindro.....	64
Figura. 44 Graficas de interacciones de variables.....	66

Figura. 45 Graficas de efectos de las variables con respecto de la Temperatura.....	66
Figura. 46 Grafica de efectos para el Techo de la cámara.....	67
Figura. 47 Grafica de efectos para la pared "C" de la cámara.....	67
Figura. 48 Grafica de efectos para la pared "B" de la cámara.....	68
Figura. 49 Grafica para efectos de la pared "A" de la cámara.....	68
Figura. 50 Descripción de experimentación.....	69
Figura. 51 Descripción de funcionamiento de presión.....	70
Figura 52 Separador de fases parte superior y válvula de venteo parte inferior.....	81
Figura. 53 Separador de fases con termopar tipo J (a) Vista lateral (b) Vista inferior.....	82
Figura. 54 Vaso p.p. con termopar tipo J y nitrógeno líquido (a) Cámara criogénica (b) En ambiente abierto .....	83
Figura. 55 Nitrógeno líquido en vaso de p.p. de 25mL.. .....	83
Figura. 56 Cámara criogénica con termopares tipo J y nitrógeno líquido.....	84
Figura. 57 Descripción del comportamiento del nitrógeno líquido a gas.....	85
Figura. 58 Temperaturas registradas en la parte superior de la cámara criogénica.....	88
Figura. 59 Temperaturas registradas en la parte inferior de la cámara criogénica .....	88
Figura. 60 Grafica lineal temperatura (°C) vs volumen(m3).....	89
Figura. 61 Grafica lineal temperatura (K) vs volumen(m3).....	90
Figura. 62 Temperaturas registradas en la parte superior de la cámara criogénica.....	92
Figura. 63 Temperaturas registradas en la parte Inferior de la cámara criogénica.....	92
Figura. 64 Grafica Temperatura (°C) vs Volumen (m3).....	93
Figura. 65 Grafica de Temperatura (K) vs volumen (m3).....	93
Figura. 66 Grafica regresión lineal de coeficientes de expansión.....	97
Figura. 67 Grafica regresión lineal de ordena al origen.....	98
Figura. 68 Diseño ideal de la cámara.....	100
Figura. 69 "Grafica Cuadrante 1A" posición de la manija 18° a 10 segundos de apertura.....	101

Figura. 70 “Grafica Cuadrante 2A” posición de la manija 18° a 10 segundos de apertura.....	101
Figura.71.“ Grafica Cuadrante 1A” posición de la manija 18° a 20 segundos de apertura.....	102
Figura. 72. “Grafica Cuadrante 2A” posición de la manija 18° a 20 segundos de apertura.....	102
Figura. 73 “Grafica Cuadrante 1A” posición de la manija 20° a 10 segundos de apertura.....	103
Figura. 74“Grafica Cuadrante 2A” posición de la manija 20° a 10 segundos de apertura.....	103
Figura. 75“Grafica Cuadrante 1A” posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura.....	104
Figura.76 “Grafica Cuadrante 2A” posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura.....	104
Figura.77 “Grafica Cuadrante 1B” posición de la manija 18° a 10 segundos de apertura.....	105
Figura.78 “Grafica Cuadrante 2B” posición de la manija 18° a 10 segundos de apertura.....	105
Figura. 79 “Grafica Cuadrante 1B” posición de la manija 18° a 20 segundos de apertura.....	106
Figura. 80 “Grafica Cuadrante 1B” posición de la manija 18° a 20 segundos de apertura.....	106
Figura. 81 “Grafica Cuadrante 1B” posición de la manija 18° a 20 segundos de apertura.....	107
Figura. 82 “Grafica Cuadrante 2B” posición de la manija 20° a 10 segundos de apertura.....	107
Figura. 83 “Grafica Cuadrante 2B” posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura.....	108
Figura. 84 “Grafica Cuadrante 2B” posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura.....	108
Figura. 85 Grafica Pared “A” posición de la manija 18° a 10 segundos de apertura.....	109
Figura. 86 Grafica Pared “A” posición de la manija 18° a 10 segundos de apertura.....	109
Figura. 87 Grafica Pared “A” posición de la manija 20° a 10 segundos de apertura.....	110

<b>Figura. 88. Grafica Pared “A” posición de la manija 20° a 10 segundos de apertura.....</b>	<b>110</b>
<b>Figura. 89 Grafica Techo posición de la manija 18° a 10 segundos de apertura.....</b>	<b>111</b>
<b>Figura. 90 Grafica Techo posición de la manija 18° a 20 segundos de apertura.....</b>	<b>111</b>
<b>Figura.91 Grafica techo posición de la manija 20° a 10 segundos de apertura.....</b>	<b>112</b>
<b>Figura. 92 Grafica techo posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura.....</b>	<b>112</b>
<b>Figura. 93 Grafica pared “B” posición de la manija 18° a 10 segundos de apertura.....</b>	<b>113</b>
<b>Figura. 94 Grafica pared “B” posición de la manija 18° a 10 segundos de apertura.....</b>	<b>113</b>
<b>Figura. 95 Grafica pared “B” posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura.....</b>	<b>114</b>
<b>Figura. 96 Pared “B” posición de la manija 20° a 10 segundos de apertura.....</b>	<b>114</b>
<b>Figura. 97 Grafica pared “C” posición de la manija 18° a 10 segundos de apertura.....</b>	<b>115</b>
<b>Figura. 98 Grafica pared “C” posición de la manija 18° a 20 segundos de apertura.....</b>	<b>115</b>
<b>Figura. 99 Grafica pared “C” posición de la manija 20° a 10 segundos de apertura.....</b>	<b>116</b>
<b>Figura. 100 Grafica pared “C” posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura.....</b>	<b>116</b>

## Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades del nitrógeno Líquido.....	17
Tabla 2. Variables.. ..	35
Tabla 3 Volúmenes obtenidos en diferentes tiempos y aperturas de la Válvula.....	37
Tabla 4 Flujo volumétrico.....	38
Tabla 5 (1) Temperaturas del Nitrógeno dentro de la cámara en los diferentes cuadrantes.....	44
Tabla 6 (2) Temperaturas del Nitrógeno dentro de la cámara en los diferentes cuadrantes.....	45
Tabla 7 (3) Temperaturas del Nitrógeno dentro de la cámara en los diferentes cuadrantes.....	46
Tabla 8 Propiedades termofísicas de las temperaturas obtenidas.....	48
Tabla 9 Propiedades termofísicas de las temperaturas obtenidas.....	49
Tabla 10 Propiedades termofísicas de las temperaturas obtenidas. ....	49
Tabla 11 Temperaturas obtenidas en la pared A a diferentes tiempos y aperturas de la válvula.....	50
Tabla 12 Temperaturas obtenidas en techo de la cámara a diferentes tiempos y aperturas de la válvula.....	51
Tabla 13. Temperaturas obtenidas en la pared B a diferentes tiempos y aperturas de la válvula.....	51
Tabla 14 Temperaturas obtenidas en la pared C a diferentes tiempos y aperturas de la válvula.....	52
Tabla 15 Temperaturas obtenidas en el acrílico de la cámara 20° de apertura a diferentes tiempos...52	
Tabla 16 Tabla de resultados de nitrógeno con alimento. ....	57
Tabla 17. Estadístico de Minitab. ....	65
Tabla 18. Volumen esp. y densidad del nitrógeno a diferentes temperaturas obtenidas .....	73
Tabla 19. Valores más representativos de temperaturas alcanzadas en °C.....	75
Tabla 20. Presiones y temperaturas interpoladas. ....	79
Tabla 21 Descripción del comportamiento del gas Nitrógeno dentro de la cámara criogénica.....	87
Tabla 22. Volumen del nitrógeno a diferentes temperaturas °C para 200 mL de nitrógeno líquido...89	
Tabla 23 Volumen del nitrógeno a diferentes temperaturas (kelvin) para 200 mL de nitrógeno líquido.....	90
Tabla 24 Valores de las constantes "a" , "b" y "r" para las diferentes unidades de temperatura.....	90
Tabla 25 Descripción de volumen ocupado con respecto a la temperatura.....	91
Tabla 26. Descripción del volumen con respecto de la temperatura utilizando 100mL nitrógeno líquido.....	93
Tabla 27. Temperatura correspondiente a los diferentes volúmenes.....	94

<b>Tabla 28. Valores de regresiones lineales en grados °C y K.....</b>	<b>94</b>
<b>Tabla 29 Comportamiento del nitrógeno con respecto a la Temperatura.....</b>	<b>97</b>
<b>Tabla 30. Valores gráficos de coeficiente de expansión.....</b>	<b>97</b>
<b>Tabla 31 Valores teóricos a diferentes volúmenes ocupados de Nitrógeno líquido.....</b>	<b>98</b>

## **Resumen.**

La utilización de un gas criogénico implica una operación determinada así como el equipo necesario para el buen desempeño del mismo. Lo que genera condiciones operativas y métodos de control estrictos.

Los diferentes gases criogénicos como lo son: nitrógeno  $-195.8^{\circ}\text{C}$ , argón  $-186^{\circ}\text{C}$ , oxígeno  $-183^{\circ}\text{C}$ , tienen gran capacidad de enfriamiento y transferencia de calor,

Las nuevas tecnologías de conservación por frío a los alimentos perecederos, van teniendo un gran auge, en la actualidad una de ellas es la conservación, usando nitrógeno líquido, que es el fluido criogénico en estudio en este presente trabajo. El nitrógeno líquido se escogió porque es el que tiene la temperatura de ebullición más baja de  $-195.8^{\circ}\text{C}$ .

La utilización de esta tecnología ha descubierto que se necesita establecer condiciones operativas en los equipos de almacenamiento y tuberías para el nitrógeno líquido, así como también generar la propuesta de cámaras frías para la conservación costeable y rápida de los alimentos.

El diseño de una cámara fría implica que es lo que está ocurriendo fuera de ella (como el tipo de material, su dimensionamiento) y dentro de ella (como por ejemplo; al manejar bajas temperaturas y alimentada con un gas ideal-criogénico, se tiene que establecer y facilita un cálculo basado en leyes de gases ideales, para tener un uso o aplicación determinada).

Entre los procedimientos conservadores desempeñan un importante papel de los métodos basados en la acción de bajas temperatura, es decir, en depósito refrigerado y la conservación por congelación. Estas técnicas mejoran amplios campos de la comercialización de los alimentos cuando son aplicadas racionalmente (mejor abastecimiento del mercado y superior calidad de los artículos y disminución de las pérdidas). Las pérdidas siguen siendo muy elevadas de los alimentos perecederos.

## **Antecedentes**

Los hombres de la edad Antigua ya sabían que los alimentos se conservaban por más tiempo cuando se les mantenía a bajas temperaturas (en cavas bajo tierra, en nieve, en hielo, junto a manantiales de agua fría).

En el siglo XVI se preparaban helados y comidas enfriadas empleando para tales fines mezclas frigoríficas a base de nieve o de hielo con diversas sales, como la de nitro. En 1844 entra en funcionamiento la primera máquina de producción de frío, comienza a refrigerarse el pescado mediante incorporación al mismo de mezclas frigoríficas.

En el último cuarto de siglo XIX, al inventarse las máquinas de producción de frío, comienza la era de la congelación de los alimentos. Se observa entonces que cuando la temperatura es de 0 o más grados centígrados los alimentos se conservan por corto tiempo pero cuando se les congela, dicho tiempo de conservación aumenta.

Ya en 1932 se fabricaron en Estados Unidos productos congelados en grandes masas. En este país, el rápido desarrollo de las técnicas de congelación y perfeccionamiento en los sistemas de envasado han llevado a un gran incremento en la elaboración y consumo de alimentos congelados.

La utilización de atmosferas modificadas para la conservación de alimentos es muy antigua, remontándose a los tiempos bíblicos. En el norte de África, en el medio oriente, en la China, etc., los agricultores de hace más de 2000 años, excavaban agujeros en la tierra en lugares secos, donde conservaban los cereales durante periodos de uno o varios años.

La utilización de gases o mezclas de gases obtenidos por procedimientos industriales, es mucho más reciente y se remonta a finales del siglo XX. Por ejemplo, hacia el año 1900 aparecen trabajos astrohúngaros dedicados al estudio de la conservación de productos cárnicos en una sala con atmosferas modificada a base de CO<sub>2</sub>, nitrógeno y oxígeno. Como contrapunto, determinadas aplicaciones de los gases a la conservación de los alimentos son mucho más recientes. Basten algunos ejemplos:

1. Las primeras tentativas de empleo de gases (nitrógeno fundamentalmente) para la congelación rápida de pescados y otros productos alimenticios datan de 1930-1940. (Herrmann K.,1970)
2. La aplicación de los gases para la protección de los vinos se inició en los años 1950-1960. (Herrmann K.,1970)
3. Otras aplicaciones se puede decir que acaban de producirse o están en experimentación , como son los productos de la llamada “Cuarta Gama” (frutas y verduras crudas, lavadas, peladas, cortadas, preparadas, acondicionadas y distribuidas a temperaturas de 2 a 4 °C). (Herrmann K.,1970)

El nitrógeno líquido es inerte, inodoro, incoloro, no toxico, es químicamente estable, no permite el crecimiento de bacterias ya que es asfixiante, estas propiedades lo hacen ideal para el contacto con alimentos es decir no tiene influencia alguna en las propiedades del alimento, el nitrógeno líquido mejora las características del alimento.

## **Introducción**

En los depósitos refrigerados el almacenamiento en refrigeración la temperatura se mantiene en torno a los 0°C, lo que frena el curso de los procesos que reducen la calidad en los productos, éste es el único factor que permite prolongar la capacidad de conservación de un artículo.

Las condiciones para el depósito refrigerado de alimentos dependen de las características específicas de estos productos, y están mucho más diferenciadas que en el caso de la conservación por congelación.

La misión principal de la congelación en términos económicos estriba en conservar la calidad de la materia prima y productos alimenticios durante los alimenticios de larga duración a bajas temperaturas. Pero no es el único empleo de las temperaturas muy bajas en la industria alimentaria.

“También se utilizan muy variadamente como importantes parámetros de procesos tecnológicos, en la crioconcentración de jugos, desecación-congelación, producción de helados etc.” (Gruda et. al., 1985)

Más de un siglo después de las primeras aplicaciones comerciales de la congelación de alimentos perecederos, el procedimiento es hoy uno de los más utilizados para una amplia gama de productos.

La capacidad de conservación del producto congelado es muchas veces superior a la del mismo producto mantenido en refrigeración. (Gruda et. al., 1985)

No se dispone de un conjunto de reglas sencillas para aplicar en la congelación. Un breve retraso antes de la congelación puede ser perjudicial en el caso de la carne, pero para numerosas hortalizas ocurre lo contrario. La rapidez óptima de congelación varía según los productos; lo mismo ocurre con el tipo de embalaje que se adopte. La duración del almacenamiento a largo plazo varía con el producto, la temperatura y el embalaje. Instituto Internacional del Frío., (I.I.F.1990).

En comparación con otros procedimientos, la congelación por líquidos enfriados ha disminuido mucho en importancia, aunque el coeficiente de transmisión de calor de los alimentos a los líquidos es diez veces, cuando menos, más elevado que el de transmisión de calor al aire, e influye decisivamente en la velocidad de congelación cuando se trata de congelar pequeñas piezas. Las condiciones del procedimiento imponen, sin embargo, serias desventajas. La sal de los líquidos utilizados para el intercambio calórico puede penetrar directamente en los alimentos y afectar desventajosamente su calidad. Se ha de evitar además que los líquidos lleguen a estar sucios, siendo preciso renovar con frecuencia los baños.

La congelación en nitrógeno líquido es utilizada para la elaboración y sobre todo para el envío de alimentos congelados, se empezó a utilizar muy recientemente el nitrógeno líquido (punto de ebullición:  $-196^{\circ}\text{C}$ ) que como sustancia inerte, no ejerce influencia alguna sobre el aroma y sabor de los alimentos.

Para realizar la congelación suele dar buen resultado un túnel de, según su capacidad. El nitrógeno líquido, extraído de un tanque donde se encuentra a una presión dada por el recipiente específico del fabricante, es dirigido en forma de duchas sobre el alimento desde un sistema de toberas o inyectores existente en el último tercio del túnel. Pasa al estado gaseoso al tomar el calor de vaporización del producto y, frío aún, es llevado en sentido opuesto al del recorrido, y por consiguiente en contracorriente al producto que se enfría. Así pues, en su desplazamiento a través del túnel, los alimentos son primero pre-enfriados hasta un punto próximo al de congelación con nitrógeno frío en estado gaseoso y rápidamente congelados a continuación mediante pulverización o rociado. En la zona de post-enfriamiento que sigue, esto es, en el sector que queda de túnel, se establece un equilibrio de temperaturas entre la superficie de los productos y un núcleo central.

También, por medio de una cinta transportadora, se puede conducir directamente el alimento a un recipiente lleno de nitrógeno y de allí a la nave de envasado (congelación por inmersión). Sin embargo con este procedimiento existe el riesgo que el producto se rompa o se reviente a causa de la extraordinariamente rápida congelación y del vertiginoso aumento de volumen que comporta.

## CAPITULO 1 Marco Teórico

### 1.1 Nitrógeno descripción general y propiedades químicas

El nitrógeno es un gas incoloro, inodoro e insípido. No es inflamable y no cede a la combustión. El aire atmosférico contiene 78,09% (en volumen) de nitrógeno. El gas es ligeramente más ligero que el aire y ligeramente soluble en agua. Es inerte, excepto a altas temperaturas, cuando se combina con ciertos metales activos, tales como litio, magnesio y titanio, para formar nitruros. Se forma el óxido nítrico y dióxido de nitrógeno con oxígeno, amoníaco con el hidrógeno, nitrógeno y sulfuro con azufre. En combinación con halógeno, nitrógeno puede formar compuestos altamente explosivos. También es fisiológicamente necesario para todos los animales y la vida vegetal. El nitrógeno se condensa en su punto de ebullición,  $-195,8^{\circ}\text{C}$  ( $-320,4^{\circ}\text{F}$ ), a un líquido incoloro e inodoro que es más ligero que el agua y caracterizado principalmente gran inercia química (no ataca o reacciona con otros productos) lo que favorece enormemente su utilización en la elaboración, envasado y conservación de los productos alimenticios. Cuando el nitrógeno líquido se vaporiza y después se calienta a temperatura ambiente, se consume una gran cantidad de calor. Esta propiedad hace que el nitrógeno líquido sea un refrigerante ideal en muchos casos.

A presión y temperaturas normales, vemos que es un gas no inflamable e inerte. No es posible la respiración de los seres vivos en atmósferas de nitrógeno. Tampoco es posible la combustión de los cuerpos en este tipo de gas. Por otra parte, el nitrógeno es un elemento esencial para la vida, ya que forma parte de la estructura proteínica de los animales y de las plantas.

El nitrógeno se expansiona al pasar de líquido a gas hasta 696.5 veces su volumen, cediendo su calor latente (47.74 Kcal/kg) en el proceso.

En cuanto su obtención del nitrógeno líquido de forma industrial se hace licuando el aire a base de comprimirlo y enfriarlo en etapas sucesivas, por debajo de su temperatura crítica ( $-141^{\circ}\text{C}$ ) y de su presión crítica  $38\text{ kg/cm}^2$ . Una vez que tenemos el aire en estado líquido, se separan a sus tres componentes principales (nitrógeno, oxígeno y argón por destilación

fraccionada. La separación se va haciendo por partes debido a su punto de ebullición oxígeno (-183°C), argón (-185°C) y por último el nitrógeno (195.8°C). (A. Madrid)

## 1.2 Congelación con nitrógeno líquido

La congelación en nitrógeno líquido se introdujo en la producción de conservas congeladas a principios de los años 60. En estos aparatos se emplea nitrógeno puro resultante en instalaciones de aire líquido como subproducto de la obtención de oxígeno. Tiene las siguientes propiedades físicas:

<b>TEMPERATURA DE EBULLICION</b>	<b>195.7°C</b>
<b>DENSIDAD</b>	<b>810 kg/m<sup>3</sup></b>
<b>Entalpía de evaporación</b>	<b>200.50 kJ/kg</b>
<b>Capacidad calórica específica del vapor de N<sub>2</sub></b>	<b>1.05 KJ /kg K</b>
<b>Calor latente de vaporización</b>	<b>47.74 Kcal/kg</b>
<b>Punto triple</b>	<b>-210°C, 0.1253Bar</b>

Tabla 1 Propiedades del nitrógeno Líquido

Cuatro son sus cualidades principales que han hecho al nitrógeno licuado, el fluido criogénico por excelencia para los procesos de refrigeración y ultra-congelación.

1. Su inercia química (no reacciona con otros cuerpos).
2. Su potencia frigorífica.
3. No es toxico.
4. Su bajo precio.

Las frigorías suministradas por un litro de nitrógeno líquido para enfriar un producto a -20°C son 70, pero de ellas 38.4 frigorías lo son a un bajísimo nivel térmico (-195.8°), lo que le confiere una gran rapidez de congelación. Por otra parte, la potencia frigorífica suministrada por una cantidad dada de nitrógeno líquido varía poco en función del nivel térmico al cual se suministran las calorías, contrariamente a lo que ocurre en las instalaciones clásicas de refrigeración. Como ejemplo podemos indicar que la potencia

frigorífica del nitrógeno líquido a  $-50^{\circ}\text{C}$  representa el 93% de la potencia frigorífica a  $-20^{\circ}\text{C}$ . Se puede, por lo tanto, rebajar la temperatura final de refrigeración con una incidencia económica mucho más débil.

Por otra parte, si el nitrógeno es utilizado en forma líquida en los procesos de refrigeración y congelación rápida de alimentos, en forma gaseosa se puede emplear en la conservación y acondicionamiento de esos mismos productos. Como ejemplos:

- Conservación de carnes y pescados en atmósferas de nitrógeno.
- Protección de vinos y otras bebidas desde la elaboración al embotellado con nitrógeno gaseoso.

También por medio de una cinta transportadora, se puede conducir directamente al alimento aun recipiente lleno de nitrógeno y de allí a la nave de envasado (congelación por inmersión). Sin embargo, con este procedimiento existe el riesgo que el producto se rompa o reviente a causa de la extraordinariamente rápida congelación y del vertiginoso aumento de volumen que comporta. Cuando se utiliza este sistema en judías verdes, ha de controlarse muy cuidadosamente el tiempo de inmersión si se requiere obtener un producto de agradable apariencia y con tejidos bien conservados. Basta con exceder el tiempo óptimo de inmersión, para que las judías puedan reventar.

El procedimiento de rociado tiene la ventaja de una rápida congelación acompañada de una intensa eliminación del oxígeno, con lo que puede conseguirse que se conserven muy bien las propiedades originarias del producto, en el caso, por ejemplo de frutas y hortalizas sensibles. La atmósfera de nitrógeno puede impedir la oxidación de las grasas y sustancias aromáticas.

La congelación por nitrógeno líquido da buenos resultados en espárragos, judías verdes, tomates, pepinos, melones, fresas y frambuesas, pues mantiene en buen estado los tejidos de estos productos; va bien igualmente para la clara de huevo cocida. Se ha recomendado también para maíz dulce, ciruelas, cerezas, uvas y champiñones, así como para ciertos pescados selectos, cuales son lenguados, anguilas, salmones y también langostinos, gambas y otras. La carne de cerdo congelada por nitrógeno mejora de aspecto y consistencia. En

aves, la superficie adquiere una tonalidad clara por efecto de la congelación muy rápida. También se ha recomendado el procedimiento para bollos y pasteles pobres en grasas, debido a que con él se pasa muy rápidamente la zona de temperaturas comprendida entre 30 y -7 se evita así muy bien el fenómeno de revenido que dentro de ese margen se produce.

Al igual que con cualquier nuevo procedimiento, es la practica la que ha de decidir a qué productos conviene. Frente a las ventajas de un corto tiempo de congelación funcionamiento relativamente simple, aparatos sencillos y congelación en atmosfera neutra, se ha de oponer, al comparar este sistema con los convencionales, el más elevados coste por caloría. De ahí que resulte de interés principalmente para productos de alto valor que precisan de congelación muy rápida.

Es interesante aplicar el nitrógeno líquido de enfriamiento de medios de transporte, dado que se logran con él especiales ventajas en el orden económico, como disminución del riesgo que supone el transporte para los productos, pues aun elevadas temperaturas exteriores, puede reducirse rápidamente la temperatura de la caja de la carga, y conseguir menos carga muerta y gastos se servicio.

### 1.3 Tanque de almacenamiento Dewar

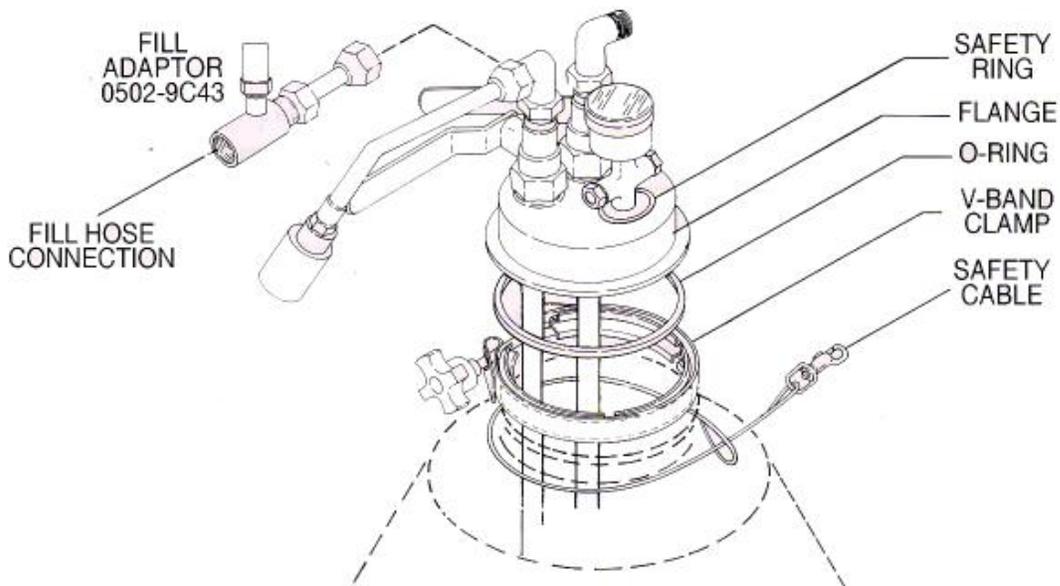
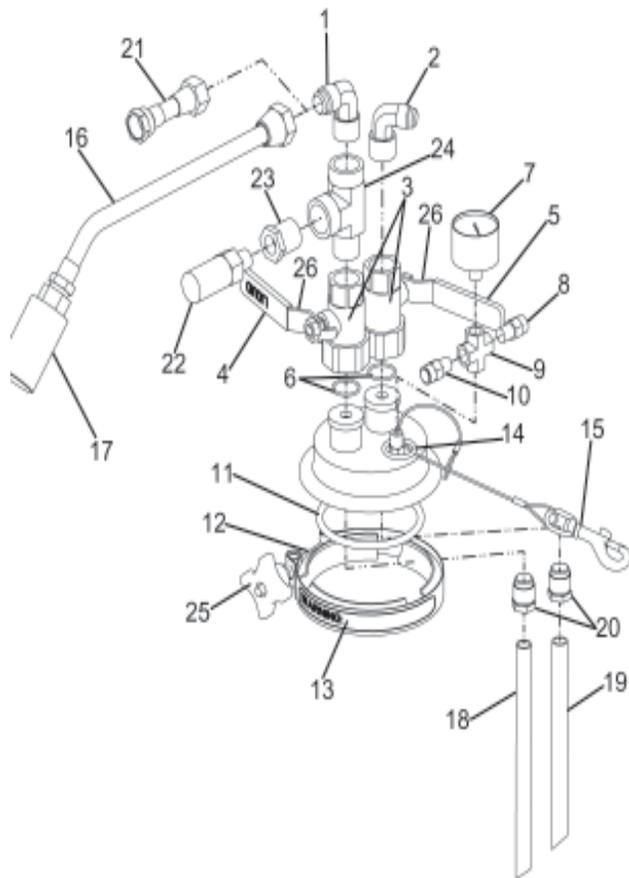


Figura. 1 Cuello Dewar con sistema de salida de líquido



- 9 Cruz 1/8\* NPT
- 10 Válvula de seguridad 15 psig (1.0 bar/103 kPa)
- 11 O- anillo de brida
- 12 V- abrazadera de banda.
- 13 Etiqueta de advertencia
- 14 Anillo para el cable de seguridad
- 15 Montaje de cable de seguridad
- 16 Montaje del surtidor.
- 17 Separador de fase (parte del conjunto del surtidor).
- 18 Tubo de extracción del líquido.
- 19 Tubo venteo.
- 20 Contratuerca, compresión.
- 21 Adaptador de llenado.
- 22 Válvula de Alivio
- 23 Hex buje , 1/2 " X 1/4 " , latón  
(Hex Bushing, 1/2" X 1/4", Brass)
- 24 Street Tee 1/2" NPT (calle T)
- 25 V- Banda de la abrazadera del pomo de apriete.
- 26 Mango Reemplazo de la válvula

**Figura. 2 Sistema de extracción.**

Articulo	DESCRIPCIÓN
1	Codo, liquido
2	Codo, venteo
3	Válvula (liquido/venteo)
4	válvula cubierta de la manija líquido
5	Válvula cubierta de la manija, venteo.
6	Junta tórica de válvula
7	Manómetro
8	Válvula de seguridad 10psig (0.7 bar/103kPa)

#### **1.4- Equipos de congelación criogénica**

Los procesos que cursan en los productos dependen en buena medida de su temperatura. Una propiedad fundamental de la materia es el movimiento de sus moléculas. La intensidad de este movimiento viene determinada por la temperatura y por el estado de agregación del cuerpo. En el estado gaseoso realizan las respectivas moléculas en movimiento y llenan en totalidad el espacio libre; en estado líquido. Las moléculas reunidas en grandes acúmulos se mueven dentro de un espacio muy estrecho; en estado sólido, las moléculas aparecen exactamente ordenadas por lo general formando cristales, siendo capaces entonces de realizar un movimiento de oscilación muy limitado. A la temperatura del cero absoluto (0 K) desaparece todo movimiento.

El grado de movilidad de las moléculas influye sobre la frecuencia de los choques, lo que a su vez ejerce influencia sobre la intensidad de los procesos físico-químicos que discurren en un cuerpo dado y modifica las propiedades iniciales del cuerpo en cuestión. (Gruda Et. al.1985).

#### **1.5. Armarios de congelación**

Con el objeto de conseguir una congelación muy rápida (ultracongelación) de los alimentos, se utilizan gases tales como el nitrógeno líquido a  $-195.8^{\circ}\text{C}$ , que se pulverizan sobre los productos en el interior de un armario o túnel, con lo que se consigue su congelación en breves minutos (1 a 15), y a bajas temperaturas. En primer lugar los armarios de congelación de alimentos son equipos que tienen lugar por lotes o cargas sucesivas. Los productos se colocan en bandejas o parrillas que a su vez se van distribuyendo en un carro que a su vez se van distribuyendo en un carro que una vez lleno se empuja hacia el interior del armario, que se cierra y puede comenzar el proceso. Se hace entonces circular el gas criogénico, entre los productos, procedentes de una entrada colocada en la parte superior del armario. Unas rampas de pulverización verticales (situadas a uno y otro lado de los ventiladores), dispersan la inyección de gas.

Los ventiladores agitan y distribuyen el gas a muy baja temperatura ( $-195.8^{\circ}\text{C}$  si se trata de nitrógeno), entre las bandejas o parrillas con los productos alimenticios que de este modo, y en muy pocos minutos, se enfrían hasta la temperatura requerida.

Una electroválvula regula el caudal frigorífico en función de las características del producto y de la temperatura final que se quiera lograr. Para ello, la válvula está conectada a un regulador de temperatura.

Se puede aumentar o disminuir la potencia frigorífica instantánea cambiando el diámetro de los pulverizadores. El armario es de acero inoxidable, aislado térmicamente (suelo incluido) con poliuretano inyectado. Todas sus partes son fácilmente accesibles para proceder a su limpieza ó tareas de mantenimiento.

El diseño de estos armarios se ha cuidado al máximo pa cumplir con la normativa internacional de equipos para el tratamiento de alimentos , reduciendo al máximo posible los puntos de sedimentación facilitando así las opciones de limpieza.

Los armarios son idóneos para su utilización en fábricas de tamaño pequeño o mediano, que traten diversos productos en una misma jornada laboral. También pueden servir como instalaciones piloto para ver como se comportan productos nuevos en los procesos de refrigeración y congelación.

Son equipos de fácil manejo, poco voluminosos, reducido coste y muy flexibles, ya que se pueden utilizar en hospitales , colegios, cocinas centrales , colectividades, empresas alimentarias, etc, para la refrigeración o congelación de platos cocinados, precocinados, carnes, pescados, productos lácteos, bollería, pastelería , helados, etc.

## **1.6. Túneles de congelación**

Para la congelación o refrigeración de alimentos por nitrógeno líquido, en sistemas continuos se utilizan unos túneles especiales. Estos túneles consisten en un recinto aislado a través del cual circulan los productos mediante un sistema de transporte, a velocidad regulable. En el último tercio del transportador, una rampa de pulverización dispersa sobre el producto el nitrógeno líquido (-195.8°C) en finas gotas. El gas frio resultante de la vaporización, se dirige por acción de unos ventiladores, en contracorriente con el producto, lo que propicia un excelente rendimiento térmico en las instalaciones. El funcionamiento y regulación de este tipo de túneles es muy sencillo, bastando con controlar dos factores:

- La velocidad de transporte del producto en el interior del túnel que será función de las dimensiones y las características del alimento. En general basta un paso de 3 a 5 minutos para conseguir su congelación o refrigeración, según se desee.
- El caudal de nitrógeno líquido suministrado, que también será función de la masa de producto y de sus temperaturas a la entrada y salida de túnel.

La pulverización del nitrógeno líquido se realiza por medio de boquillas dispuestas en rampa. Su situación se puede variar de conseguir perfil térmico más adecuado en el interior del túnel.

La regulación automática del caudal de nitrógeno líquido es función de la temperatura que marque la sonda colocada en el interior del túnel.

Los modernos túneles están constituidos por un recinto aislado, atravesado por tres cintas transportadoras. De acero inoxidable.

A. Madrid clasifica en tres etapas que podemos distinguir en el funcionamiento de un túnel de este tipo:

- 1º Etapa. Los productos se cargan a granel en la cinta transportadora superior, que se desliza rápidamente a fin de que el nivel de carga no sea excesivo, evitándose así que las diferentes piezas de producto se peguen entre sí.
- 2º Etapa. Los productos caen en la segunda cinta transportadora formando una capa de mayor espesor.
- 3º Etapa. En la tercera cinta, continua la congelación hasta el centro del producto.

La caída de una a otra cinta ayuda a evitar el fenómeno de pegaduras en los productos tratados.

Estos túneles son muy flexibles y pueden tratar todo tipo de productos tales com hamburguesas, salchichas, carnes troceadas, filetes de pescado, mejillones, gambas, champiñón, cebollas, etc.

Veamos a continuación como tiene lugar el intercambio térmico entre el producto y el nitrógeno líquido dentro del túnel. Podemos distinguir 3 zonas.

1° Zona Intercambio frigorífico gas-producto. Esta zona constituye el tramo más largo del túnel. Cerca de la entrada del producto, el nitrógeno gaseoso circula en contracorriente con aquél, gracias a un sistema de ventilación. La extracción y salida al exterior del nitrógeno gaseoso se hace mediante una chimenea colocada en la zona de entrada del producto.

2° Zona. Pulverización. Aquí es donde tiene lugar la inyección de nitrógeno líquido sobre el producto, para lo que se dispone de un dispositivo de pulverización de gran capacidad. La regulación del caudal de nitrógeno líquido que se debe inyectar, se puede efectuar con dos electro válvulas colocadas en paralelo y mandadas por una sonda de medida de temperatura o bien con una válvula proporcional.

3° Zona Estabilización. Esta parte es muy corta, La estabilización rápida de la temperatura del producto se consigue con la ayuda de ventiladores. A continuación se produce la salida del producto.

En la actualidad, se construyen los aparatos en forma de túnel con cinta transportadora de rejilla. Para aprovechar al máximo el medio refrigerante, el túnel se divide en cuatro zonas. (Gruda et. al., 1985)

1. Zona de Pre-refrigeración.
2. Zona de Enfriamiento intensivo.
3. Zona de pulverización
4. Zona de descomposición térmica

El medio refrigerante líquido sólo se rocía en la zona de pulverizada. El vapor de nitrógeno formado se conduce en dos direcciones: en sentido contrario al movimiento de la cinta transportadora a las zonas II y I (corriente principal, con el 99% aprox. del vapor), y la zona IV (alrededor del 1 %) en la misma dirección de la cinta hacia la abertura de la salida. La segunda corriente parcial tiene por finalidad impedir la penetración de aire y vapor de agua del ambiente exterior, ya que otro caso se formaría escarcha en el interior del túnel. En la

zona II se colocan potentes ventiladores radiales que provocan un fuerte movimiento del vapor de nitrógeno tangencialmente a la cinta. Construyendo el túnel adecuadamente y colocando bien los ventiladores, se alcanzan grandes velocidades de vapor (15 m/S) pese a las cuantías relativamente pequeñas de éste. Debido a la gran diferencia de temperatura, se consiguen de esta manera elevadas velocidades de congelación.

Para reducir las pérdidas de producto refrigerante durante la congelación por pulverización, La solución propuesta por esta patente se fundamenta en el movimiento forzado de la niebla en direccional producto que exhibe carga contraria, y en la adherencia de dicha niebla a la superficie de los artículos. (Gruda et. al., 1985)

En la zona I se colocan ventiladores de escasa potencia, que desplazan la corriente de vapor en perpendicular a la cinta. El vapor de nitrógeno usado se absorbe con ayuda de un ventilador (llamado extractor) cuya boquilla de absorción se instala debajo de la cinta, en la proximidad del punto de entrada de la materia prima la división antes apuntada de la corriente de vapor depende del rendimiento de este ventilador. Además se consigue una mejor regulación con persianas situadas entre las distintas zonas del túnel.

El revestimiento del túnel es de poliuretano forrado de hoja metálica resistente a los ácidos. En la zona III (pulverización), el revestimiento forma una pila, en la cual se recoge el líquido no evaporado. Este líquido fluye luego a través de un filtro hasta el depósito de nitrógeno para ser pulverizado. La presión de la bomba correspondiente es de 0.15 MPa.

Dentro del revestimiento del túnel existen termómetros de resistencia que marcan las temperaturas imperantes en cada zona y, mediante impulsos, regulan al aporte de nitrógeno líquido y la apertura o cierre de las persianas que controlan la corriente principal entre las zonas I y II.

El funcionamiento de las instalaciones en conjunto es automático, estando gobernado por un cuadro principal de distribución. La instalación va montada sobre un ligero bastidor de tubo y es transportable.

El aparato congelador debe ponerse en funcionamiento unos minutos antes de comenzar el proceso congelador, con objeto de que el interior del túnel se enfríe a la temperatura de

congelación. Antes de conectar el sistema pulverizador antes de conectar el sistema de pulverizador hay que poner en movimiento la cinta transportadora. Además, la velocidad de esta última se graduará de acuerdo con la clase de materia prima y la duración de la congelación cuando el interior del túnel alcanza la temperatura deseada, se pone en marcha la cinta transportadora, iniciándose la congelación, El resto dl funcionamiento estriba en vigilar la temperatura de trabajo alcanzada y en observar los instrumentos de medida y control.

### **1.6.1. Proceso de congelación en el túnel.**

La materia prima llega con la cinta a la zona I, donde se pre-refrigera en corriente de vapor de nitrógeno a  $-20\dots-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  y luego alcanza la temperatura de congelación. En este estado llega a la zona II, en la que entra en contacto con una corriente muy fuerte de vapor a  $-100\dots-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ . En esta zona se congela el producto hasta la mitad; sin embargo, la temperatura en el seno del artículo sigue siendo de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  aproximadamente. En la zona III tienen lugar la pulverización directa con nitrógeno líquido hasta la congelación de los productos con una gran diferencia de temperatura. En la superficie alcanza la temperatura los  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$  o menos mientras que en el centro la temperatura es de  $-5\dots-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La compensación de esta última temperatura hasta el valor medio deseado de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  sólo se realiza en la zona IV.

En el aspecto termodinámico, el proceso congelador es complicado en el túnel. El coeficiente de transmisión de temperatura  $\alpha$  se modifica considerablemente dentro del aparato congelador. En la zona I de la pre-refrigeración vale  $0.68\text{ W/m}^2\text{K}$ ; en la zona II (congelación intensiva) vale  $0.85\text{ W/m}^2\text{K}$  ; en la zona III (sistema pulverizador) vale aproximadamente  $175\text{ W/m}^2\text{K}$ . En la zona IV, es decir, después de la evaporación de los residuos de líquido en la superficie del producto, disminuye el intercambio de calor con el ambiente, y el valor de  $\alpha$  es casi 0. A efectos de cálculo, se toma el valor medio de  $\alpha= 60\text{ W/m}^2\text{K}$  para todo el proceso congelador.

También es variable la diferencia de temperatura existente entre el medio refrigerante y la superficie del producto. Al principio (zonas I y II) aumenta constantemente esta diferencia, pasando de 50 K a 150 K; después disminuye en la zona de pulverizado, hasta casi

equilibrarse térmicamente producto y medio refrigerante. Merced al flujo calórico procedente del interior del producto, aumenta súbitamente la temperatura en la zona IV, simultaneo coeficiente de transmisión de calor muy pequeño. La compensación de la temperatura en esta última fase se ve favorecida por el alto coeficiente de conductibilidad calórica en la capa congelada. Con un plazo de estancia suficientemente largo en la zona IV, los productos que abandonan el túnel exhiben una temperatura casi completamente uniforme.

También el tamaño de las raciones congeladas ejerce influencia sobre la manera de funcionar y rendimiento de la instalación congeladora. A medida que aumenta el grosor del producto, disminuye la velocidad de congelación, y, como consecuencia, se incrementa la duración de la operación. El rendimiento del túnel desciende a casi la mitad cuando, por razones técnicas, el producto no se pulveriza directamente con nitrógeno líquido.

### 1.8. Ley de Gay Lussac

Gay-Lussac hizo medidas del volumen de una masa fija de gas bajo presión constante y encontró que el volumen era una función lineal de la temperatura. Esto expresa por la ecuación

$$V = a + bt \quad (\text{Ec.1})$$

Donde “t” es la temperatura y “a y b” son constantes. La figura 1 muestra una gráfica del volumen en función de la temperatura. La intersección en el eje vertical es  $\alpha_0 = V_0$ , o sea, el volumen a 0°C. La pendiente de la curva es la derivada  $b = \left(\frac{\partial V}{\partial t}\right)_p$ . Según esto.

### 1.9. Ley de Charles.

Los experimentos de Charles demostraron que para una masa fija de gas bajo una presión constante, el aumento relativo de volumen por cada aumento de un grado de temperatura era el mismo para todos los gases, con los cuales el experimento. A una presión constante el aumento de volumen por grado es  $V = \left(\frac{\partial V}{\partial t}\right)_p$  por tanto, el aumento relativo en volumen por grado a 0°C es  $\left(\frac{1}{V_0}\right)\left(\frac{\partial V}{\partial t}\right)_p$ . Esta cantidad es el coeficiente de expansión térmica a 0°C para el cual empleamos el símbolo  $\alpha_0$ :

$$\alpha_o = \frac{1}{v_o} \left( \frac{\partial V}{\partial t} \right)_p$$

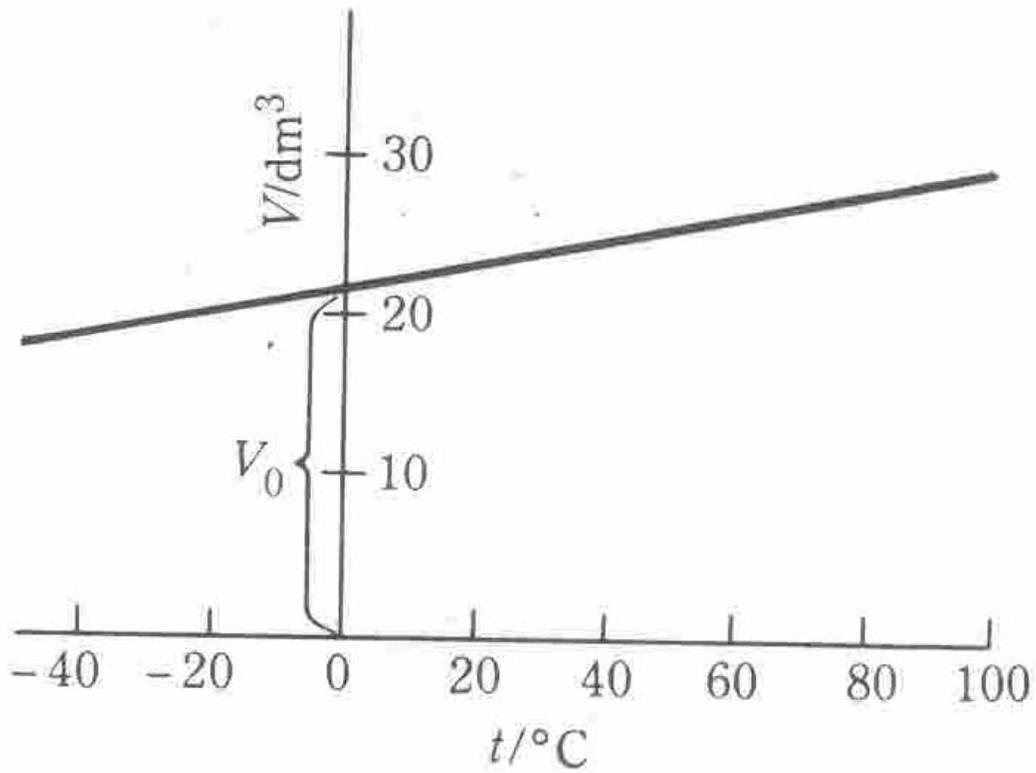


Figura. 3. Volumen en función de la temperatura ley de Charles.

# CAPITULO 2 Metodología de experimentación.

## COMPORTAMIENTO DEL NITRÓGENO LÍQUIDO-GAS Y SUS CONDICIONES OPERATIVAS PARA EL DISEÑO DE UNA CÁMARA CRIOGÉNICA.

**Planteamiento del problema:**

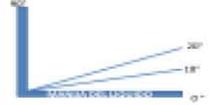
La congelación y refrigeración es un método efectivo de conservación en los alimentos, recientemente la utilización de fluidos criogénicos ha dado buenos resultados debido a los cortos tiempos que representa este tipo de aplicación. El nitrógeno al ser un gas inerte y en fase líquida tiene un punto de ebullición de  $-195.8^{\circ}\text{C}$ , lo vuelve ideal para el uso de congelación en los alimentos, pero dado su comportamiento inestable a condiciones normales de presión atmosférica es necesario confinarlo en sistemas de almacenamiento (Dewar).

El Nitrógeno líquido en fase gaseosa tiene la capacidad de aumentar su volumen casi instantáneamente 695.8 veces, lo que resulta un problema poder utilizar su capacidad para refrigerar y congelar en condiciones normales de presión.

**Objetivo General:** Caracterización de una cámara de enfriamiento por nitrógeno líquido y gaseoso, mediante la inyección de nitrógeno líquido a condiciones de presión y temperatura atmosféricas teniendo un registro de las historias térmicas en las diferentes zonas dentro de la cámara, para determinar las mejores áreas de transferencia calor con el alimento y establecer condiciones de operación en el tanque Dewar.

**Actividades Preliminares:**

Determinar el flujo Volumétrico en diferentes tiempos y aberturas de la manija de extracción de Nitrógeno líquido en las posiciones de  $18^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$ .



Volumen del nitrógeno en l.				
Apertura de Manija	Tiempo	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
$18^{\circ}$	10			
	20			
$20^{\circ}$	10			
	20			

Flujo Volumétrico $\text{cm}^3/\text{seg}$					
Apertura de Manija	Tiempo	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	Promedio
$18^{\circ}$	10				
	20				
$20^{\circ}$	10				
	20				

**Objetivo Particular 1:**

Construir una cámara criogénica que nos ayude a una fácil inyección Nitrógeno gaseoso y líquido, utilizando un material aislante adiabático y teniendo un registro de las temperaturas alcanzadas en las diferentes áreas de la cámara, para aprovechar las mejores zonas de transferencia de calor del Nitrógeno.

V.I. Áreas de la Cámara  
V.D. Temperatura  
V.R. Propiedades del Nitrógeno C.p. Volumen específico.

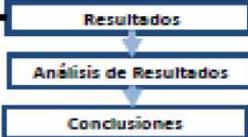
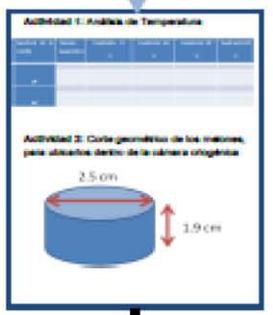
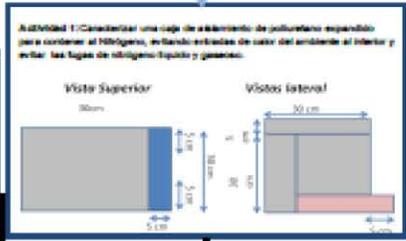
**Objetivo Particular 2:**

Analizar el comportamiento termodinámico del nitrógeno en sus dos fases líquido y gaseoso dentro de la cámara de enfriamiento, mediante historias térmicas en las diferentes áreas de la cámara, para ubicar el alimento en la zona que mejor genere una transferencia de calor.

V.I. Nitrógeno líquido-gas.  
V.D. Temperatura en el alimento  
V.R. Velocidad de congelación

**Actividad 1:**

- Colocar los termopares en las zonas A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M, N, O, P, Q, R, S, T, U, V, W, X, Y, Z de la cámara, a la salida de la boquilla del separador de fases, y a la salida del Nitrógeno gaseoso.
- Colocar los termopares tipo "P" en el centro geométrico de cada cuadrante del cilindro dentro de la cámara criogénica.
- Abrir la manija a  $18^{\circ}$  y  $20^{\circ}$  durante 10 y 20 segundos, pasado este tiempo cerrar la manija inmediatamente.
- Repetir a que todo el Nitrógeno Gaseoso desahale la cámara de aislamiento.
- Registrar temperaturas.

## 2.2 Materiales y Métodos:

Tanque Dewar.

Sistema de extracción de Nitrógeno.

Cámara criogénica de Poliuretano expandido.

Termopares tipo J.

Vaso p.p. de 500 mL.

Un calibrador.

Base para la Cámara Criogénica.

Nitrógeno Líquido.

Cronómetro

### Actividades Preliminares

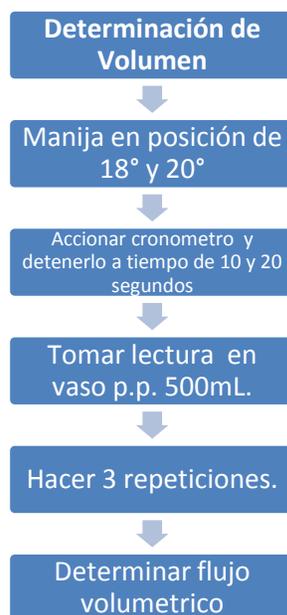


Figura. 4 Diagrama de actividades Preliminares

## Objetivo particular 1

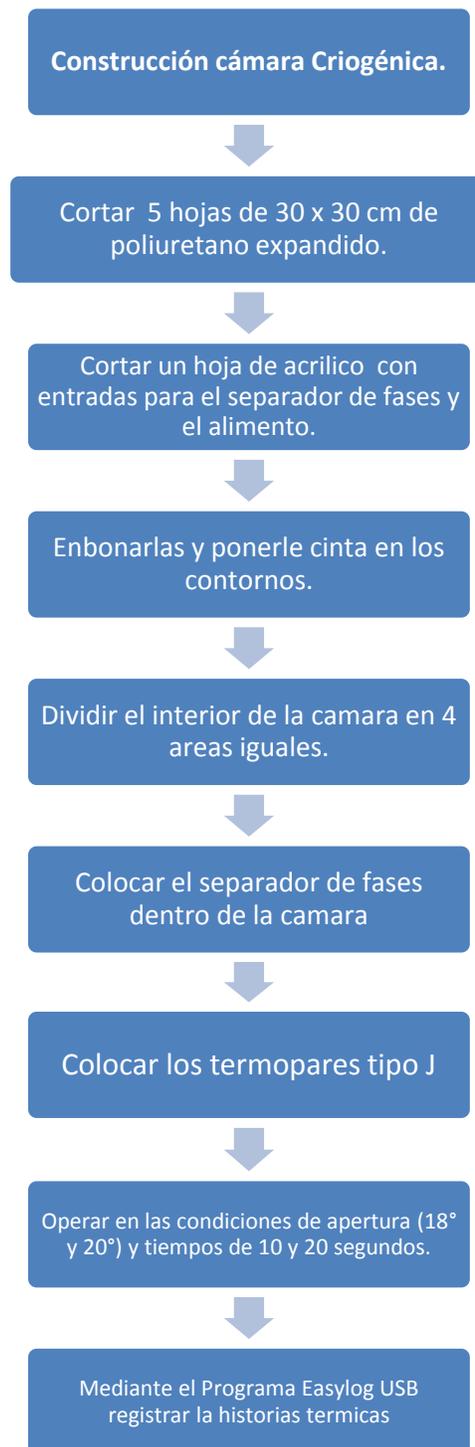


Figura. 5 Diagrama de proceso del Objetivo particular 1

**Objetivo particular 2:**

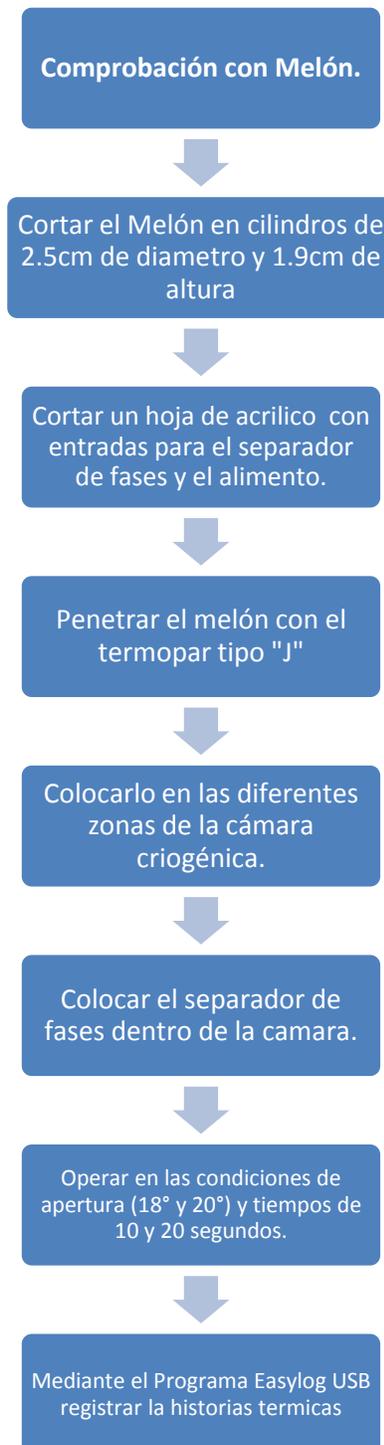


Figura. 6 Diagrama de proceso del O.P.2

### **Planteamiento del problema:**

La congelación y refrigeración es un método efectivo de conservación en los alimentos, recientemente la utilización de fluidos criogénicos ha dado buenos resultados debido a los cortos tiempos que representa este tipo de aplicación. El nitrógeno al ser un gas inerte y en fase líquida tiene un punto de ebullición de  $-195.8^{\circ}\text{C}$ , lo vuelve ideal para el uso de congelación en los alimentos, pero dado su comportamiento inestable a condiciones normales de presión atmosféricas es necesario confinarlo en sistemas de almacenamiento (Dewar).

El Nitrógeno líquido en fase gaseosa tiene la capacidad de aumentar su volumen casi instantáneamente 695.8 veces, lo que resulta un problema poder utilizar su capacidad para refrigerar y congelar en condiciones normales de presión.

### **Objetivo General:**

Caracterización de una cámara de enfriamiento por nitrógeno líquido y gaseoso, mediante la inyección de nitrógeno líquido a condiciones de presión y temperatura atmosféricas teniendo un registro de las historias térmicas en las diferentes zonas dentro de la cámara, para determinar las mejores áreas de transferencia calor con el alimento y establecer condiciones de operación en el tanque Dewar.

### **Objetivo Particular 1:**

Construir una cámara de enfriamiento que facilite la inyección de Nitrógeno líquido y gas, utilizando un material aislante adiabático y teniendo un registro de las temperaturas alcanzadas en las diferentes áreas de la cámara, para aprovechar las mejores zonas de transferencia de calor del Nitrógeno.

Hipótesis: La cámara criogénica nos ayudara determinar el comportamiento que tiene el nitrógeno en sus dos fases liquido-gas y las temperaturas que se pueden alcanzar dentro de ella.

V.I. Áreas de la Cámara

V.D. Temperatura

V.R. Propiedades del Nitrógeno C.p. Volumen específico,

**Objetivo particular 2:**

Analizar el comportamiento termodinámico del nitrógeno en sus dos fases líquido y gaseoso dentro de la cámara de enfriamiento, mediante historias térmicas en las diferentes áreas de la cámara, para ubicar el alimento en la zona que mejor genere una transferencia de calor.

V.I. Nitrógeno líquido-gas.

V.D. Temperatura en el alimento

V.R. Velocidad de congelación

Factor de variación (V.I.)	Nivel de variación	Numero de réplicas	Variable Dependiente	Variable de respuesta	Técnica o instrumento de medición
Apertura de la válvula	Alto	3	mL. utilizados de Nitrógeno	Temperatura alcanzada en la cámara	Vaso de p.p. y cronómetro
	Bajo				
Áreas de la cámara	Alto1	3	Temperatura en los cuadrantes	Condiciones del Nitrógeno en los cuadrantes	Termopares tipo J.
	Alto2				
	Bajo1				
	Bajo2				
Nitrógeno Líquido-Gas	Nitrógeno liquido	3	Temperatura en el alimento.	Velocidad de congelación.	Termopares tipo J
	Nitrógeno gaseoso				

**Tabla 1 Variables**

## 2.3 Desarrollo y resultados.

### 2.3.1. Actividades Pre-eliminares:

Procedimiento:

1.- Determinar el flujo Volumétrico en diferentes tiempos y aberturas de la manija de extracción de Nitrógeno líquido en las posiciones de  $18^\circ$ ,  $20^\circ$  y teniendo tiempos de 10 y 20 segundos.

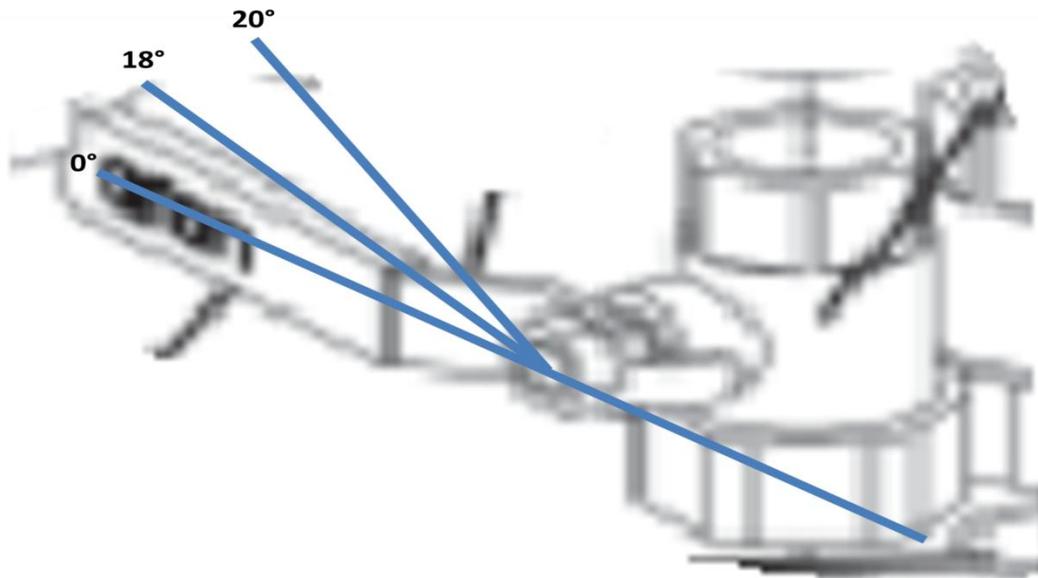


Figura. 7 Grados de Apertura

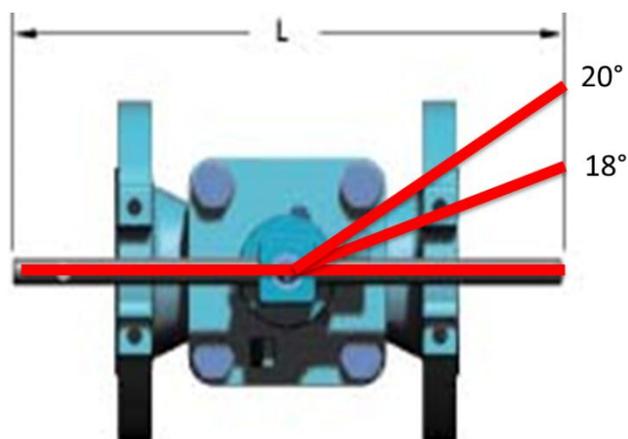


Figura. 8 Diagrama de la válvula en aperturas de  $18^\circ$  y  $20^\circ$ .

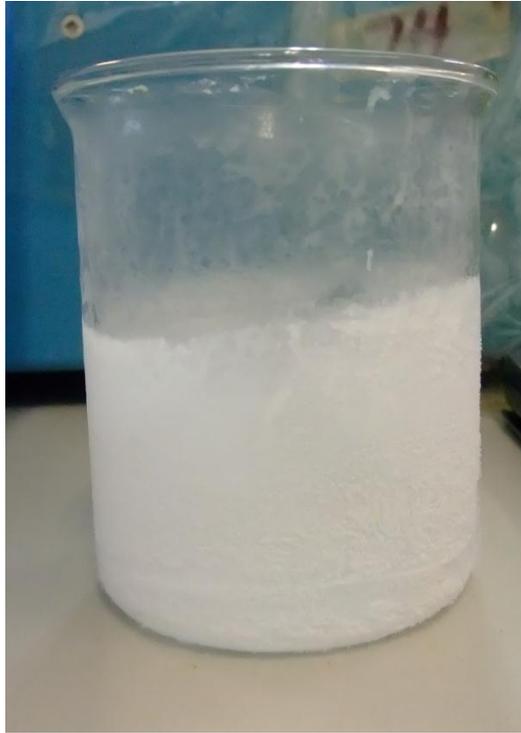


Figura. 9 Vaso de p.p. 250 después de la experimentación

**VOLUMEN en mL.**

Apertura de Manija	Tiempo(s)	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3
18°	10	45	38	48
	20	123	115	100
20°	10	100	110	95
	20	200	210	209

Tabla 2 Volúmenes obtenidos en diferentes tiempos y aperturas de la Válvula.

Como referencia en el manual Taylor Wharton nos indica que son posibles caudales de hasta 8 litros por minuto a presiones de trabajo de hasta 10 psig (0,7 bar / 69 kPa) .

Para determinar los caudales en nuestra experimentación es necesario tomar el tiempo que tarda en llenar cierto volumen.

El volumen fue medido un vaso de p.p. de 250 mL mediante y un cronómetro en el lapso de tiempo de 20 y 10 segundos.

El tiempo del cronómetro es a partir en el momento exacto que se accionó la manija de extracción de líquido del tanque Dewar.

$$Flujo\ volumetrico = \frac{Volumen}{Tiempo} = \frac{mL}{segundo} = \frac{m^3}{h}$$

CONDICIONES		Flujo Volumétrico $\frac{m^3}{h}$			Promedio
Apertura de Manija	Tiempo	Repetición 1	Repetición 2	Repetición 3	
18°	10	7.5E-8	6.33E-8	4.8E-5	1.60 E-5
	20	1.23E-4	1.15E-4	0.0001	4.17 E-3
20°	10	1.6667E-7	1.833E-7	4.75E-6	1.69 E-6
	20	1 E-5	1.05E-5	1.045 E-5	1.031 E-5

Tabla 3 Flujo volumétrico

Las mediciones más exactas son en la posición de la manija a 20° con 20 segundos, los resultados que se muestran en la tabla 3 nos muestra un volumen sin tanta variación en los datos esto se debe a que la apertura de la válvula de globo queda abierta en una posición que le permite el paso fácil de Nitrógeno líquido, mientras que en la posición a 18° no se le permite una fácil extracción del nitrógeno líquido,

### 2.3.2. Objetivo Particular 1:

Construir una cámara criogénica que nos ayude a una fácil inyección Nitrógeno gaseoso y líquido, utilizando un material aislante adiabático y teniendo un registro de las temperaturas alcanzadas en las diferentes áreas de la cámara, para aprovechar las mejores zonas de transferencia de calor del Nitrógeno.

Construcción de cámara criogénica.

Caracterizar una caja de aislamiento de poliuretano expandido para contener al Nitrógeno, evitando entradas de calor del ambiente al interior y evitar las fugas de nitrógeno líquido y gaseoso.

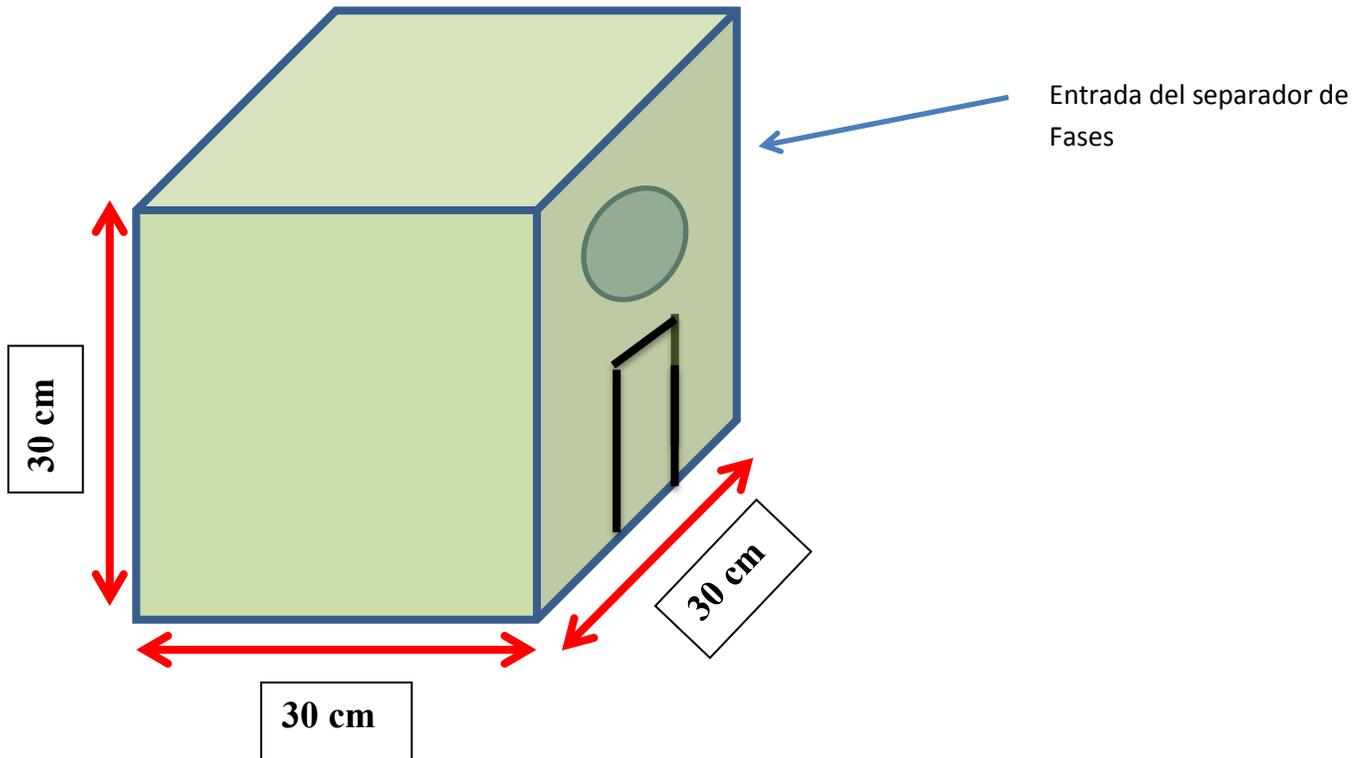


Figura. 10 Isométrico de cámara Criogénica.

1.- Cortar 5 hojas de poliuretano expandido, de 30x30cm con un grosor de 5 cm y marcar las áreas para tener un mejor ensamble como lo muestran las siguientes figuras.

## ***Vista Superior***

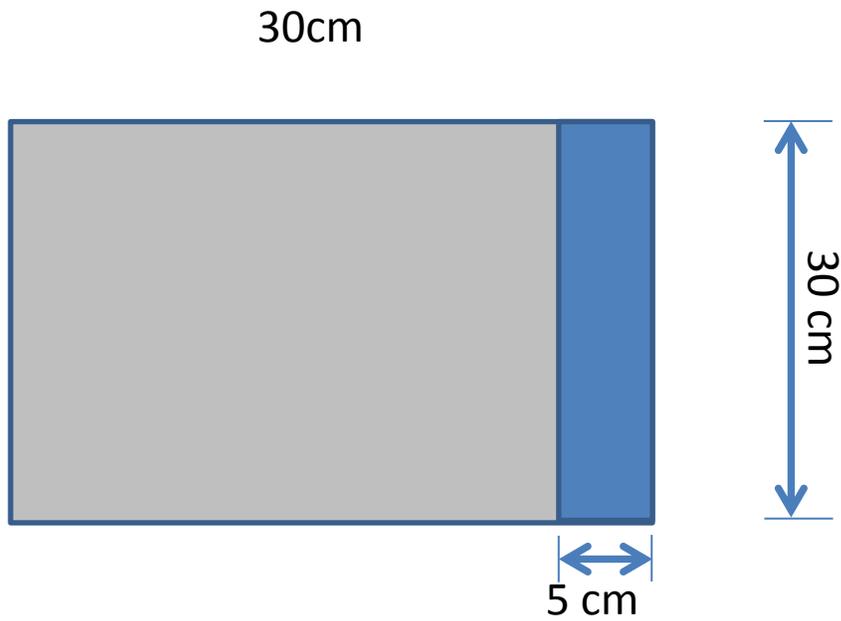


Figura. 11. Isométrico en vista Superior del diagrama de cámara criogénica.

## ***Vista lateral***

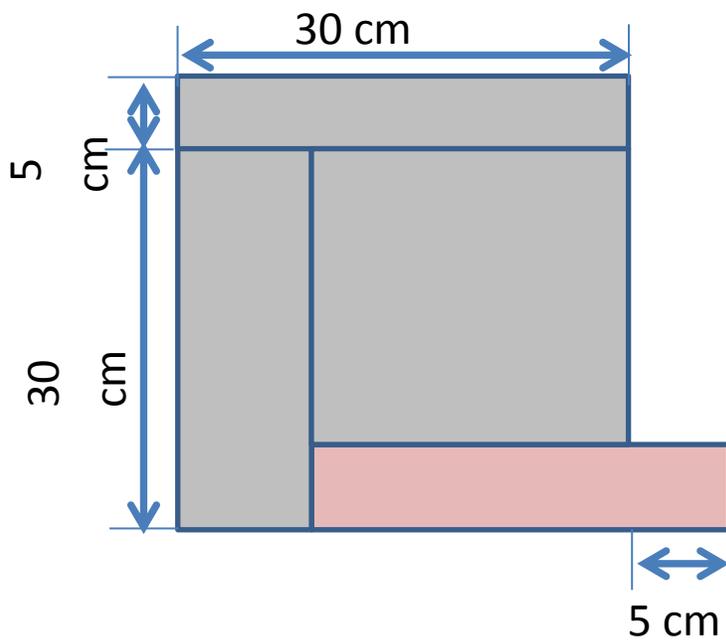


Figura. 12. Isométrico en vista Lateral del diagrama de cámara criogénica.

## *Vista Frontal*

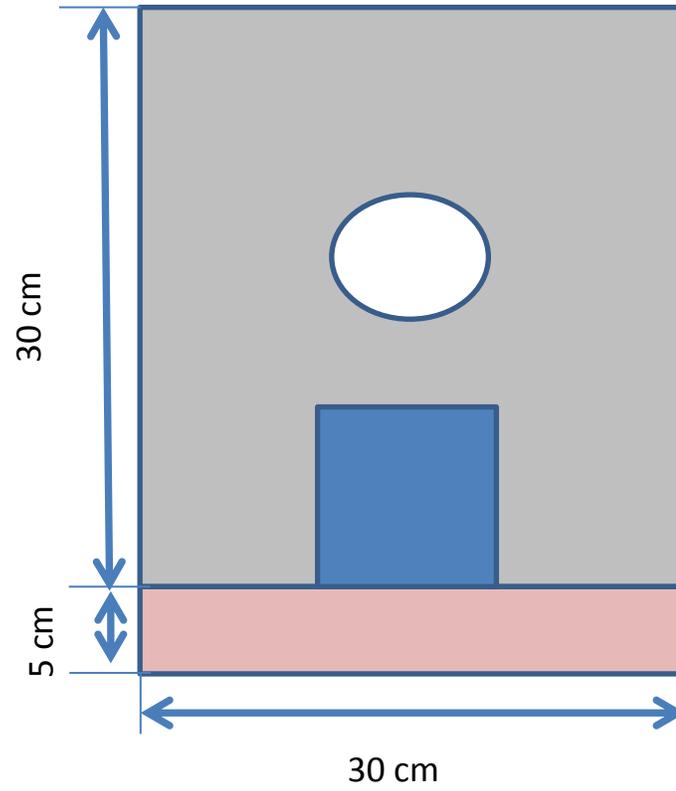


Figura. 13 Isométrico en vista Lateral del diagrama de cámara criogénica.



Figura. 14. Cámara criogénica construida

Procedimiento:

1.- Montar el equipo como se muestra en la siguiente figura:

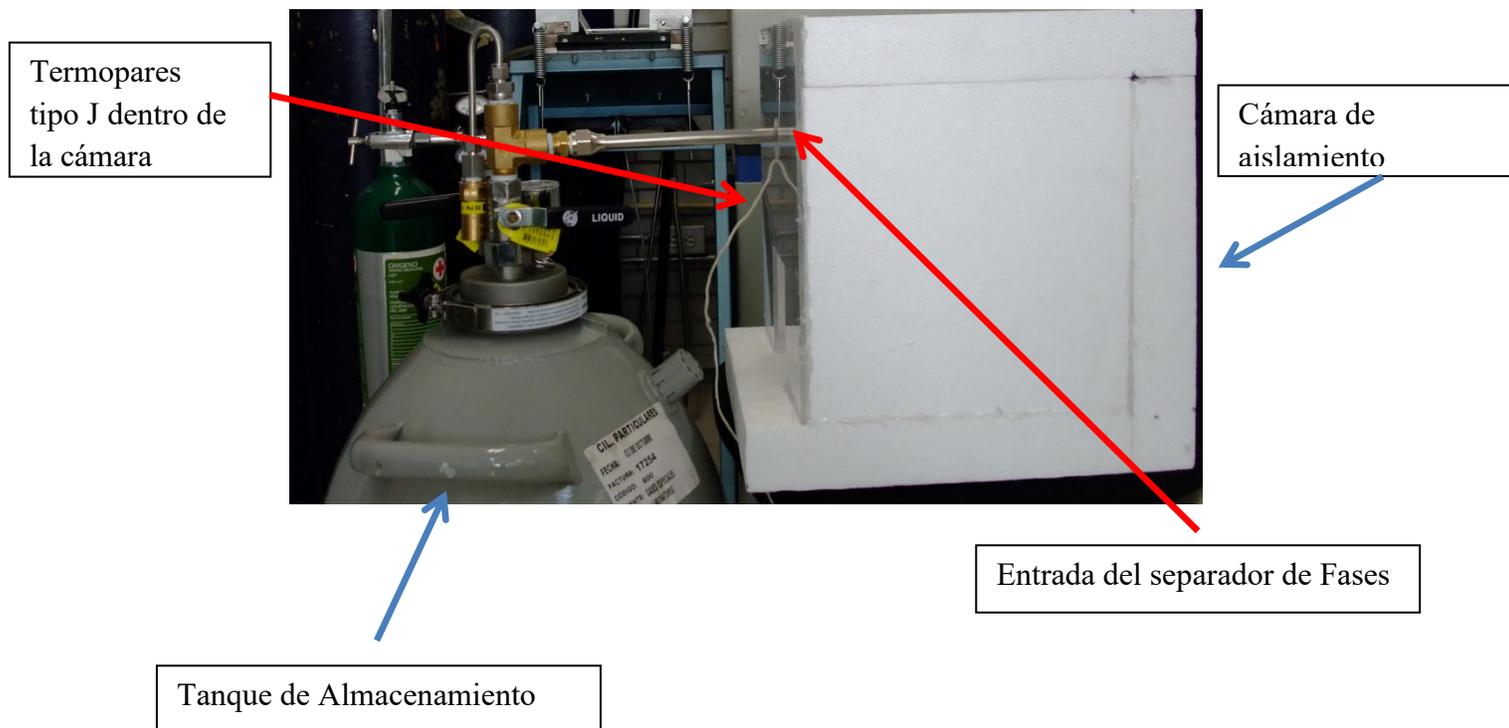


Figura. 15 Equipo de extracción de nitrógeno líquido con cámara de aislamiento listo para operar.

2.- Antes iniciar cada corrida de experimentación calibrar la cámara criogénica.



Figura. 16 Cámara criogénica con su base y calibrador

3.-Colocar los termopares en los muros A , B, C, Acrílico, Techo, Piso (izquierda y-derecha) de la cámara, a la salida de la boquilla del separador de fases, y a la salida del Nitrógeno gaseoso.

4.-Colocar los termopares tipo “J” en el centro geométrico de cada cuadrante delimitado dentro de la cámara criogénica.

5.-Abrir la manija a 18 y 20 ° durante 10 y 20 segundos, pasado este tiempo cerrarla inmediatamente.

6.-Esperar a que todo el Nitrógeno Gaseoso desaloje la cámara de aislamiento.

7.-Registrar temperaturas.

Comportamiento del Nitrógeno por Cuadrantes.



Figura. 18 Divisiones de cuadrantes dentro de la cámara

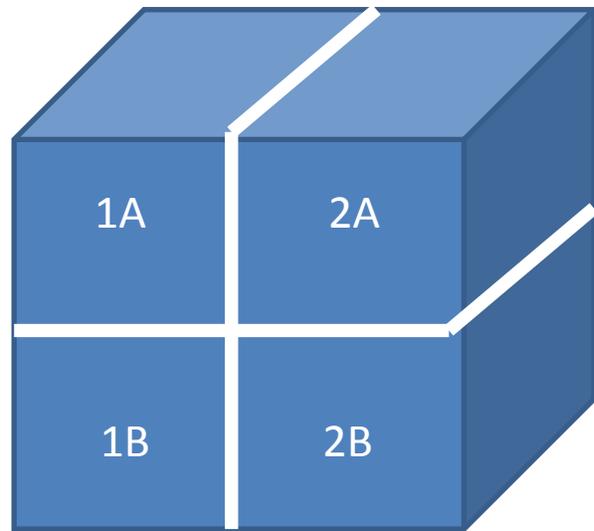


Figura. 17 División real de los cuadrantes.

## REPETICIÓN 1

Apertura de la manija	Tiempo (segundos)	Cuadrante	Cuadrante	Cuadrante	Cuadrante
		1A	1B	2A	2B
		°C	°C	°C	°C
18°	10	-20	-16	-7	-9
	20	-32	-39	-67.5	-79
20°	10	-34	-32	-53	-62
	20	-47.5	-49	-68	-79

Tabla 4 (1) Temperaturas del Nitrógeno dentro de la cámara en los diferentes cuadrantes.

## REPETICIÓN 2

Apertura de la manija	Tiempo (segundos)	Cuadrante	Cuadrante	Cuadrante	Cuadrante
		1 <sup>a</sup>	1B	2A	2B
		°C	°C	°C	°C
18°	10	-19	-13	-33	-38.5
	20	-35	-44	-43.5	-48.5
20°	10	-34.5	-33.5	-48	-58.5
	20	-53	-58	-71	-80.5

Tabla 5 (2) Temperaturas del Nitrógeno dentro de la cámara en los diferentes cuadrantes.

### REPETICIÓN 3

Apertura de la manija	Tiempo (segundos)	Cuadrante 1 <sup>a</sup> °C	Cuadrante 1B °C	Cuadrante 2A °C	Cuadrante 2B °C
18°	10	-23	-18	-50	-58
	20	-35.5	-40	-53	-60.5
20°	10	-28	-30	-54	-61
	20	-55	-58	-70	-78.5

Tabla 6 (3) Temperaturas del Nitrógeno dentro de la cámara en los diferentes cuadrantes.

En las siguientes graficas se muestra el comportamiento del nitrógeno líquido-gas en los 4 cuadrantes a sus diferentes condiciones, esto con el fin de tener una visión completa dentro de lo que está ocurriendo dentro de la cámara, se presentan los datos más representativos y en los anexos se presentan sus repeticiones.

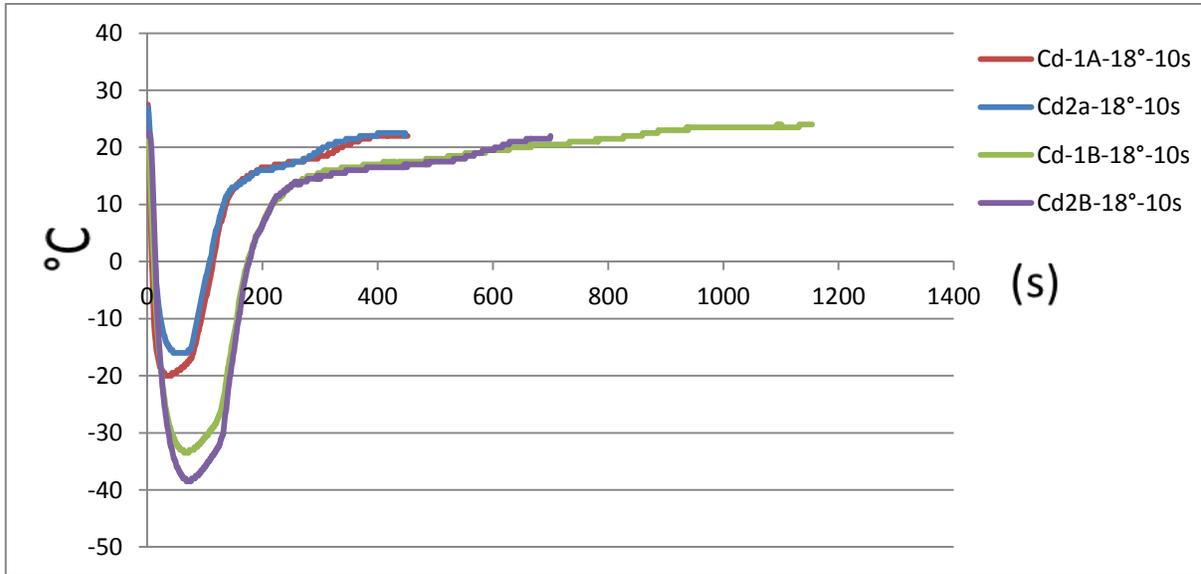


Figura. 19 Gráfica de posición de la manija 18° tiempo de apertura 10 segundos.

Propiedades termofísicas	Cuadrante 1A	Cuadrante 2A	Cuadrante 1B	Cuadrante 2B
Temperatura	-20°C	-15°C	-33°C	-38°C
Volumen específico ( $m^3/kg$ )	0.740	0.7556	0.7026	0.6879
Entalpía (KJ/Kg)	262.4	267.6	248.7	243.5
Cp (KJ/Kg)	1.042	1.042	1.042	1.042
Kt(W/(m*K))	22.49	22.49	21.48	21.096

Tabla 7. Propiedades termofísicas de las temperaturas obtenidas

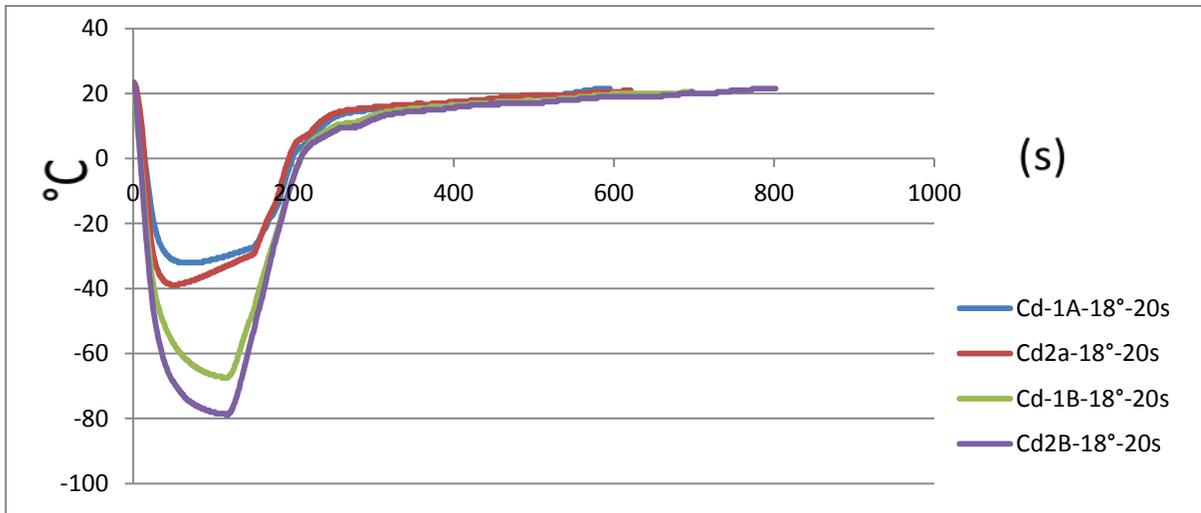


Figura. 20 Gráfica posición de la Manija de 18° tiempo de apertura 20 segundos

Propiedades termofísicas	Cuadrante 1A	Cuadrante 2A	Cuadrante 1B	Cuadrante 2B
Temperatura	-34°C	-41°C	-53°C	-62°C
Volumen específico ( $m^3/kg$ )	0.699	0.6791	0.6438	0.6174
Entalpía (KJ/Kg)	247.7	240.4	228.01	218.62
Cp (KJ/Kg)	1.042	1.04	1.042	1.043
Kt(W/(m*K))	21.4	20.86	19.91	19.18

Tabla 8 Propiedades termofísicas de las temperaturas obtenidas

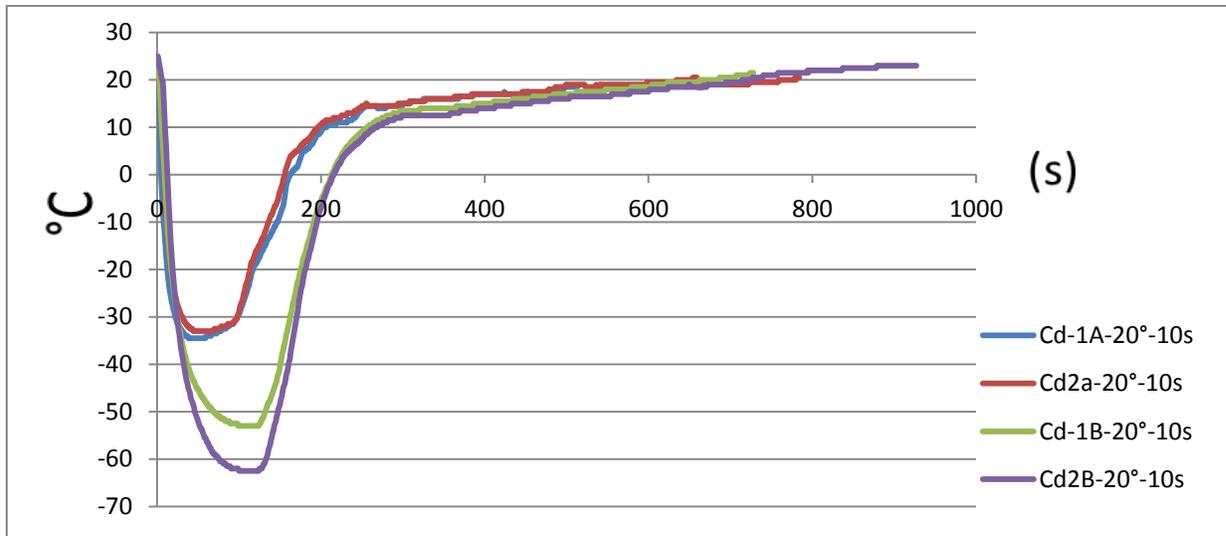


Figura. 21 Gráfica Posición de la manija 20° tiempo de apertura 10 segundos

Propiedades termofísicas	Cuadrante 1A	Cuadrante 2A	Cuadrante 1B	Cuadrante 2B
Temperatura	-32°C	-31°C	-51°C	-60°C
Volumen específico ( $m^3/kg$ )	0.7055	0.7085	0.6497	0.6233
Entalpía (KJ/Kg)	249.7	250.8	230.09	220.71
Cp (KJ/Kg)	1.042	1.042	1.042	1.043
Kt(W/(m*K))	21.56	21.64	20.07	19.35

Tabla 9 Propiedades termofísicas de las temperaturas obtenidas.

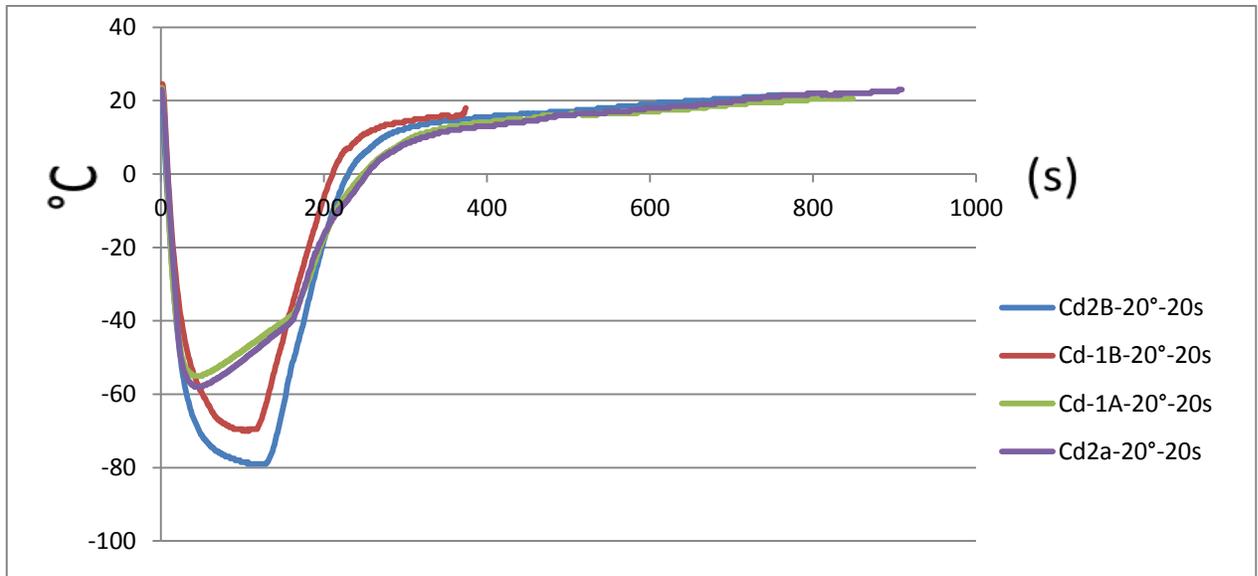


Figura. 22 Gráfica Posición de la manija 20° tiempo de apertura 20 segundos.

Propiedades termofísicas	Cuadrante 1A	Cuadrante 2A	Cuadrante 1B	Cuadrante 2B
Temperatura	-51°C	-55°C	-69°C	-79°C
Volumen específico ( $m^3/kg$ )	0.6497	0.638	0.5967	0.567
Entalpía (KJ/Kg)	230.09	225.92	211.32	200.99
Cp (KJ/Kg)	1.042	1.042	1.043	1.043
Kt(W/(m*K))	20.15	19.75	18.621	17.79

Tabla 10 Propiedades termofísicas de las temperaturas obtenidas.

### 2.3.3. Resultados en muros y techo.

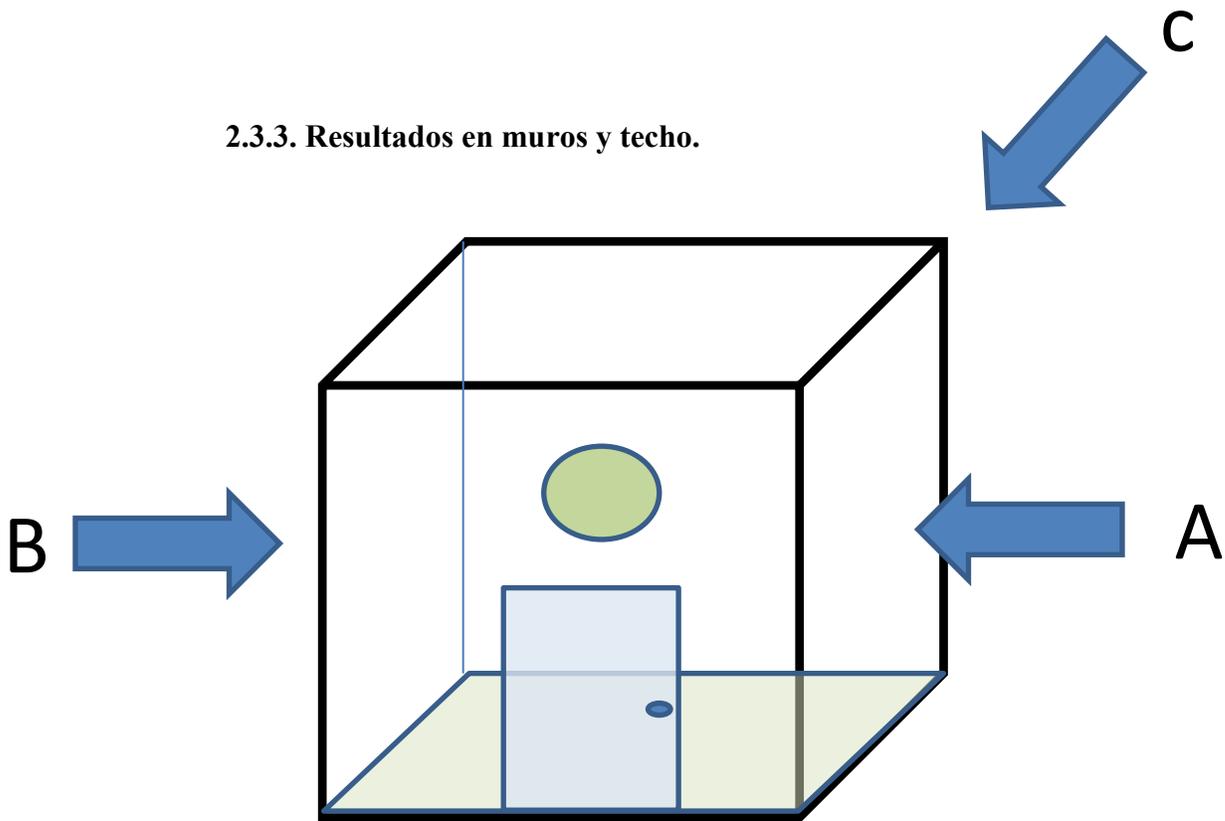


Figura. 23 Paredes de la cámara criogénica

Apertura de la manija	Tiempo (segundos)	Pared A (°C) repetición 1	Pared A (°C) repetición 2	Pared A (°C) repetición 3	Promedio
18°	10	-17	-21	-24	-20.6
	20	-39	-42	-37.5	-39.3
20°	10	-25	-25	-22.5	-24.1
	20	-38	-38	-50	-42

Tabla 11 Temperaturas obtenidas en la pared A a diferentes tiempos y aperturas de la válvula

Apertura de la manija	Tiempo (segundos)	Pared B (°C) repetición 1	Pared B (°C) repetición 2	Pared B (°C) repetición 3	Promedio
18°	10	-18	-17	-20.5	-18.3
	20	-32.5	-35	-27	-31.5
20°	10	-20.5	-21	-18.5	-20
	20	-33	-34	-42	-36.3

Tabla 12. Temperaturas obtenidas en la pared B a diferentes tiempos y aperturas de la válvula.

Apertura de la manija	Tiempo (segundos)	Pared C (°C) repetición 1	Pared C (°C) repetición 2	Pared C (°C) repetición 3	Promedio
18°	10	-5.5	-3	-15	-7.8
	20	-26	-15	-20	-20
20°	10	-26	-15.5	-22	-21
	20	-30	-28	-31.5	-29

Tabla 13 Temperaturas obtenidas en la pared C a diferentes tiempos y aperturas de la válvula.

Apertura de la manija	Tiempo (segundos)	Techo(°C) repetición 1	Techo(°C) repetición 2	Techo(°C) repetición 3	Promedio
18°	10	2.5	6.5	4.5	4.5
	20	3	0.5	5	2.8
20°	10	7.5	8.5	9.5	8.5
	20	4	4.5	-3	1.8

**Tabla 14** Temperaturas obtenidas en techo de la cámara a diferentes tiempos y aperturas de la válvula

Apertura de la manija	Tiempo (segundos)	Acrílico (°C) repetición 1	Acrílico (°C) repetición 2	Acrílico (°C) repetición 3	Promedio
20°	10	4.5	10.5	4.5	6.5
	20	-5	-5	-7	5.6

**Tabla 15.** Temperaturas obtenidas en el acrílico de la cámara 20° de apertura a diferentes tiempos.

En las siguientes gráficas se muestra el comportamiento del nitrógeno líquido-gas en los muros de la cámara criogénica a sus diferentes condiciones, esto con el fin de tener una visión completa dentro de lo que está ocurriendo con el material de la cámara. Se presentan los datos más representativos, en los anexos se presentan sus repeticiones.

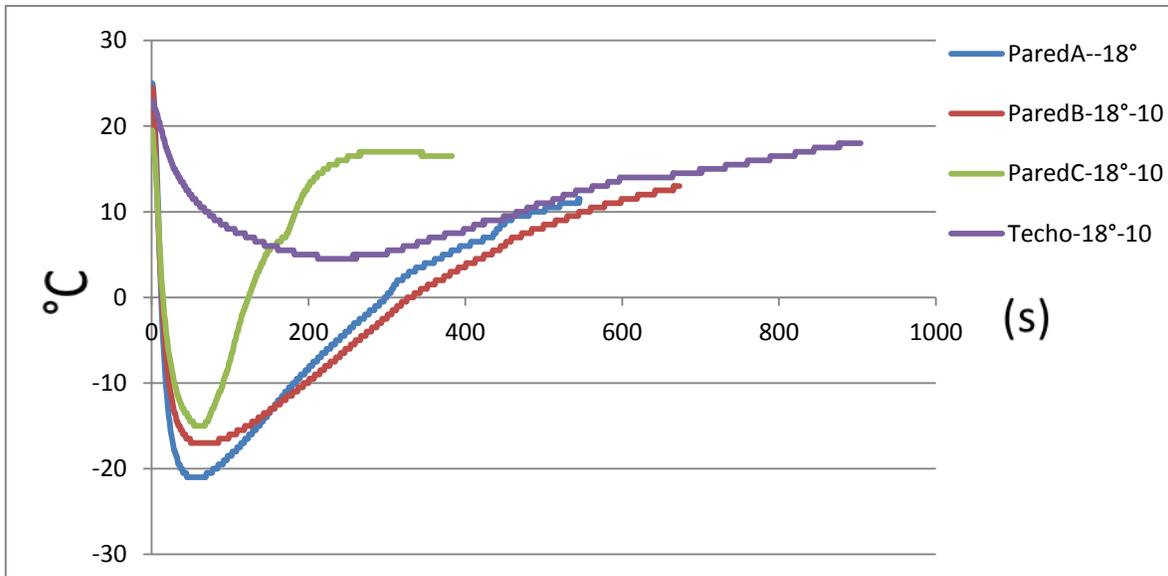


Figura. 24 Gráfica Posición de la manija 18° tiempo de apertura 10 segundos para todas las paredes de la cámara

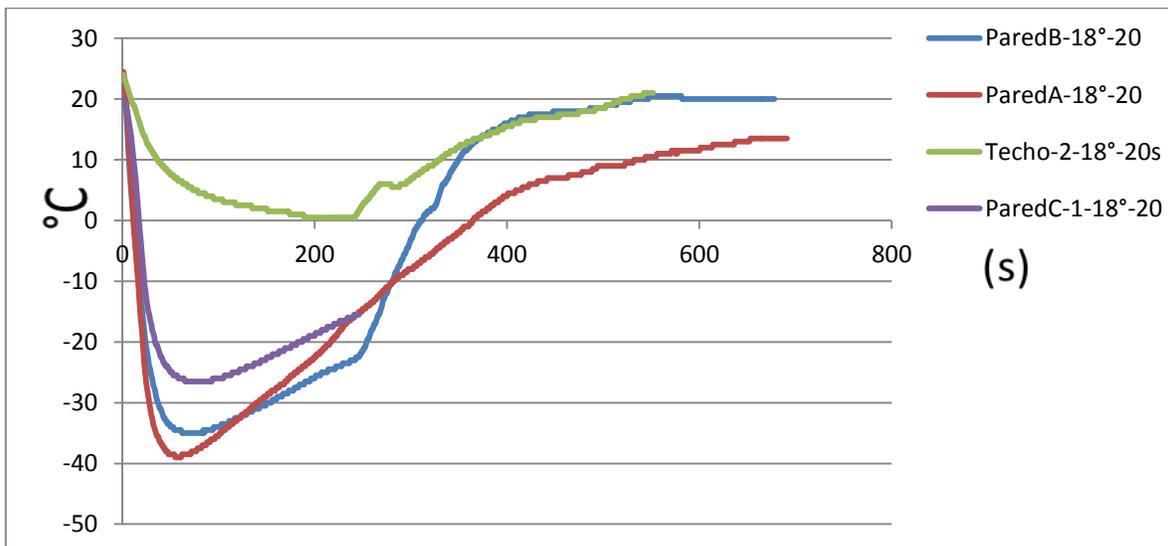


Figura. 25 Gráfica Posición de la Manija 18° tiempo de apertura 20 segundos para todas las paredes de la cámara.

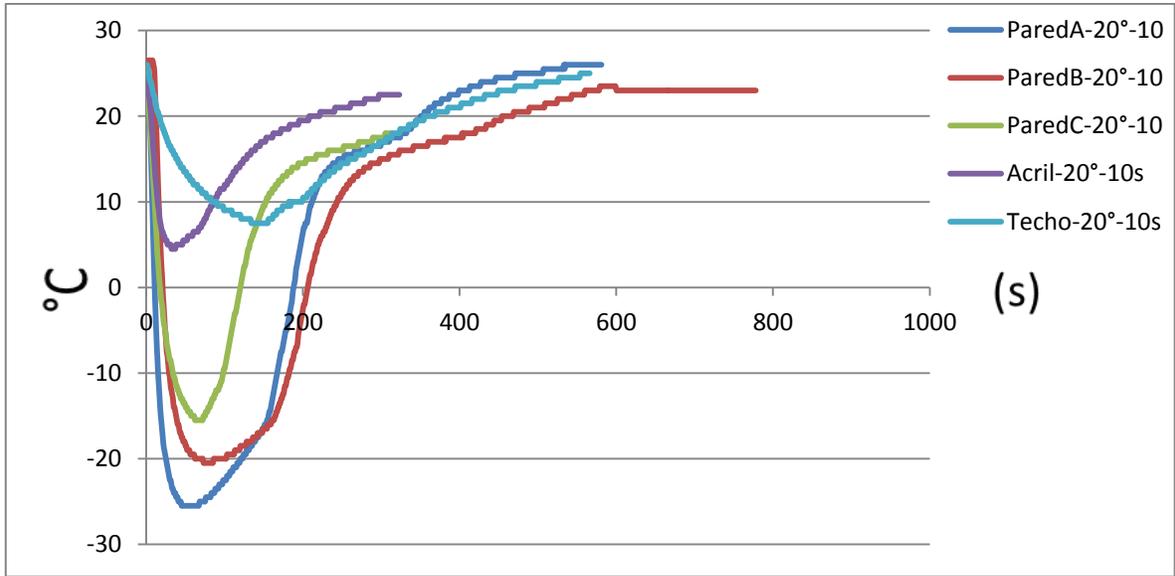


Figura. 26 Gráfica Posición de la manija 20° tiempo de apertura 10 segundos para todas las paredes de la cámara

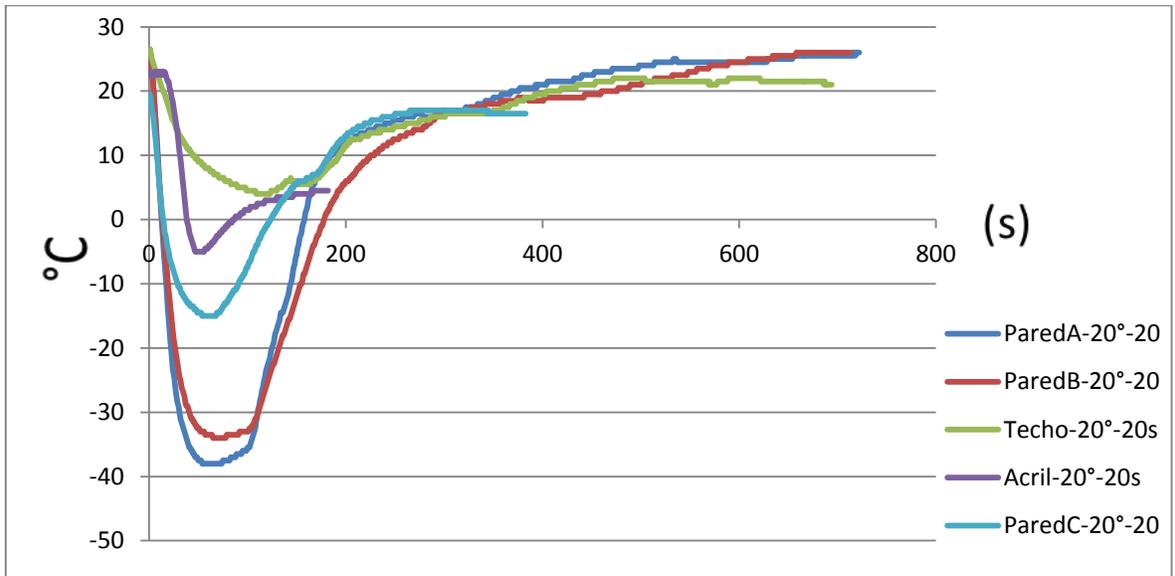


Figura. 27 Gráfica Posición de la manija 20° tiempo de apertura 10 segundos para todas las paredes de la cámara

#### 2.4. Desarrollo objetivo particular 2

Analizar el comportamiento termodinámico del nitrógeno en sus dos fases líquido y gaseoso dentro de la cámara de enfriamiento, mediante historias térmicas en las diferentes áreas de la cámara, para ubicar el alimento en la zona que mejor genere una transferencia de calor.

Hipótesis: En las zonas de menor temperatura generara una mayor transferencia de calor.

##### **Procedimiento:**

Se eligió el melón: Cucumis melo L.

Variedad: Reticulatus

Marca: IAN Melons

Lote:815-CN188-15

Característica: Almacenamiento frigorífico a 7-9 °C mientras que sus condiciones de transporte es de 8-9°C.

Se eligió este alimento debido a que tiene alto porcentaje de agua y susceptible a los cambios de temperatura que se halla sobre él **mesocarpio**.

Procedimiento de Experimentación:

1.- Primero se cortó el melón en la forma geométrica de un cilindro.

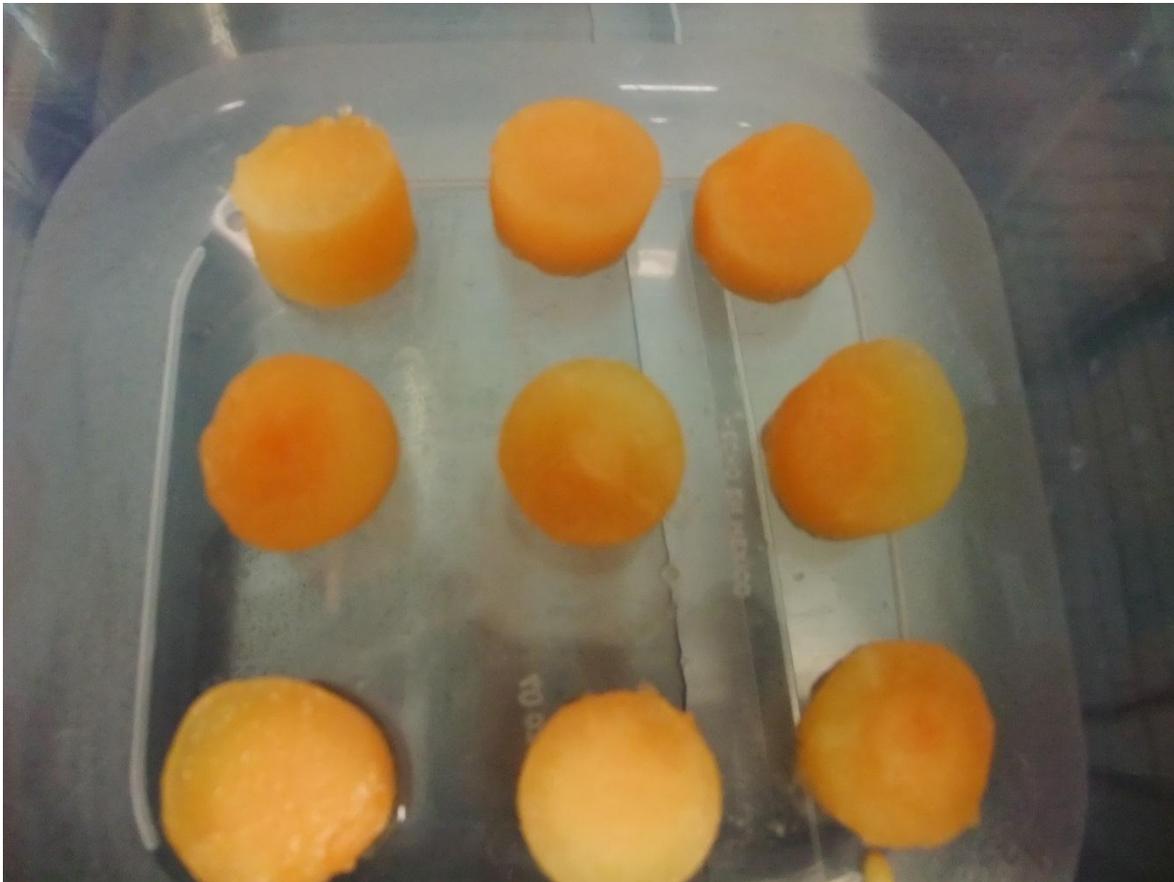


Figura. 28 Trozos de melón cortados de manera cilíndrica

1.1. Los cilindros de melón tienen la siguiente medida,

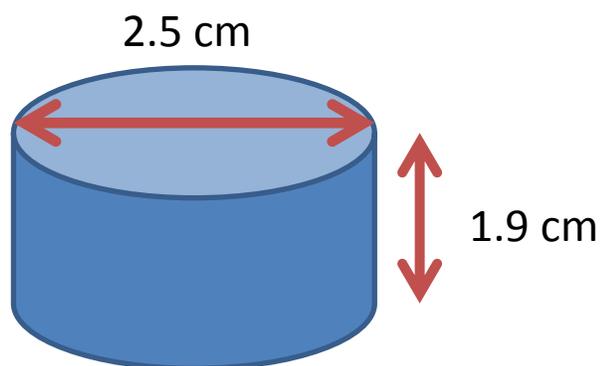


Figura. 29 Medidas de corte en cm.

1.2. Una vez cortado el alimento se coloca el alimento en la cámara criogénica.



Figura. 30 Experimentación con alimento.

### 2.6.1.RESULTADOS

	Apertura de la manija	Tiempo (segundos)	(°C) repetición 1	(°C) repetición 2	(°C) repetición 3	Promedio
Zona Alta	20°	20	10	11	8.5	9.8
Zona Baja	20°	20	-62.5	-53.5	-62.5	-59.5

Tabla 16 Tabla de resultados de nitrógeno con alimento.

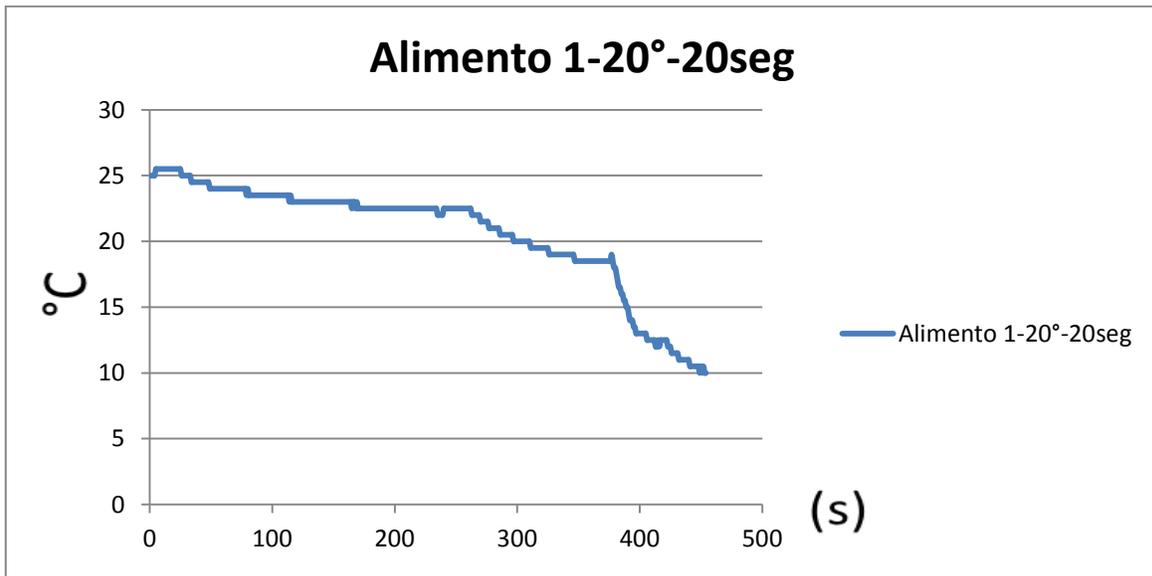


Figura. 31 Gráfica Zona Alta posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura repetición 1.

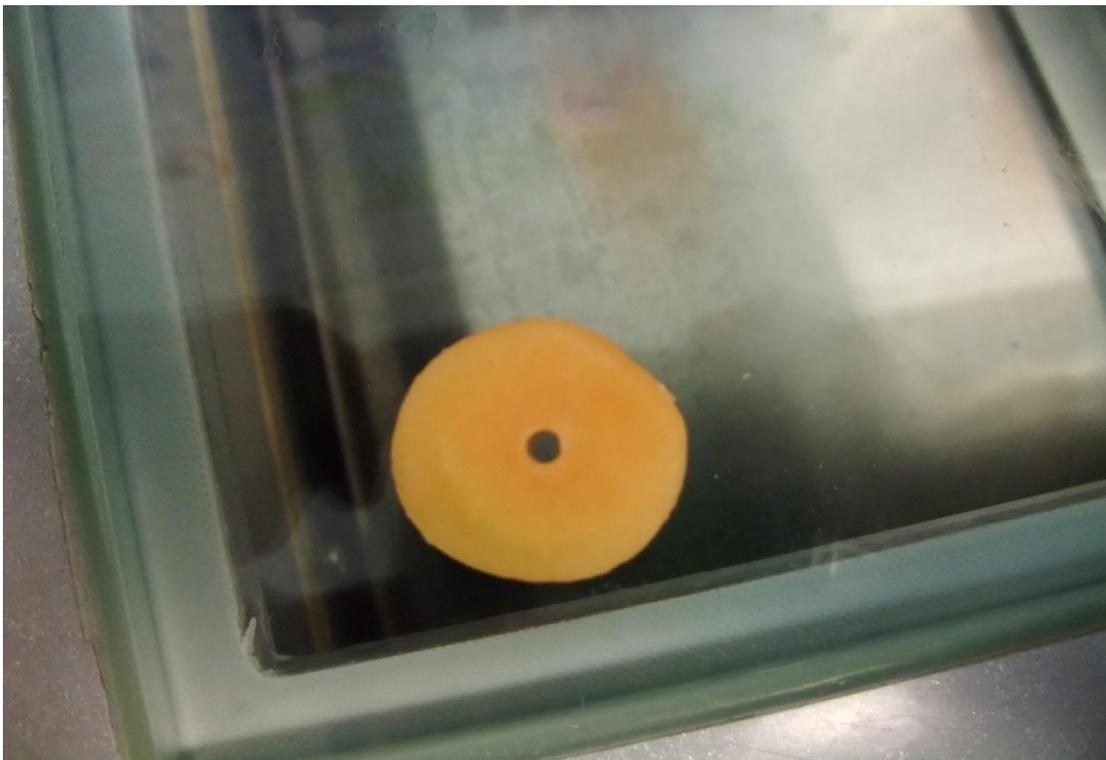


Figura. 32 Melón después de la experimentación.

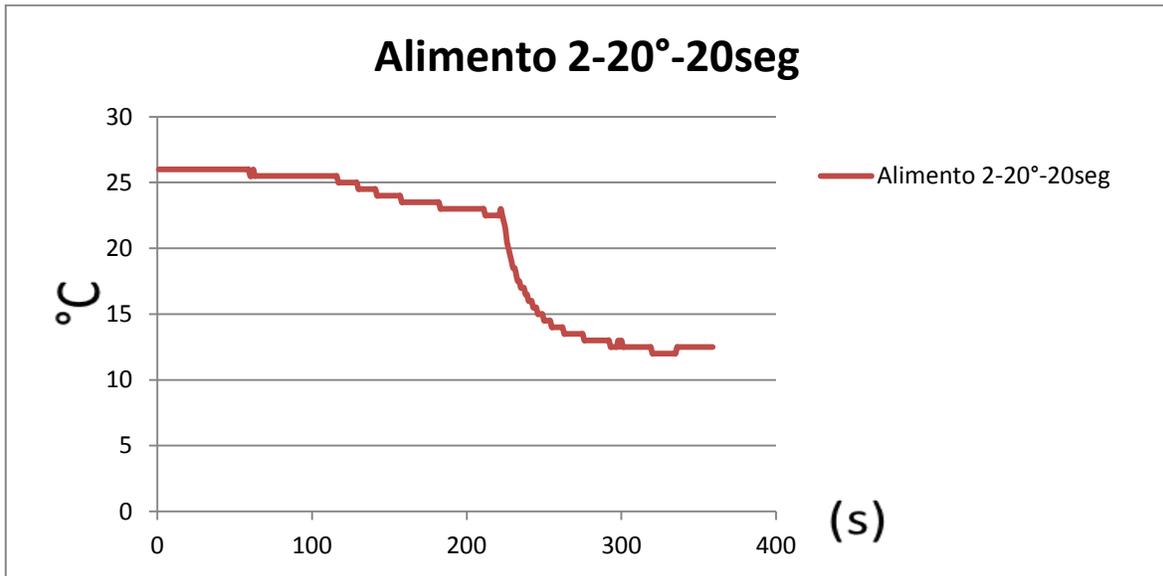


Figura. 33 Gráfica Zona Alta posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura repetición 2.



Figura. 34 Melón después de la experimentación.

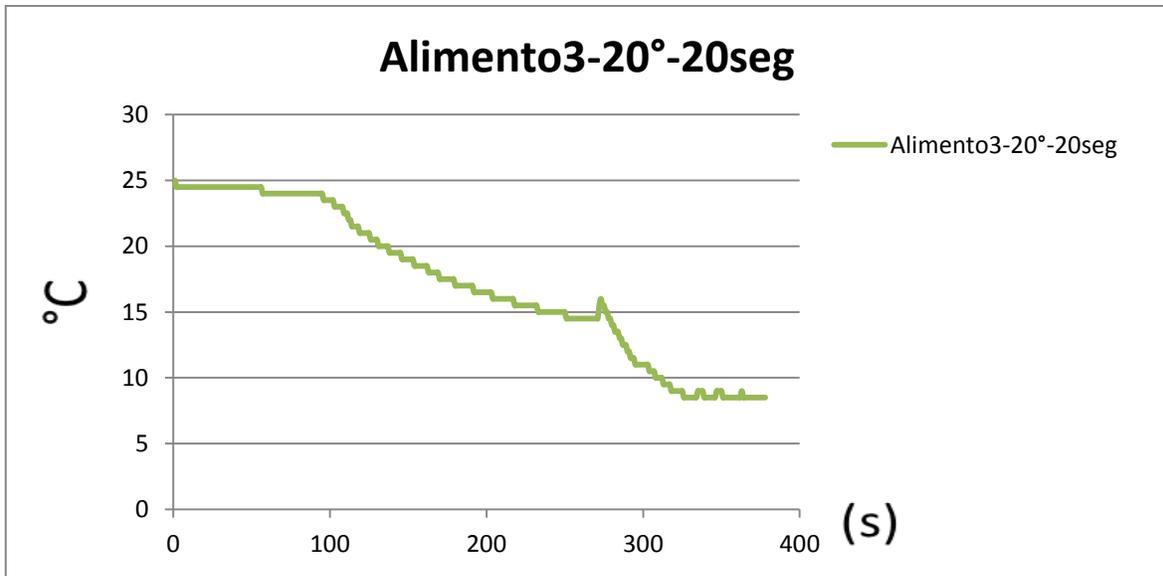


Figura. 35 Gráfica Zona Alta posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura repetición 3.

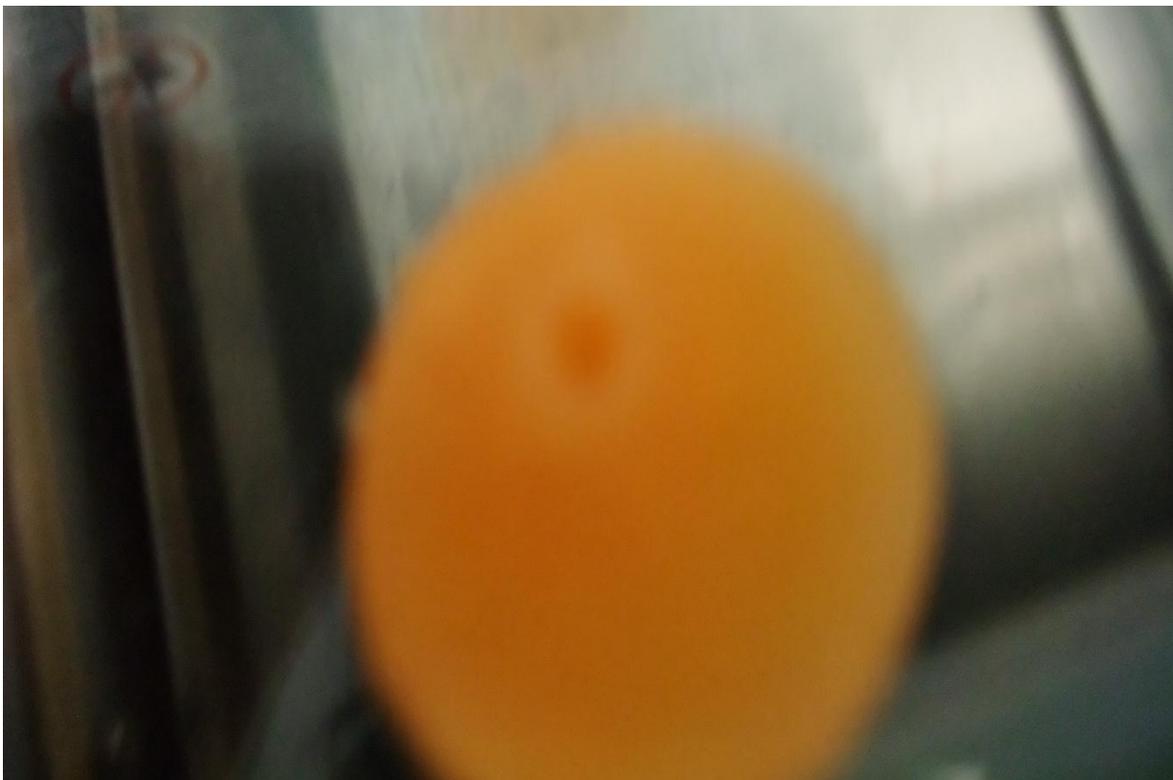


Figura. 36 Melón después de la experimentación.

1.3.Después de colocar los cilindros de melón en la parte superior para que el alimento tuviera contacto el nitrógeno en estado gaseoso.

1.4.Se coloca ahora el melón en la parte inferior para que tenga contacto con el nitrógeno en forma líquida.

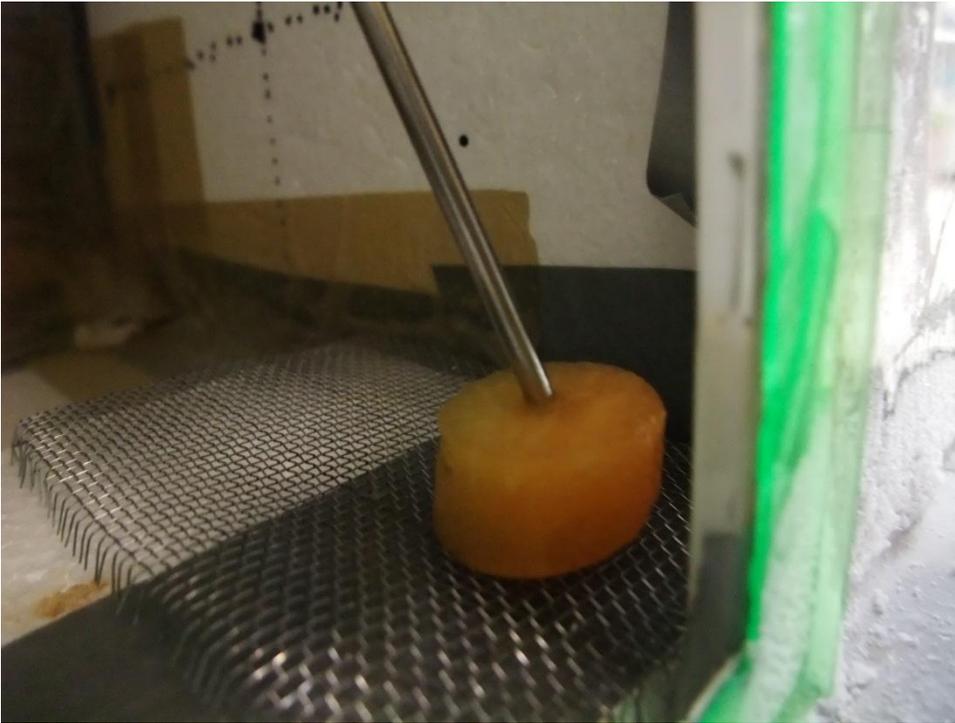


Figura. 37 Melón con termopar tipo "J" en la zona inferior de la cámara

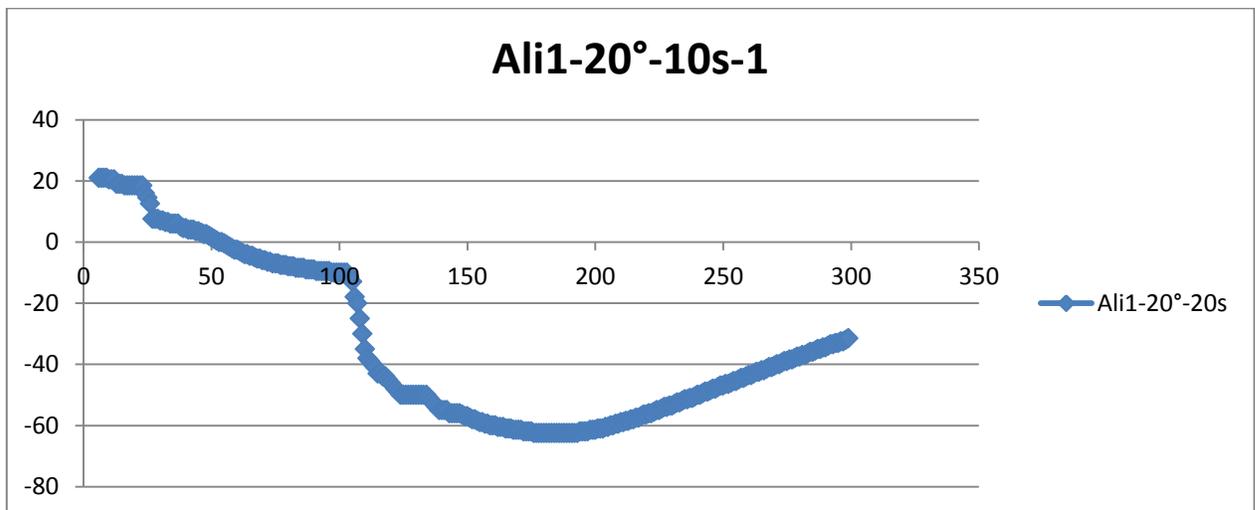


Figura. 38 Gráfica "Zona baja de la cámara (1)" posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura.

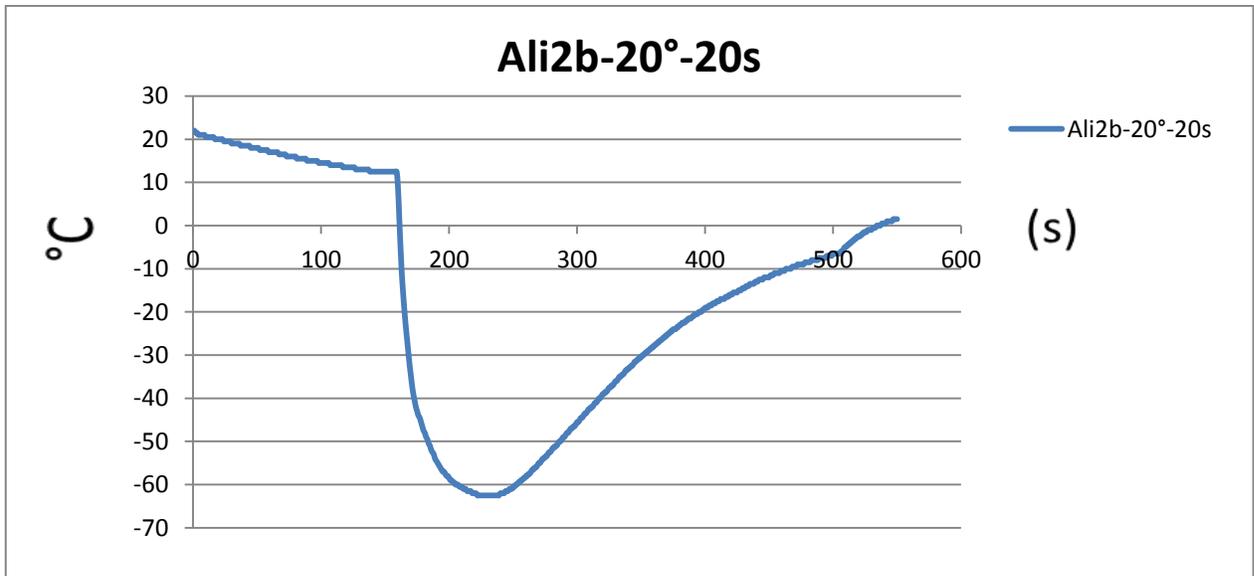


Figura. 39 Gráfica "Zona baja de la cámara (2)" posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura.



Figura. 40 Melón después de la experimentación en la zona inferior de la cámara

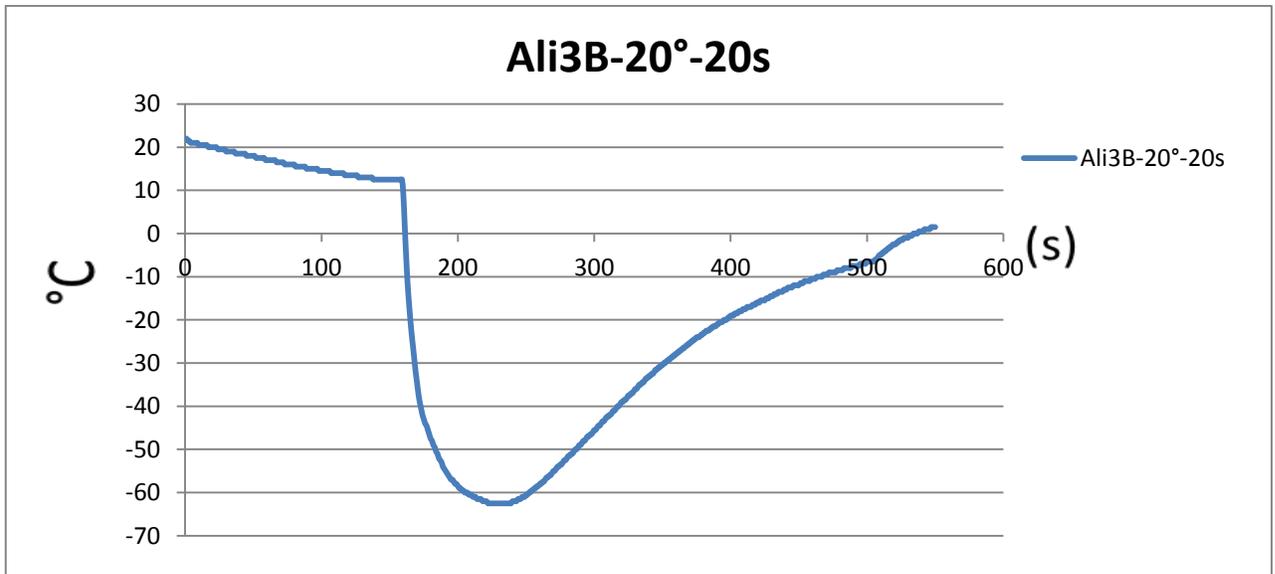


Figura. 41 Gráfica “Zona Baja de la cámara (3)” posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura.

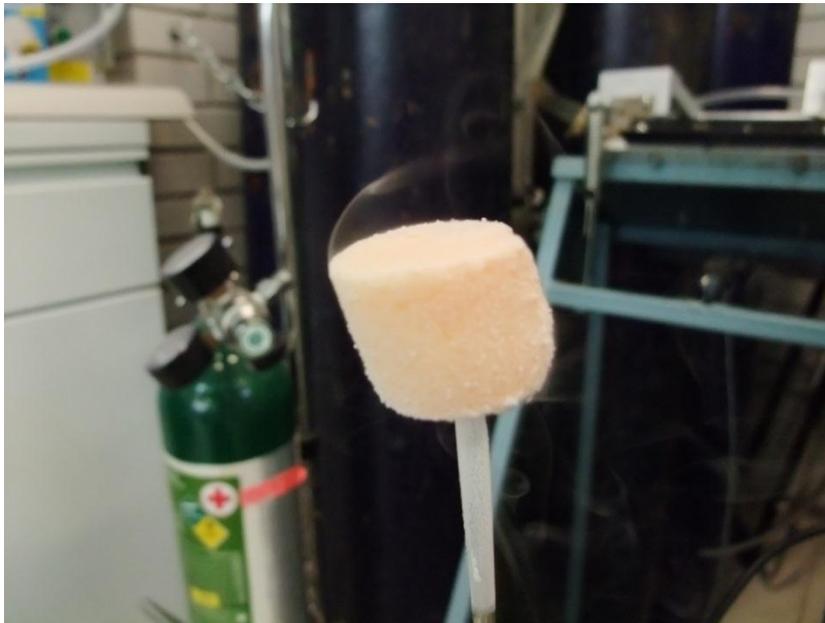


Figura. 42 Melón después de la experimentación en la zona inferior de la cámara

Como contraste observamos que con gas se llega a una temperatura de 9 a 10°C mientras que con líquido se tiene una a temperatura alrededor de los -70°C., esta diferencia de temperaturas es visible en el cambio de coloración del Alimento.

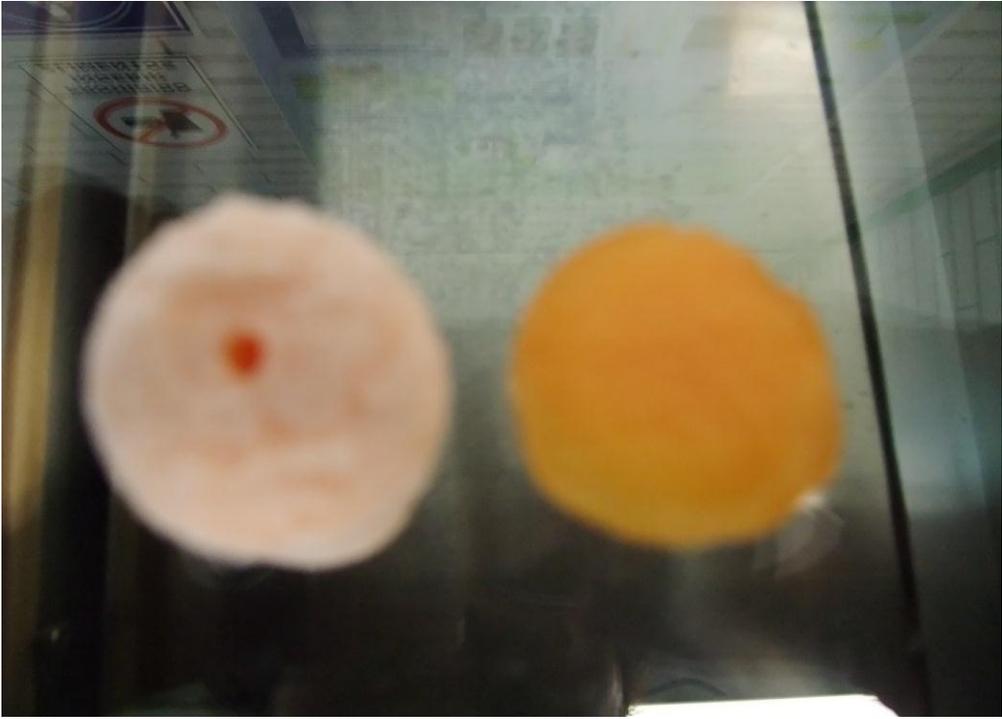


Figura. 43 Diferencia de Enfriamiento en los melones en forma de cilindro

## CAPITULO III ANALISIS DE RESULTADOS

### 3.1 Tratamientos Estadístico por cuadrante

Apertura	Tiempo	Cuadrante	Nivel	Temperatura	OrdenEst	OrdenCorrida	Bloques	PuntoCentral
18°	10s	1	A	-20°C	1	1	1	1
18°	10s	1	B	-33°C	2	2	1	1
18°	10s	2	A	-15°C	3	3	1	1
18°	10s	2	B	-38°C	4	4	1	1
18°	20s	1	A	-34°C	5	5	1	1
18°	20s	1	B	-53°C	6	6	1	1
18°	20s	2	A	-41°C	7	7	1	1
18°	20s	2	B	-62°C	8	8	1	1
20°	10s	1	A	-32°C	9	9	1	1
20°	10s	1	B	-51°C	10	10	1	1
20°	10s	2	A	-31°C	11	11	1	1
20°	10s	2	B	-60°C	12	12	1	1
20°	20s	1	A	-51°C	13	13	1	1
20°	20s	1	B	-69°C	14	14	1	1
20°	20s	2	A	-55°C	15	15	1	1
20°	20s	2	B	-79°C	16	16	1	1

Tabla 17. Estadístico de Minitab.

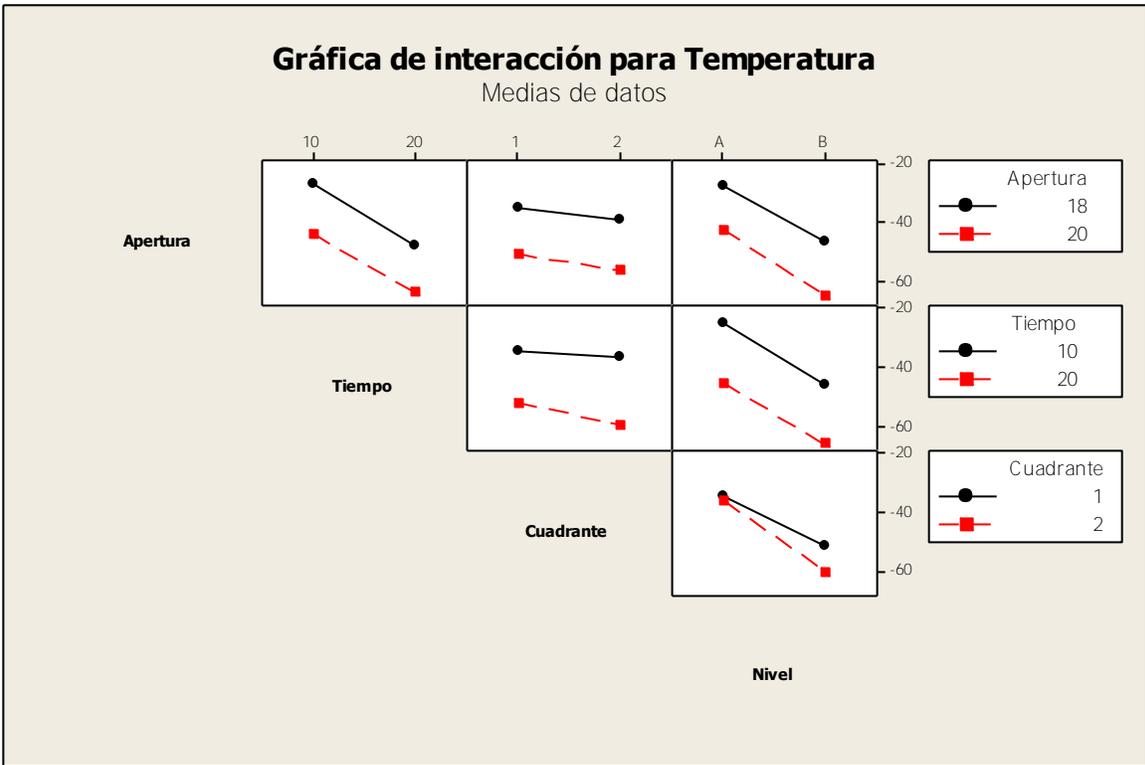


Figura. 44 Gráficas de interacciones de variables

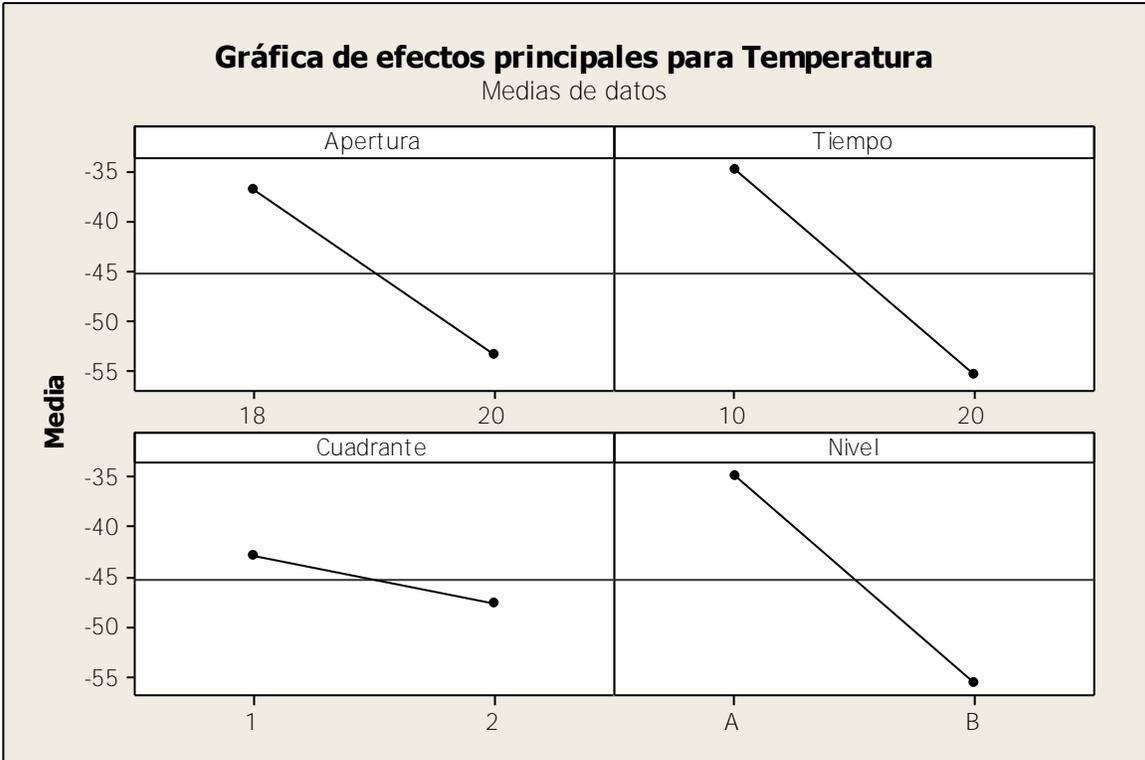


Figura. 45 Gráficas de efectos de las variables con respecto de la Temperatura

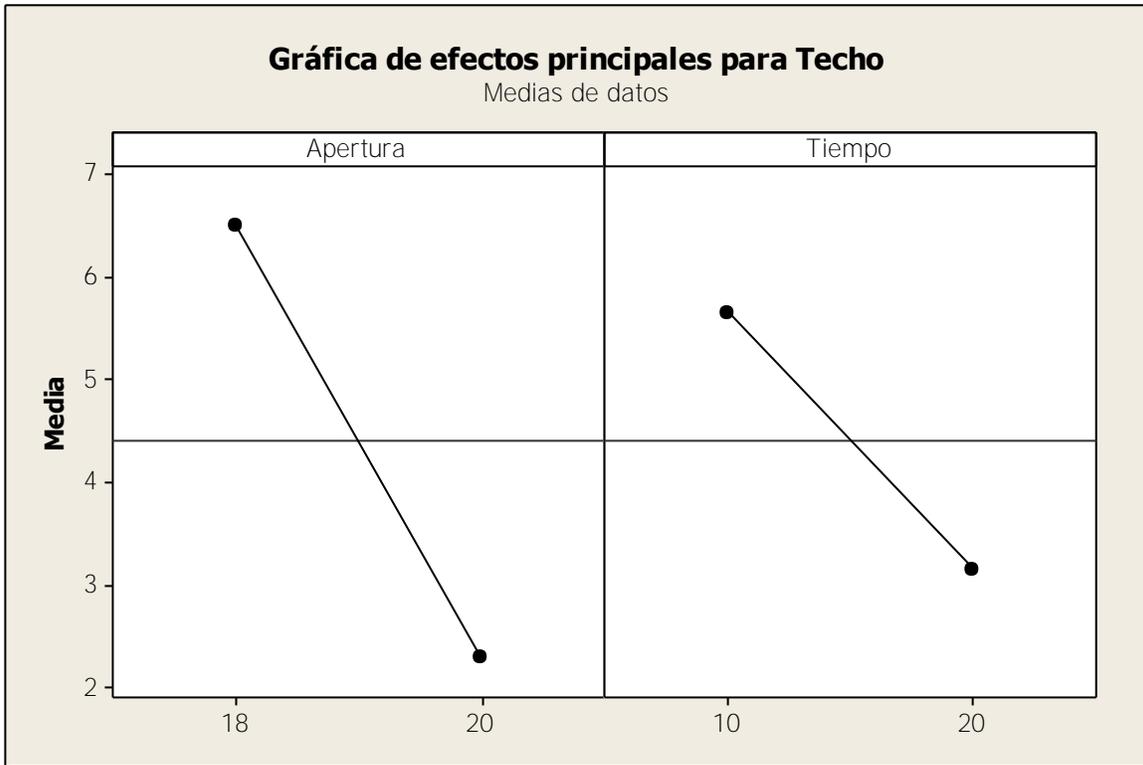


Figura. 46 Gráfica de efectos para el Techo de la cámara

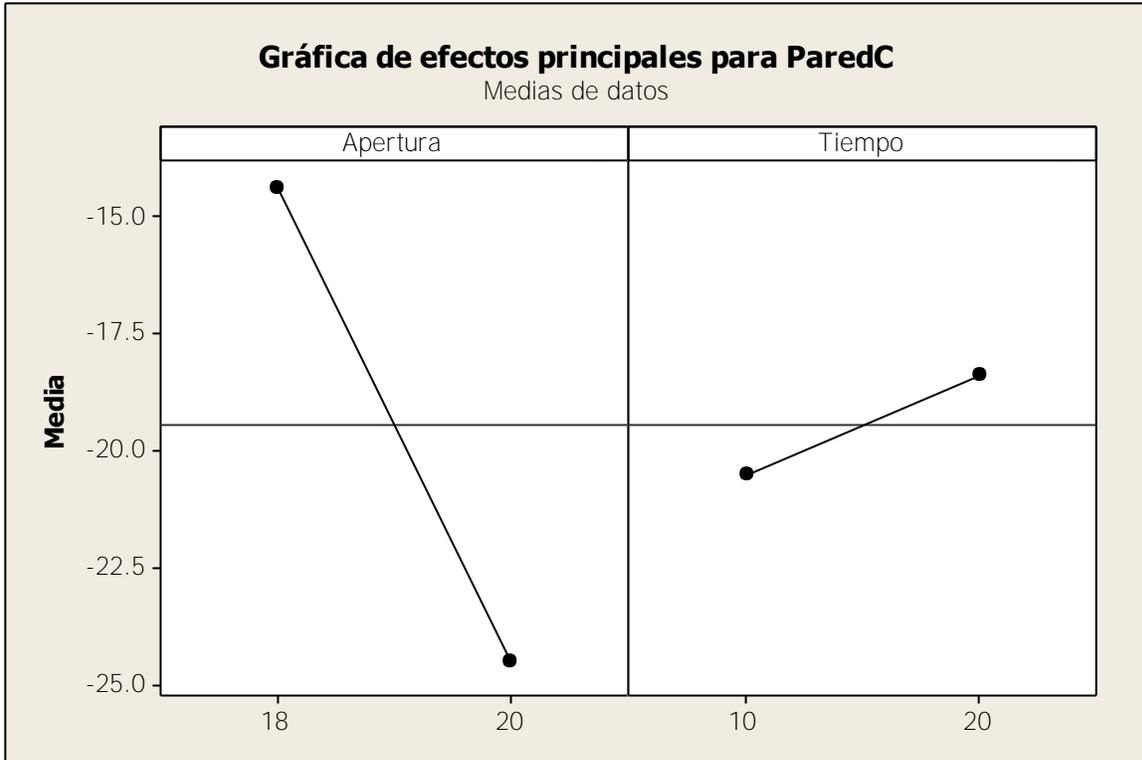


Figura. 47 Gráfica de efectos para la pared "C" de la cámara.

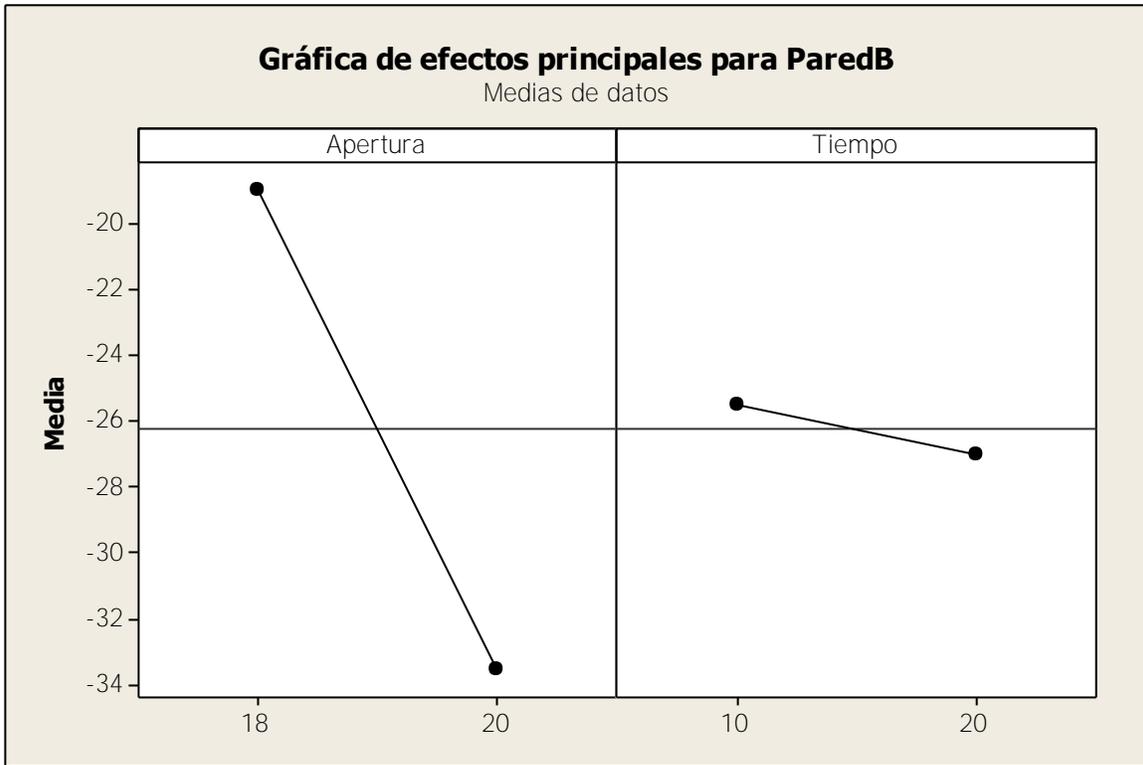


Figura. 48 Gráfica de efectos para la pared "B" de la cámara

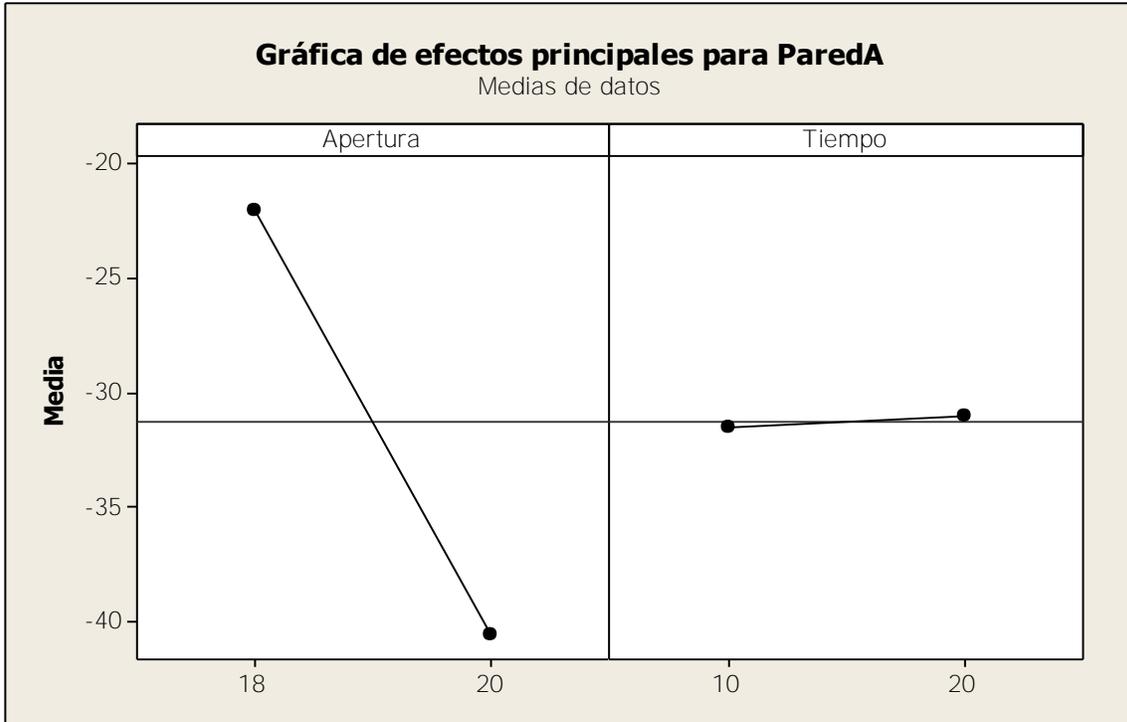


Figura. 49 Gráfica para efectos de la pared "A" de la cámara.

### 3.2 Análisis de Resultados en los cuadrantes.

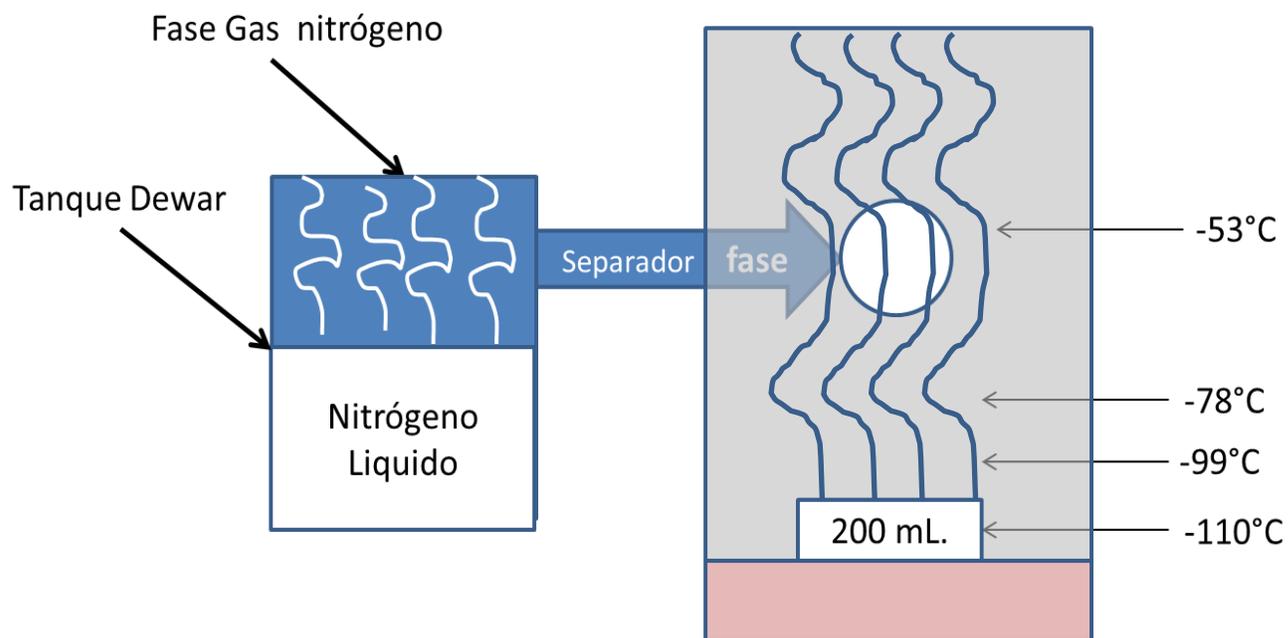


Figura. 50 Descripción de experimentación

El diagrama describe el proceso del nitrógeno líquido, primero se encuentra en el tanque Dewar equilibrio liquido-gas sosteniendo una presión 10 psig, esta presión empuja al nitrógeno por el separador de fases y tener la medida más exacta, en cuanto a líquido ya dentro de la cámara criogénica, que a su vez este evapora, teniendo el comportamiento de temperaturas como se muestra en la figura 50.

Conforme el nitrógeno gaseoso aumenta su temperatura se va expandiendo hasta desalojar la cámara criogénica.

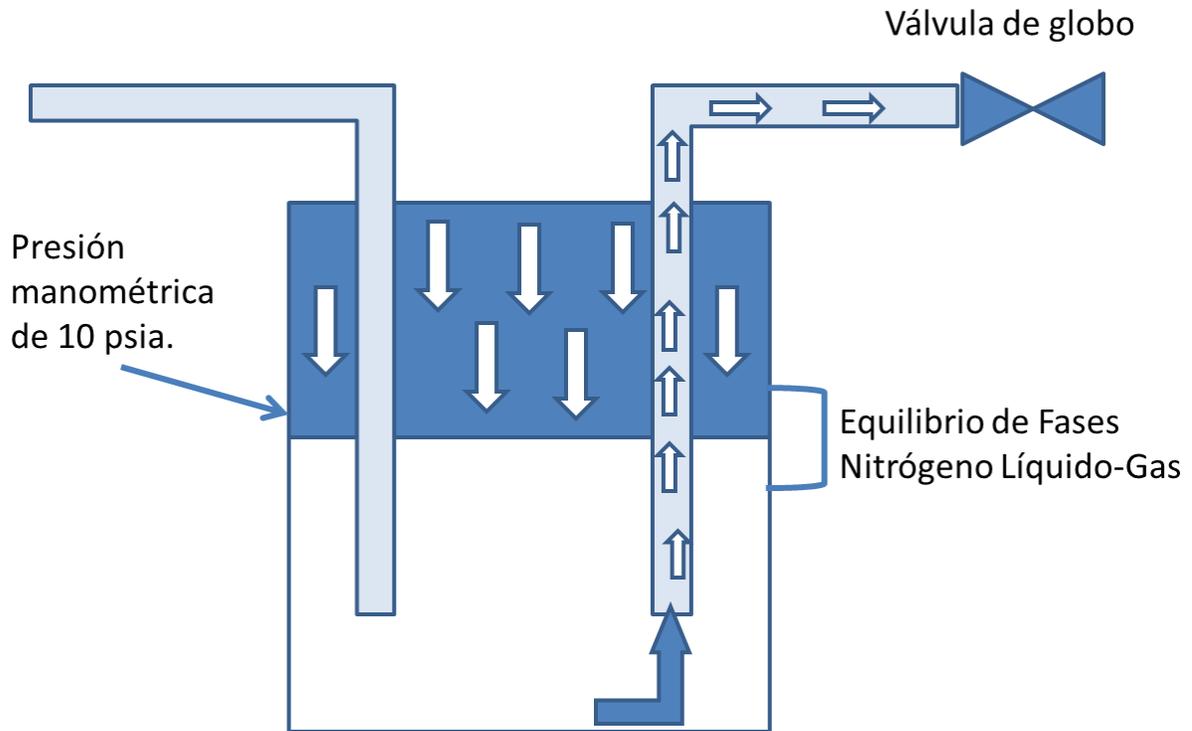


Figura. 51 Descripción de funcionamiento de presión.

Las presiones manejadas dentro del tanque Dewar a 10 psig son importantes porque, de ella depende el flujo volumétrico. La válvula de globo a diferentes aperturas de la manija 18° y 20° (liquid) determinan en gran medida las temperaturas dentro de la cámara criogénica.

### 3.3. Cálculo de carga calórica:

Para la transmisión de calor es necesario que haya un diferencial de temperatura, para que el calor de los cuerpos de temperatura mayor fluya a los de menor, la termodinámica estudia los procesos de transferencia de energía en sistemas de equilibrio.

La transmisión de calor complementa los principios de la termodinámica, de manera que puedan determinarse aspectos como: velocidad de la transferencia de calor y estados intermedios para saber con más exactitud la carga de calor ocupada por el aire y los materiales aislantes de la cámara de refrigeración.

## Carga de calor para el Aire

El aire de la cámara es el agente transmisor del calor entre el producto almacenado y el equipo de producción de frío, para efectuar esta transferencia energética se hace necesario un permanente contacto con el producto. En el transcurso del tiempo la masa del aire desciende y aumenta en gran medida por la presencia del Nitrógeno.

Basándose en la ley de los gases ideales, el estado de una cierta masa “m” de sustancia está determinada por una presión “P” un volumen “V” y una temperatura “T”. Teniendo entendido esto, nos ayuda a calcular la cantidad de masa de aire que existe dentro de la cámara de refrigeración, con los siguientes datos:

P = Presión a la que se encuentra la cámara criogénica en Cuatitlán Izcalli.

V= Volumen de la cámara de refrigeración.

T=Temperatura inicial de la cámara

R= Constante de los Gases ideales

$$n = \frac{P V}{R T}$$

$$P = 0.7697 \text{ atm}$$

$$V = 0.0125 \text{ m}^3$$

$$R = 8.205 \times 10^{-5} \frac{\text{atm m}^3}{\text{mol K}}$$

$$T = 298.15 \text{ K}$$

$$n = \frac{0.7697 \text{ atm} * 0.0125 \text{ m}^3}{8.205 \times 10^{-5} \frac{\text{atm m}^3}{\text{mol K}} * 298.15 \text{ K}} = 0.3932 \text{ mol}$$

$$n = 0.3932 \text{ mol}$$

Se hace una conversión de mol a gramos sabiendo que el Peso molecular del aire es 28.84 g/mol obteniendo:

$$m_{N_2} = n * PM$$

$$m_{N_2} = 0.3932 \text{ mol} * 28.84 \frac{\text{g}}{\text{mol}} = 11.34 \text{ g} = 0.01134 \text{ kg}$$

Obteniendo la masa del aire podemos saber la carga de calor del aire.

$$Q = m C_p \Delta T$$

$$m = 0.01134 \text{ kg}$$

$$C_{p_{\text{aire}}} = 1012 \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

$$\Delta T = 298.15 - 273.15 = 25 \text{ K}$$

$$Q = 0.01134 \text{ kg} * 1012 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} * 25 \text{ K}$$

$$Q = 286.9 \text{ J} \quad \text{Esta es la carga de calor para el aire.}$$

Esta carga también nos ayuda entender que en la cámara de refrigeración coexiste una mezcla de aire y nitrógeno a bajas temperatura y que a cero grados es cuando la cámara solo existe nitrógeno.

El volumen específico de una mezcla bifásica líquido-gas puede determinarse utilizando tablas de saturación para el nitrógeno. En el tanque de almacenamiento Dewar, mantiene el equilibrio del nitrógeno líquido-gas correspondiéndole una temperatura de  $-190^\circ\text{C}$ . Utilizando 200mL de nitrógeno líquido, el volumen específico tiene un cambio al momento de hacerlo pasar por el separador de fases, en el Diagrama de Molliere nos indica que estamos en la zona sobrecalentamiento, muestra que a temperaturas menores el nitrógeno es más denso y ocupa menor espacio.

°C	m <sup>3</sup> /kg	Kg/m <sup>3</sup>
-10	0.769	1.3
-17	0.747	1.33
-27	0.719	1.39
-40	0.681	1.47
-50	0.652	1.533
-58	0.628	1.59
-72	0.587	1.70
-76	0.574	1.742
-88	0.537	1.88
-92	0.528	1.89
-100	0.504	1.98
-103	0.494	2.02

Tabla 18. Volumen específico y densidad del nitrógeno a diferentes temperaturas obtenidas

C<sub>p</sub>.

El C<sub>p</sub> es el que nos indica la cantidad de energía que almacena el Nitrógeno para cada valor de su temperatura. La capacidad calórica a presión constante se define como la variación de la entalpía con respecto a la temperatura, manteniendo la presión constante así como se muestra:

$$C_p = \left(\frac{dh}{dT}\right)_P$$

El tratamiento estadístico muestra que el ángulo de apertura de la manija influye en las temperaturas mostrando que a un ángulo de  $20^\circ$  se alcanzan temperaturas de hasta de  $-79^\circ\text{C}$  aparte de que los datos no hubo diferencia significativa como en el ángulo a  $18^\circ$ , esta variación se debe a que la válvula de globo no tiene una abertura, que le permite extraer al nitrógeno líquido de manera homogénea,

El tiempo es un factor que influye directamente en la cantidad de volumen, a lo que su relación del tiempo y el volumen se le conoce como flujo volumétrico, a mayor flujo volumétrico menores temperaturas alcanzadas.

El nivel Alto y Bajo también tiene influencia en las temperaturas, en las zonas bajas de la caja de aislamiento se registran temperaturas de hasta  $-79^\circ\text{C}$ , mientras que en la parte superior de  $-51^\circ\text{C}$ , al momento de que el líquido llega a la válvula de globo, hace descender su presión y temperatura, lo que en el diagrama de Mollier nos indica que está en la zona de sobrecalentamiento, aun estando en esta zona de sobrecalentamiento del nitrógeno tiene la capacidad de ceder su calor sensible y llegar a tener temperaturas bajas que se pueden aprovechar para refrigerar alimentos.

El Nitrógeno al estar confinado en el tanque Dewar, está a condiciones de Presión Manométrica ( $0.0689\text{ MPa}$ ) y atmosférica ( $0.1\text{MPa}$ ), lo que nos da una presión Absoluta de ( $0.1689\text{ MPa}$ ) y una temperatura de  $82^\circ\text{k}$  ( $-190^\circ\text{C}$ ) en el diagrama de Molliere nos ubica en la región de equilibrio liquido-gas, al momento de que el nitrógeno líquido pasa por el separador de fases, cede su calor latente provocando una caída de presión manométrica y aumentando la temperatura a  $-100^\circ\text{C}$ , a condiciones de presión atmosféricas.

Las propiedades termofísicas, indica el comportamiento del nitrógeno que a temperaturas menores el volumen específico disminuye y conforme la temperatura va aumentando empieza a ceder su calor sensible del gas con el ambiente.

### **3.4 Análisis de Resultados para techo y muros**

Para el análisis del comportamiento del Nitrógeno líquido en techo y muro es muy similar al comportamiento que existe en los cuadrantes, en la mayoría de las paredes se observa que el tiempo no es un factor que influya excepto para el techo, debido a que el nitrógeno

cuando sale del separador de fases no cae de una manera homogénea en el piso por lo que al cambiar de fase a gas no se comporta de manera estable lo que hace tener una variación.

La posición de la apertura influye en las temperaturas alcanzadas en los muros y techo debido al volumen utilizado, los datos a posiciones de 20° no tienen variación como a 18°.

Para el análisis del comportamiento del Nitrógeno líquido en techo y muro es muy similar al comportamiento que existe en los cuadrantes, en la mayoría de las paredes se observa que el tiempo no es un factor que influya excepto para el techo, debido a que el nitrógeno cuando sale del separador de fases no cae de una manera homogénea en el piso por lo que al cambiar de fase el gas no se comporta de manera estable lo que hace tener una variación de temperatura, cuando comparamos las temperaturas entre los cuadrante “2B y 1B” en la parte inferior marca una diferencia de 10°C.

La posición de la apertura influye en las temperaturas alcanzadas en los muros y techo debido al volumen utilizado, los datos a posiciones de 20° no tienen variación como a 18°.

### 3.4.1 Carga calórica de la cámara criogénica

Se estima la carga calórica tomando en cuenta el material que es (poliestireno expandido). Utilizando la siguiente ecuación obtenemos:

$$Q = m_{\text{Poliestireno exp.}} * C_{p\text{Poliestireno expandido}} * \Delta T$$

$$m = 1g = 0.001kg \text{ por pared}$$

$$C_{p\text{aire}} = 0.42 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} = 1.75 \frac{\text{KJ}}{\text{KgK}}$$

$$T_i = 298.15 \text{ K} \quad T_{fA} = 231.15 \text{ K} \quad T_{fB} = 237.15 \text{ K} \quad T_{fC} = 244.15 \text{ K}$$

$$T_{f\text{techo}} = 274.95 \text{ K} \quad T_{f\text{piso}} = 163.15 \text{ K}$$

Pared A	Pared B	Pared C	Techo	Suelo
-42 °C	-36°C	-29°C	1.8°C	-110°C

Tabla 19 Valores más representativos de temperaturas alcanzadas en °C

Están son las temperaturas más representativas en las diferentes paredes de la cámara criogénica. Calculando la carga para cada pared obtenemos:

$$Q_{Pared A} = 0.001 \text{ kg} * 1.758 \frac{\text{kJ}}{\text{kg k}} * (231.15 - 298.15)k = -0.1177\text{kJ} = -117.78 \text{ J}$$

$$Q_{Pared B} = 0.001 \text{ kg} * 1.758 \frac{\text{kJ}}{\text{kg k}} * (237.15 - 298.15)k = -0.1072\text{kJ} = -107.2 \text{ J}$$

$$Q_{Pared C} = 0.001 \text{ kg} * 1.758 \frac{\text{kJ}}{\text{kg k}} * (244.15 - 298.15)k = -0.0949\text{kJ} = -94.9 \text{ J}$$

$$Q_{Techo} = 0.001 \text{ kg} * 1.758 \frac{\text{kJ}}{\text{kg k}} * (274.95 - 298.15)k = -0.04078 \text{ kJ} = -40.78 \text{ J}$$

$$Q_{Suelo} = 0.001 \text{ kg} * 1.758 \frac{\text{kJ}}{\text{kg k}} * (163.15 - 298.15)k = -0.23733 \text{ kJ} = -237.33 \text{ J}$$

$$Q_{Camara criogénica} = -597.99 \text{ J}$$

Analizando la carga de calor en cada pared durante la experimentación, se muestra como el nitrógeno retira calor en su movimiento en fase gaseosa con las paredes de la cámara, nos da una idea de cómo se comporta el movimiento del gas, ya que en cada una tiene una carga de calor absorbida distinta.

### 3.4.2. Calor del Nitrógeno líquido “ $Q_{líquido}$ ”

La cantidad de calor que puede retirar el nitrógeno líquido a las condiciones de presión atmosférica dentro de la cámara nos da parámetros de temperatura de  $-110^{\circ}\text{C}$  a  $-100^{\circ}\text{C}$ , estos parámetros son gracias al sub-enfriamiento que se da en la parte inferior de la cámara.

$$Q_{líquido} = H_{-100^{\circ}\text{C}} - H_{-110^{\circ}\text{C}}$$

$$Q_{líquido} = (329.8 - 340.2) \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_{líquido} = 10.4 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}} = 10400 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

### 3.4.3. Calor del Nitrógeno gaseoso

$$Q_{gas} = H_{-99^{\circ}\text{C}} - H_{-58^{\circ}\text{C}}$$

$$Q_{gas} = 330.88 - 382.3$$

$$Q_{gas} = -51.41 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 51410 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

## 3.5 Análisis de resultados de entalpías.

La destilación flash, es un fenómeno que se da en nuestra experimentación consiste en una sola etapa donde la alimentación se vaporiza parcialmente para producir un vapor más rico en el componente más volátil y se explica como: el separador de flash en equilibrio, es el más sencillo de los procesos de etapas de equilibrio con el que se puede encontrar el diseño.

Aun cuando interviene solamente una etapa, el cálculo de las composiciones y cantidades relativas de las fases de líquido y vapor para una temperatura y presión dadas requiere una tediosa solución por tanteo. (Buford D. Smith 1963).

El nitrógeno líquido tiene un peso molecular cercano al del oxígeno en condiciones atmosféricas, por lo que su vaporización es rápida (destilación flash), La cámara de

enfriamiento de poliuretano expandido es nuestro aislante, el nitrógeno líquido se introduce en la cámara y se espera hasta alcanzar un estado de equilibrio dentro de la cámara fría, en el momento que el líquido toca la base la ebullición es instantánea y se comienzan a tener las pérdidas de masa de nitrógeno líquido en función del tiempo de vaporización del líquido.

Gay-Lussac hizo medidas del volumen de una masa fija de gas bajo presión constante y encontró que el volumen era una función lineal de la temperatura. (Castellan, 1987, P.9)

Los experimentos de Charles demostraron que, para una masa fija de gas bajo una presión constante, el aumento relativo de volumen por cada aumento de un grado de temperatura era el mismo para todos los gases con los cuales él experimentó, A una presión constante el aumento en volumen por grado es  $(\frac{\partial V}{\partial t})_P$ , es el coeficiente de expansión térmica a 0°C. (Castellan, 1987, P.9)

El calor latente de vaporización nos indica que para pasar del estado líquido a la fase de vapor se necesita una absorción de energía por parte del Nitrógeno en estado líquido, puesto que la energía total de las moléculas de líquido es menor que el de las moléculas del Nitrógeno gaseoso. El calor absorbido por el Nitrógeno líquido para pasar a vapor sin variar su temperatura se denomina calor de vaporización. Se suele denominar calor latente de vaporización.

La temperatura de ebullición del líquido se ve afectada por los cambios en la presión atmosférica debido a las variaciones de la altura. A medida que un sitio se encuentra más elevado sobre el nivel del mar, la temperatura de ebullición se hace menor.

En nuestra experimentación estábamos situados en Cuautitlán Izcalli lo que corresponde a una presión Atmosférica de 0.0779 MPa por debajo de la presión atmosférica del nivel del mar que corresponde a 0.1013MPa. Por lo que nuestros valores de entalpias se ven afectados como se muestra en la siguiente tabla:

		Presiones (MPa)		
		0.0779	0.1013	0.1018
		Entalpías (J/g)		
		H	H	H
Temperatura (kelvin)	170	326.5	326.15	326.14
	173.15	329.9	329.8	329.7
	180	337.2	337.1	337.09
	183.15	340.3	340.2	340.19
	190	347.71	347.6	347.59
	194.15	351.21	351.15	351.14
	200	358.11	358	357.99
	203.15	362.37	362.19	362.18
	218.15	376.99	376.9	376.8
	220	378.9	378.9	378.8
	221.15	379.98	379.9	379.89
	240	399.12	399.1	399.09

Tabla 20. Presiones y temperaturas interpoladas.

Las columnas de las presiones son necesarias para poder interpolar los datos de entalpía a presión de Cuatitlan Izcalli.

Tomando en cuenta las temperaturas registradas con los termopares tipo “J” en los diferentes puntos de la cámara de refrigeración obtenemos los diferentes valores de entalpías.

Observamos que no existe diferencia significativa de entalpías entre la presión atmosférica nivel del mar y la de Cuautitlán, o que al momento de cambiar de fase del Nitrógeno líquido a gas, sus valores de entalpías son casi idénticos.

### 3.7. Análisis sobre el Diagrama de Molliere.

El diagrama de Mollier nos indica el comportamiento que tiene el nitrógeno líquido desde que está almacenado en el tanque Dewar, hasta cuando se evapora dentro de la cámara de refrigeración. Utilizando las coordenadas de presión y entalpías obtenidas mediante tablas (Anexos) nos da un mapa en el diagrama.

1.- El primer punto está dado por la presión absoluta que se obtiene de la siguiente manera:

$$P_{Absoluta} = P_{Manometrica} + P_{atmosferica}$$

La presión manométrica es la que se encuentra en el tanque Dewar, dentro del tanque se encuentra en equilibrio las fases liquido-gas del nitrógeno, esta presión manométrica es de 0.0689 MPa (10 psi). Y la atmosférica de 0.0779 MPa como se había dicho anteriormente para Cuautitlán.

$$P_{Absoluta} = (0.0689 + 0.0779) MPa$$

$$P_{Absoluta} = 0.1468 MPa$$

Cuando dos sistemas están separados en un cilindro por un pistón sin fricción el pistón se moverá en la dirección de la presión más baja debido a la fuerza de desequilibrio que actúa sobre el pistón, la propiedad presión, puede verse entonces como la fuerza motriz para el cambio de volumen.(Francis, F. Juan)

2.- El segundo punto esta cuando se acciona la válvula de líquido en el tanque Dewar como LIQUID, en este punto sucede un fenómeno importante, en el cual al accionarla, se pierde la presión manométrica del tanque Dewar, quedando únicamente la presión atmosférica de Cuautitlán 0.0779 MPa, este sensible cambio de presión en el Nitrógeno líquido hace que tengamos dos fases en la válvula “T” y en la tubería que está conectada al separador de fases, la válvula en un principio hace un efecto de *evaporación instantánea* que empieza con la formación de burbujas de gas en la línea del líquido, hasta formar una parte gas, donde se separa del líquido, en el separador de fases, mientras que en el diagrama de Mollier nos coloca en la zona liquido-vapor favoreciendo más fracción líquida .

Estas presiones son netamente necesarias para poder tener una buena extracción del Nitrógeno líquido, en caso de no tenerse, la válvula es afectada en su funcionamiento debido a que “al comenzar a abrirse la válvula, el caudal volumétrico a evacuar no está disponible” porque el nitrógeno gaseoso ejerce una presión dentro del tanque Dewar tal que ayuda a la extracción del líquido teniendo caudales más uniformes.

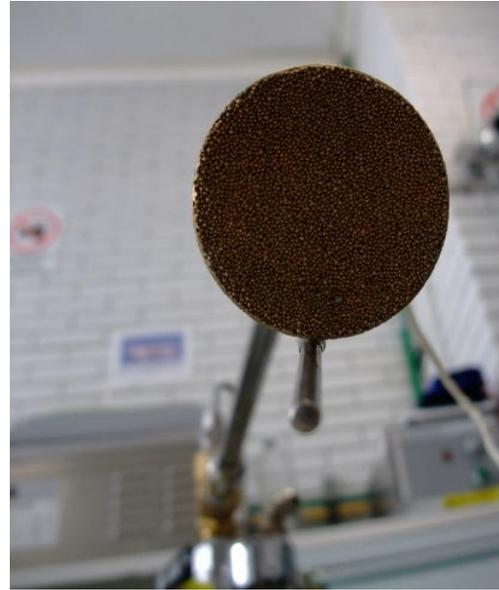


**Figura. 52 Separador de fases parte superior y válvula de venteo parte inferior**

3.-El tercer punto o coordenada en el Diagrama de Mollier corresponde al Nitrógeno ya en dos fases líquido-gas en el separador de fases que le corresponde a una temperatura de  $-100^{\circ}\text{C}$  ( $173\text{K}$ ) , Un separador de dos fases puede ser horizontal, vertical o esférico. El Nitrógeno líquido sale del separador de fases por el fondo. El gas sale por la parte superior del recipiente. Los separadores se pueden clasificar según su presión operativa. Las unidades de baja presión manejan presiones de 10 a 180 psi [ $0.0689$  a  $1.24$  MPa] (Schlumberger) el grado de separación entre el gas y el líquido dependerá de la presión que existe en el tanque Dewar y el tipo de flujo del fluido. El flujo turbulento permite que escapen más burbujas que el flujo laminar.



(a)



(b)

Figura. 53 Separador de fases con termopar tipo J (a) Vista lateral (b) Vista inferior

(Separador de fases con termopar tipo J)

Para poder saber la temperatura que se tiene del Nitrógeno líquido del separador de fases se coloca un termopar de tal forma que este en contacto directo. De esta manera se midió la temperatura que tiene el Nitrógeno líquido exactamente.

4.- El cuarto punto o coordenada en el diagrama de Mollier es cuando el Nitrógeno líquido cae en la base de la cámara de refrigeración. Aquí ocurre otro fenómeno al que llamamos sub-enfriamiento, teniendo una temperatura de  $-110^{\circ}\text{C}$  (163.15 K), es decir tenemos a la salida del separador de fases una temperatura de  $-100^{\circ}\text{C}$  y en la base de la cámara de refrigeración cae el líquido pero se encuentra a  $-110^{\circ}\text{C}$ , el sub-enfriamiento es un enfriamiento adicional del Nitrógeno líquido saturado que proviene del continuo flujo del separador de fases, cuando hay sub-enfriamiento se observó que hay más cantidad de refrigerante, reduciendo la temperatura  $-10^{\circ}\text{C}$ , esto incrementa la eficiencia del ciclo ya que nos permite absorber más calor.

Este efecto de sub-enfriamiento se comprobó dejando caer el nitrógeno líquido en un vaso de precipitados midiendo la temperatura alcanzada de  $-110^{\circ}\text{C}$ .

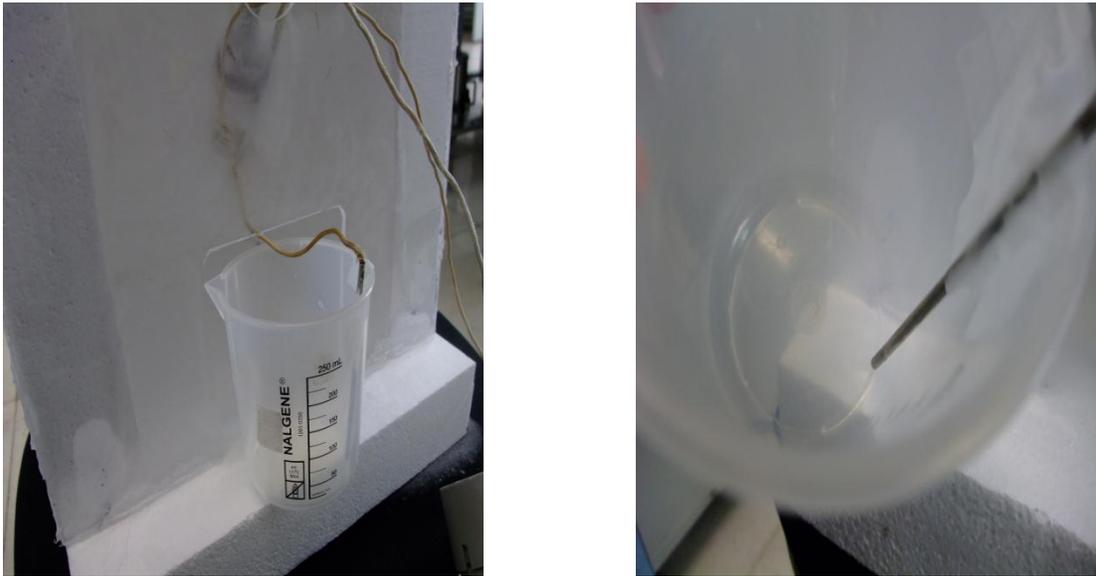


Figura. 54 Vaso p.p. con termopar tipo J y nitrógeno líquido (a) Cámara criogénica (b) En ambiente abierto



Figura. 55 Nitrógeno líquido en vaso de p.p. de 25mL

Mediante esta forma comprobamos el sub-enfriamiento del Nitrógeno Líquido dentro de la cámara de enfriamiento en la base (suelo). Donde de igual manera se registró la temperatura de  $-110^{\circ}\text{C}$  (163.15 K). y teniendo una temperatura de evaporación de  $-100^{\circ}\text{C}$  ( 173.15 K).



Figura. 56 Cámara criogénica con termopares tipo J y nitrógeno líquido

Después del punto 4 o coordenada en el diagrama de Mollier se tiene una tendencia a expandirse el Nitrógeno gaseoso, en donde tendremos como limite la temperatura de  $-33^{\circ}\text{C}$  (240 K) que este será nuestro último punto 5.

Después del punto 4, ocurre el fenómeno de Evaporación instantánea o evaporación flash que se da a partir de los  $-100^{\circ}\text{C}$  (173.15 K) este fenómeno es cuando el líquido se evapora instantáneamente, se le dice así a la propiedad que a menos presión, un líquido se evapora más rápidamente, la clave es la presión baja, ya que la fase gaseosa del nitrógeno es favorecida a estas presiones atmosféricas.

Observando la ubicación del punto 3 en el diagrama de Mollier se encuentra en la zona de gas sobrecalentado, pero recordemos que el nitrógeno a pesar de estar en esa zona tiene la capacidad de retirar calor porque se manejan las temperaturas de  $-99^{\circ}\text{C}$  hasta  $-33^{\circ}\text{C}$ .

Para poder saber más exacto los puntos o coordenadas en el Diagrama de Mollier se efectúan los cálculos de **carga de calor** utilizando las tablas de presión y temperaturas del nitrógeno.

Quedando de la siguiente manera en nuestro diagrama como se muestra en la figura 51.

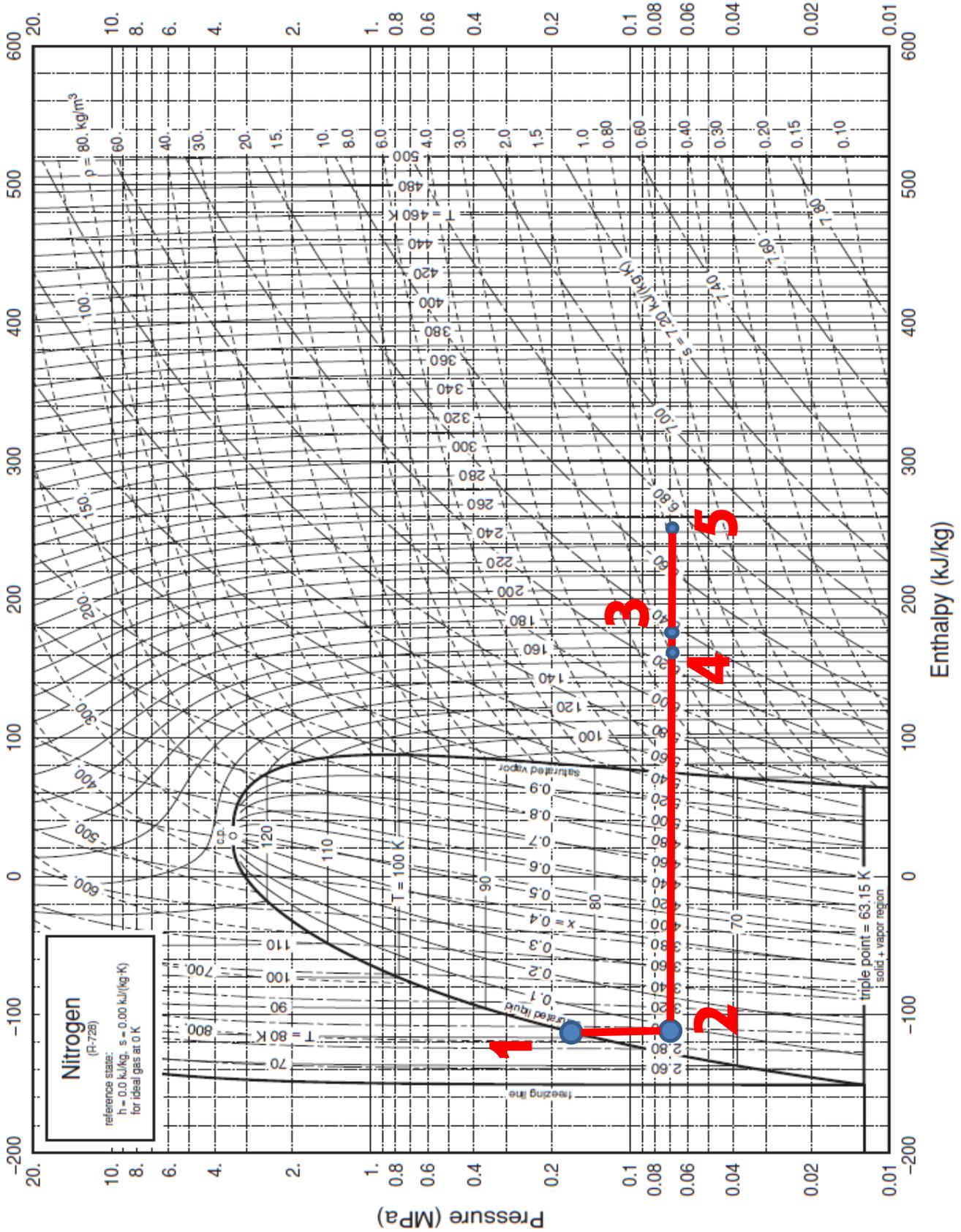


Figura. 57 Descripción del comportamiento del nitrógeno líquido a gas.

### 3.7. Ley charles y Gay-Lussac

La ley de Charles demostró que para una masa fija (nitrógeno líquido) bajo una presión constante (atmosférica) el aumento relativo de volumen por cada aumento de un grado de temperatura es el mismo para todos los gases. Propuesta de modelo matemático de coeficiente de expansión del nitrógeno líquido. Proponer la predicción del nitrógeno líquido con el fin de asegurar en un espacio dado del universo, una temperatura deseada para conservación de alimentos.

Con los datos de temperatura registrados en los cuadrantes, obtenemos diferentes datos de volumen específico y densidad apoyándonos en las tablas de propiedades termofísicas para el refrigerante R728, a presiones atmosféricas. Obtenemos:

Temperatura		Volumen esp.	Densidad.	-45	228.15	0.666	1.501501502
°C	Kelvin	m <sup>3</sup> /kg	kg/m <sup>3</sup>	-46	227.15	0.664	1.506024096
				-47	226.15	0.661	1.512859304
-31	242.15	0.7085	1.41432604	-48	225.15	0.658	1.519756839
-32	241.15	0.7055	1.417434444	-49	224.15	0.655	1.526717557
-33	240.15	0.7026	1.423284942	-50	223.15	0.6522	1.533272002
-34	239.15	0.699	1.430615165	-51	222.15	0.6497	1.539171926
-35	238.15	0.696	1.436781609	-52	221.15	0.6463	1.54726907
36	237.15	0.693	1.443001443	-53	220.15	0.6438	1.553277415
-37	236.15	0.69	1.449275362	-54	219.15	0.6404	1.561524047
-38	235.15	0.6875	1.454545455	-55	218.15	0.638	1.567398119
-39	234.15	0.684	1.461988304	-56	217.15	0.634	1.577287066
-40	233.15	0.6821	1.466060695	-57	216.15	0.631	1.584786054
-41	232.15	0.6791	1.472537182	-58	215.15	0.628	1.592356688
-42	231.15	0.675	1.481481481	-59	214.15	0.625	1.6
-43	230.15	0.672	1.488095238	-60	213.15	0.6233	1.60436387
-44	229.15	0.669	1.494768311	-61	212.15	0.619	1.615508885

-62	211.15	0.6174	1.619695497	-82	191.15	0.5579	1.79243592
-63	210.15	0.613	1.63132137	-83	190.15	0.555	1.801801802
-64	209.15	0.611	1.636661211	-84	189.15	0.552	1.811594203
-65	208.15	0.608	1.644736842	-85	188.15	0.549	1.821493625
-66	207.15	0.6051	1.652619402	-86	187.15	0.546	1.831501832
-67	206.15	0.6021	1.660853679	-87	186.15	0.543	1.841620626
-68	205.15	0.599	1.669449082	-88	185.15	0.54	1.851851852
-69	204.15	0.5967	1.675884029	-89	184.15	0.537	1.862197393
-70	203.15	0.5938	1.68406871	-90	183.15	0.534	1.872659176
-71	202.15	0.5903	1.694053871	-91	182.15	0.5314	1.881821603
-72	201.15	0.587	1.703577513	-92	181.15	0.5284	1.892505678
-73	200.15	0.5845	1.710863986	-93	180.15	0.5255	1.902949572
-74	199.15	0.5815	1.719690456	-94	179.15	0.5225	1.913875598
-75	198.15	0.5786	1.728309713	-95	178.15	0.5159	1.938360147
-76	197.15	0.5775	1.731601732	-96	177.15	0.5166	1.935733643
-77	196.15	0.572	1.748251748	-97	176.15	0.5136	1.947040498
-78	195.15	0.5699	1.754693806	-98	175.15	0.5107	1.95809673
-79	194.15	0.567	1.76366843	-99	174.15	0.5077	1.969667126
-80	193.15	0.5638	1.773678609	-100	173.15	0.5052	1.979414093
-81	192.15	0.5609	1.782848993				

Tabla 21 Descripción del comportamiento del gas Nitrógeno dentro de la cámara criogénica

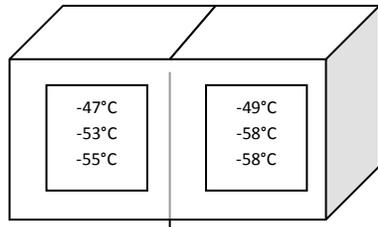
Observamos que a menores temperaturas se tienen datos de menor espacio ocupado por el gas y una densidad mayor. Siguiendo la ecuación de los Gases Ideales

$$P V = n R T$$

El volumen de nitrógeno líquido usando 200 mL genera una cierta cantidad de mol, masa y volumen específico, a su vez el volumen utilizado por el nitrógeno líquido en la cámara de aislamiento, nos da una variación de las temperaturas en los diferentes cuadrantes, a menores temperaturas como lo es en  $-100^{\circ}\text{C}$ , el volumen específico del nitrógeno es de  $0.5052 \text{ m}^3$  lo que nos indica que a menores temperaturas mayor acumulación de número de mols en un metro cuadrado y que a mayores temperaturas de  $-31^{\circ}\text{C}$  (experimentación con

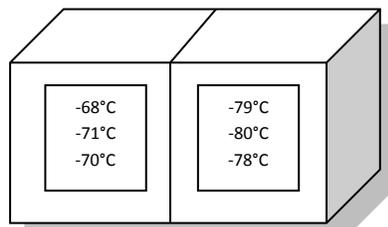
200ml de  $N_2$ ) se registran cantidades menores de numero de mol, conforme la temperatura aumenta el volumen del gas aumenta, pero disminuye la masa..

Tomando los valores en los cuadrantes con sus respectivas repeticiones tomamos en cuenta un valor promedio para un volumen delimitado de la cámara de aislamiento ( $0.0062 m^3$ ) como se muestra a continuación: Con la apertura de manija a  $20^\circ$  con 20 segundos.



Temperatura promedio  $-53^\circ C$

**Figura. 58** Temperaturas registradas en la parte superior de la cámara criogénica



Temperatura promedio  $-74^\circ C$

**Figura. 59** Temperaturas registradas en la parte inferior de la cámara criogénica.

La ley Gay-Lussac hizo medidas del volumen a una masa fija de gas, bajo condiciones de presión constante y encontró que el volumen era una función lineal de la temperatura. Esto se expresa por la ecuación.

$$V = a + bt.$$

Donde “t” es la temperatura, y “a y b” son constantes, la intersección en el eje vertical es  $a = V_0$ . Ósea el volumen a  $0^\circ C$ . La pendiente de la curva es  $b = V_0 \alpha$ .

$\alpha$  = coeficiente de expansión térmica a  $0^\circ C$ .

Teniendo en cuenta la ley de charles, la ecuación y temperaturas promedio hacemos el procedimiento.

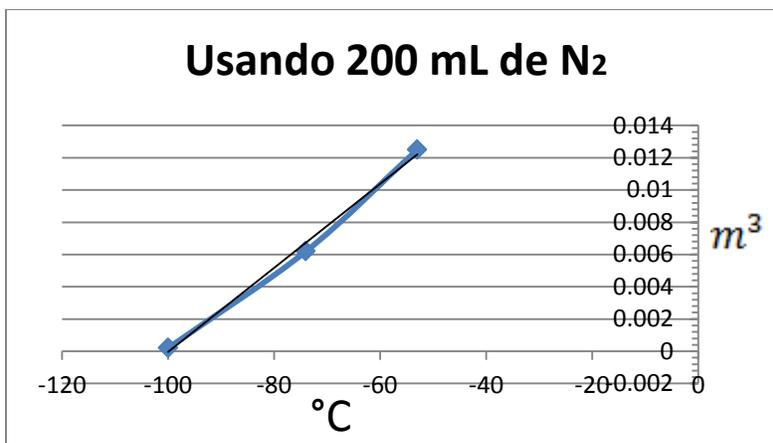


Figura. 60 Gráfica lineal temperatura (°C) vs volumen(m3)

Temperatura °C	Volumen $m^3$
-100	0.0002
-74	0.0062
-53	0.0125

Tabla 22. Volumen del nitrógeno a diferentes temperaturas °C para 200 mL de nitrógeno líquido.

También hacemos el mismo procedimiento para la temperatura en unidades Kelvin.

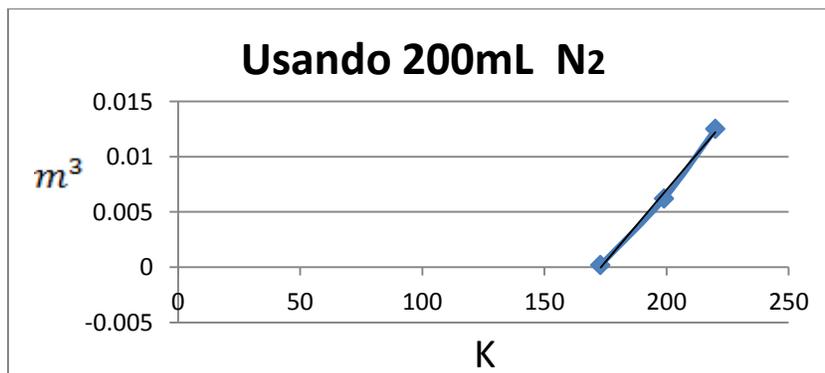


Figura. 61 Gráfica lineal temperatura (K) vs volumen(m3)

Temperatura K	Volumen $m^3$
173	0.0002
199	0.0062
220	0.0125

**Tabla 23** Volumen del nitrógeno a diferentes temperaturas (kelvin) para 200 mL de nitrógeno líquido.

Obtenemos los valores de las constantes a y b para cada las diferentes unidades de Temperatura.

	Kelvin	°C
A	-0.045	0.026
B	2.6 E-4	2.60E-4
R	0.9971	0.9971

**Tabla 24** Valores de las constantes "a" , "b" y "r" para las diferentes unidades de temperatura

Se tienen las siguientes ecuaciones para saber el espacio en metros cúbicos que va ocupando el nitrógeno a medida que aumenta su temperatura

$$V = 0.026 + 0.00026 * (Temp. en °C)$$

$$V = 0.045 + 0.00026 * (Temp. en K)$$

Temperatura		Volumen (m3)		-33	240.15	0.0175	0.0174
°C	K	Utilizando 200 mL	Utilizando 100 mL	-34	239.15	0.0172	0.0171
-31	242.15	0.0180	0.0179	-35	238.15	0.0170	0.0169
-32	241.15	0.0177	0.0177	-36	237.15	0.0167	0.0166
				-37	236.15	0.0165	0.0164

-38	235.15	0.0162	0.0161	-71	202.15	0.0077	0.0075
-39	234.15	0.0159	0.0158	-72	201.15	0.0074	0.0073
-40	233.15	0.0157	0.0156	-73	200.15	0.0072	0.0070
-41	232.15	0.0154	0.0153	-74	199.15	0.0069	0.0067
-42	231.15	0.0152	0.0151	-75	198.15	0.0067	0.0065
-43	230.15	0.0149	0.0148	-76	197.15	0.0064	0.0062
-44	229.15	0.0146	0.0145	-77	196.15	0.0061	0.0060
-45	228.15	0.0144	0.0143	-78	195.15	0.0059	0.0057
-46	227.15	0.0141	0.0140	-79	194.15	0.0056	0.0054
-47	226.15	0.0139	0.0138	-80	193.15	0.0054	0.0052
-48	225.15	0.0136	0.0135	-81	192.15	0.0051	0.0049
-49	224.15	0.0134	0.0132	-82	191.15	0.0048	0.0047
-50	223.15	0.0131	0.0130	-83	190.15	0.0046	0.0044
-51	222.15	0.0128	0.0127	-84	189.15	0.0043	0.0041
-52	221.15	0.0126	0.0125	-85	188.15	0.0041	0.0039
-53	220.15	0.0123	0.0122	-86	187.15	0.0038	0.0036
-54	219.15	0.0121	0.0119	-87	186.15	0.0036	0.0034
-55	218.15	0.0118	0.0117	-88	185.15	0.0033	0.0031
-56	217.15	0.0116	0.0114	-89	184.15	0.0030	0.0028
-57	216.15	0.0113	0.0112	-90	183.15	0.0028	0.0026
-58	215.15	0.0110	0.0109	-91	182.15	0.0025	0.0023
-59	214.15	0.0108	0.0106	-92	181.15	0.0023	0.0021
-60	213.15	0.0105	0.0104	-93	180.15	0.0020	0.0018
-61	212.15	0.0103	0.0101	-94	179.15	0.0017	0.0015
-62	211.15	0.0100	0.0099	-95	178.15	0.0015	0.0013
-63	210.15	0.0097	0.0096	-96	177.15	0.0012	0.0010
-64	209.15	0.0095	0.0093	-97	176.15	0.0010	0.0008
-65	208.15	0.0092	0.0091	-98	175.15	0.0007	0.0005
-66	207.15	0.0090	0.0088	-99	174.15	0.0005	0.0004
-67	206.15	0.0087	0.0086	-100	173.15	0.0002	0.0002
-68	205.15	0.0085	0.0083				
-69	204.15	0.0082	0.0080				
-70	203.15	0.0079	0.0078				

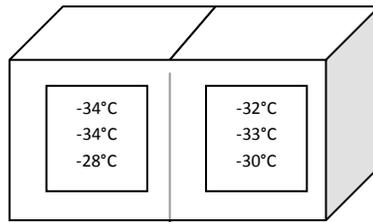
Tabla 25 Descripción de volumen ocupado con respecto a la temperatura.

Ahora lo hacemos para el volumen de 100 mL de Nitrógeno y repetimos el mismo procedimiento

Siguiendo la ecuación de los Gases Ideales

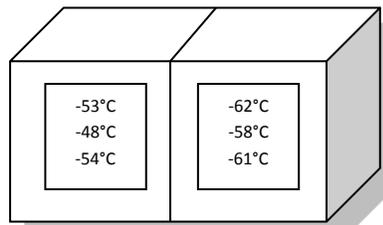
$$P V = n R$$

Con la apertura de manija a 20° con 10 segundos.



Temperatura promedio -31°C

Figura. 62 Temperaturas registradas en la parte superior de la cámara criogénica



Temperatura promedio -56°C

Figura. 63 Temperaturas registradas en la parte inferior de la cámara criogénica

**La ley de Charles.**

$$V = a + bt.$$

Donde “t” es la temperatura, y “a y b” son constantes, la intersección en el eje vertical es  $a = V_0$ . Ósea el volumen a 0°C. La pendiente de la curva es  $b = V_0 \alpha$ .

$\alpha$  = coeficiente de expansión térmica a 0°C.

Teniendo en cuenta la ley de charles, la ecuación y temperaturas promedio hacemos el procedimiento.

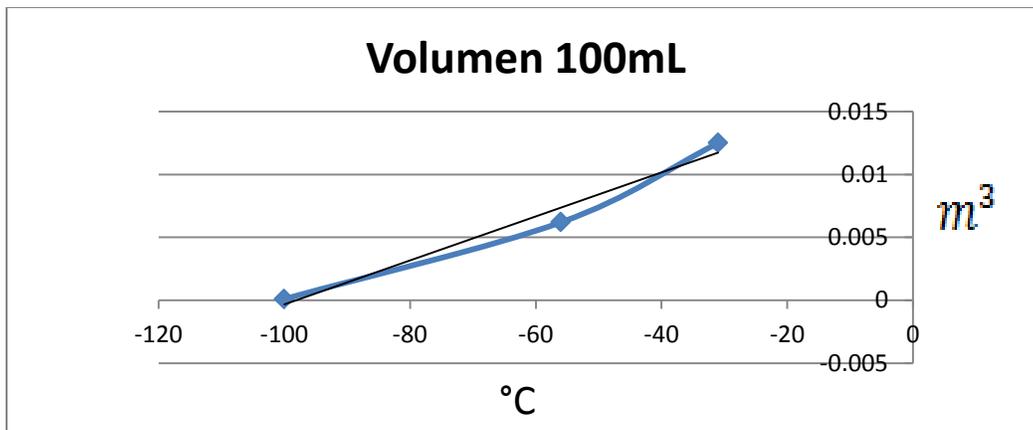


Figura. 64 Gráfica Temperatura (°C) vs Volumen (m3)

Temperatura °C	Volumen $m^3$
-100	0.0001
-56	0.0062
-31	0.0125

Tabla 26. Descripción del volúmen con respecto de la temperatura utilizando 100mL nitrógeno líquido

También hacemos el mismo procedimiento para la temperatura en unidades Kelvin.

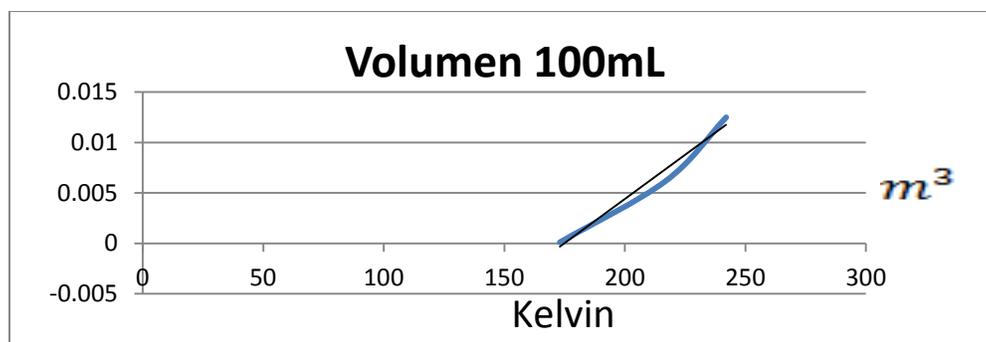


Figura. 65 Gráfica de Temperatura (K) vs volumen (m3)

Temperatura K	Volumen $m^3$
173	0.0002
217	0.0062
242	0.0125

Tabla 27. Temperatura correspondiente a los diferentes volúmenes

Obtenemos los valores de las constantes a y b para cada las diferentes unidades de Temperatura.

	Kelvin	°C
A	-0.03	0.0171
B	1.75 E-4	1.75E-4
R	0.9971	0.9971

Tabla 28. Valores de regresiones lineales en grados °C y K.

Se tienen las siguientes ecuaciones para saber el espacio en metros cúbicos que va ocupando el nitrógeno

$$V = 0.0171 + 0.000175 * (Temp. en °C)$$

$$V = -0.03 + 0.000175 * (Temp. en K)$$

Temperatura		Volumen (m3)	
°C	K	Volumen(100 mL)	Volumen(100 mL)
-31	242.15	0.0117	0.0124
-32	241.15	0.0115	0.0122
-33	240.15	0.0113	0.0120
-34	239.15	0.0112	0.0118
-35	238.15	0.0110	0.0117
-36	237.15	0.0108	0.0115
-37	236.15	0.0106	0.0113

-38	235.15	0.0105	0.0111
-39	234.15	0.0103	0.0110
-40	233.15	0.0101	0.0108
-41	232.15	0.0099	0.0106
-42	231.15	0.0098	0.0104
-43	230.15	0.0096	0.0103
-44	229.15	0.0094	0.0101
-45	228.15	0.0092	0.0099
-46	227.15	0.0091	0.0097
-47	226.15	0.0089	0.0096
-48	225.15	0.0087	0.0094
-49	224.15	0.0085	0.0092
-50	223.15	0.0084	0.0090
-51	222.15	0.0082	0.0089
-52	221.15	0.0080	0.0087
-53	220.15	0.0078	0.0085
-54	219.15	0.0077	0.0083
-55	218.15	0.0075	0.0082
-56	217.15	0.0073	0.0080
-57	216.15	0.0071	0.0078
-58	215.15	0.0070	0.0076
-59	214.15	0.0068	0.0075
-60	213.15	0.0066	0.0073
-61	212.15	0.0064	0.0071
-62	211.15	0.0063	0.0069
-63	210.15	0.0061	0.0068
-64	209.15	0.0059	0.0066
-65	208.15	0.0057	0.0064
-66	207.15	0.0056	0.0062
-67	206.15	0.0054	0.0061

-68	205.15	0.0052	0.0059
-69	204.15	0.0050	0.0057
-70	203.15	0.0049	0.0055
-71	202.15	0.0047	0.0054
-72	201.15	0.0045	0.0052
-73	200.15	0.0043	0.0050
-74	199.15	0.0042	0.0048
-75	198.15	0.0040	0.0047
-76	197.15	0.0038	0.0045
-77	196.15	0.0036	0.0043
-78	195.15	0.0035	0.0041
-79	194.15	0.0033	0.0040
-80	193.15	0.0031	0.0038
-81	192.15	0.0029	0.0036
-82	191.15	0.0028	0.0034
-83	190.15	0.0026	0.0033
-84	189.15	0.0024	0.0031
-85	188.15	0.0022	0.0029
-86	187.15	0.0021	0.0027
-87	186.15	0.0019	0.0026
-88	185.15	0.0017	0.0024
-89	184.15	0.0015	0.0022
-90	183.15	0.0014	0.0020
-91	182.15	0.0012	0.0019
-92	181.15	0.0010	0.0017
-93	180.15	0.0008	0.0015
-94	179.15	0.0007	0.0013
-95	178.15	0.0005	0.0012
-96	177.15	0.0003	0.0010
-97	176.15	0.0001	0.0008

-98	175.15	0.0000	0.0006
-99	174.15	-0.0002	0.0005
-100	173.15	-0.0004	0.0001

Tabla 29 Comportamiento del nitrógeno con respecto a la Temperatura

Coefficiente de expansión térmica.

Observando que la ley de Charles cumple con nuestro modelo experimental y que describe un comportamiento ideal para el nitrógeno podemos suponer el coeficiente de expansión térmica y el valor de ordenadas al origen ( $V_0$ ) para diferentes volúmenes de nitrógeno líquido mediante una regresión lineal.

Teniendo los datos de:

Volumen ( $m^3$ )	Pendiente ( $m^3/^\circ C$ )( $m^3/^\circ C$ )	Ordenada al origen $V_0$
0.0002	2.60E-4	0.026
0.0001	1.75E-4	0.0171

Tabla 30. Valores gráficos de coeficiente de expansión

Obtenemos las gráficas de coeficientes de expansión:

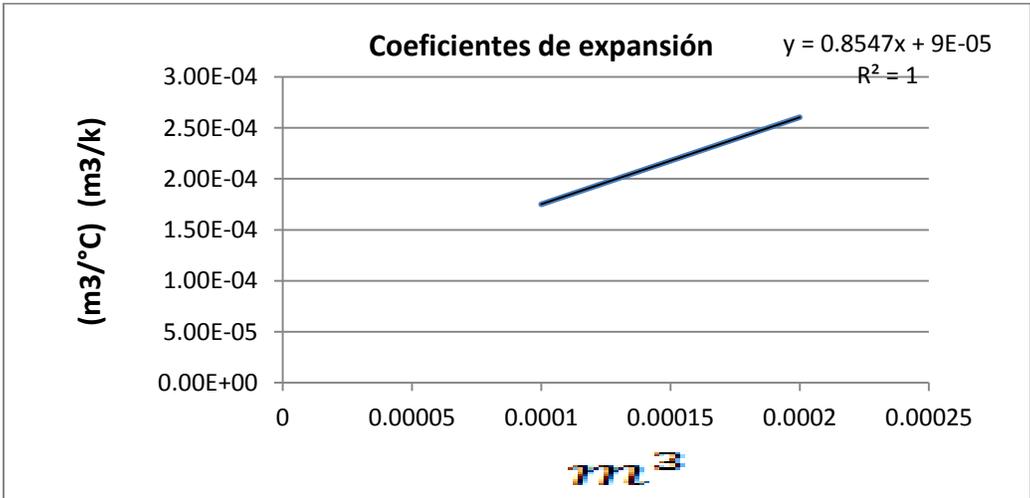


Figura. 66 Gráfica regresión lineal de coeficientes de expansión.

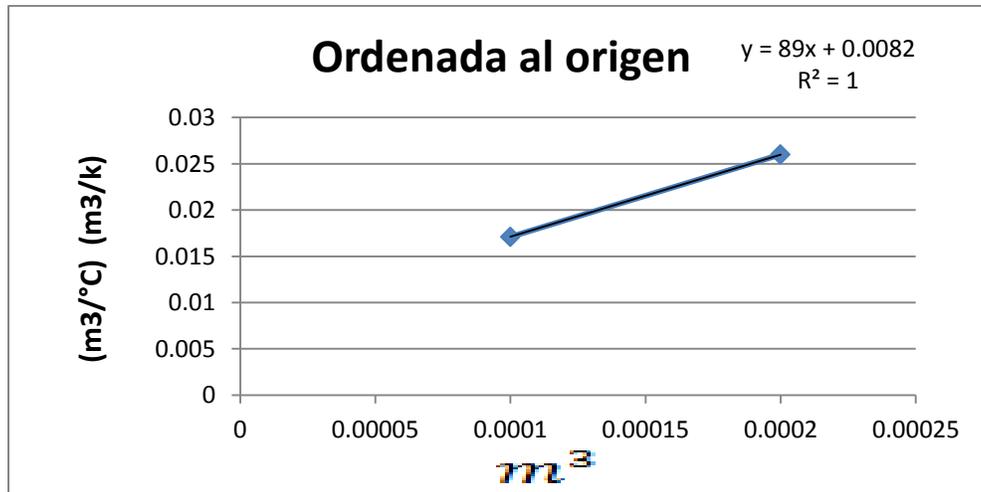


Figura. 67 Gráfica regresión lineal de ordena al origen

Volumen ( $m^3$ )	Coefficiente de expansión ( $m^3 / ^\circ C$ )( $m^3 / ^\circ C$ )	Ordenada al origen	$V_0$
0.001	0.00094	0.097	
0.0009	0.00086	0.0881	
0.0008	0.00077	0.0792	
0.0007	0.00069	0.0703	
0.0006	0.00060	0.0614	
0.0005	0.00052	0.0525	
0.0004	0.00043	0.0436	
0.0003	0.00035	0.0347	
0.0002	0.00026	0.0258	
0.0001	0.00018	0.0169	

Tabla 31 Valores teóricos a diferentes volúmenes ocupados de Nitrógeno líquido

Con estos datos podemos suponer cualquier volumen necesario de nitrógeno a la temperatura deseada a partir de  $-100^\circ C$  en adelante.

### **3.8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

El comportamiento del Nitrógeno dentro de una cámara criogénica está en función del volumen de nitrógeno líquido ocupado, entre más líquido ocupemos, menores temperaturas alcanzadas se tendrán en los cuadrantes.

El comportamiento en las propiedades termofísicas del nitrógeno, nos demostró que al pasar a la fase gaseosa se va expansionando, este fenómeno se explica que conforme aumenta la temperatura, va aumentando su capacidad de transferir calor y aun en estado gaseoso se alcanzan temperaturas por debajo de  $0^{\circ}\text{C}$ .

La válvula de extracción de líquido es más exacta a partir de las posiciones de  $20^{\circ}$ , en esta misma posición influye el tiempo en cuanto al volumen deseado.

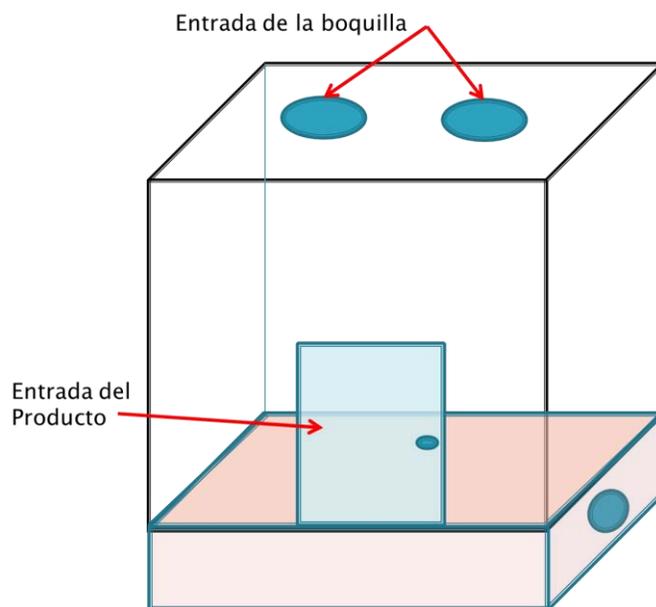
Las presiones manométricas en el tanque Dewar siempre deben ser a 10 psig, para tener una extracción homogénea de líquido.

Las pruebas con el alimento, mostraron que se da una mejor transferencia de calor en las zonas donde se tienen una menor temperatura ( $-100^{\circ}\text{C}$ ), mientras que en la parte superior de la cámara criogénica se da una menor transferencia de calor.

En la salida del aspersor se registra una temperatura de  $-100^{\circ}\text{C}$  pero cuando está en piso la acumulación de nitrógeno líquido provoca un subenfriamiento en el mismo, registrando temperaturas de hasta  $-110^{\circ}\text{C}$ .

Cuando se efectúa una operación con el nitrógeno, el tiempo normal que tarda en llegar a la temperatura ambiente es de 1 hora, ese es el tiempo en que tarda en entrar el aire caliente a la cámara criogénica a  $25^{\circ}\text{C}$ .

Este efecto retardado del nitrógeno gaseoso lo podemos utilizar a nuestro favor diseñando de la siguiente manera la cámara.



**Figura. 68** Diseño ideal de la cámara.

Se recomienda modificar el diseño como el que se muestra en la figura 68, colocando el sistema de extracción de líquido por la parte superior de la cámara, porque de esta manera se retiene más el nitrógeno en su fase gaseosa y aun en gas se registran temperaturas menores a  $0^{\circ}\text{C}$ .

Dentro de la misma cámara se pueden ubicar diferentes tipos de alimentos en diferentes zonas, los que son más resistentes al congelamiento como las fresas pueden estar en la zona baja, mientras que los que pueden sufrir cambios en su estructura como las ciruelas pueden estar en la zona alta o que solo tengan contacto con el nitrógeno en fase gaseosa.

Como en la cámara criogénica se registra una variación de temperaturas entre los muros “A( $-42^{\circ}\text{C}$ ) y B( $-36^{\circ}\text{C}$ )” y en los cuadrantes “1A ( $-69^{\circ}\text{C}$ ) y 2A ( $-79^{\circ}\text{C}$ )” se recomienda poner dos sistemas de inyección para nivelar la temperatura en toda la cámara criogénica.

Las temperaturas en los cuadrantes nos dan una idea de cómo se comporta el gas ideal (nitrógeno) dentro de la cámara, su comportamiento de expansión es lineal, lo que comprueba los trabajos de la ley de Charles y Gay-Lussac en el presente trabajo.

## ANEXOS

### Resultados de las 3 repeticiones en los diferentes cuadrantes

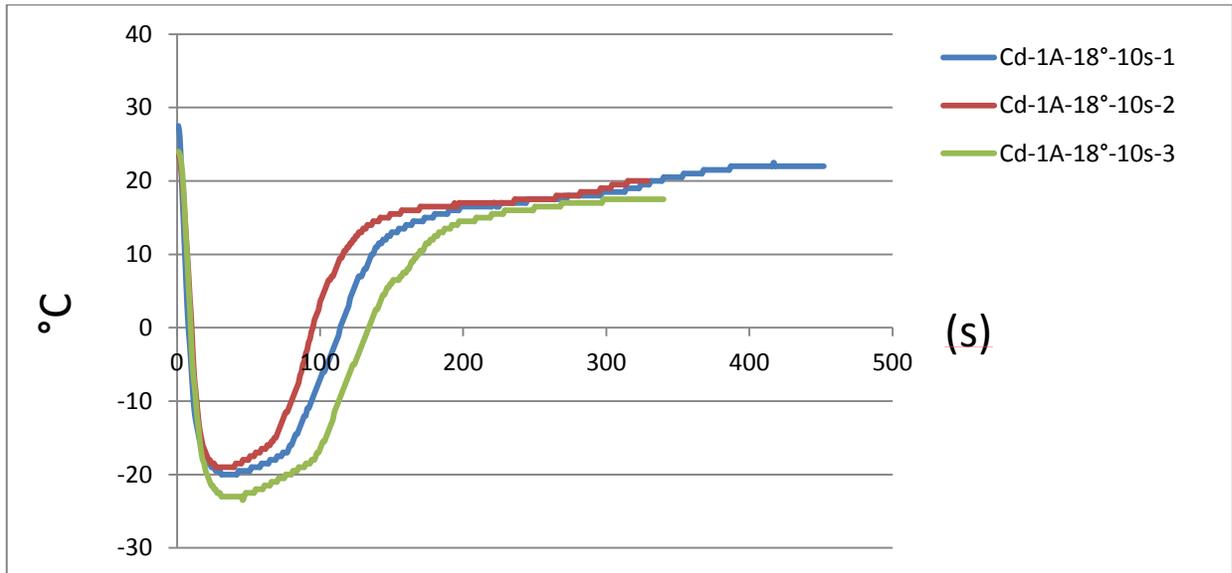


Figura. 69 "Gráfica Cuadrante 1A" posición de la manija 18° a 10 segundos de apertura.

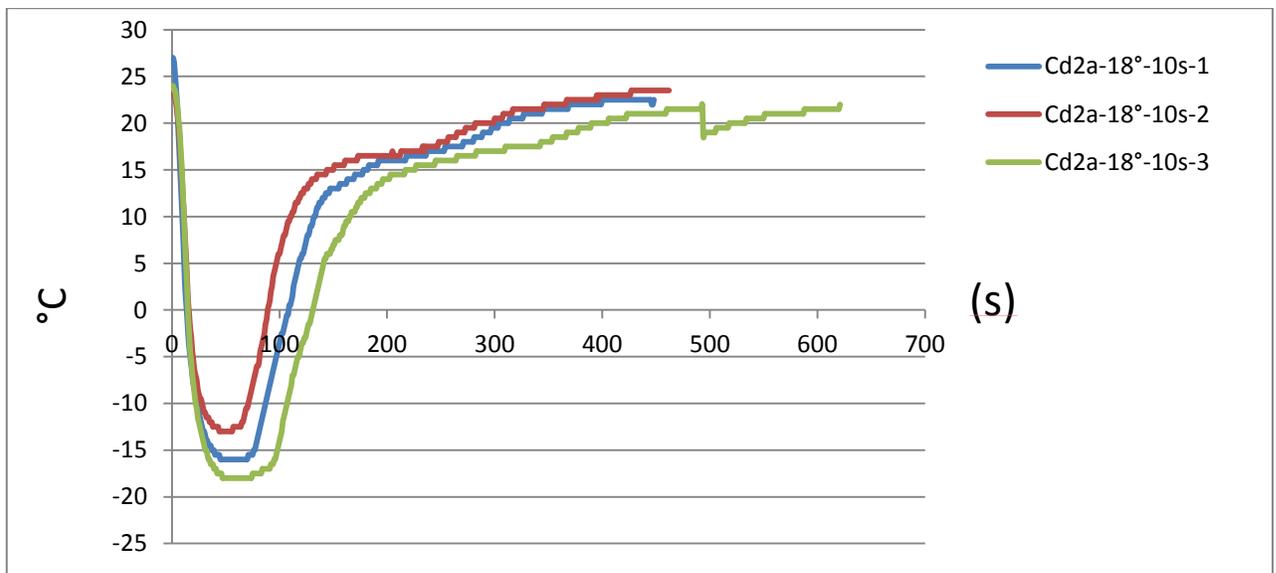


Figura. 70 "Gráfica Cuadrante 2A" posición de la manija 18° a 10 segundos de apertura.

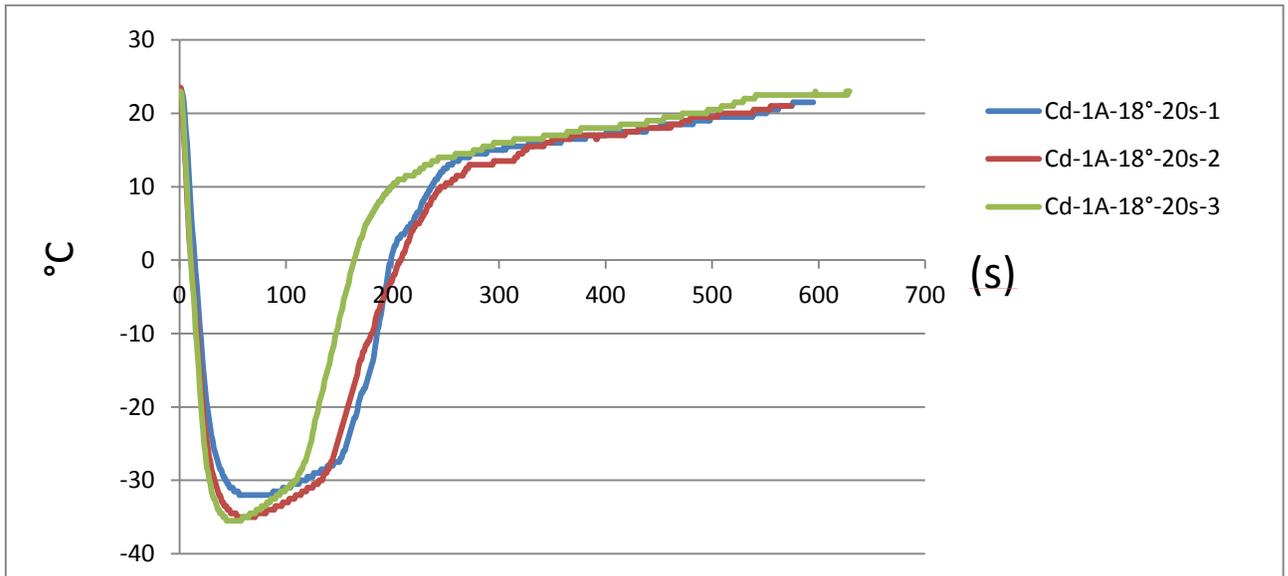


Figura. 71. "Gráfica Cuadrante 1A" posición de la manija 18° a 20 segundos de apertura.

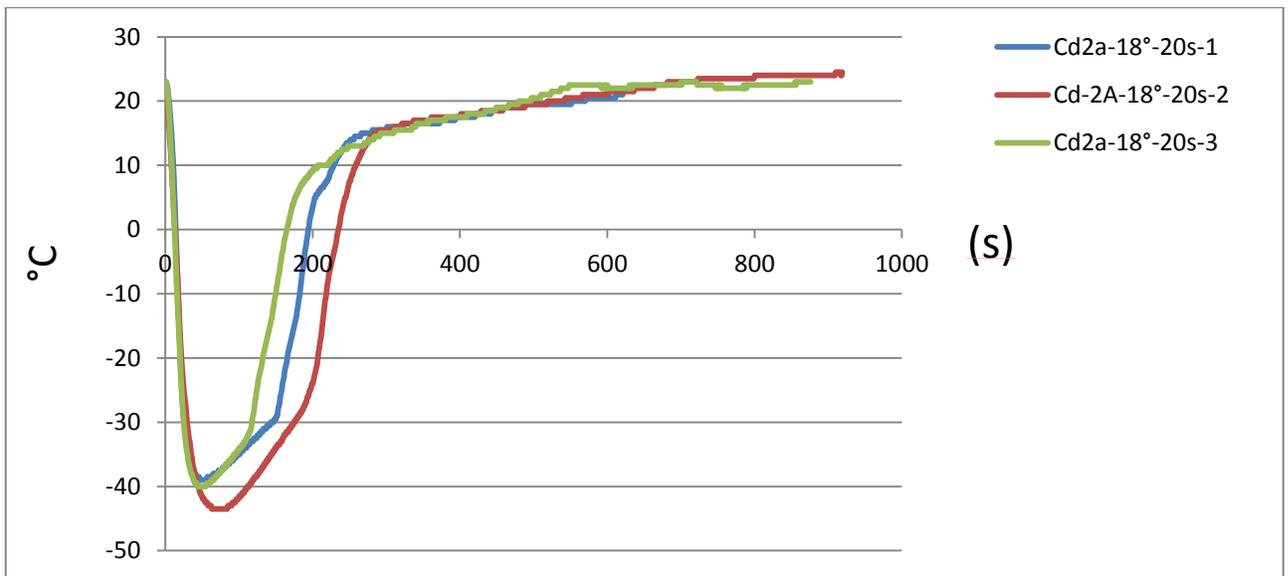


Figura. 72. "Gráfica Cuadrante 2A" posición de la manija 18° a 20 segundos de apertura.

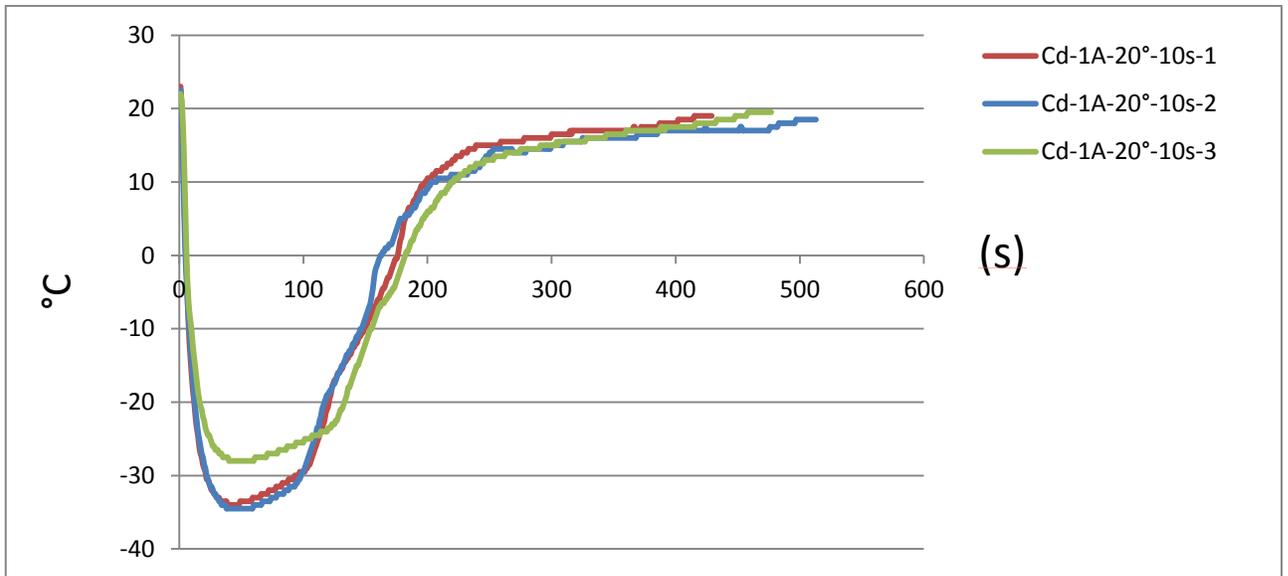


Figura. 73 "Gráfica Cuadrante 1A" posición de la manija 20° a 10 segundos de apertura.

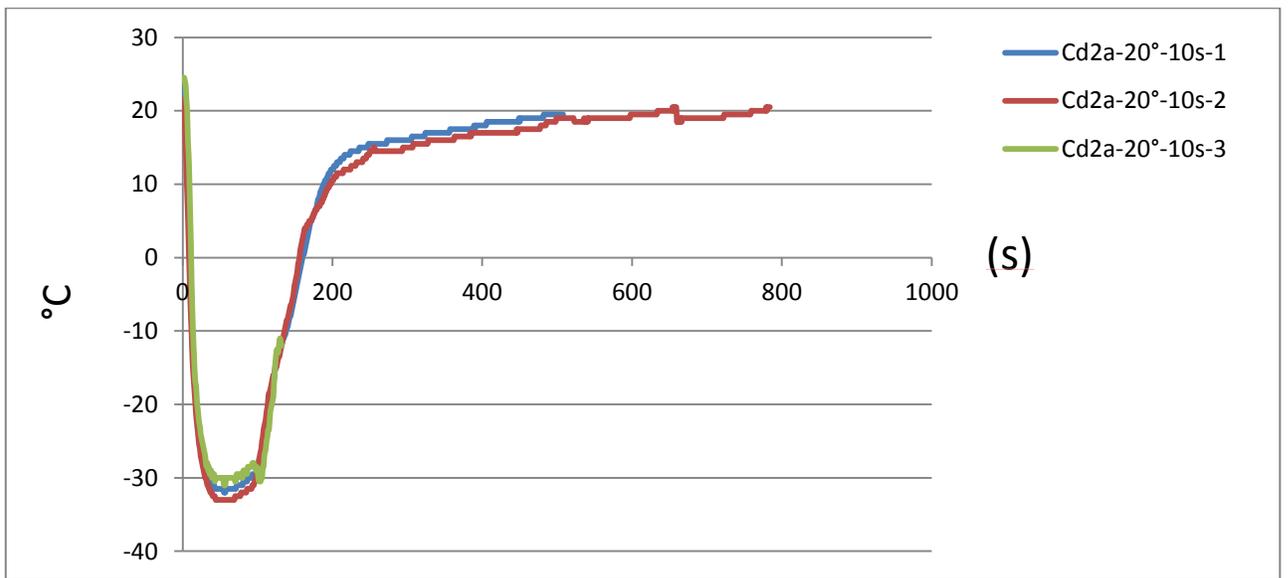


Figura. 74 "Gráfica Cuadrante 2A" posición de la manija 20° a 10 segundos de apertura.

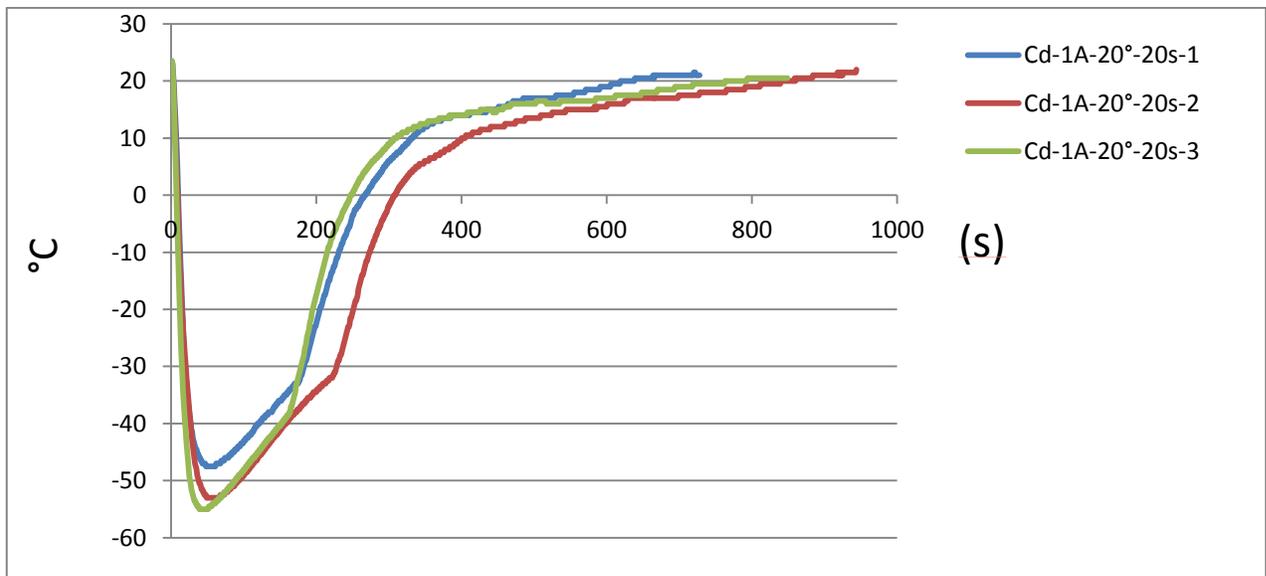


Figura. 75 "Gráfica Cuadrante 1A" posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura.

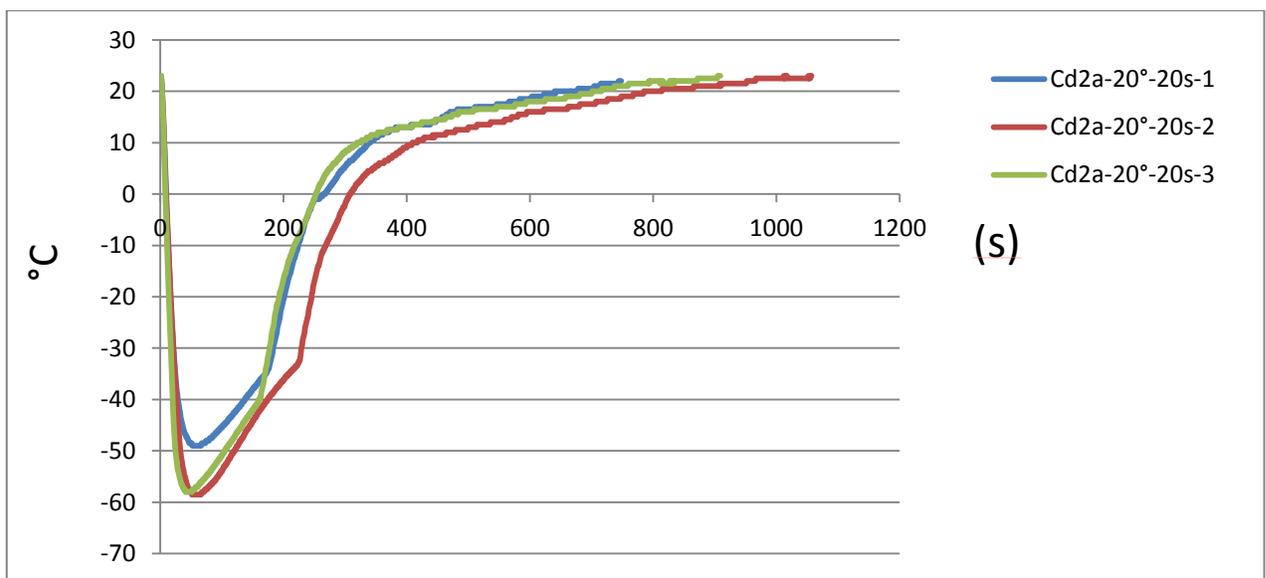


Figura. 76 "Gráfica Cuadrante 2A" posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura.

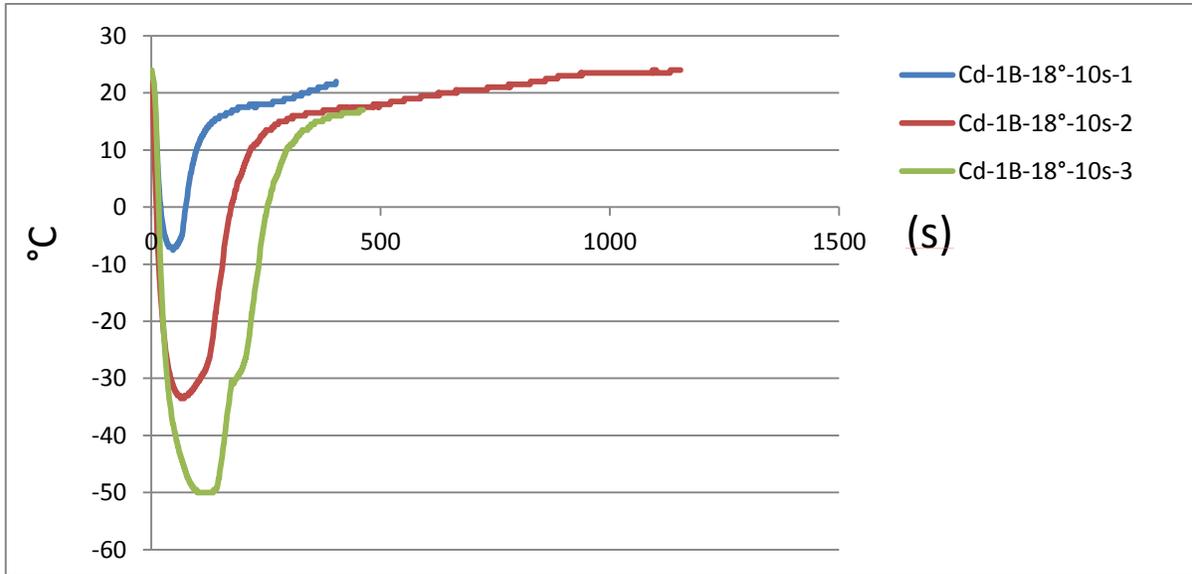


Figura. 77 "Gráfica Cuadrante 1B" posición de la manija 18° a 10 segundos de apertura.

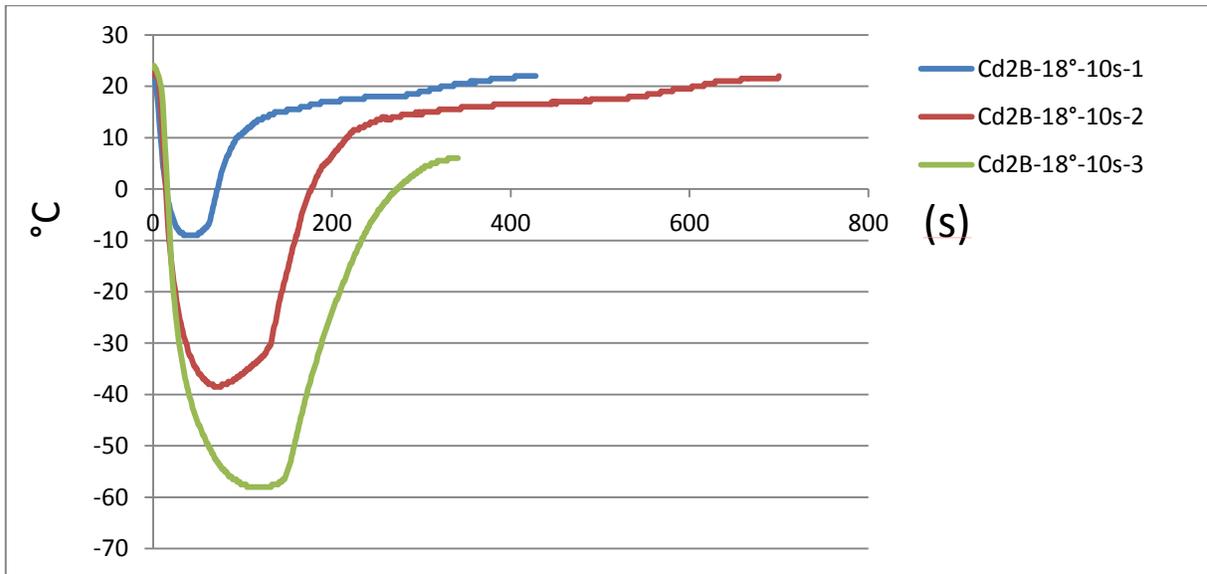


Figura. 78 "Gráfica Cuadrante 2B" posición de la manija 18° a 10 segundos de apertura

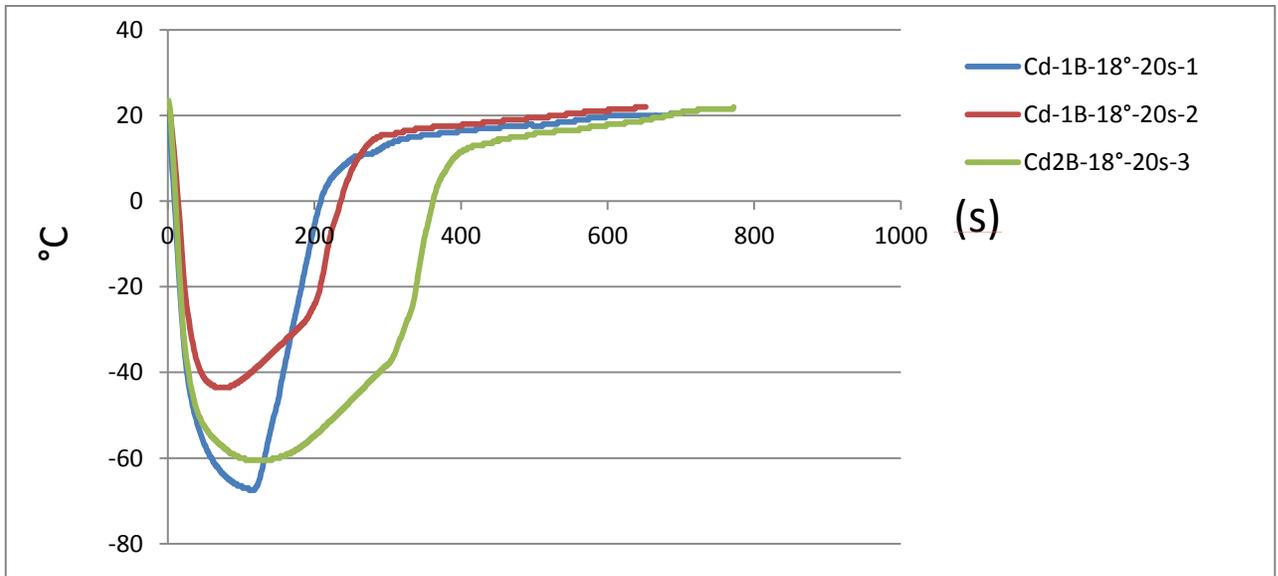


Figura. 79 "Gráfica Cuadrante 1B" posición de la manija 18° a 20 segundos de apertura.

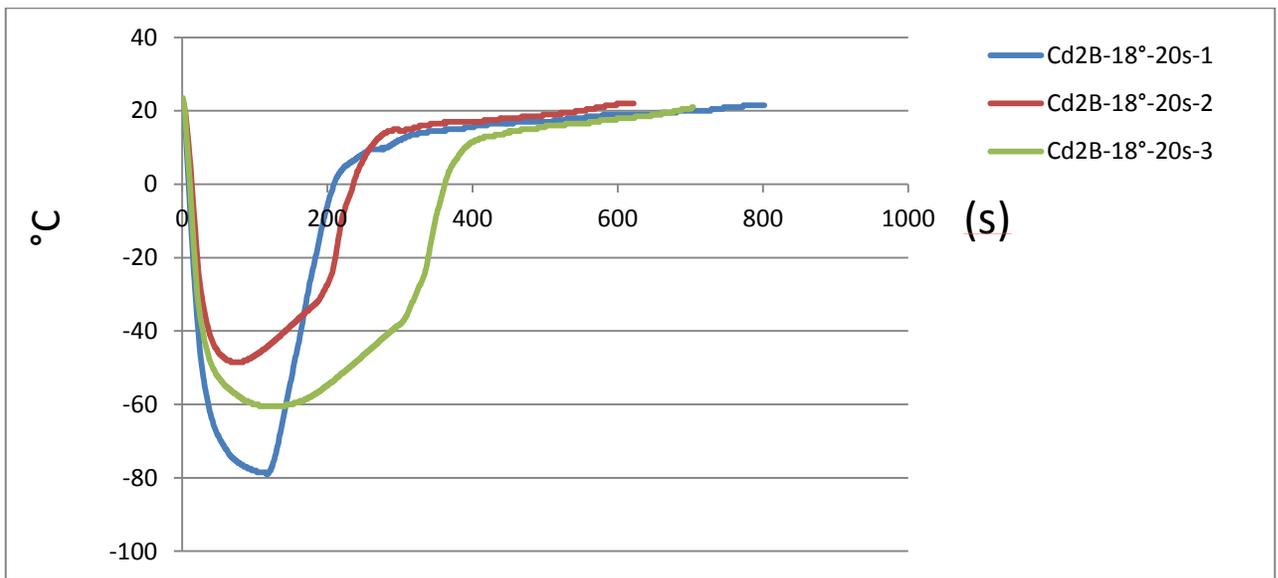


Figura. 80 "Gráfica Cuadrante 1B" posición de la manija 18° a 20 segundos de apertura.

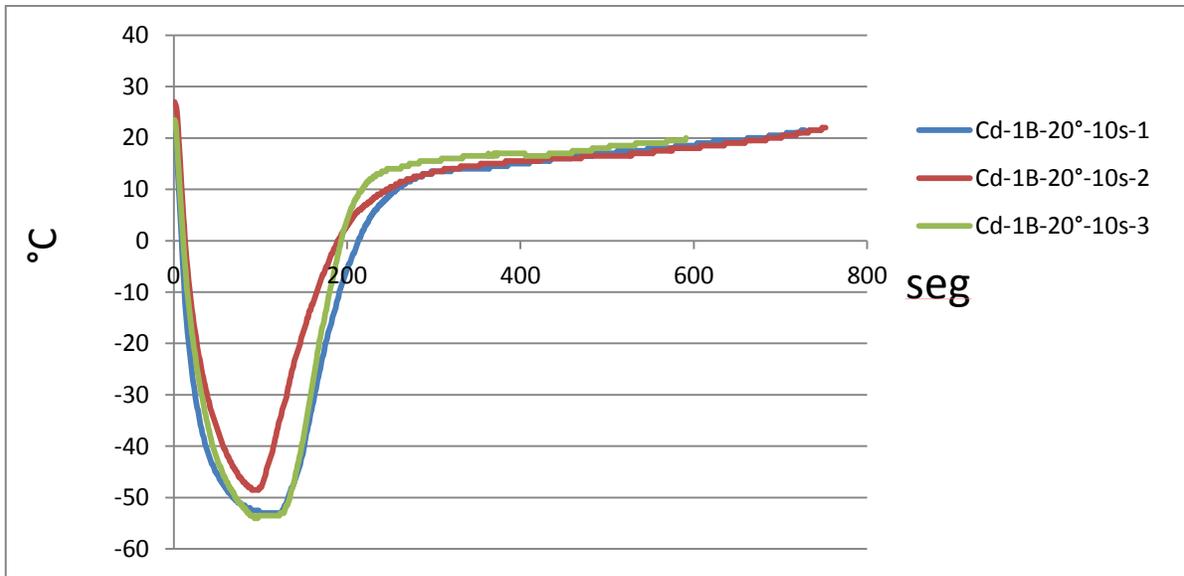


Figura. 81 "Gráfica Cuadrante 1B" posición de la manija 20° a 10 segundos de apertura.

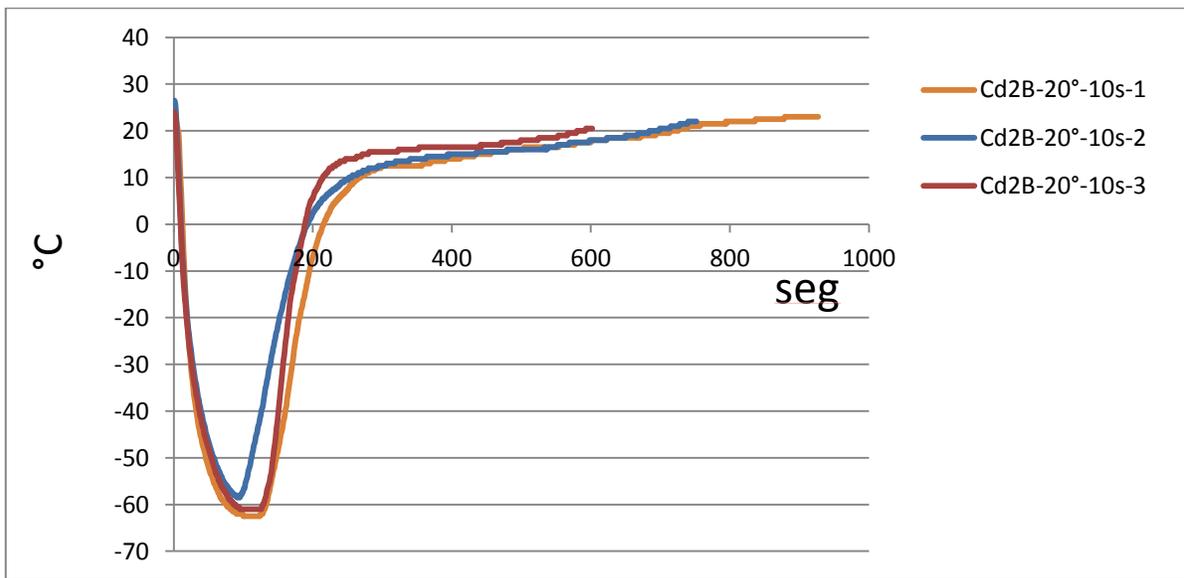


Figura. 82 "Gráfica Cuadrante 2B" posición de la manija 20° a 10 segundos de apertura.

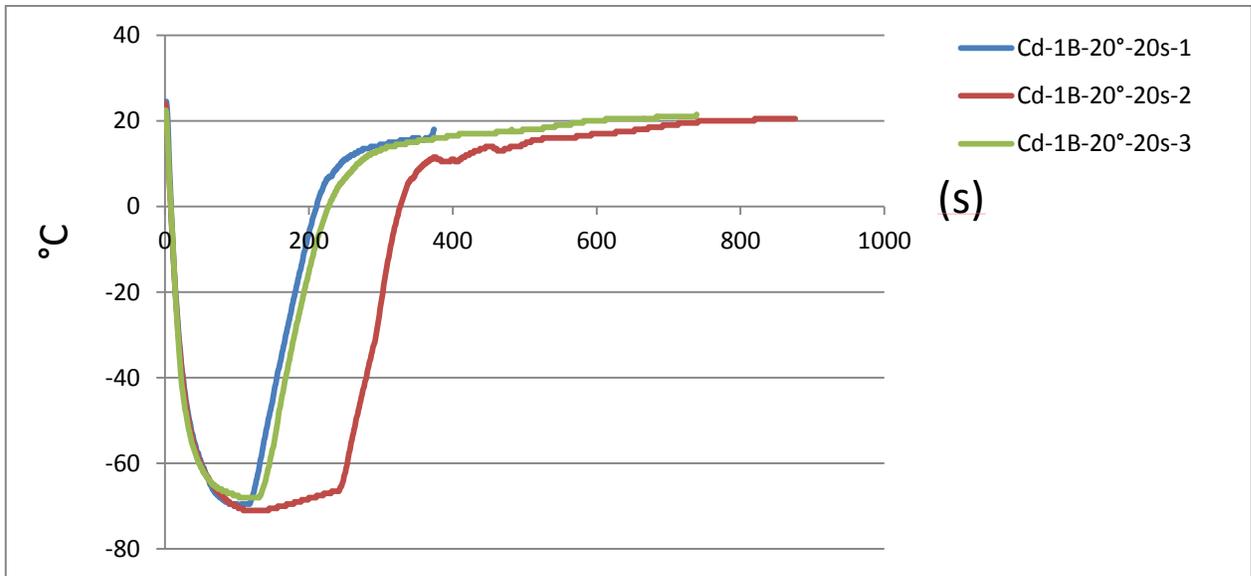


Figura. 83 "Gráfica Cuadrante 2B" posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura.

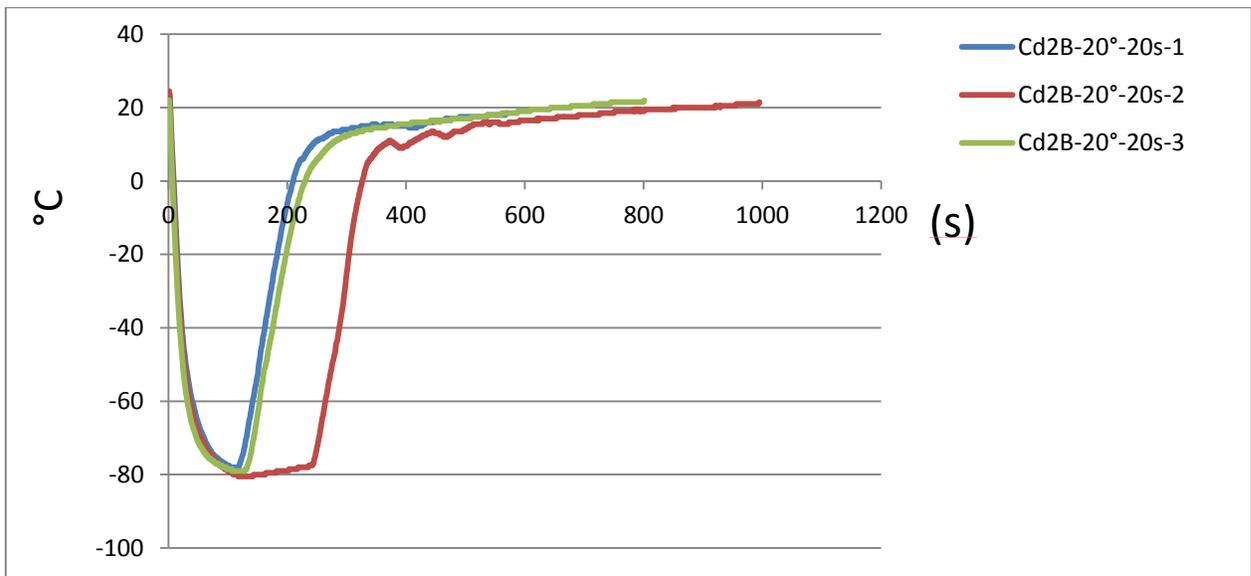


Figura. 84 "Gráfica Cuadrante 2B" posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura.

Resultados para diferentes muros de cámara criogénica.

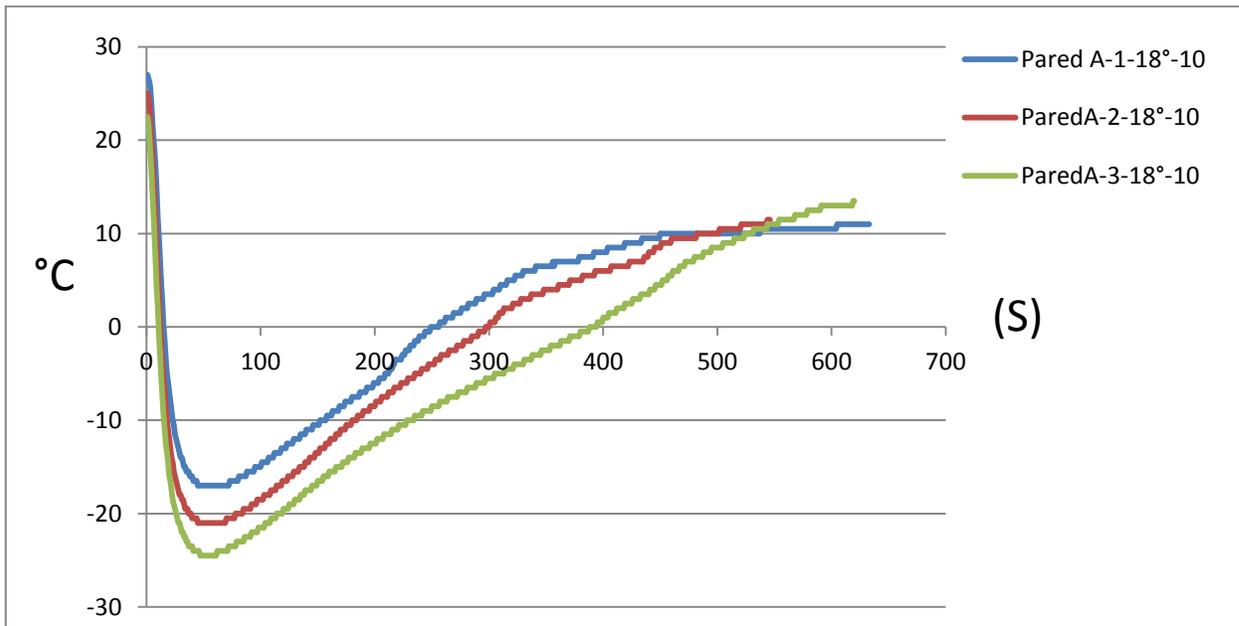


Figura. 85 Gráfica Pared "A" posición de la manija 18° a 10 segundos de apertura

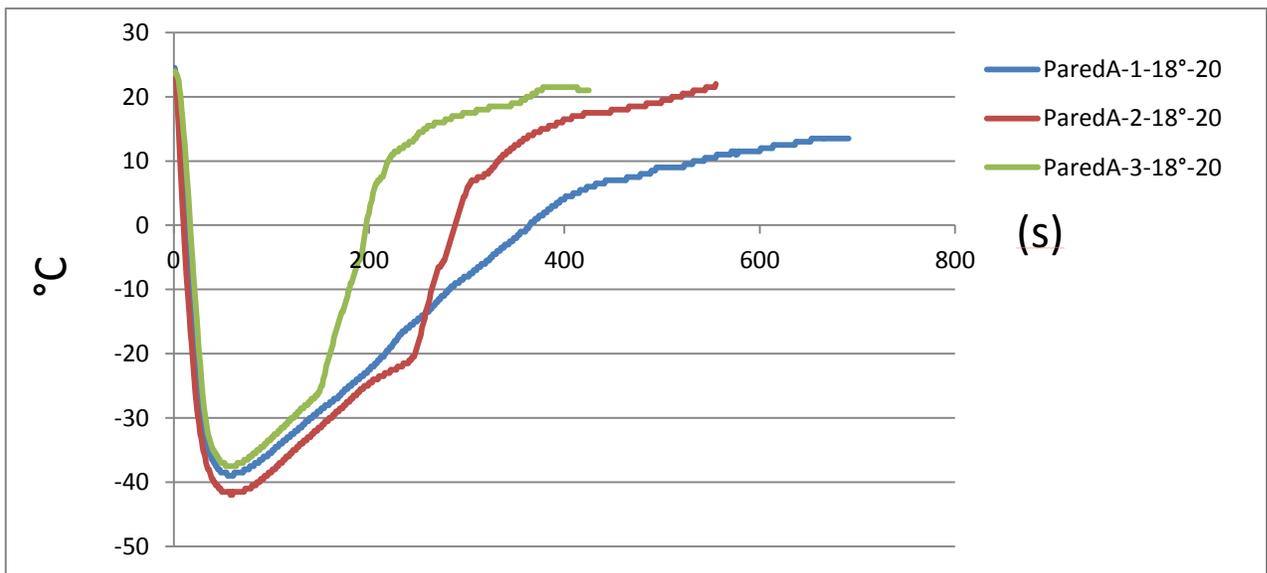


Figura. 86 Gráfica Pared "A" posición de la manija 18° a 10 segundos de apertura.

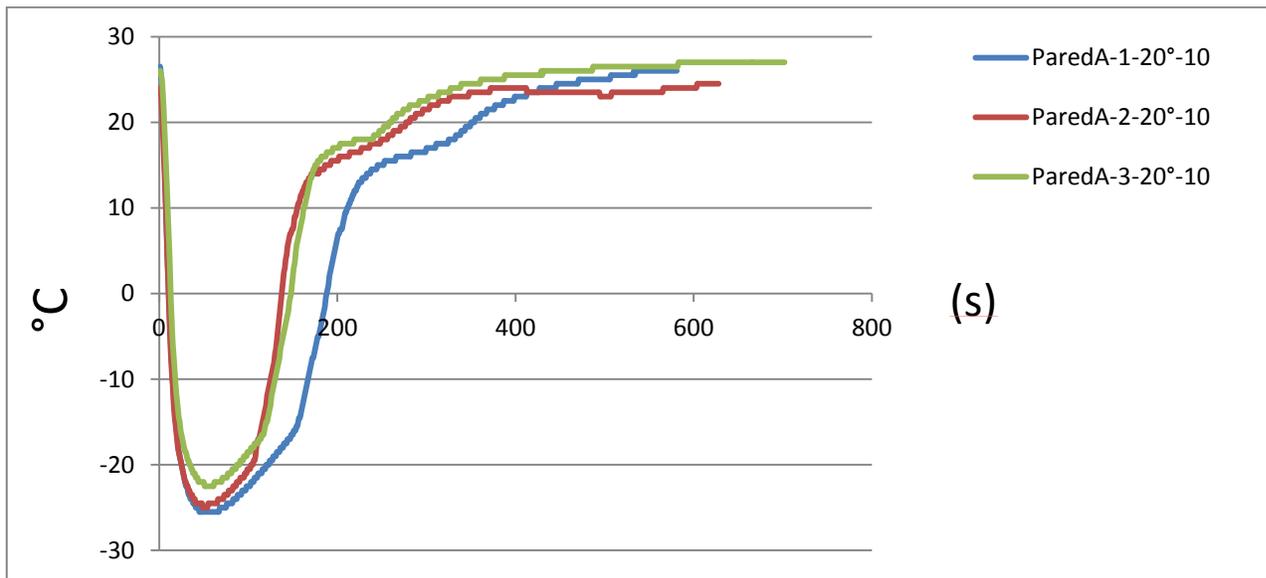


Figura. 87 Gráfica Pared "A" posición de la manija 20° a 10 segundos de apertura.

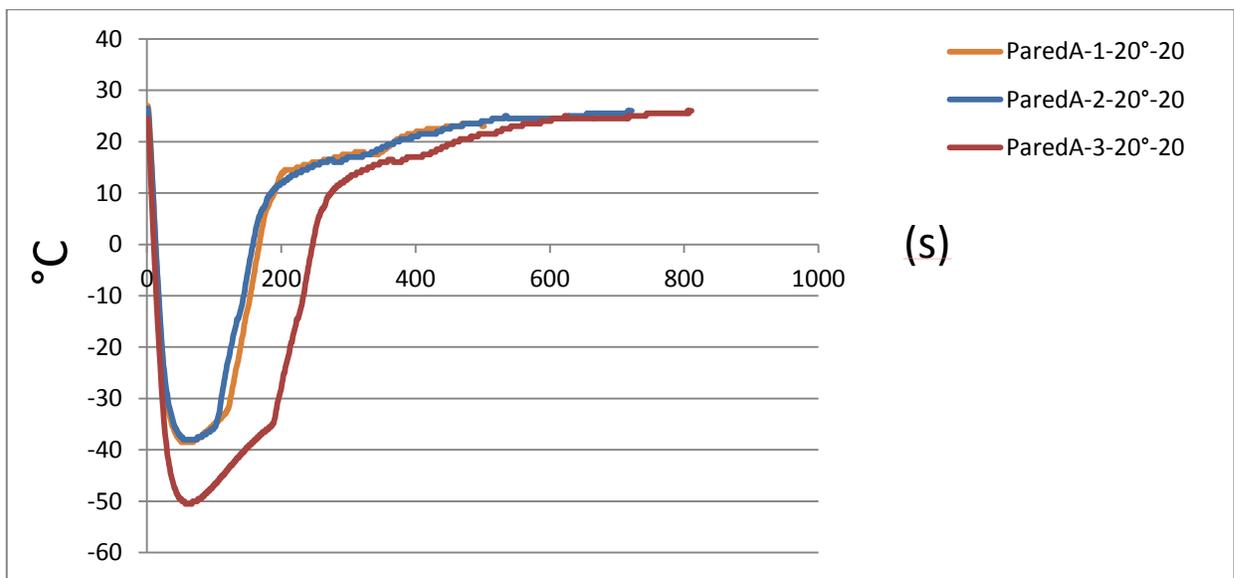


Figura. 88. Gráfica Pared "A" posición de la manija 20° a 10 segundos de apertura

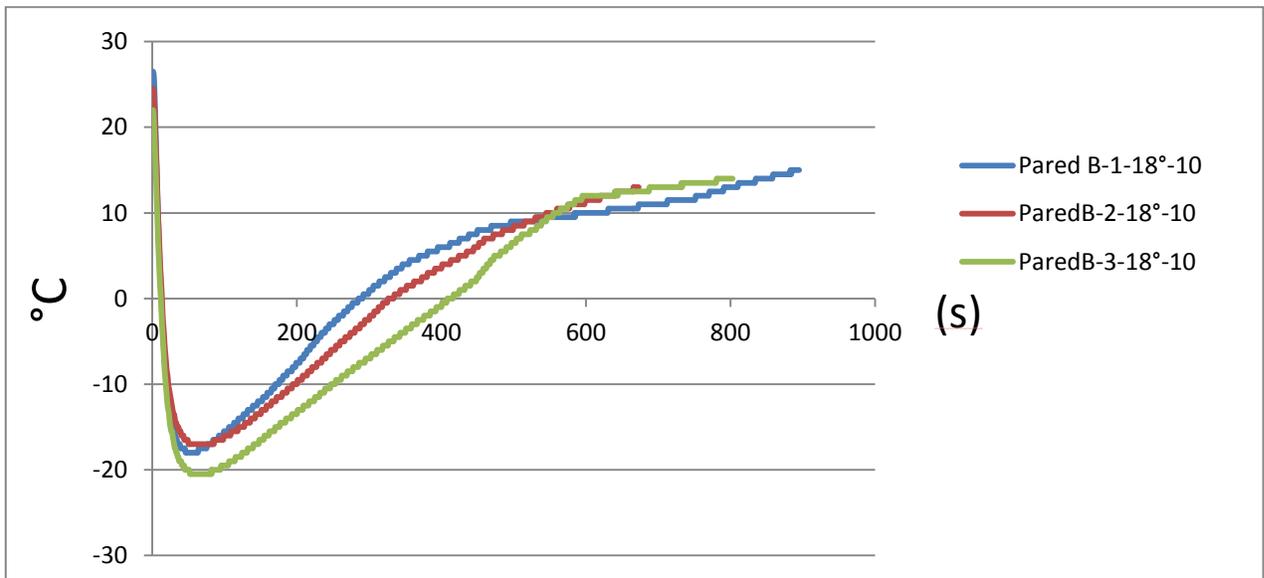


Figura. 89 Gráfica pared "B" posición de la manija 18° a 10 segundos de apertura

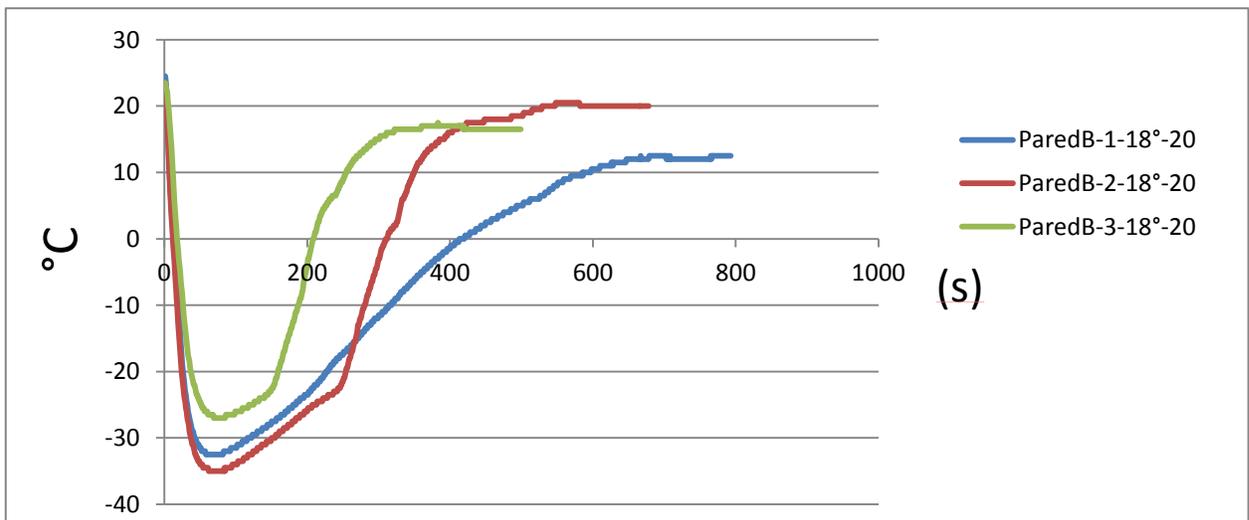


Figura. 90 Gráfica pared "B" posición de la manija 18° a 10 segundos de apertura.

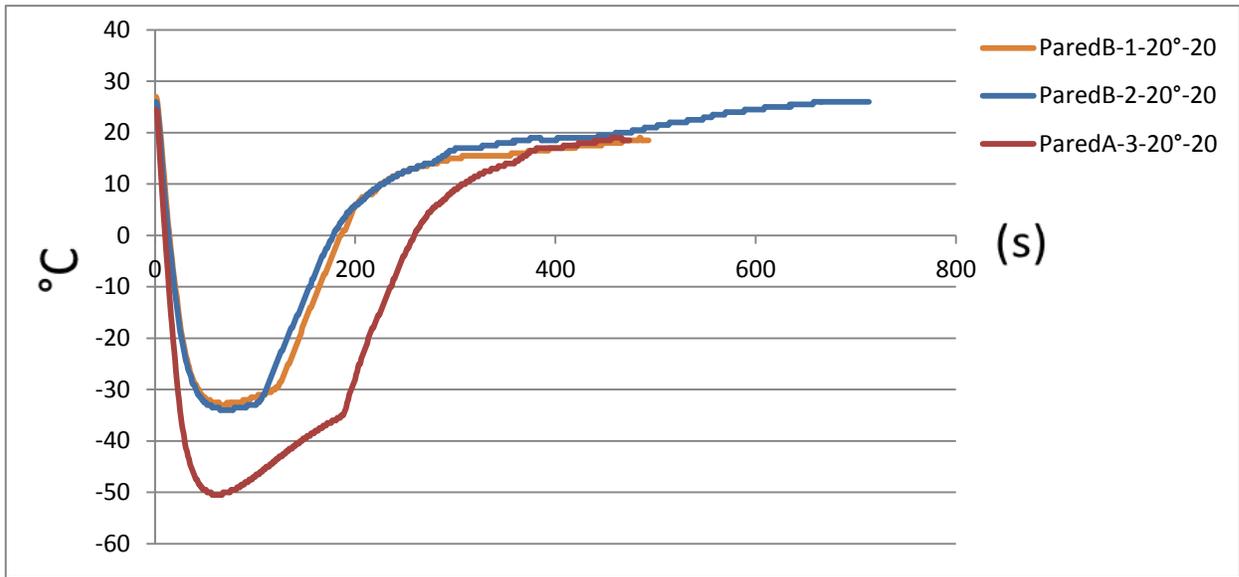


Figura. 91 Gráfica pared "B" posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura.

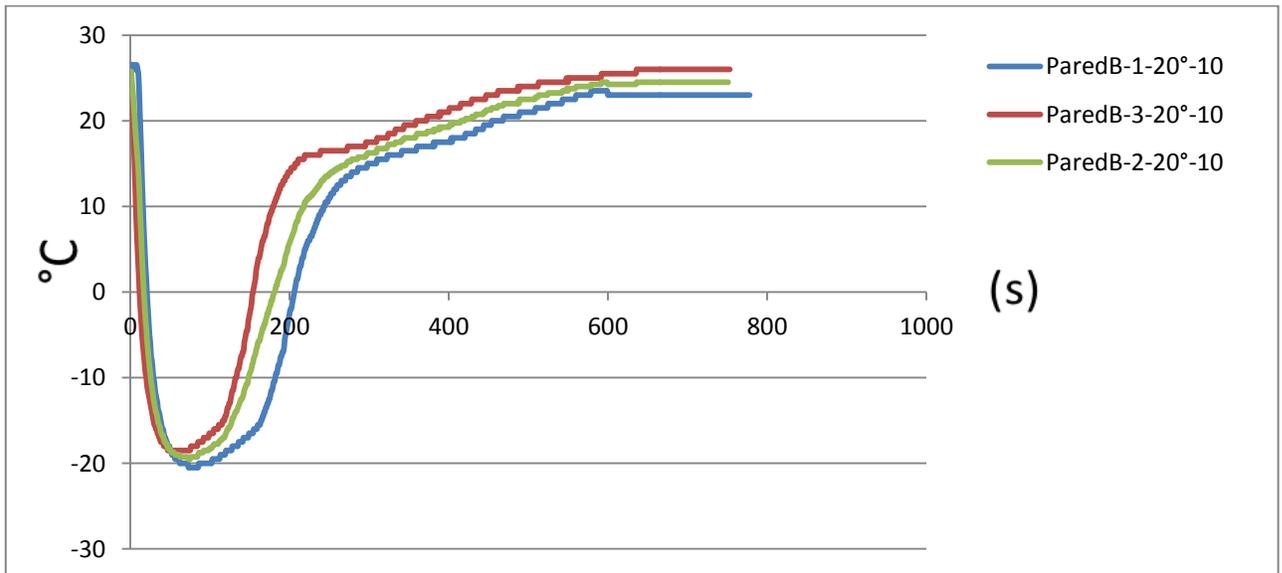


Figura. 92 Gráfica Pared "B" posición de la manija 20° a 10 segundos de apertura.

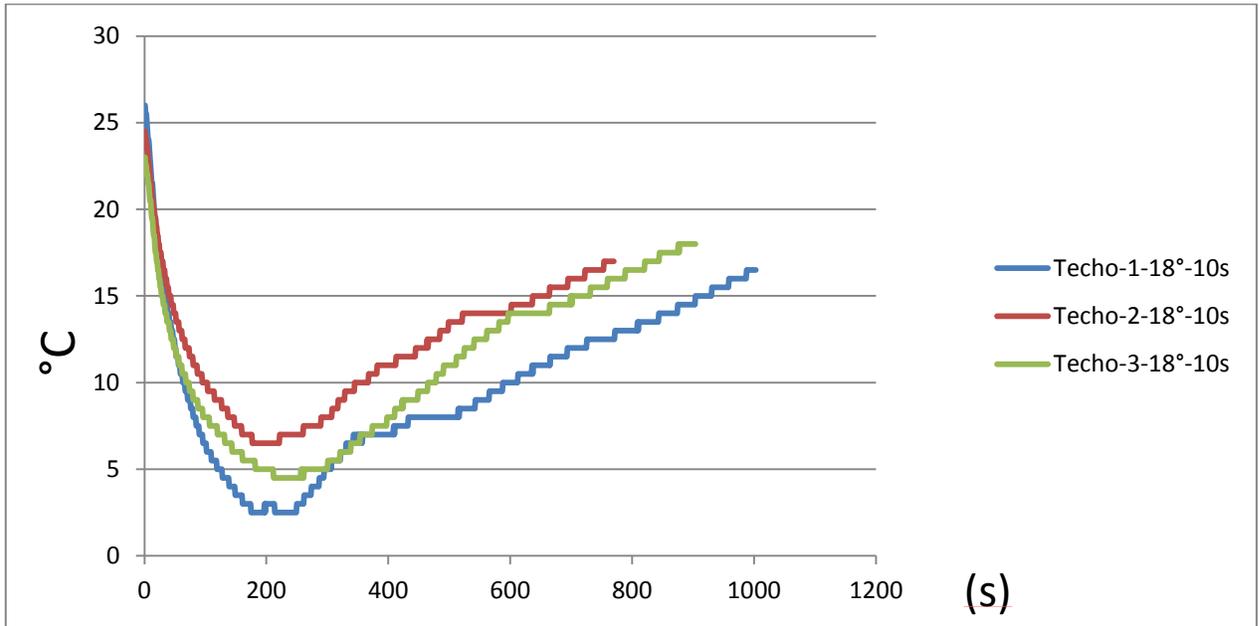


Figura. 93 Gráfica Techo posición de la manija 18° a 10 segundos de apertura.

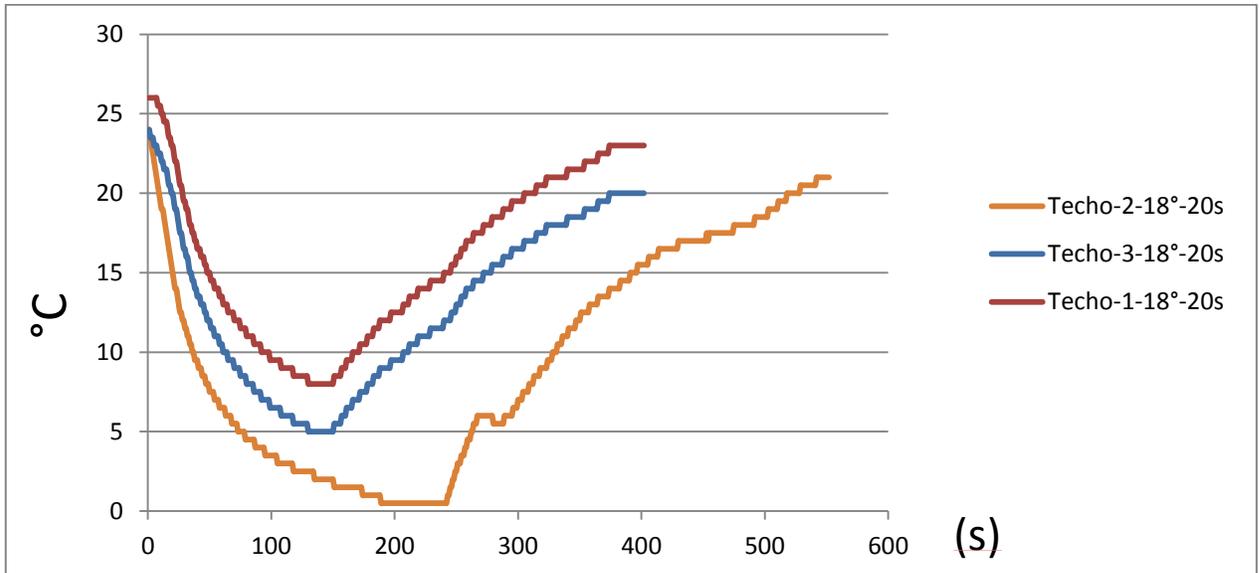


Figura. 94 Gráfica Techo posición de la manija 18° a 20 segundos de apertura.

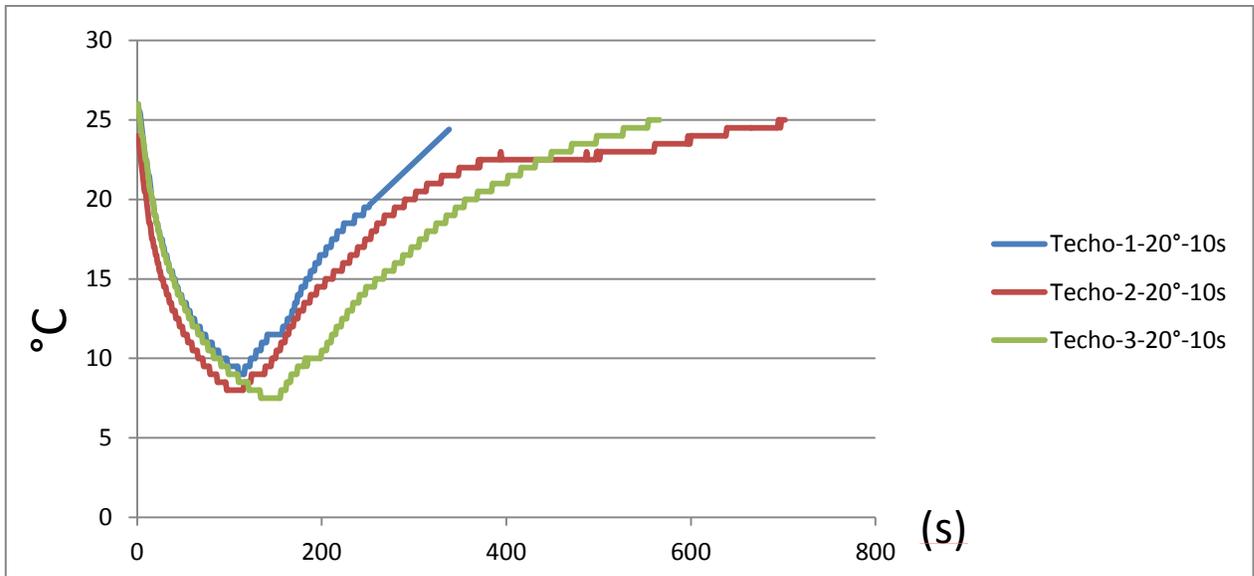


Figura. 95 Gráfica techo posición de la manija 20° a 10 segundos de apertura.

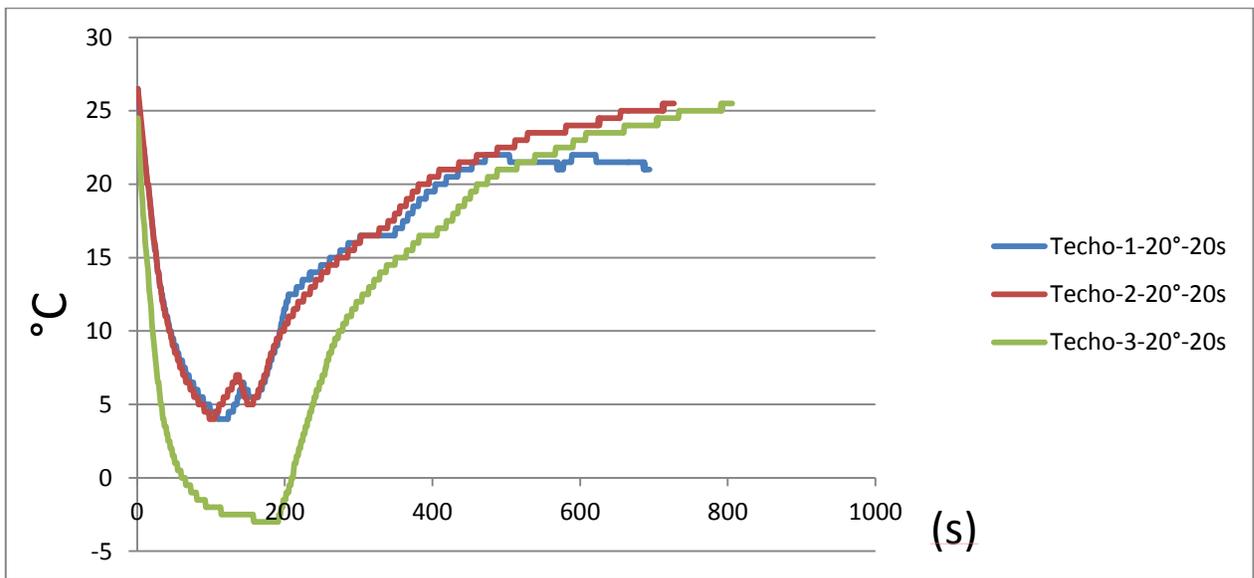


Figura. 96 Gráfica techo posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura.

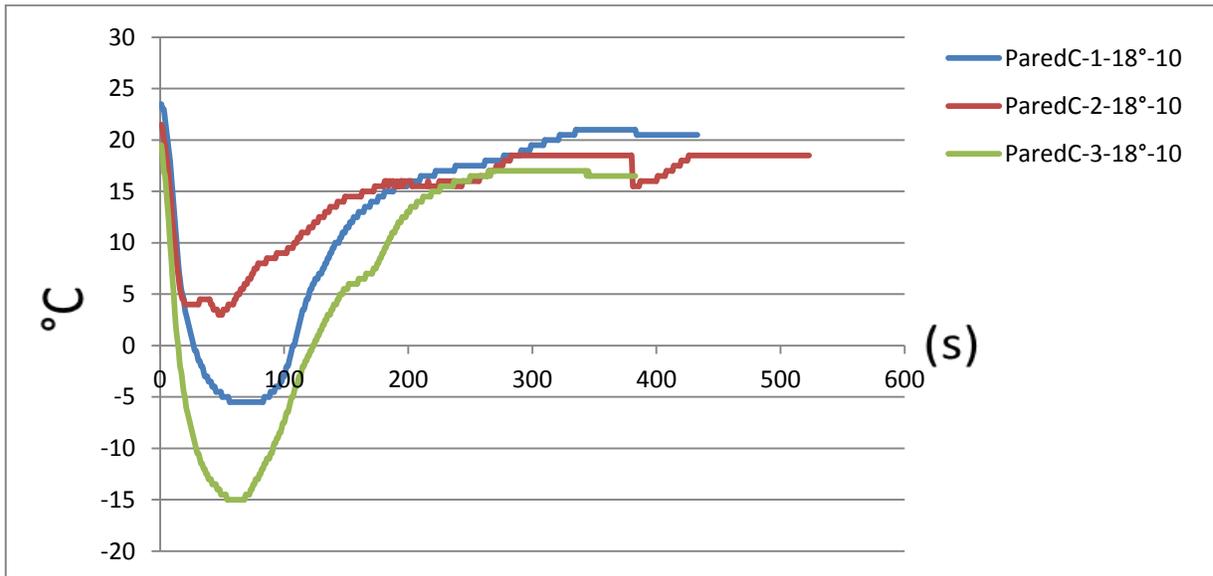


Figura. 97 Gráfica pared "C" posición de la manija 18° a 10 segundos de apertura.

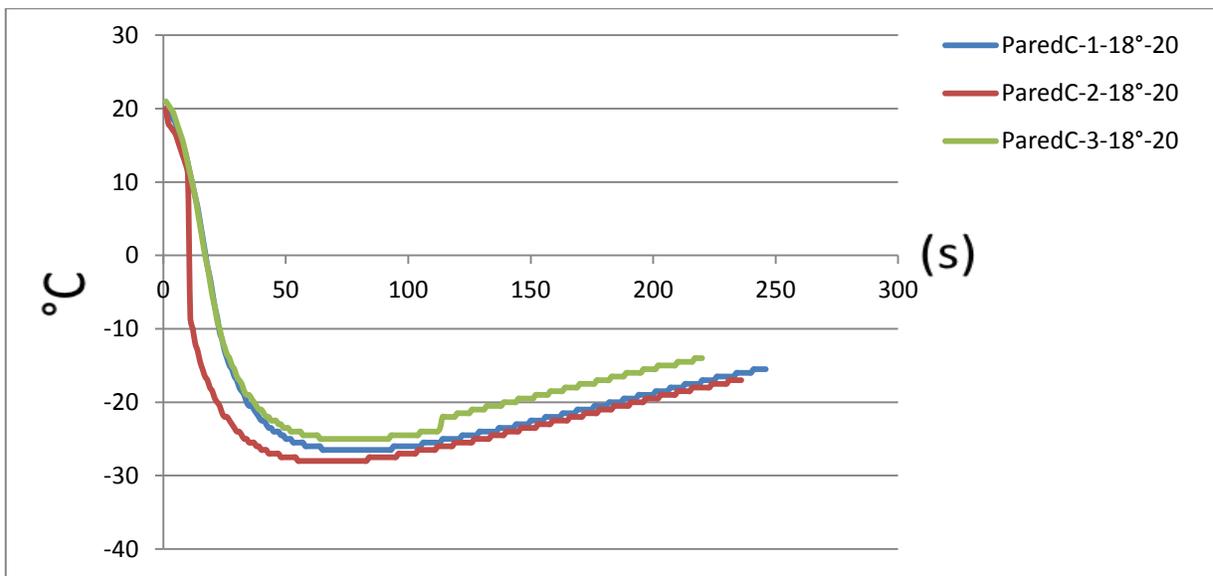


Figura. 98 Gráfica pared "C" posición de la manija 18° a 20 segundos de apertura.

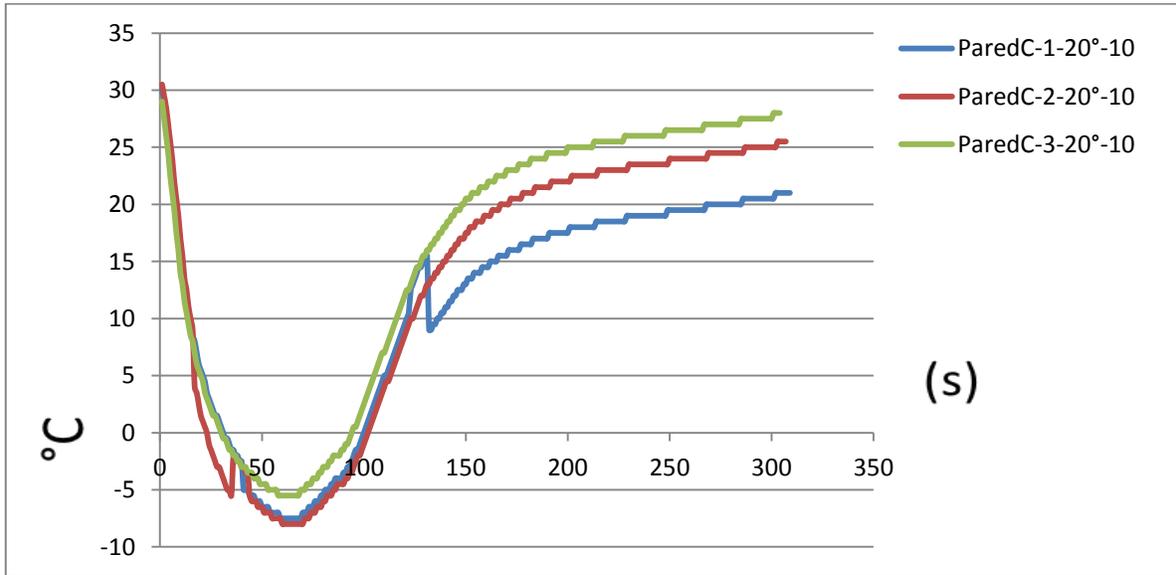


Figura. 99 Gráfica pared "C" posición de la manija 20° a 10 segundos de apertura.

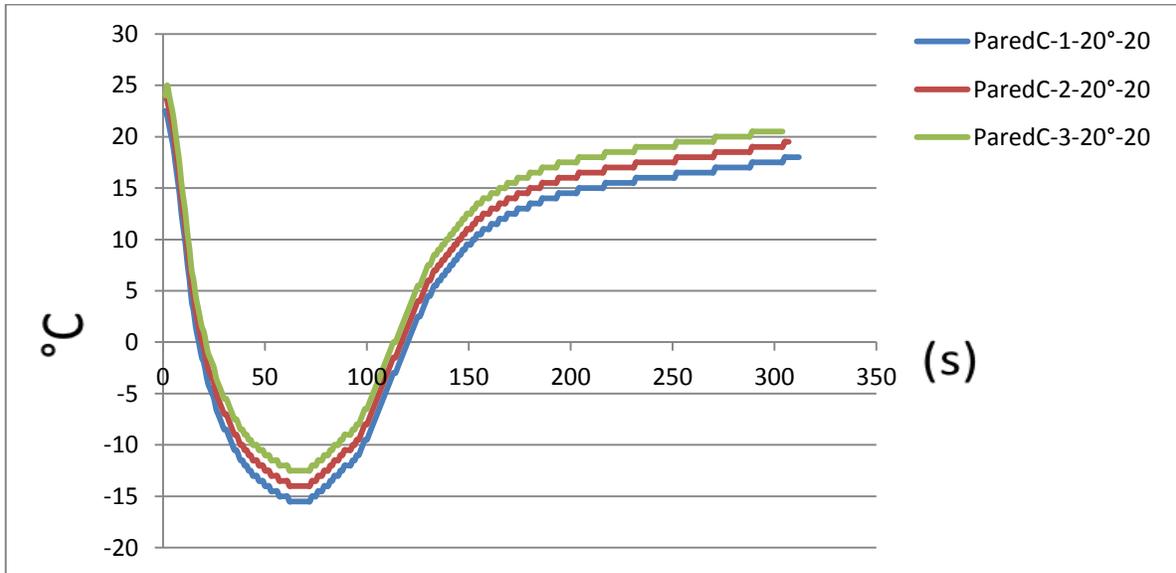
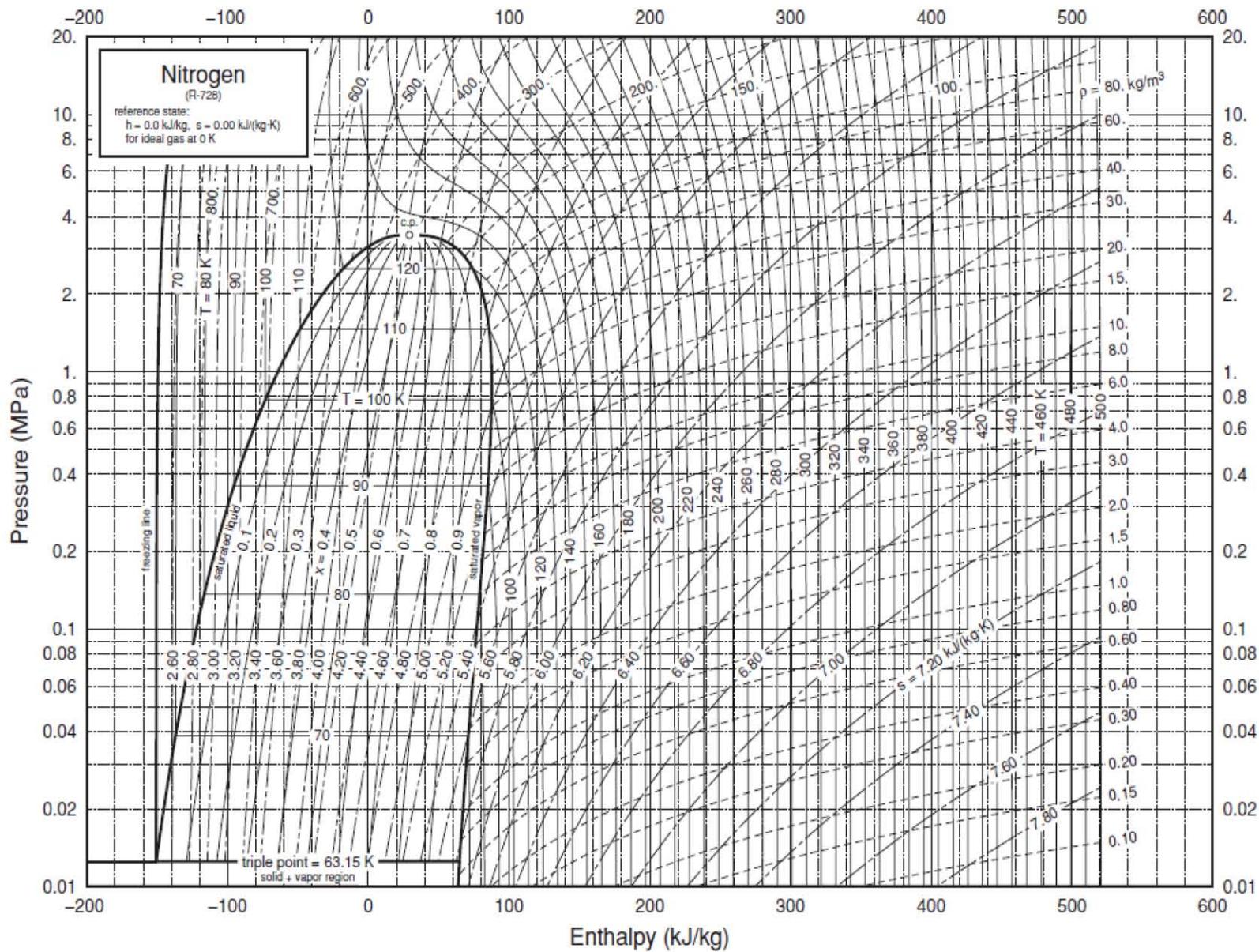
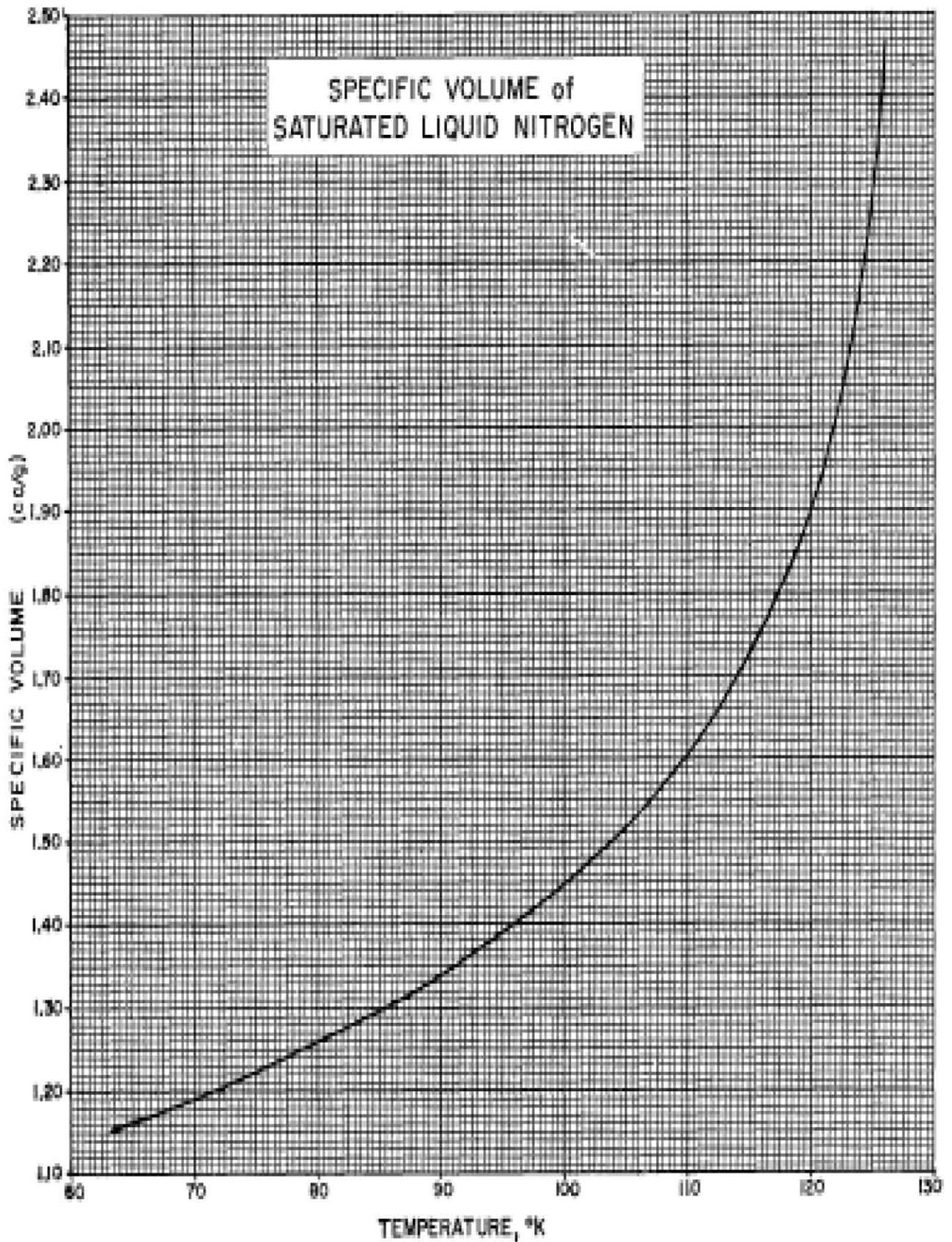


Figura. 100 Gráfica pared "C" posición de la manija 20° a 20 segundos de apertura.





Vapor Pressure of Saturated Nitrogen

Temperature (K)	Pressure (ATM)	Pressure PSIA
63.150	0.123	1.808
64.000	0.144	2.116
65.000	0.172	2.528
66.000	0.203	2.983
67.000	0.240	3.527
68.000	0.281	4.130
69.000	0.328	4.820
70.000	0.380	5.585
71.000	0.439	6.453
72.000	0.505	7.422
73.000	0.579	8.509
74.000	0.660	9.699
75.000	0.750	11.022
76.000	0.849	12.477
77.000	0.958	14.079
77.364	1.000	14.696
78.000	1.077	15.828
79.000	1.207	17.738
80.000	1.349	19.825
81.000	1.503	22.088
82.000	1.670	24.542
83.000	1.850	27.188
84.000	2.045	30.053
85.000	2.254	33.125
86.000	2.480	36.446
87.000	2.721	39.988
88.000	2.980	43.794
89.000	3.256	47.850
90.000	3.551	52.185
91.000	3.864	56.785
92.000	4.198	61.694
93.000	4.553	66.911
94.000	4.929	72.437
95.000	5.327	78.286
96.000	5.748	84.473
97.000	6.192	90.998
98.000	6.662	97.905
99.000	7.156	105.165
100.000	7.676	112.806
101.000	8.223	120.845
102.000	8.798	129.295
103.000	9.401	138.157
104.000	10.032	147.430
105.000	10.694	157.159
106.000	11.387	167.343
107.000	12.111	177.983
108.000	12.867	189.093
109.000	13.657	200.703
110.000	14.480	212.798
111.000	15.339	225.423
112.000	16.233	238.560
113.000	17.164	252.242
114.000	18.133	266.483
115.000	19.140	281.281
116.000	20.188	296.683

### Specific Heat ( $C_p$ ) of Gaseous Nitrogen

Source of Data:

Din, F.; Thermodynamic Functions of Gases, Vol. 3, London (1961)

Pressure Atm	Specific Heat $c_p$ joules/mole $^{\circ}$ K							
	1000	1300	1600	1900	2200	2500	2800	3000
1	29.58	29.27	29.07	29.98	28.95	28.95	28.96	28.98
3	30.62	29.95	29.51	29.26	29.11	29.07	29.05	29.06
5	31.94	30.68	29.98	29.54	29.27	29.18	29.14	29.14
10	60.63	32.80	31.25	30.27	29.70	29.48	29.39	29.35
30	57.88	-----	38.28	33.56	31.66	30.84	30.42	30.21
50	55.92	-----	54.3	38.01	33.87	32.39	31.54	31.12
100	53.37	60.9	83	49.50	39.60	36.35	34.42	33.45
200	50.44	53.7	63.1	50.45	43.89	40.21	37.62	36.25
300	49.11	50.97	54.3	48.55	44.25	41.31	38.94	37.61
400	48.29	49.19	49.52	47.13	43.97	41.17	39.09	37.95
600	47.28	47.13	46.41	44.96	42.79	40.55	38.86	37.96
800	46.79	46.28	45.21	43.63	41.81	40.06	38.60	37.82
1000	46.62	45.84	44.53	42.91	41.18	39.65	38.37	37.68
1500	46.46	45.59	44.10	42.17	40.32	38.83	37.80	37.28
2000	46.71	45.72	44.09	42.12	40.27	38.75	37.66	37.10
2500		45.91	44.27	42.31	40.40	38.86	37.74	37.18
3000		46.12	44.91	42.61	40.69	39.15	38.01	37.44

NITROGEN

Properties of Saturated Liquid and Saturated Vapor\*

Temp		Volume (cm <sup>3</sup> /g)		Enthalpy (J/g)		Entropy (J/g °K)		Temp		Volume (cm <sup>3</sup> /g)		Enthalpy (J/g)		Entropy (J/g °K)	
°K	atm	Sat Liquid	Sat Vapor	Sat Liquid	Sat Vapor	Sat Liquid	Sat Vapor	°K	atm	Sat Liquid	Sat Vapor	Sat Liquid	Sat Vapor	Sat Liquid	Sat Vapor
63.15 <sup>1</sup>	.123	1.152	1487	0.0	216.1	.000	3.421	100	7.676	1.450	31.34	77.7	239.3	.955	2.571
65	.172	1.162	1097	3.8	217.8	.059	3.352	105	10.69	1.520	22.26	89.7	239.1	1.067	2.490
70	.380	1.190	528.4	14.1	222.5	.212	3.189	110	14.48	1.608	15.98	102.4	237.3	1.180	2.407
75	.750	1.222	283.1	24.5	226.8	.355	3.052	115	19.14	1.726	11.47	116.2	233.5	1.295	2.315
80	1.349	1.258	164.7	34.8	230.6	.487	2.934	120	24.80	1.905	8.036	131.7	226.1	1.419	2.206
85	2.254	1.297	102.2	45.2	233.9	.611	2.831	125	31.63	2.289	5.074	154.6	209.5	1.595	2.034
90	3.551	1.341	66.55	55.7	236.6	.729	2.739	126.2 <sup>2</sup>	33.5	3.215	3.215				
95	5.327	1.392	45.03	66.4	238.4	.843	2.653								

<sup>1</sup> Triple point, <sup>2</sup> Critical point, \* From published data, National Bureau of Standards, Technical Note 129 (Jan. 1962)

Properties of Liquid and Vapor\*

Temp °K	P = 0.1 atm			P = 1 atm (Sat temp = 77.36 °K)			P = 4 atm (Sat temp = 91.41 °K)			P = 7 atm (Sat temp = 98.69 °K)			P = 10 atm (Sat temp = 103.95 °K)		
	v cm <sup>3</sup> /g	h J/g	s J/g°K	v cm <sup>3</sup> /g	h J/g	s J/g°K	v cm <sup>3</sup> /g	h J/g	s J/g°K	v cm <sup>3</sup> /g	h J/g	s J/g°K	v cm <sup>3</sup> /g	h J/g	s J/g°K
(Sat Liq)				1.239	29.4	.418	1.355	58.7	.761	1.434	74.7	-.926	1.504	87.1	1.043
(Sat Vapor)				217.2	228.7	2.994	59.39	237.2	2.714	34.39	239.2	2.592	23.89	239.2	2.507
70	2040	223.3	3.592	1.190	14.1	.212	1.189	14.4	.210	1.189	14.7	.208	1.188	14.9	.206
80	2315	233.7	3.731	225.5	231.5	3.030	1.257	35.0	.485	1.255	35.2	.483	1.254	35.4	.481
90	2629	244.1	3.854	256.5	242.3	3.157	1.341	55.7	.729	1.339	55.8	.726	1.337	56.0	.723
100	2983	254.5	3.963	297.0	253.0	3.270	67.02	247.5	2.822	35.16	241.0	2.610	1.447	77.7	.952
110	3217	264.9	4.063	317.3	263.6	3.371	75.48	259.0	2.932	40.72	254.0	2.734	20.61	248.2	2.591
120	3511	275.3	4.153	347.4	274.2	3.463	83.66	270.3	3.030	45.87	266.2	2.840	30.66	261.7	2.708
130	3804	285.7	4.236	377.3	284.8	3.548	91.65	281.4	3.119	50.77	277.9	2.934	34.37	274.2	2.809
140	4098	296.1	4.313	407.1	295.3	3.626	99.50	292.4	3.200	55.52	289.4	3.019	37.90	286.2	2.898
150	4391	306.5	4.385	436.8	305.8	3.698	107.3	303.2	3.275	60.16	300.6	3.097	41.30	297.9	2.978
160	4684	316.9	4.452	466.4	316.2	3.766	114.9	314.0	3.344	64.72	311.7	3.168	44.62	309.3	3.052
170	4977	327.3	4.515	496.0	326.7	3.829	122.6	324.7	3.409	69.21	322.6	3.235	47.87	320.6	3.120
180	5271	337.7	4.574	525.6	337.1	3.889	130.2	335.3	3.470	73.66	333.5	3.297	51.06	331.7	3.184
190	5564	348.1	4.631	555.1	347.6	3.945	137.7	346.0	3.528	78.07	344.3	3.355	54.22	342.7	3.243
200	5857	358.5	4.684	584.6	358.0	3.999	145.2	356.5	3.582	82.45	355.1	3.410	57.35	353.6	3.299
220	6443	379.2	4.783	643.5	378.9	4.098	160.2	377.7	3.683	91.14	376.4	3.512	63.53	375.2	3.402
240	7029	400.0	4.873	702.3	399.7	4.189	175.1	398.7	3.774	99.76	397.7	3.605	69.64	396.6	3.495
260	7615	420.8	4.956	761.1	420.5	4.272	189.9	419.7	3.858	108.3	418.8	3.689	75.70	417.9	3.581
280	8201	441.6	5.033	819.8	441.3	4.349	204.7	440.6	3.936	116.9	439.9	3.767	81.72	439.1	3.659
300	8787	462.3	5.105	878.5	462.1	4.421	219.5	461.5	4.008	125.4	460.9	3.840	87.72	460.3	3.732

Temp °K	P = 40 atm			P = 70 atm			P = 100 atm			P = 140 atm			P = 200 atm		
70	1.180	17.2	.189	1.173	19.6	.172	1.167	22.1	.156	1.158	25.4	.135	1.1-7	30.1	.107
80	1.243	37.5	.459	1.232	39.7	.439	1.223	41.9	.420	1.211	44.9	.397	1.195	49.6	.364
90	1.318	57.6	.696	1.302	59.4	.672	1.288	61.5	.649	1.271	64.1	.622	1.249	68.4	.586
100	1.414	78.4	.915	1.387	79.6	.884	1.365	81.1	.857	1.340	83.4	.825	1.309	87.2	.784
110	1.545	101.1	1.131	1.496	101.0	1.088	1.459	101.6	1.053	1.420	103.2	1.014	1.377	106.3	.966
120	1.768	126.4	1.352	1.648	122.9	1.279	1.579	121.9	1.231	1.518	122.3	1.181	1.454	124.5	1.124
130	3.102	185.6	1.820	1.898	149.6	1.493	1.745	145.0	1.416	1.638	143.3	1.351	1.544	144.0	1.282
140	6.472	243.3	2.253	2.430	184.4	1.751	1.991	170.9	1.608	1.792	165.7	1.516	1.649	164.3	1.432
150	8.071	265.3	2.406	3.418	222.5	2.014	2.367	198.7	1.799	1.992	188.3	1.672	1.771	184.2	1.569
160	9.355	282.7	2.518	4.408	251.2	2.200	2.875	226.3	1.978	2.244	211.3	1.820	1.914	204.0	1.697
170	10.49	298.0	2.611	5.253	273.1	2.332	3.430	251.2	2.129	2.543	233.9	1.957	2.078	223.7	1.816
180	11.54	312.1	2.692	5.996	291.5	2.438	3.969	272.7	2.252	2.871	255.4	2.081	2.260	243.2	1.928
190	12.53	325.5	2.764	6.672	307.9	2.527	4.476	291.8	2.355	3.207	275.5	2.189	2.456	262.3	2.031
200	13.47	338.3	2.830	7.301	323.1	2.604	4.951	309.0	2.443	3.540	294.1	2.285	2.661	280.7	2.125
220	15.27	362.9	2.947	8.465	351.0	2.738	5.829	340.0	2.591	4.179	327.8	2.445	3.078	315.3	2.291
240	16.99	386.6	3.050	9.546	376.9	2.850	6.637	368.1	2.713	4.778	358.0	2.577	3.491	347.2	2.429
260	18.65	409.5	3.142	10.57	401.6	2.949	7.397	394.4	2.819	5.344	386.1	2.687	3.891	376.7	2.548
280	20.28	432.1	3.225	11.56	425.5	3.038	8.124	419.5	2.912	5.885	412.6	2.788	4.276	404.8	2.652
300	21.87	454.3	3.302	12.52	448.7	3.118	8.825	443.7	2.995	6.405	438.0	2.875	4.650	431.5	2.744

\* From published data, National Bureau of Standards, Technical Note 129 (Jan 1962)  
 Bold horizontal line indicates phase change (liquid above, vapor below the line).

Conversions for Units, to Equivalent in British System of Units:

To convert temperature in degrees Kelvin (°K) to degrees Rankine (°R), multiply (°K) by 1.8

To convert pressure in atmospheres (atm) to (psia), multiply (atm) by 14.696

To convert volume (v) in cubic centimeters per gram (cm<sup>3</sup>/g) to (cu ft/lb), multiply (cm<sup>3</sup>/g) by .016018

To convert enthalpy (h) in joules per gram (J/g) to (Btu/lb), multiply (J/g) by .42993

To convert entropy (s) in joules per gram °K (J/g°K) to (Btu/lb°R), multiply (J/g°K) by .23885

## BIBLIOGRAFÍA

NORMA Oficial Mexicana NOM-020-STPS-2011, Recipientes sujetos a presión, recipientes criogénicos y generadores de vapor o calderas - Funcionamiento - Condiciones de Seguridad.

A. I. Tyshchenko, “Low-temperature martensitic transformation and deep cryogenic treatment of a tool steel”, *Materials Science and Engineering A*, 527, pp. 7027-7039, 2010.

Abulhassan Ali, Khuram Maqsood, Lam Pei Shin, Varsheta Sellappah, Synthesis and mixed integer programming based optimization of cryogenic packed bed pipeline network for purification of natural gas, *Journal of Cleaner Production* 171 (2018) 795-810.

Ali, A., Ganguly, S., Shariff, A.B.M., 2013. Simulation of Cryogenic Packed Bed Using 1-dimensional Pseudo Homogeneous Model. *International Oil and Gas Symposium and Exhibition (IOGSE 2013)*, Sabah, Malaysia.

Analisis exergetico de plantas criogénicas con HYSYS, Lozano S. Miguel, Claveria V. Luis, Departamento de Ingeniería Mecánica, Junio 2001, Tarragona.

Anandharamakrishnan C., Ishwarya P., Andrew G.F., (2015). Spray-freezedrying : A novel process for the drying of foods and bioproducts. *Trends in Food Science & Technology* 41 161-181.

Ahlberg K. (1986). *Aga gas Handbook* 2<sup>a</sup>ed. Lidings Sweden.

Bradley P.E., Huber M. L., Lewis R., Radebaugh R., Lee Y.C. (2010). Mixed refrigerants for a glass capillary micro cryogenic cooler. *Cryogenics*, 50 (8), 439–442.

- Gruda Z., Postolski J., (1985) Tecnología de congelación de alimentos. 3<sup>a</sup> ed. Acribia, Zaragoza
- Castellan W., (1987) Fisicoquímica. 2<sup>a</sup> ed. Pearson, Massachusetts, E.U.A.
- Chen Jianye, Xu Lu, Xiong Wei, Qiu Limin, Zhang Xiaobin (2014), Experimental results of flooding experiments in an inclined tube with liquid nitrogen and its vapor, *Cryogenics* 62,1–6.
- Dike O. Ukuku\*, David J. Geveke, Lee Chau, Andrew Bigley (2017), Appearance and overall acceptability of fresh-cut cantaloupe pieces from whole melon treated with wet steam process, *Food Science and Technology* 82 235-242.
- E. Pyataa , L. Belovaa, T. Boeckmannb, M. Kholopova, XFEL injector-1 cryogenic equipment *Physics Procedia* 67 ( 2015) 868 – 873
- Equation of state, viscosity, and thermal conductivity Span, R., E.W. Lemmon, R.T. Jacobsen, W. Wagner, and A. Yokozeki. 2000. A reference equation of state for the thermodynamic properties of nitrogen for temperatures from 63.151 to 1000 K and pressures to 2200 MPa. *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 29:1361-1433.
- Emily Grace , Alistair Butcher, Jocelyn Monroe, James A. Nikkel,(2017) Index of refraction, Rayleigh scattering length, and Sellmeier coefficients in solid and liquid argon and xenon, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A 867. 204–208.
- G.P. Wang, Y. Zhang, Z.Z Chen,(2015), Development progress of critical equipment in the CSNS cryogenic hydrogen system, *Physics Procedia* 67 ( 2015) 233 – 238
- Herrmann K., (1970). Alimentos congelados tecnología y comercialización. 1<sup>a</sup>ed. Acribia Zaragoza, España.

Huang F. (2004). Ingeniería termodinámica. 2ª Compañía editorial continental Mexico D.F.

Inada, T., Zhang, X., Yabe, A., & Kozawa, Y. (2001). Active control of phase change from supercooled water to ice by ultrasonic vibration 1. Control of freezing temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(23), 4523-4531.

Instituto Internacional del Frío., (1990). Alimentos congelados procesado y distribución. 1ªed. Acribia Zaragoza, España. Capítulo 2 y 3.

J.E. Fesmirea, W.L. Johnsonb (2018). Cylindrical cryogenic calorimeter testing of six types of multilayer insulation systems, *Cryogenics* 89 (2018) 58–75.

D. Das, “On the mechanism of wear resistance enhancement of tool steels by deep cryogenic treatment”, *Philosophical Magazine Letters*, 92:6, pp. 295-303, 2012.

D. N. Collins, “Deep Cryogenic Treatment of Tool Steels: a Review”, *Heat Treatment of Metals*, 2, pp 40-42, 1996.

Li Y., Wang Q., (2014). Experimental investigation of the characteristics of cryogenic oscillating heat pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 79, 713–719.

Madrid A., Gómez-Pastrana J.M., Santiago M., Madrid J.M., Cenzano J.M. (2010). Refrigeración, congelación y envasado de los alimentos. 1ªed. Mundi-Prensa, Madrid España.

Marsh Warren, Olivo Thomas, Principios de la Refrigeración (1993) 2ª ed. Diana México D.F.

Minsu Cha , Naif B. Alqahtani , Xiaolong Yin , (2017). Laboratory system for studying cryogenic thermal rock fracturing for well stimulation. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 156 (2017) 780–789.

- Minsuk Kang, Juwon Kim, Hwalong You, Daejun Chang,(2017), Experimental Investigation of Thermal Stratification in Cryogenic Tanks, *Experimental Thermal and Fluid Science*, S0894-1777(17)30400-4.
- Nikolay P. Malomuzh , Konstantin S. Shakun, Specific properties of argon-like liquids near their spinodals *Journal of Molecular Liquids* 235 (2017) 155–162.
- Pattanayak S.,(2004), Cryofreezing and cryofreezer, *Cryogenics* 44 (2004) 661–678
- Rodriguez V.,Martinez,(2007) Descripción y aplicaciones de equipos de congelación para la industria de alimentos, *Temas selectos de ingeniería de Alimentos* 1:97-107.
- Rui P. Queirós, Mauro D. Santos, Liliana G. Fidalgo, Hyperbaric storage of melon juice at and above room temperature and comparison with storage at atmospheric pressure and refrigeration, *Food Chemistry* 147 (2014) 209–214
- R. W. Thornton, “Investigating the effects of cryogenic processing on the wear performance and microstructure of engineering materials”, Thesis, University of Sheffield, 2014.
- Surface tension Lemmon, E.W. and S.G. Penoncello. 1994. The surface tension of air and air component mixtures. *Advances in Cryogenic Engineering* 39:1927-1934.
- Saeed Rahbarimanesh, Joshua Brinkerhoffa, Jim Huang, (2018). Development and validation of a homogeneous flow model for simulating cavitation in cryogenic fluids *Applied Mathematical Modelling* 56 , 584–611
- T. Cervi, M. Bonesini, A. Falcone, A. Menegolli, G.L. Raselli, M. Rossella, M. Torti, Performances of some SiPM models for cryogenic applications, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A (2017), <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.12.011>

Tay A.A.O. (2014). A study of intermittent liquid nitrogen sprays. *Applied Thermal Engineering*, 69, 199-207.

Thomas C. Green.(2005), Avances en crioterapia (2004) Criobiología . Arch. Esp. Urol. 58, 7 (589-596).

Viscosity and thermal conductivity Lemmon, E.W. and R.T. Jacobsen. 2004b. Viscosity and thermal conductivity equations for nitrogen, oxygen, argon, and air. *International Journal of Thermophysics* 25:21-69

V.P. Skripov, M.Z. Faizullin, Solid-liquid and liquid-vapor phase transitions: similarities and differences, in: W.P. Jurn, Schmelzer (Eds.), *Nucleation theory and Application*, Wiley-VCH, 2005.

Xiaobin Z., Jianye C., Lu X., Wei X., Limin Q., Xiaobin Z. (2014). Experimental results of flooding experiments in an inclined tube with liquid nitrogen and its vapor. *Cryogenics* 62 1–6.