



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE
DURANGO**

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DEL
VALLE DEL GUADIANA**

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN**



**Diseño de un congelador criogénico ajustable para semen
bovino.**

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestría en Ingeniería

Presenta:

Ing. César Omar Hernández Salazar

Director de tesis:

Dr. Francisco Javier Godínez García

Durango, Dgo. México, septiembre, 2022.





Diseño de un congelador criogénico ajustable para semen bovino.

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestría en Ingeniería

Presenta:

Ing. César Omar Hernández Salazar

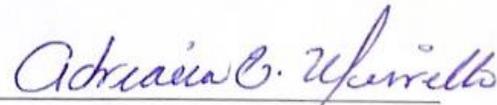
Dirigido Por

Dr. Francisco Javier Godínez García

Presidente Dr. Francisco Javier Godínez García	 Firma
Secretario M.C. José Antonio Martínez Rivera	 Firma
Vocal M.I. Eduardo Gamero Inda	 Firma



M.C. Norma Alicia García Vidaña
Coordinadora de la Maestría en Ingeniería



M.C. Adriana Eréndira Murillo
Jefa de la División de Estudios de Posgrado e
Investigación

COMITÉ TUTORIAL



Victoria de Durango, Dgo., a **01/ Diciembre /2022**.

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 587 / 22.

ASUNTO: Autorización de Impresión de Tesis de Maestría.

C. CÉSAR OMAR HERNÁNDEZ SALAZAR
No. DE CONTROL G14040384
PRESENTE.

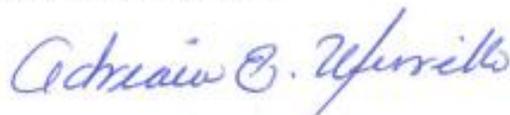
De acuerdo al reglamento en vigor y tomando en cuenta el dictamen emitido por el jurado que le fue asignado para la revisión de su trabajo de tesis para obtener el **Grado de Maestro en Ingeniería**, esta División de Estudios de Posgrado e Investigación le autoriza la impresión del mismo, cuyo título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

"Diseño de un congelador criogénico ajustable para semen bovino"

Sin otro particular de momento, quedo de Usted.

ATENTAMENTE.

Excelencia en Educación Tecnológica
"La Técnica al Servicio de la Patria"



C. ADRIANA ERÉNDIRA MURILLO
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



AEM/ammc.





Victoria de Durango, Dgo., a **01 / Diciembre / 2022**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
DEPI / C / 586 / 22.

ASUNTO: Autorización de Tema de Tesis de Maestría.

C. CÉSAR OMAR HERNÁNDEZ SALAZAR
No. DE CONTROL G14040384
PRESENTE.

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

"Diseño de un congelador criogénico ajustable para semen bovino"

CONTENIDO:

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

ATENTAMENTE.

Excelencia en Educación Tecnológica
"La Técnica al Servicio de la Patria"

C. ADRIANA ERÉNDIRA MURILLO
JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN



AEM/ammc



Agradecimientos

Quiero agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la oportunidad del apoyo económico otorgado para cursar los estudios de posgrado, al Instituto Tecnológico de Durango y su programa de maestría en ingeniería por brindar el apoyo para desarrollar la investigación relacionada con el proyecto. Al Dr. Francisco Javier Godínez García, principal asesor durante el desarrollo de este proyecto el cual puso a disposición su conocimiento y experiencia en el área de ingeniería. Así como al M.C. José Antonio Martínez, M.C. Eduardo Gamero Inda y al Dr. Rubén Guerrero Rivera por sus cátedras ofrecidas dentro del programa de posgrado y a todos los demás docentes que fueron parte para la realización de este proyecto.

También quiero agradecer a mi familia por la motivación y apoyo que me brindaron durante el transcurso del desarrollo de este proyecto. A mis hermanos por el aguante y apoyo, a Sofía por acompañarme en la realización de mi proyecto. A la Lic. Monserrat que me ayudo a no desistir en este transcurso. A los compañeros que estuvieron implicados durante el proceso de realización del proyecto que sin ellos también esto no hubiese sido posible. Y Faruz Feet y Proof por esa motivación lírica barra tras barra para sacar lo mejor y no desistir para llegar a la meta hoy y siempre en lo que me proponga.

Contenido

Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1-Introducción.....	1
1.2 Antecedentes.....	3
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo general.	5
1.3.2 Objetivos específicos.	5
1.4 Problemas a resolver.....	5
1.5 Justificación.....	5
Capítulo 2 Marco teórico.....	6
2.1 Crio congeladores (crio enfriadores).....	6
2.1.1 Sistemas de ciclos abiertos.	6
2.1.2 Sistemas de ciclos cerrados	6
2.2 Criogenia.....	7
2.2.1 Aplicaciones	7
2.3.1 Poliuretano	8
2.3.2 Poliisocianurato	9
2.3.3 Vidrio celular.	9
2.3.4 Cryogel®	9
2.4 Gases refrigerantes.....	10
2.4.1 Nitrógeno Líquido.	10
2.5 Metales y materiales para bajas temperaturas.....	11
2.5.1 Aplicaciones criogénicas.	11
Capítulo 3 Metodología.....	13
3.1 Prototipos.....	13
3.1.1 Cubo metálico.	13
3.1.2 Sistema motocompresor.	17
3.2 Tanque cilíndrico autoclave.....	18
3.2.1 Mecanismo pistón/ sinfín.	22
3.2.2 Tanque de almacenamiento de nitrógeno líquido.	24
3.3 Preparación para pruebas.....	28
3.3.1 Prueba con nitrógeno líquido sin sistema actuador	30

3.3.2 Prueba con nitrógeno líquido y sistema de calefacción.....	31
4.- Resultados.....	33
5.- Conclusiones y recomendaciones.....	43
Referencias.....	44
Referencias web.....	45

Índice de figuras

Figura 1.1.- Existencias de bovinos por función y actividad zootécnica	2
Figura 1.2 Clasificación de refrigeración criogénica	7
Figura 2.1 Precio de Helio y Nitrógeno (R. Radebaugh., 2009).	10
Figura 3.1 Interfaz LabVIEW panel frontal de control de giro y velocidad de motor D.C. fuente: propia	13
Figura 3.3 Cámara interna de congelador prototipo con desplazamiento. Fuente: Propia	15
Figura 3.4 Cámara interna de congelador prototipo con desplazamiento. Fuente: Propia	15
Figura 3.5 Controlador LN298 conectado a motor D.C. Fuente: Propia	16
Figura 3.6 conexión de tarjeta de datos y controlador LN298 para control de motor D.C. Fuente: Propia	17
Figura 3.7 Motocompresor modificado de refrigerador LG modelo MA53LCCM. Fuente: Propia	18
Figura 3.8 Autoclave sin modificación alguna. Fuente: Propia.....	19
Figura 3.9 Aislante anterior de autoclave. Fuente: Propia	20
Figura 3.10 Autoclave con poliuretano (aislante térmico). Fuente: Propia.....	20
Figura 3.11 Base inferior del tanque. Fuente: Propia	21
Figura 3.12 Base inferior de tanque retirada. Fuente: Propia.....	21
Figura 3.13 Diseño de tanque en SolidWorks®. Fuente: Propia.....	22
Figura 3.14 Mecanismo pistón/sinfín en SolidWorks®. Fuente: Propia.....	23
Figura 3.15 Pistón/sinfín manufacturado. Fuente: Propia	23
Figura 3.17 Vista frontal e inferior de cono de aluminio realizado mediante SolidWorks®. Fuente: Propia	25
Figura 3.18 Tanque de almacenamiento cortado. Fuente: Propia.....	25
Figura 3.19 Tanque interno cortado para soldar cono de aluminio. Fuente: Propia	26
Figura 3.20 Cono de aluminio soldado a la parte inferior de contenedor de LN2. Fuente: Propia.....	26
Figura 3.21 Equipo actuador insertado dentro del cono de aluminio interno del tanque. Fuente: Propia	27
Figura 3.22 Diagrama de conexión de tanques. Fuente: Propia	28
Figura 3.23 Sistema de control del tanque de almacenamiento. Fuente: Propia	29
Figura 3.24 Tanque de almacenamiento recubierto de poliuretano. Fuente: Propia	30

Figura 3.25 Presión generada dentro del tanque sin elemento calefactor. Fuente: Propia	31
Figura 3.26 Presión generada dentro del tanque. Fuente: Propia.....	32
Figura 3.1 Respuestas al cambio del flujo másico de Nitrógeno. Fuente: Propia	34
Figura 4.2 Temperatura del contenedor al segundo 60 mediante simulación en SolidWorks®. Fuente: Propia.....	35
Figura 4.3 Temperatura del contenedor al segundo 120 mediante simulación en SolidWorks®. Fuente: Propia.....	36
Figura 4.4 Temperatura del contenedor al segundo 180 mediante simulación en SolidWorks®. Fuente: Propia.....	37
Figura 4.5 Temperatura del contenedor al segundo 240 mediante simulación en SolidWorks®. Fuente: Propia.....	38
Figura 4.6 Temperatura del contenedor al segundo 300 mediante simulación en SolidWorks®. Fuente: Propia.....	39
Figura 4.7 Temperatura del contenedor al segundo 316 mediante simulación en SolidWorks®. Fuente: Propia.....	40
Figura 4.8 Temperatura del contenedor al segundo 376 mediante simulación en SolidWorks®. Fuente: Propia.....	41
Figura 4.9 Temperatura del contenedor al segundo 435 mediante simulación en SolidWorks®. Fuente: Propia.....	42

Capítulo 1 Introducción.

1.1-Introducción.

En México, la ganadería es una actividad del sector primario que consiste en la cría, tratamiento y reproducción de animales domésticos con fines de reproducción para el consumo humano y es una práctica importante dentro de la economía mexicana. Donde se desarrollan principalmente las ganaderías bovina, porcina, ovina, caprina y aviar (SIAP, 2018). Por lo que el equipo que es utilizado en esta aplicación ganadera a estado siendo más desarrollada y exigente conforme la tecnología avanza siendo así mucho más la producción que esta práctica ganadera exige. Siendo así la existencia de competencia especializada en este tipo de rama ganadera.

Cuando se habla de ganadería bovina se refiere a la crianza y domesticación del toro y la vaca, donde deriva la producción de alimentos para consumo humano y otros artículos. En México se explotan alrededor de treinta razas bovinas que son destinadas para uso cárnico, entre las más importantes se encuentran: Angus, Hereford, Charolais, Nelore, Pardo suizo europeo. Y dentro de la producción lechera bovina las razas que destacan para esta actividad son Holstein Fresian y Pardo suiza americana. La carne es el principal producto que se extrae del ganado bovino y México produce casi 2 millones de toneladas al año de las cuales el 85% se exporta a los Estados Unidos (SADR, 2015). A través del servicio de información agroalimentaria y pesquera (SIAP), se informó que la producción de carne de bovino en el 2019 alcanzó un máximo histórico de dos millones de toneladas, lo que representa 2.4% mayor con respecto al año 2018. Además, se destacó que las exportaciones mexicanas de carne de res de 2019 sumaron 252 mil toneladas, 14.3% mayores a lo comercializado en el 2018. También se puntualizó que el principal destino de las exportaciones de cárnicos de bovino fue a Estados Unidos, con una participación del 86%, seguido de Japón y Hong Kong con el 6 %y 5%, respectivamente (SADR, 2020). Los principales estados productores de carne de res son Veracruz con 249 mil toneladas y Jalisco con 209 mil toneladas al año, le siguen estados como Chiapas, Sinaloa y Baja California. Mientras que, en producción de leche, México genera 11 millones de litros anuales. Los estados con mayor producción son Jalisco, Coahuila y Durango. (SADR, 2015).

Con referencia a las cantidades de bovinos que se manejan en la siguiente figura brindada mediante la encuesta realizada por INEGI en el 2019. Donde indica la existencia de bovinos por función y actividad dentro del sector ganadero bovino la cual indica un margen en el cual dispone de información relacionada con las características de las unidades de producción en las que se realizó la actividad ganadera.

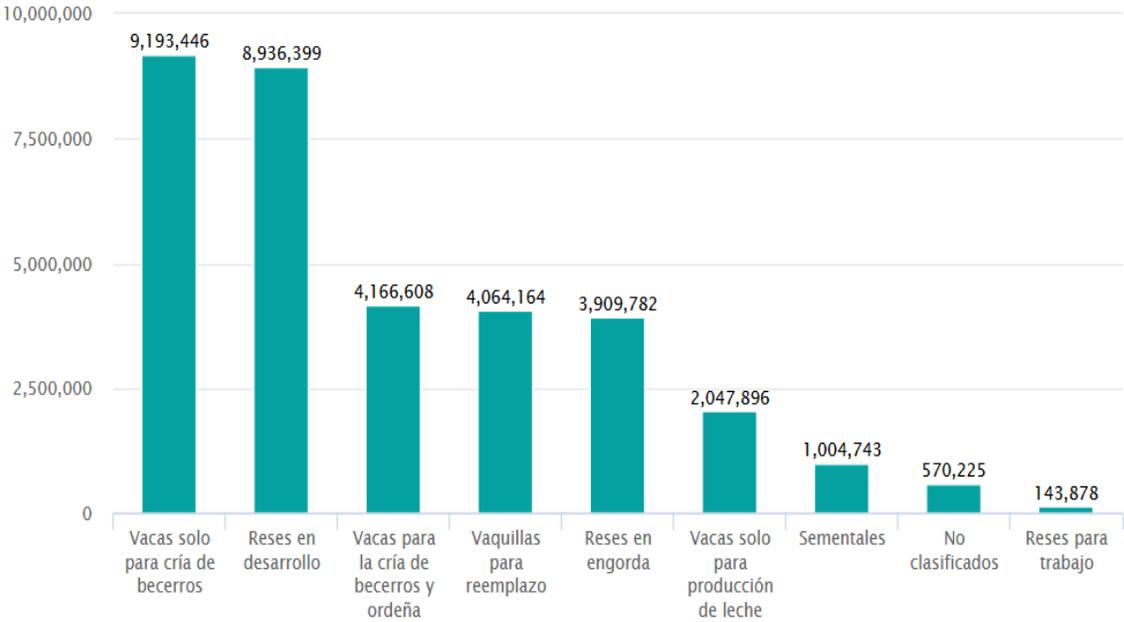


Figura 1.1.- Existencias de bovinos por función y actividad zootécnica

Fuente: INEGI Encuesta nacional agropecuaria 2019.

Para lo cual se busca desarrollar el diseño de un congelador criogénico que se pueda adaptar conforme a la producción y adquisición del esperma bovino del sector o empresa donde este se esté aplicando y mejorar la producción y conservación de semen bovino, cabe destacar que es necesario implementar técnicas que den valor agregado a los sistemas utilizados en la actualidad para la crío conservación. Estas técnicas de desarrollo tecnológico deberán favorecer los índices de sobrevivencia del semen encapsulado en pajillas acorde a la producción diaria obtenida de la extracción del ganado. Para hacerlo posible es necesario contar con un sistema de congelación que se ajuste de forma mecatrónica a las necesidades del productor, siguiendo para ello la trayectoria descendiente de temperatura sugerida por otros autores.

1.2 Antecedentes.

En el mundo donde actualmente se encuentra el hombre es notable un constante cambio tecnológico debido a la gran mayoría de procesos y manufactura renovadas mediante la automatización de los procesos. En este proyecto de investigación se propone una innovación a un equipo empleado para fines de congelamiento de semen de ganado bovino producción ganadera. La investigación en el área de sistemas de refrigeración ha dado mejorías en los últimos 20 años tales como resolución de problemas de rentabilidad, eficiencia, tamaño, transferencia de calor y costo. Los enfriadores criogénicos o crio congeladores son sistemas diseñados para alcanzar temperaturas criogénicas, dentro de los cuales se puede encontrar disponibles el mercado los tipos Stirling, de tubo de pulso (PTC por sus siglas en inglés) y G-M (Gifford-McMahon) (Milind D. Atrey, 2020). Estos se encuentran dentro de la clasificación de refrigeración regenerativa, el cual es un método de enfriamiento de gases donde el gas comprimido se enfría permitiendo que se expanda y tome calor del entorno. A manera que el gas expandido enfriado pase a través de un intercambiador de calor donde enfría el gas comprimido entrante.

Este tipo de herramientas tecnológicas reducen y mejoran la labor humana y más cuando se emplea para manejo de muchas cantidades respecto a lo que se esté trabajando, en este caso el semen bovino. Estos procesos tienden a llevar condiciones como lo son la supervisión o monitoreo y control de temperatura como es en el caso de los congeladores criogénicos.

La criogenia es la ciencia y la tecnología que se ocupan de temperaturas inferiores a aproximadamente 120 °K (Walker, 1983). De modo que la crio preservación de semen es una importante biotecnología reproductiva que busca promover la conservación del semen en este caso, semen bovino. En la práctica, la criogenia es la ciencia dedicada a la producción de gases con temperaturas entre -100°C y -273°C (Pérez González, 2013). Las técnicas utilizadas para producir temperaturas criogénicas difieren en varias formas de los que se llegan a ocupar de la refrigeración convencional. Tanto como difiere a la refrigeración convencional la reducción significativa de temperatura conlleva a resultados pronunciados desde efectos sobre las propiedades de los materiales y el comportamiento de los sistemas. Se han desarrollado muchas aplicaciones criogénicas a medida que las técnicas de refrigeración antes de 1950 han mejorado, aunque muchas aplicaciones todavía enfrentan una dura competencia de los fenómenos de temperatura ambiente debido a la refrigeración asociada problemas (Radebaugh, R., 2009) La temperatura afecta a las propiedades de los materiales más que alguna otra variable como podría ser presión, campo eléctrico, campo magnético, etc. Para el diseño de un refrigerador que abunde a estas temperaturas altamente frías son variables importantes para considerar y más dependiendo del uso o aplicación del refrigerador ya que a estas temperaturas es posible su uso para algún proceso como son:

- Licuefacción y separación de gases.

- Refrigeración de dispositivos superconductores.
- Crio-bombas para vacío limpio.
- Ablación de tejidos (criocirugía).
- Conservación de material biológico y alimentos.
- Refrigeración de dispositivos electrónicos con bajo ruido térmico

La mayoría de los enfriadores criogénicos funcionan en un ciclo cerrado y utilizan Helio (He) como líquido. Sin embargo, algunos crio-enfriadores utilizan Hidrógeno (H₂), Neón (Ne) o mezclas de gases. Pero, por otro lado, algunos crio enfriadores donde el tiempo de enfriamiento es muy importante como el crio-enfriador Joule-Thompson, son sistemas de ciclo abierto y pueden requerir alta presión para aplicaciones particulares. (Milind D. Atrey, 2012). El avance en la tecnología de enfriadores criogénicos en las últimas dos décadas ha llevado a un aumento del uso de refrigeradores criogénicos para aplicaciones espaciales, industriales y médicas. (Radebaugh, R., 2007)

Si bien debido a las diversas pérdidas involucradas en el sistema especialmente a temperaturas criogénicas, cada crio enfriador debe tener un diseño optimizado para entregar el efecto de enfriamiento requerido de modo que trata de optimizar diferentes aspectos de rendimiento del refrigerador criogénico. (De Waele, A., 2011) A manera de que la ciencia de la criogenia tiene diferentes aplicaciones, en este caso del congelador aplicado a la ganadería a forma de preservación de células vivas de ganado bovino se tiene que considerar que el diseño del congelador tiene que ser eficaz para lograr las temperaturas adecuadas para preservar el esperma bovino y su rendimiento sea óptimo. Las superficies frías deben enfriarse a temperatura, a fin de mantener la presión de saturación correspondiente igual o inferior la presión de vacío deseada en la cámara.

Dentro de la ciencia y tecnología que implica la criogenización, mediante el transcurso de evolución de esta misma se llegaron a desarrollar diferentes crio congeladores con diferentes diseños, así como su clasificación ya sea a ciclo cerrado o a ciclo abierto y dependiendo de su aplicación. De modo que para este proyecto se empleará el diseño de un congelador a partir de la innovación de uno mismo se tendrá que optar por las opciones más viables y convenientes bajo las normas para la aplicación criogénica para el congelamiento de semen bovino. Este congelador consiste en reducir el volumen interno de la cámara criogénica a través de un mecanismo de pistón / sinfín acoplado a un motorreductor logrando así minimizar el consumo de nitrógeno líquido del tanque criogénico controlando las variables del sistema para el proceso de cambio de estado del nitrógeno líquido a gaseoso. Además de imitar una curva de enfriamiento óptima para la congelación de esperma tomando el comportamiento de la curva de enfriamiento que marcan los parámetros para un proceso adecuado de conservación de semen animal. Cabe destacar que dentro de las invenciones anteriores con referencia a equipos de congelamiento criogénico no hay alguno de momento del cual se pueda reducir su capacidad para un número específico de pajillas de semen lo cual es una gran

ventaja tanto para los grandes y pequeños productores dentro del mercado ganadero bovino.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general.

Diseñar un contenedor de dimensiones ajustables y sellado hermético mediante manipulación mecatrónica para la optimización del congelamiento con nitrógeno de pajillas con semen de ganado bovino en el rango de temperaturas de 20 a -140°C.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Realizar una investigación con relación a los tipos de congelador ya existentes y adaptar la información recolectada al congelador que se busca realizar
- Obtención de información con respecto a los materiales que se pueden emplear para las bajas temperaturas dentro del área criogénico
- Desarrollar un sistema de dimensiones ajustables mediante control mecatrónico para contener pajillas de semen bovino
- Mejorar la producción y conservación de semen bovino mediante el congelador de dimensiones ajustable

1.4 Problemas a resolver.

Reducir el consumo de energía y gas líquido nitrógeno debido a que la producción de pajillas de semen bovino que produce la asociación ganadera no abarca al equipo con el cual cuentan debido a sus condiciones de alto rendimiento ya que es un equipo para altas producciones y por ende ajustar el nuevo equipo para que vaya con los ajustes de producción de semen bovino.

1.5 Justificación.

Con la finalidad de mejorar, innovar y diseñar un congelador criogénico ajustable con tal de reducción de gastos y consumos se busca mejorar la calidad y cantidad de pajillas de semen bovino proporcionadas por la asociación ganadera y así beneficiar la misma producción de manera que se asegure que tanto la seguridad de las pajillas y la calidad de estas.

Capítulo 2 Marco teórico.

2.1 Crio congeladores (crio enfriadores)

Los crio congeladores o crio enfriadores son dispositivos utilizados para alcanzar temperaturas criogénicas, las cuales son aproximadamente por debajo de 123 K (-153°C) (Walker, G., 1983). Temperaturas tan bajas tienen ciertas aplicaciones las cuales son:

- Licuefacción y separación de gases.
- Refrigeración de dispositivos superconductores.
- Crio-bombas para vacío limpio.
- Ablación de tejidos (criocirugía).
- Conservación de material biológico y alimentos.
- Refrigeración de dispositivos electrónicos con bajo ruido térmico

La refrigeración criogénica puede ser alcanzada utilizando este tipo de dispositivos de enfriamiento para mantener las bajas temperaturas. Existe diferentes técnicas de enfriamiento criogénico y de las cuales también hay diferentes tipos de crio enfriadores los cuales pueden ser clasificados tanto como ciclo abierto o ciclo cerrado (Atrey M. D., 2012).

2.1.1 Sistemas de ciclos abiertos

Los sistemas criogénicos de ciclo abierto son aquellos donde la refrigeración se obtiene mediante el uso de un enfriador Joule-Thomson (J-T), el cual utiliza gas almacenado a alta presión y mantenido a temperatura ambiente. El gas almacenado se libera a la atmósfera después de la expansión. Sin embargo, la mayoría de aplicaciones utilizan criógenos almacenados como Nitrógeno líquido (LN₂) y Helio líquido (LHe) para poder mantener la baja temperatura que se requiere para la criogenia. Estos criógenos almacenados se deben reponer en ciertos intervalos regulares, estos pueden estar en estado líquido, sólido o supercrítico dependiendo de la aplicación. Para almacenar los criógenos, se pueden utilizar plantas de refrigeración a gran escala para la licuefacción cuando se pueden utilizar diferentes sistemas ciclos de refrigeración por licuefacción. (Atrey M.D., 2020).

2.1.2 Sistemas de ciclos cerrados

En sistemas de ciclos cerrados, ya sean estos dinámicos los cuales son aquellos donde tienen en existencia un componente móvil o los dispositivos estáticos donde sus componentes inmóviles se utilizan para alcanzar temperaturas criogénicas. Los dispositivos dinámicos pueden incluir la disposición del pistón del compresor con o sin un expansor móvil. Dichos enfriadores criogénicos se

pueden clasificar adicionalmente según el tipo de intercambiador de calor usado en el sistema, ya sea si del tipo regenerativo o de tipo recuperativo como se muestra en la figura 1.2 (Atrey M.D., 2020).

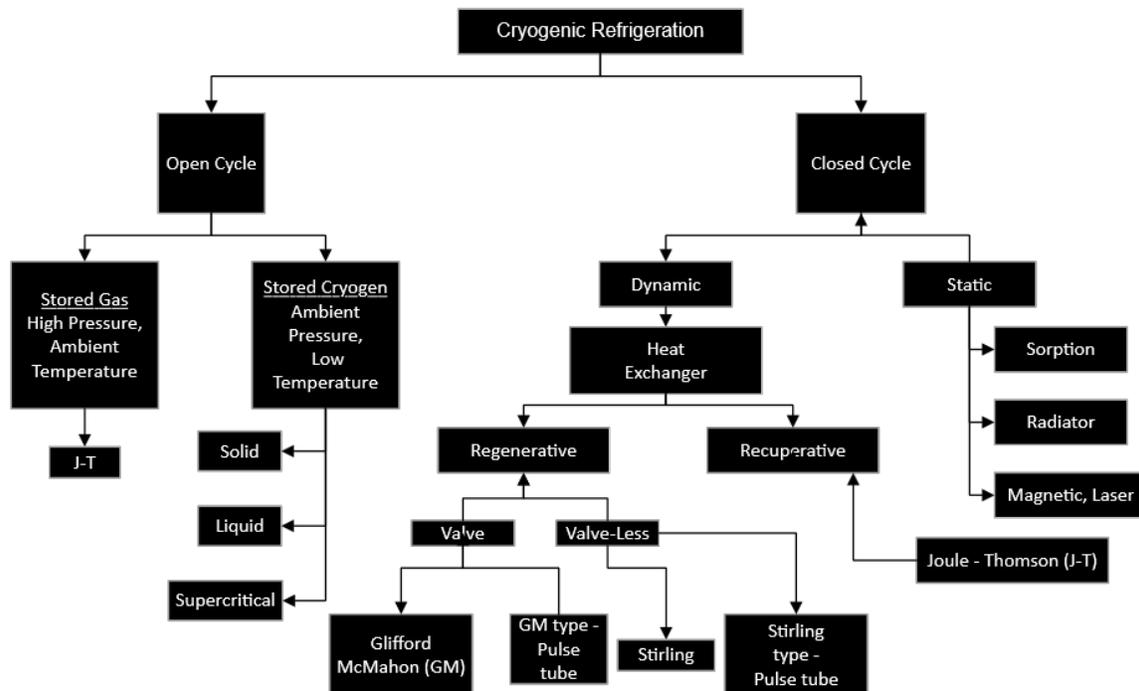


Figura 1.2 Clasificación de refrigeración criogénica

Fuente: **Atrey M.D.** (2012) Cryogenic Engineering NPTEL. Online Lectures

2.2 Criogenia

La criogenia es la ciencia y la tecnología que se ocupan de temperaturas inferiores a aproximadamente 120 K o 123 K (Atrey M.D., 2012). Las técnicas utilizadas para producir este tipo de temperaturas difieren totalmente a los métodos convencionales de refrigeración. Una de las más importantes diferencias es la necesidad de pre enfriar el gas comprimido antes de ser expandido para poder alcanzar las temperaturas criogénicas desde 0°C o temperaturas un poco más elevadas (Radebaugh, R., 2009).

2.2.1 Aplicaciones

Se pueden encontrar varias aplicaciones en donde se puede aplicar la criogenia las cuales son:

- Conservación de alimentos y material biológico: algunas empresas utilizan esta técnica para conservar lo mejor posible ya sea el alimento y

al momento de descongelarse mantenga sus propiedades tal cual al pre-congelamiento. En material biológico sería de igual forma para conservar ya sea tejido y/o células y se mantengan en un estado de “reposo” para cuando se descongelen de manera adecuada pueda seguir siendo útil el material biológico.

- Industria metal mecánica: En procesos de fabricación inyectan nitrógeno líquido en ciertos equipos para evitar choques térmicos e intercambian la energía para después procesar el nitrógeno en vapor.
- Transformación de materiales en polvo fino
- Crioterapia
- Tratamiento de enfermedades dermatológicas como arrugas
- Tratamientos químicos en materiales como templados, endurecimientos entre otros
- Procesos de manufactura criogénicos: Los procesos de fabricación asistidos criogénicamente están emergiendo como operaciones inocuas para el medio ambiente, libres de tóxicos y sin peligros, que producen productos funcionalmente superiores. (Jawahir y col. 2016).

2.3 Aislantes térmicos en la criogenia

Los aislantes térmicos son los materiales que tienen la capacidad de oponerse al paso del calor por conducción, convección y radiación y se evalúan por su capacidad de aislar térmicamente. (Garza Alejandre, 2016). Son sustancias que dificultan el paso de calor a su través y que tienen, por tanto, una baja conductividad térmica. Por lo general se suelen utilizar sólidos que, junto a la baja conductividad térmica, tengan buenas propiedades mecánicas (Costa López et al 1991).

2.3.1 Poliuretano

El poliuretano es considerado como un aislante térmico para bajas temperaturas, pero a diferencia de otros materiales su costo es menor. Dentro de sus diversas aplicaciones se utiliza en cámaras frigoríficas en forma de paneles, también es utilizado en tanques, tuberías, paredes y techos. El poliuretano se considera para los sectores constructivos, industriales e inclusive residenciales, y es una buena alternativa para proteger térmicamente algunos procesos de baja temperatura así lo requieran.

El poliuretano es el material aislante térmico más eficiente y duradero. Su baja conductividad térmica conferida por su estructura celular cerrada y su innovadora tecnología de fabricación lo han puesto a la cabeza de los productos

que colaboran en el ahorro de energía a través del aislamiento térmico. Es el material por excelencia en múltiples aplicaciones industriales y, sin duda, el producto más utilizado en el aislamiento de los edificios industriales y residenciales, frigoríficos, buses y furgones por su eficiencia energética, así el aislamiento de poliuretano en la envolvente de todos los edificios, las particiones entre viviendas, carrocerías metálicas y frigoríficos ofrece unas propiedades aislantes que perduran en el tiempo, no requieren mantenimiento y, además, son rentables económicamente. (Quezada, 2014)

2.3.2 Poliisocianurato

Es una espuma rígida variante de la espuma de poliuretano. Sus ventajas radican en sus propiedades mecánicas, térmicas y su resistencia al fuego. Es hidrofóbico y tiene una densidad de 40 a 45 kg/m³. El Poliisocianurato ofrece ligereza, fuerza estructural, adhesión inherente a superficies de metal, además de garantizar una óptima aislación térmica con propiedades mejoradas de resistencia y de reacción al fuego en diversos niveles de desempeño, de acuerdo con necesidades específicas. Estas características lo hacen indicado para aplicaciones en construcciones comerciales, industriales (tanques y tuberías), residenciales, cámaras frigoríficas, etc. Por otra parte, es importante resaltar que no propaga la flama ya que es ignífugo y tampoco representa un sustrato nutritivo para microorganismos así que no genera moho. (Prefiterm, s.f)

2.3.3 Vidrio celular

Es un material muy ligero debido a que las burbujas o celdas que encierra el material no están comunicadas entre sí. Es impermeable, aséptico, ligero y ofrece una gran resistencia al fuego y a la compresión. El vidrio celular o foamglas tiene la particularidad de ser un aislamiento térmico que soporta altas y bajas temperaturas a la vez, por lo que lo hace una excelente opción cuando se tienen procesos que pueden variar su temperatura de forma drástica. Se recomienda su instalación en procesos criogénicos en tanques y tuberías hasta en procesos de alta temperatura en los mismos equipos logrando un excelente ahorro energético. (Prefiterm, s. f)

2.3.4 Cryogel®

El Cryogel® es una manta flexible de aerogel con una barrera integral de vapor, resistente al abuso mecánico. Está diseñado para proporcionar máxima protección térmica con un mínimo de espesor ya que es cinco veces más delgado que un aislamiento convencional. Es ideal para aplicaciones criogénicas en tuberías y equipos. Por otra parte, su flexibilidad, resistencia a la compresión, hidrofobicidad, si fácil instalación y la conductividad extremadamente baja de Cryogel lo hacen líder en el mercado en materiales de aislación térmica. (Prefiterm, s. f)

2.4 Gases refrigerantes

Son diferentes y variados la cantidad de gases refrigerantes dentro de la aplicación de la criogenia. Desde propano líquido hasta helio líquido y depende de la aplicación para la cual se fuese a efectuar este tipo de gas. Para este proyecto el que se mencionará será el nitrógeno líquido el cual será explicado a continuación:

2.4.1 Nitrógeno Líquido

Es el componente más alto concentrado en el aire y representa un 78% en volumen, en condiciones normales de presión y temperatura. En estado líquido y a la presión atmosférica, temperatura criogénica de -196°C es un líquido incoloro y más ligero que es el agua, con densidad relativa de 0.81. El nitrógeno no es corrosivo y puede utilizarse a temperaturas ambientales con materiales normales y corrientes, por ejemplo, aceros al carbono. Para bajas temperaturas en estado criogénico y en líquido, deben utilizarse materiales de acero apropiados, resilientes y austeníticos (Rogelio G.P., 2013). La figura 2.1 muestra como los costos de Nitrógeno y Helio se fueron elevando (R. Radebaugh, 2009). En la figura 2.1 se muestra como son los costos tanto del Nitrógeno en su fase líquida y gaseosa, así como el del Helio (Lvovsky et al., 2013)

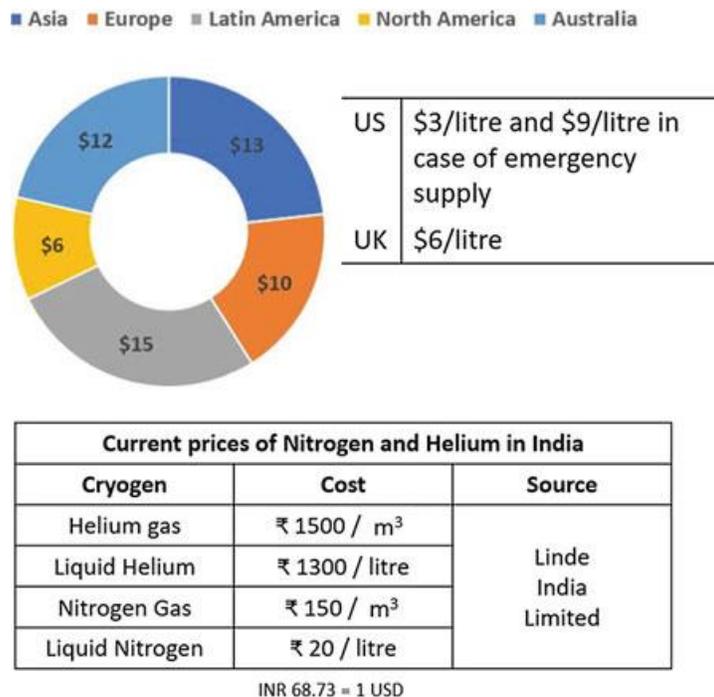


Figura 2.1 Precio de Helio y Nitrógeno (R. Radebaugh., 2009).

2.5 Metales y materiales para bajas temperaturas

Como anteriormente se había mencionado, la criogenia abarca algunas aplicaciones como lo es el tratamiento químico de materiales, la crioterapia, la conservación de alimentos y materiales biológicos, transformación de materiales en polvo fino(caucho), entre otras más. Esto quiere decir que se tiene que utilizar el material adecuado para la zona o área de temperatura en la cual se desea trabajar y tanto el tipo de trabajo que se quiera realizar. Para ello la selección del material debe de ser el adecuado y sujeto a ciertas condiciones que optimicen la tarea a elaborar, estos materiales son mostrados en la figura 2.2 (A, Hurlich. 1963).

2.5.1 Aplicaciones criogénicas

Estos son algunos de los gases que se encuentran dentro de la aplicación de la criogenia:

- -42°C: Propano líquido (industria, energía)
- -78°C: Dióxido de carbono sólido (agricultura, industria)
- -162°C: Metano líquido (energía)
- -183°C: Oxígeno líquido (industria, medicina)
- -196°C: Nitrógeno líquido (industria)
- -253°C: Hidrógeno líquido (industria, energía)
- -270°C: Helio líquido (industria)

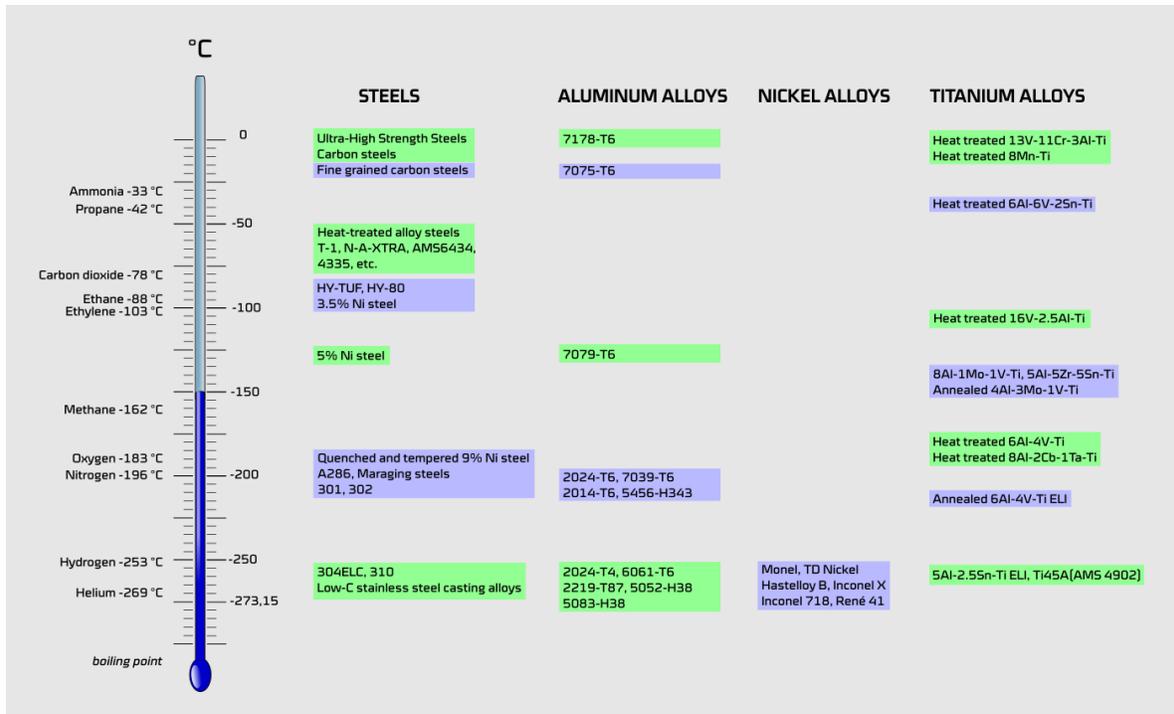


Figura 2.2 Metales para bajas temperaturas.

Fuente: A. Hurlich, *Low Temperature Metals*

2.6 Moto - reductor

Los motores reductores son mecanismos que regulan la velocidad de motores eléctricos, haciéndoles funcionar con alto torque. Están formados por una serie de engranajes que conforman la cadena cinemática, ejerciendo una fuerza rotacional sobre las piezas giratorias. Su principal función es permitir la regulación de la velocidad del rotor desde una velocidad elevada a otra menor, sin que el mecanismo se resienta. Además de la regulación de velocidad, el elemento reductor del motor está conformado por un sistema que permite el ajuste de la potencia mecánica del mismo. Estos motores se pueden encontrar de diferentes maneras y diferentes condiciones ajustándolas para la aplicación que se desea utilizar. Los tipos de motores son los siguientes:

- Reductor coaxial de engranaje helicoidal
- Reductor de ejes paralelos
- Reductor ortogonal con engranaje cónico

Capítulo 3 Metodología

3.1 Prototipos

3.1.1 Cubo metálico

El primer de los prototipos realizados fue un cubo metálico simétrico de dimensiones 20 cm de ancho x 20 cm de largo x 20 cm de altura tratando de simular la parte interna de la cámara criogénica del Digitcool® donde van introducidos los racks o rampas de congelamiento. Estos racks que son del equipo Digitcool® tienen una dimensión de 58 cm de largo, con un ancho aproximado entre 14.3 a 14.5 cm con una elevación de 5 cm donde estas se pueden apilar. En las rampas de congelamiento o racks son colocadas las pajillas de semen bovino para su proceso de congelación con nitrógeno líquido (LN2). La hoja de acero galvanizado permite ajustar el desplazamiento para reducción de volumen de la cámara, con un valor máximo de 8000 m³. Para desplazar la hoja delgada metálica fue acoplada a un tornillo sin fin de 18 cm y de ¼ de pulgada de ancho con una conexión mediante un rodamiento para el desplazamiento lineal hacia arriba o abajo mediante un programa desarrollado en la interfaz LabVIEW a una placa de datos Arduino Uno, con la finalidad de controlar la dirección y velocidad de un motor DC con un controlador de dispositivo o driver LN298. La interfaz muestra una gráfica de la velocidad del motor D.C con botoneras para la dirección del giro e indicador led, mostrado en la figura 3.1.

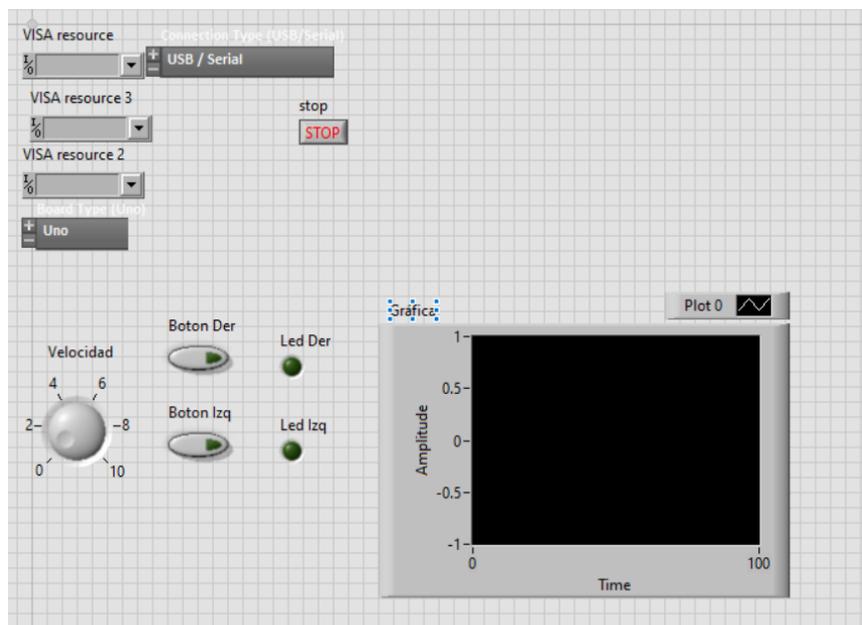


Figura 3.1 Interfaz LabVIEW panel frontal de control de giro y velocidad de motor D.C.
fuente: propia

La figura 3.2, muestra el diagrama de bloques del programa para el control de velocidad y giro del motor D.C. En los primeros bloques después de la entrada del Arduino son seleccionados los pines 2 y 3 para el control del giro del motor D.C ya que van conectados al módulo L298N y los pines 4 y 5 van hacia unos leds que serían los indicadores del giro del motor ya sea izquierda o derecha. El pin 10 es utilizado como el PWM para el control de velocidad el motor. Cabe mencionar que los primeros bloques fuera del ciclo While están establecidos como Output, es decir como salidas para el cumplimiento de la función previamente asignadas para indicadores led y control de giro del motor D.C. Dentro del ciclo While lo primero fue definir la señal PWM del pin 10 con la función de tiempo Waveform Chart como gráfica visual dentro del panel frontal del programa y el potenciómetro dentro de la misma para aumentar o disminuir la velocidad del motor cuando el programa esté en ejecución para un timing de 10 ms (milisegundos) para el conteo de la señal del pin PWM. Los otros dos recuadros dentro del caso While son las condicionantes de los casos false y true con un if fuera para los giros del motor. Donde en el caso que uno de los dos botones fuera presionado les asignaría un valor de 0 o 1 para la activación de la condicionante y así mandar la información para el giro.

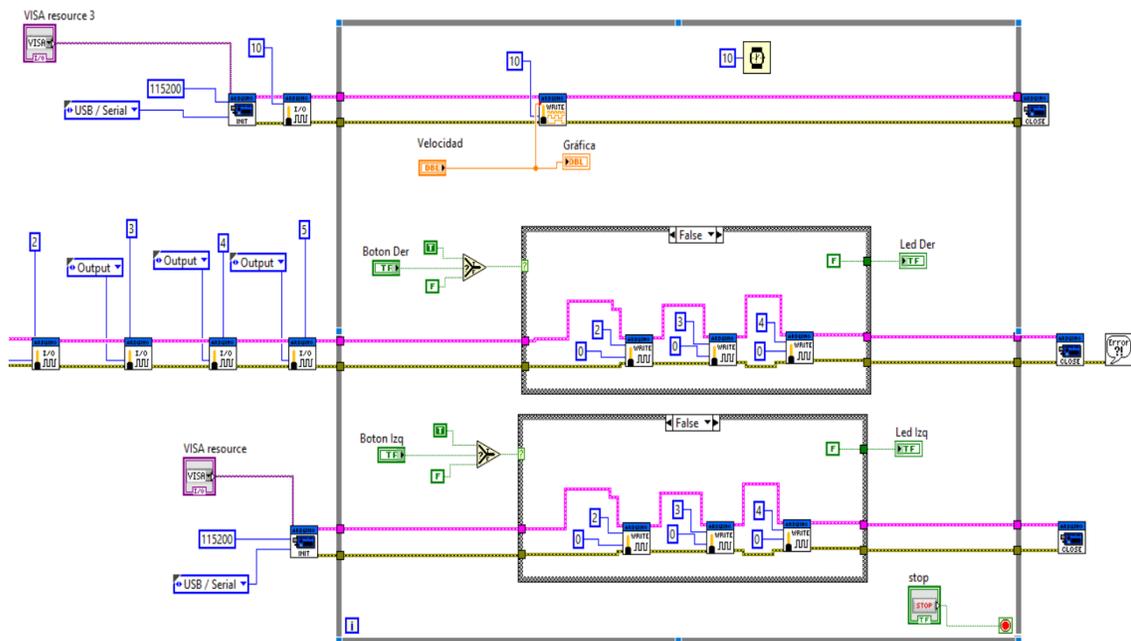


Figura 3.2 Diagrama de bloques LabVIEW, control de velocidad y giro para motor D.C.
Fuente: propia

Para el ensamble del prototipo se cortaron 5 láminas de acero galvanizado de un grosor de $\frac{1}{4}$ de pulgada con soldadura por puntos. A las hojas de la figura 3.3 y 3.4

se le hizo un corte tipo ventana para observar el movimiento de la placa insertada por dentro.



*Figura 3.3 Cámara interna de congelador prototipo con desplazamiento.
Fuente: Propia*



*Figura 3.4 Cámara interna de congelador prototipo con desplazamiento.
Fuente: Propia*

En la parte trasera del prototipo es donde se muestran las conexiones al motor D.C que está sujeto al tornillo largo usado como un sinfín. Este tiene una pequeña estructura metálica añadida a la parte superior de la hoja de cascara de huevo para lograr el desplazamiento. Lo demás son las conexiones de los pines del controlador L298N al motor y su alimentación a una batería de 9V tal y como se muestra en la figura 3.5.

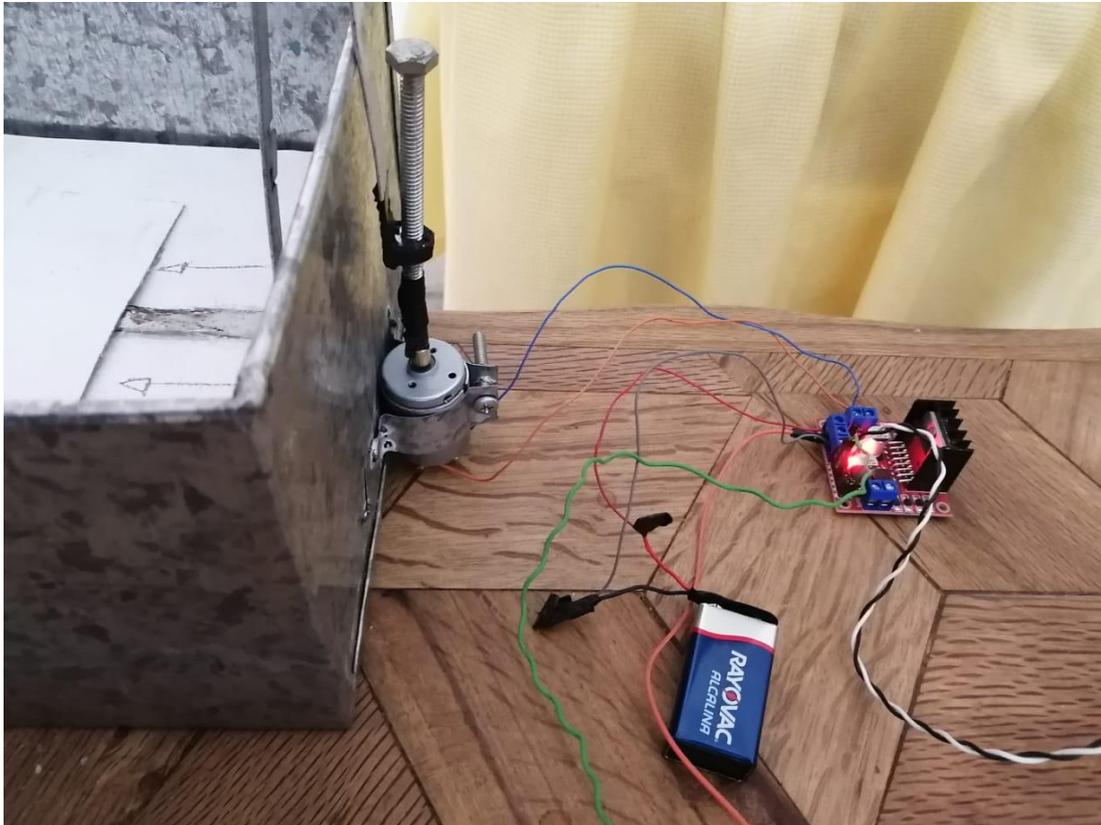
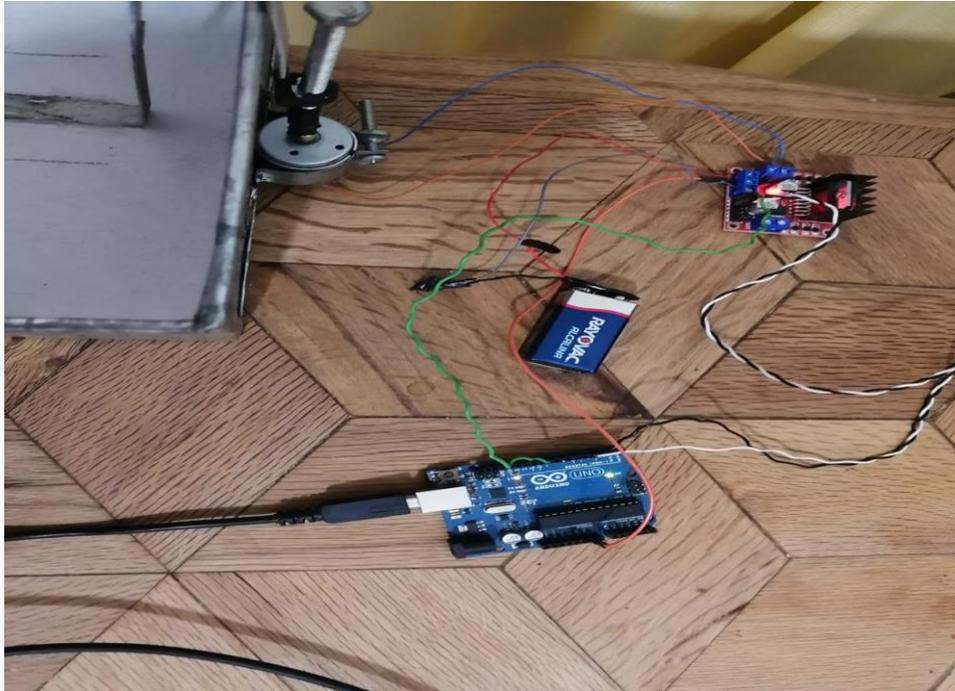


Figura 3.5 Controlador LN298 conectado a motor D.C.

Fuente: Propia

En la figura 3.6 se muestran más completas las conexiones ya que aquí se muestra la placa de datos Arduino Uno con la cual se conecta a través de sus pines al controlador L298N y correspondientes al motor D.C.



*Figura 3.6 conexión de tarjeta de datos y controlador LN298 para control de motor D.C.
Fuente: Propia*

3.1.2 Sistema motocompresor

En el segundo prototipo del sistema criogénico, el objetivo era imitar la curva de enfriamiento en un sistema cerrado para ello se planeó dirigir el aire frío provocado por el uso de un refrigerante de aire acondicionado denominado 410-a el cual nos podría proporcionar temperaturas aproximadas a los -50°C de modo de tener esta temperatura como representación de la temperatura criogénica que alcanza el equipo Digitcool mediante el gas de nitrógeno líquido. Para la realización de esta prueba se utilizó un motocompresor de un refrigerador doméstico marca LG modelo MA53LCCM el cual utilizaba un refrigerante R134a. Este refrigerante se distribuye a través del tubo capilar que el sistema tiene para salir como gas expandido y recorrer la vía del tubo restante hasta regresar al motor para ser licuado y volver a cumplir nuevamente el ciclo. Cabe mencionar que a la tubería del refrigerador se le adaptó un serpentín de cobre de 1/8 de pulgada dentro de un contenedor de acero inoxidable. Este contenedor de acero inoxidable tenía la función de ser como la cámara interna de un congelador y ver si era viable la manera de hacer un ciclo de refrigeración en un sistema cerrado para ello fue utilizado un par de termopares para tener una medición de temperatura tanto en el tubo capilar de salida del gas refrigerante y dentro del contenedor de acero inoxidable para concentrar la masa de aire frío mostrado en la figura 3.7.



*Figura 3.7 Motocompresor modificado de refrigerador LG modelo MA53LCCM.
Fuente: Propia*

3.2 Tanque cilíndrico autoclave

En el tercer prototipo se utilizó como modelo final para la realización del proyecto. Durante la fase de desarrollo de este tanque, fue modificado un tanque cilíndrico de acero inoxidable de lo que anteriormente fue una autoclave tal como se muestra en la figura 3.8. Este fue denominado tanque criogénico desplazable ya que este fue manipulado de manera que su volumen interno o de la cámara interna pudiese ser modificado. Las dimensiones máximas del contenedor son de 70 cm de altura y 40 cm del diámetro externo, el diámetro interno es e 34.6 cm. Dentro de la cámara interna se colocó un mecanismo de pistón / sinfín el cual desplazado mediante un motorreductor acoplado al eje de este es posible realizar un movimiento lineal a través de uno angular. El material de este tanque

es de un acero inoxidable 304 para conservar sus propiedades mecánicas al momento de ser sometido a temperaturas criogénicas evitando daños en su estructura molecular.



Figura 3.8 Autoclave sin modificación alguna.

Fuente: Propia

El tanque inicialmente tenía entre su separación de pared entre el tanque interno y la capa exterior, un aislante térmico denominado “pelo de angel” el cual se puede encontrar en algunas estufas como aislante para altas temperaturas. El pelo de angel fue removido por uno adecuado para las frias temperaturas como lo son las criogénicas que son alrededor de entre -140°C y 150°C en la figura 3.9 se muestra al tanque con un recubrimiento de aislante térmico poliuretano. El aislante utilizado fueron unas capas de poliuretano ya que su rango de temperatura abunda entre los -145°C y los 70°C además de que su costo es muy económico a diferencia de otros tipos de aislantes térmicos para temperaturas bajas.



*Figura 3.9 Aislante anterior de autoclave.
Fuente: Propia*



*Figura 3.10 Autoclave con poliuretano (aislante térmico).
Fuente: Propia*

Otra modificación fue en la parte inferior o base del tanque, prácticamente retirarle esa parte para que a través de esa sección quede hueca y poder introducir ahí el mecanismo pistón/sinfín que realizará el desplazamiento dentro de la cámara y así controlar a la merced del usuario en base a la cantidad de pajillas de semen bovino que este desee introducir. En la figura 3.11 se puede observar el interior del tanque cilíndrico autoclave.

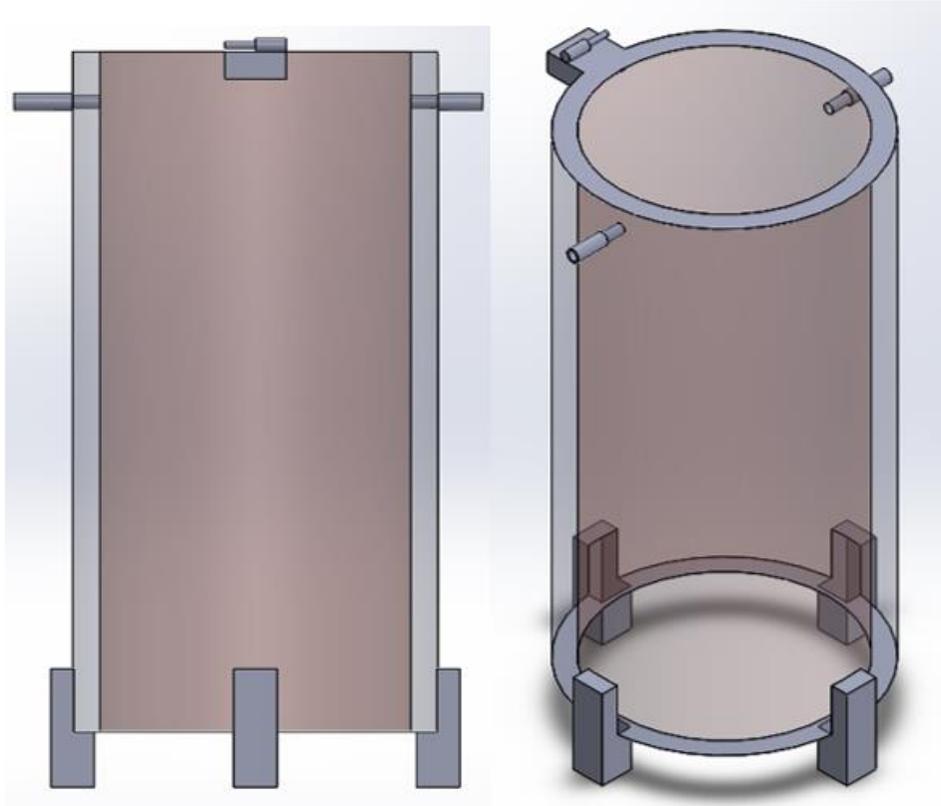


*Figura 3.11 Base inferior del tanque.
Fuente: Propia*



*Figura 3.12 Base inferior de tanque retirada.
Fuente: Propia*

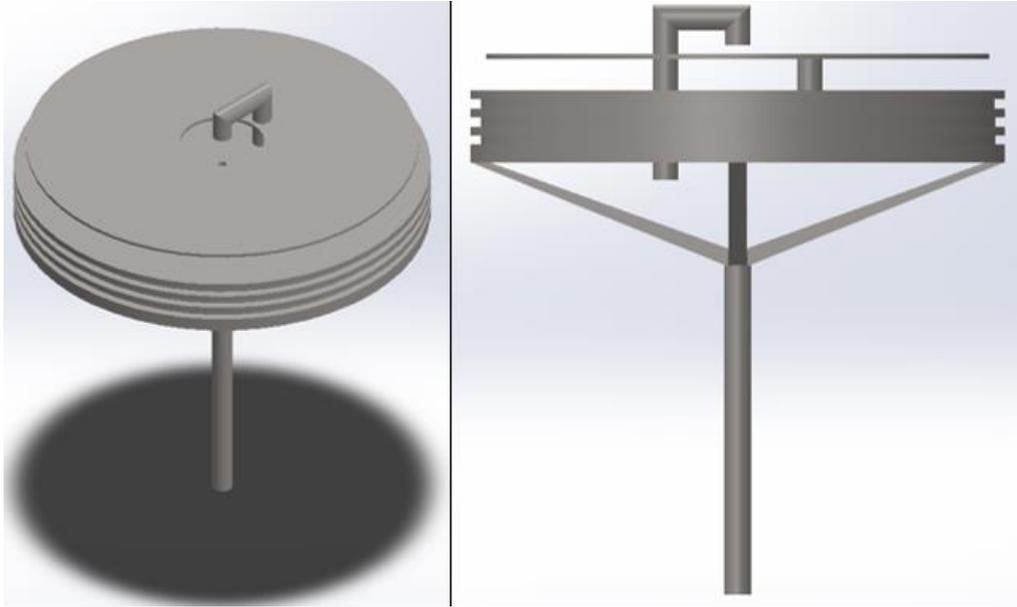
En la figura 3.13 se muestra el interior de la cámara del tanque donde posteriormente serán colocados los componentes del congelador ajustable.



*Figura 3.13 Diseño de tanque en SolidWorks®.
Fuente: Propia*

3.2.1 Mecanismo pistón/ sinfín

Un mecanismo tipo pistón/sinfín fue diseñado para llevar a cabo el desplazamiento vertical lineal de diafragma que reduce las dimensiones de la cámara interna de congelamiento del tanque criogénico. Su accionamiento es logrado mediante un tornillo sinfín sujetado con rodamientos entre el eje del motor reductor y la parte posterior del diafragma dentro de la cámara. El motor reductor es de tipo cónico-helicoidal de ejes perpendiculares y posee suficiente par con gran capacidad de carga radial y axial para lograr el desplazamiento de la carga del diseño propuesto como se muestra en la figura 3.14 El moto-reductor tiene características para una gran vida útil y un tamaño reducido, además posee una eficiencia superior al 95%, con potencia superior a los 35kw y un torque entre 189 y 50,000 Nm.



*Figura 3.14 Mecanismo pistón/sinfin en SolidWorks®.
Fuente: Propia*



*Figura 3.15 Pistón/sinfin manufacturado.
Fuente: Propia*

Como se muestra en la figura 3.16, se ven los niveles de los tanques mediante el software SolidWorks®. Empezando con el nivel 1 consta de una altura de 27.8 cm de donde se encuentra colocado el mecanismo del pistón sinfín a la tapa superior del tanque y el diámetro del cilindro es de 34.8 cm. Entonces utilizando la fórmula $V = \pi r^2 \times h$ la cual es la fórmula para calcular el volumen de un cilindro. Sustituyendo los valores nos da como resultado 0.02644m^3 . Entonces haciendo esto para cada nivel nos dará como resultado los siguientes datos: nivel 2 con una altura de 20.85 cm y un volumen de 0.01323m^3 , nivel 3 con una altura de 13.9 cm y un volumen de 0.01322m^3 y el nivel 4 con una altura de 6.95cm y un volumen de 0.00610m^3 .

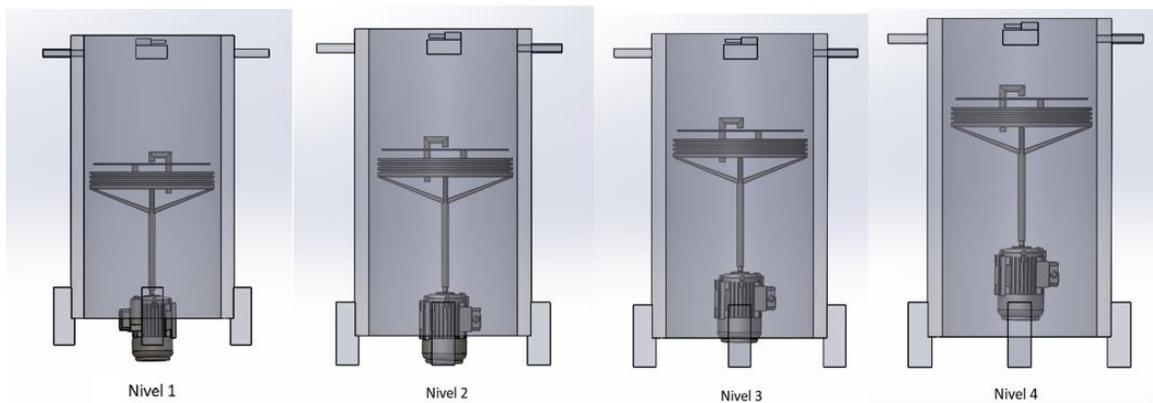
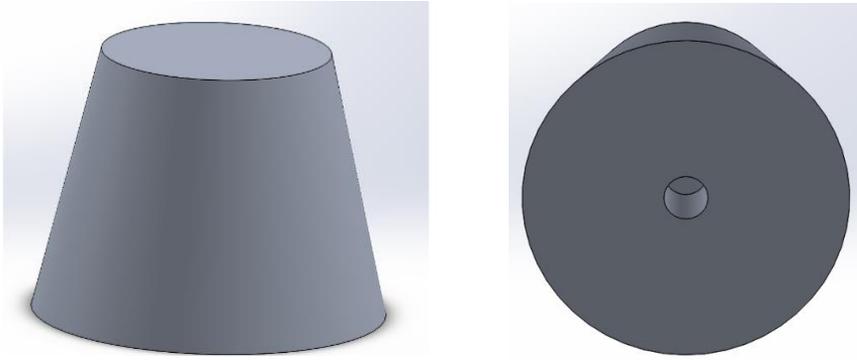


Figura 3.16 Cambio de volumen de la cámara criogénica.
Fuente: Propia

3.2.2 Tanque de almacenamiento de nitrógeno líquido

El tanque de almacenamiento consistió en el acondicionamiento de un contenedor de pajillas de semen utilizado para transporte del semen producido durante la ordeña. Este tanque fue cortado para extraer su tanque interno y colocar un cono de aluminio perforado en el interior de este, de tal manera que permita el alojamiento del dispositivo calefactor actuado por resistencia eléctrica y así evitara este el contacto directo con el nitrógeno líquido. La pieza cónica de aluminio mostrada en la siguiente figura [3.17] fue soldada de manera que este quedara hermético y así evitar fuga del nitrógeno líquido (LN2) y así concentrar la mayor cantidad de energía calorífica dentro del tanque para la producción de gas de nitrógeno líquido a través del calentamiento del LN2. Se realizó una perforación de $\frac{1}{4}$ de pulgada de largo con $\frac{1}{2}$ de pulgada de ancho, para aumentar la ebullición del nitrógeno líquido y aumentar la velocidad de transporte por el cambio de densidad transportado al tanque criogénico de almacenamiento de las pajillas con semen bovino.



*Figura 3.17 Vista frontal e inferior de cono de aluminio realizado mediante SolidWorks®.
Fuente: Propia*

En la figura 3.18 se muestra parte del proceso de apertura del tanque contenedor de nitrógeno líquido para ello se utilizó un esmeril o una máquina cortadora marca Makita® y un disco de corte. Prácticamente solamente se le retiró la parte superior ya que el tanque interno dentro de este fue la parte estratégica tanto para la colocación del equipo calefactor y al mismo tiempo usarlo como contenedor. Sin embargo, lo que se nota alrededor de este era una capa de aislante térmico basado en un sellado al vacío ya que este tanque anteriormente tenía la función de portadora de canisters para semen bovino. Los canisters son cilindros de acero inoxidable donde se colocaban de una manera específica las pajillas contenedoras de la célula animal para transporte. Este aislante estaba conformado por aluminio y una clase de papel celofán para mejor añadidura al momento de que éste sea sellado al vacío.



*Figura 3.18 Tanque de almacenamiento cortado.
Fuente: Propia*

Retirando todo el material aislante previamente visto en la figura 3.18, llegamos al tanque interno el cual como se muestra en la figura 3.19 fue cortado para así después añadirle mediante la vía de soldadura un cono de aluminio donde ahí mismo sería futuramente incrustado (fig. 3.21) un elemento calefactor para el apoyo de gasificar de una manera más rápida el nitrógeno líquido, es decir que se haga un cambio de estado ya que lo que buscamos es imitar una curva de enfriamiento adecuada siguiendo un ritmo de congelación sin afectar tan agresivamente a las muestras de célula animal o provocar un choque térmico (estrés osmótico).



*Figura 3.19 Tanque interno cortado para soldar cono de aluminio.
Fuente: Propia*



*Figura 3.20 Cono de aluminio soldado a la parte inferior de contenedor de LN2.
Fuente: Propia*

El sistema actuador que muestra en la figura 3.21 es una resistencia marca Omega de 25 watts con un rango de operación de 25V a 1A. Este equipo tiene la función de emitir un efecto calefactor a través del cono de aluminio anteriormente mencionado con de que al estar el Nitrógeno líquido en contacto con el cono de aluminio con un diferencial de temperatura esto llevará a que el nitrógeno líquido cambie de su estado líquido a gaseoso de una manera más rápida de la que en sí ya el nitrógeno líquido entrando en contacto con el ambiente se empieza a evaporar de una manera rápida pues con este equipo será posible el aumentar el tiempo de cambio de estado del líquido al gas nuevamente mencionando que esto haciéndolo llevar a cabo de una manera que podamos imitar una curva de enfriamiento óptima para la congelación de esperma y tomando en cuenta el comportamiento de la curva de enfriamiento que están dentro de los parámetros para que este proceso sea llevado de una manera adecuada para la conservación de las células animales.



Figura 3.21 Equipo actuador insertado dentro del cono de aluminio interno del tanque.

Fuente: Propia

3.3 Preparación para pruebas

Para la preparación de pruebas se realizaron unas adiciones y equipamientos a los tanques tanto del contenedor de aluminio como al tanque desplazable como se muestra en la figura 3.21 y 3.22. El tanque de almacenamiento fue recubierto por una capa de poliuretano para conservar más su temperatura sin que este fuese afectado por condiciones de ambiente e insertado nuevamente en su coraza de aluminio externa para un mejor sellado de este. Además, e equiparle una serie de conexiones de llaves (válvulas de seguridad) y de manguera para dirigir el gas de nitrógeno líquido al tanque ajustable y un manómetro para verificar la presión generada dentro del tanque de almacenamiento.

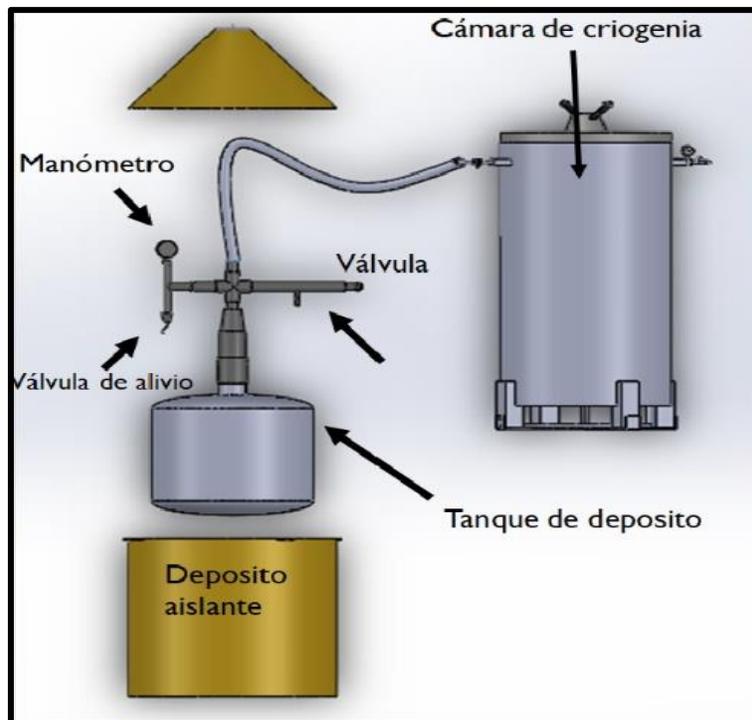
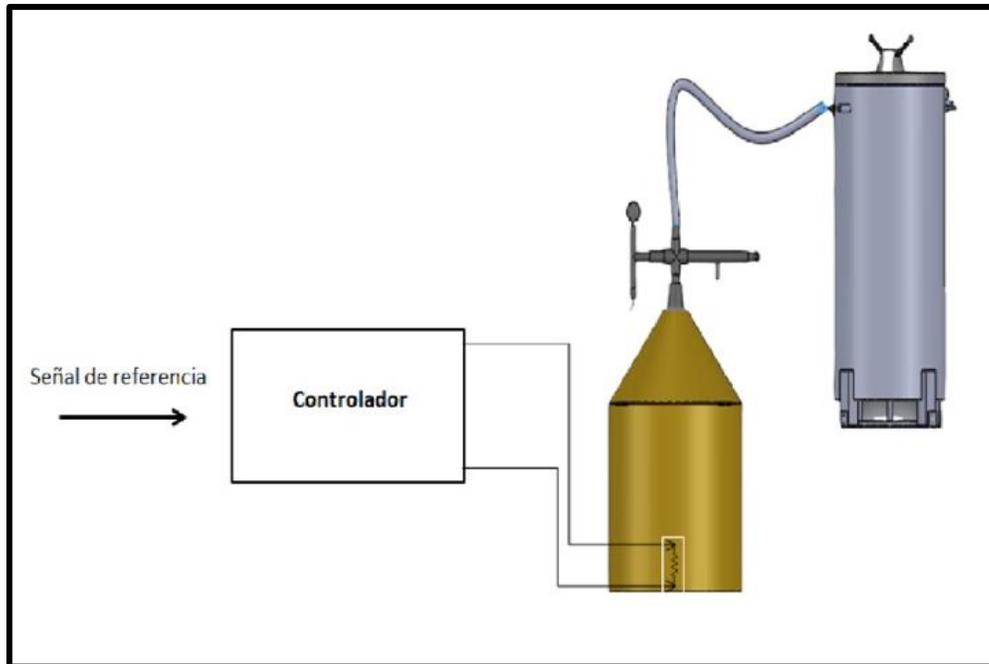


Figura 3.22 Diagrama de conexión de tanques.

Fuente: Propia



*Figura 3.23 Sistema de control del tanque de almacenamiento.
Fuente: Propia*

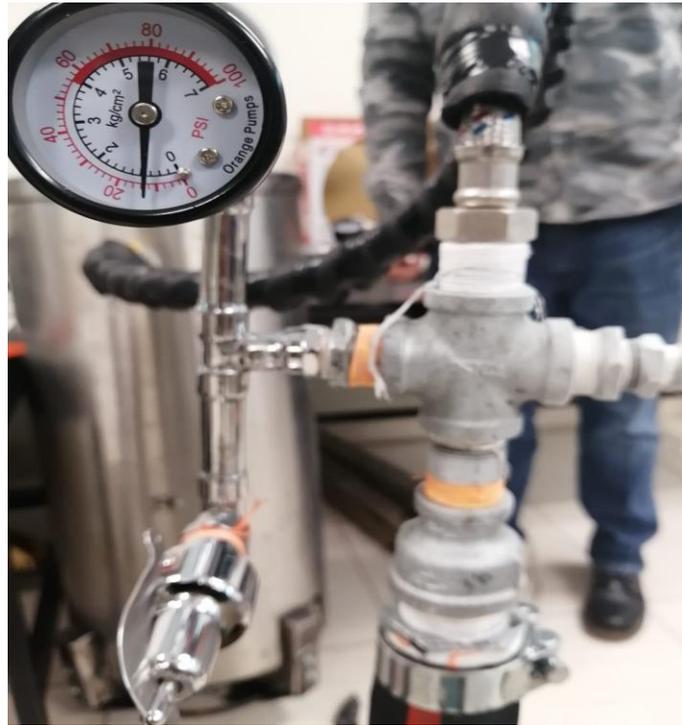
Para el sistema de control de temperatura del actuador resistivo incrustado dentro del cono de aluminio de la figura 3.22, fue considerado un control de temperatura mediante la variación de la corriente eléctrica circulante en la resistencia. Para este propósito, inicialmente fue probado un controlador tipo RST, de manera tal que fuera posible seguir la trayectoria de la curva de temperatura sugerida para sistemas crio enfriadores. Sin embargo, los polos de la función analítica generados por este tipo de control no permitieron un seguimiento adecuado de la curva de temperatura en descenso, por lo que fue implementado un sistema de control tipo PID, colocando un elemento de medición de la variable de temperatura en el interior del tanque modulador del flujo de nitrógeno inyectado hacia el contenedor principal. Una vez calibrado el controlador, fue posible observar que su respuesta es más apegada a las necesidades de variación no lineal de la curva descendente de temperatura llevada a cabo durante un tiempo de 7 minutos necesarios para la preservación del material biológico. El flujo de corriente eléctrica suministrado al elemento resistivo actuador transmite la energía calorífica por condición a través del cono de aluminio para modular el flujo de nitrógeno en fase gaseosa desde el tanque de almacenamiento hacia el contenedor ajustable de pajillas con semen bovino depositadas.



*Figura 3.24 Tanque de almacenamiento recubierto de poliuretano.
Fuente: Propia*

3.3.1 Prueba con nitrógeno líquido sin sistema actuador

Para llevar a cabo esta prueba se depositaron 8 litros de nitrógeno líquido dentro del tanque de almacenamiento colocándolo dentro de su caparazón original, pero con una capa de aislante térmico de poliuretano para evitar la transferencia de calor del exterior hacia el interior del tanque en el lugar donde fue realizada la prueba, así como se muestra en la figura 3.23 y en la figura 3.24 se nos muestra la respuesta de presión dentro del tanque por el gas de nitrógeno líquido.



*Figura 3.25 Presión generada dentro del tanque sin elemento calefactor.
Fuente: Propia*

3.3.2 Prueba con nitrógeno líquido y sistema de calefacción

De manera similar a la prueba anterior, pero poniendo en marcha el actuador de calefacción, fue realizada una dinámica de regulación gradual de la corriente eléctrica en el elemento resistivo para estimular el efecto calefactor del cono de aluminio, con el propósito de aumentar la cantidad de vapor generado por el nitrógeno líquido dirigiéndolo al tanque criogénico utilizando 8 litros que, en la prueba sin actuador, así como se mostró en la figura 3.25.



*Figura 3.26 Presión generada dentro del tanque.
Fuente: Propia*

4.- Resultados

Una vez realizadas las pruebas de funcionamiento del sistema, basándose en las pruebas preliminares mencionadas con anterioridad, fueron obtenidos dos notables resultados. El primero de ellos es, que si no es puesto en marcha el sistema de calefacción que provee la resistencia colocada dentro del cono de aluminio, el nitrógeno en fase gas no tiene un desplazamiento uniforme y suficiente para desplazarse a través de la manguera de abastecimiento de nitrógeno fase gas del tanque criogénico. En el tanque de almacenamiento se genera una presión alrededor de 18 a 20 psi sin el actuador de calentamiento, con esta presión el gas del nitrógeno no llega lo suficientemente frío para empezar a enfriar el tanque criogénico, pero empieza a aumentar la presión dentro de la cámara ajustable. Por el contrario, al poner en marcha el actuador regulado por el controlador PID, la presión aumenta alrededor de 23 a 25 psi activando inmediatamente la válvula de alivio, pero manteniendo constante el flujo másico de nitrógeno fase gas. Por seguridad del equipo y del personal se desfoga un poco de presión con la válvula manual auxiliar para evitar accidentes. Desplazando el flujo másico del nitrógeno con una velocidad más elevada hacia la cámara ajustable, se presenta un efecto de calentamiento dentro de la misma, ya que con el incremento de presión aumenta la temperatura teniendo una pérdida considerable dentro de las conexiones y en el tránsito del flujo a través de la manguera. Con el uso de la fórmula de gases ideales $PV = NRT$ la cual implica la relación entre las variables de presión (P), volumen (V), cantidad de sustancia (N) y temperatura (T), es posible considerar que un gas ideal presenta un comportamiento hipotético ante la variable de presión, volumen y temperatura y este puede ser descrito concisamente mediante la expresión ya mencionada. De esta manera, es posible calcular de manera aproximada el consumo o inyección de nitrógeno líquido que se requiere en el tanque criogénico al cambiar su volumen para mantener estable la curva de congelamiento conforme a los 4 niveles de capacidad establecidos del tanque criogénico ajustable, considerando el volumen 1 como lo más reducible posible y el volumen 4 como su capacidad interna máxima tal como se muestra en la figura 3.1.

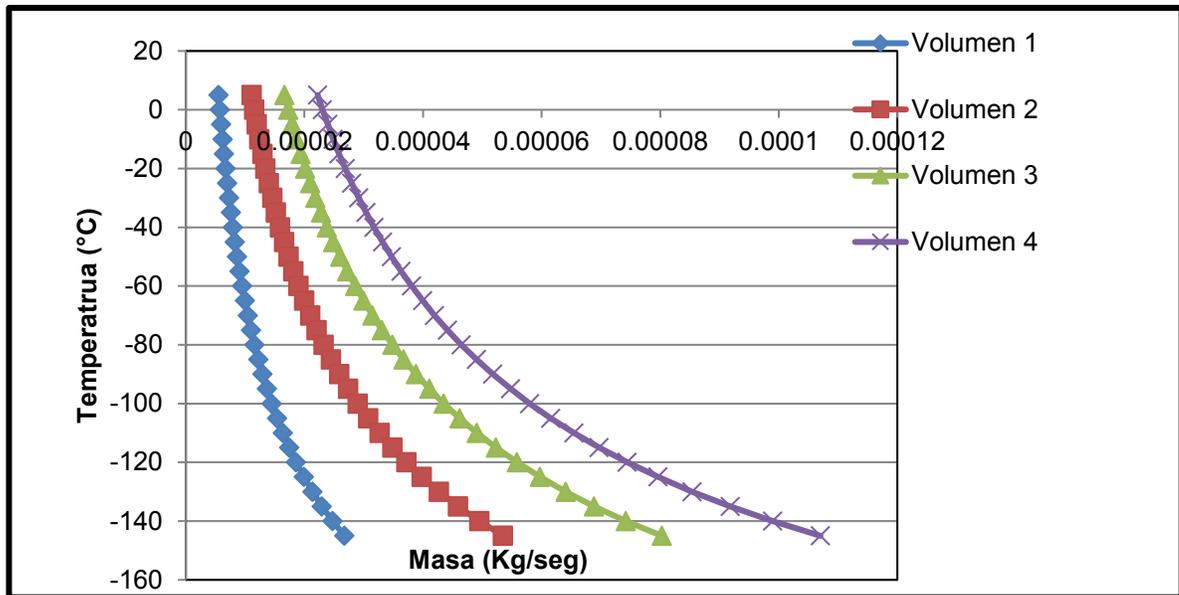
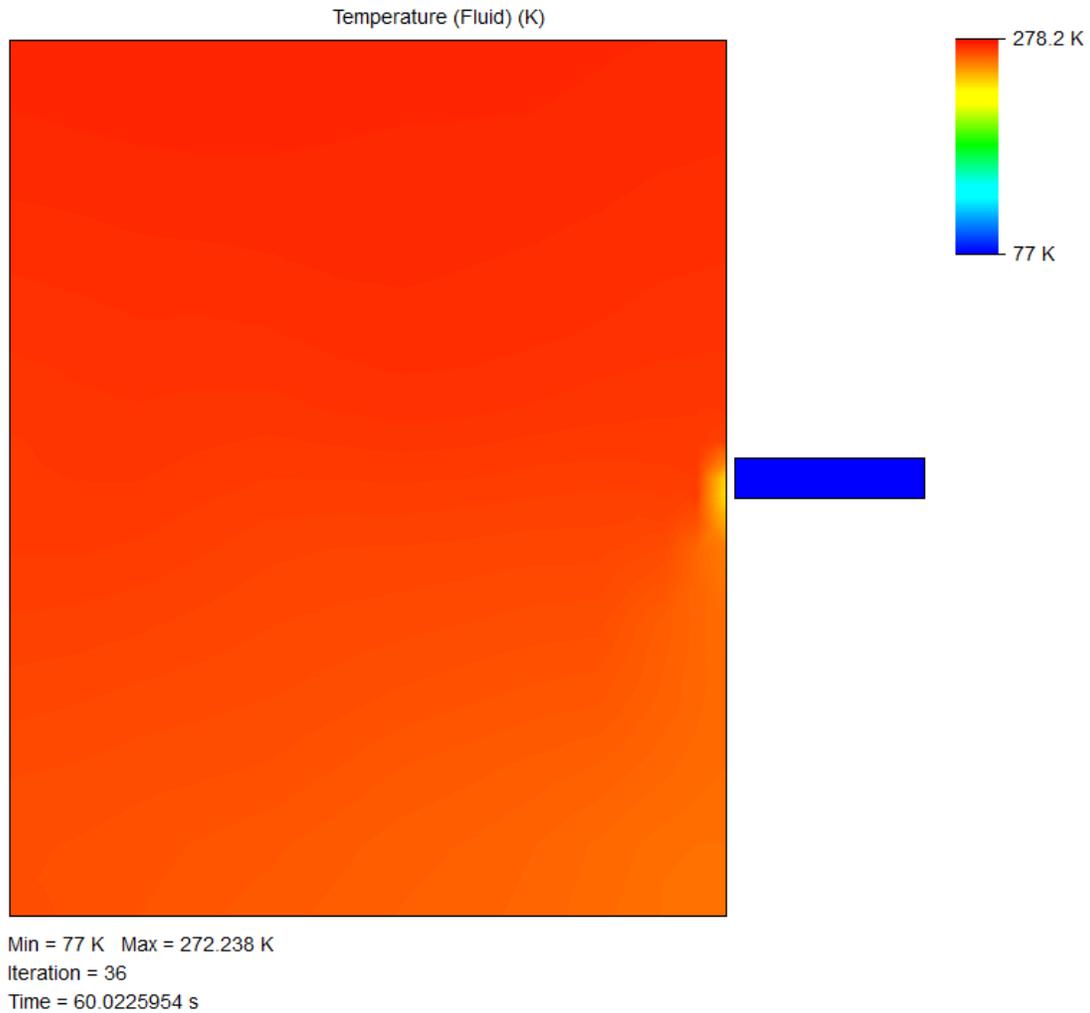


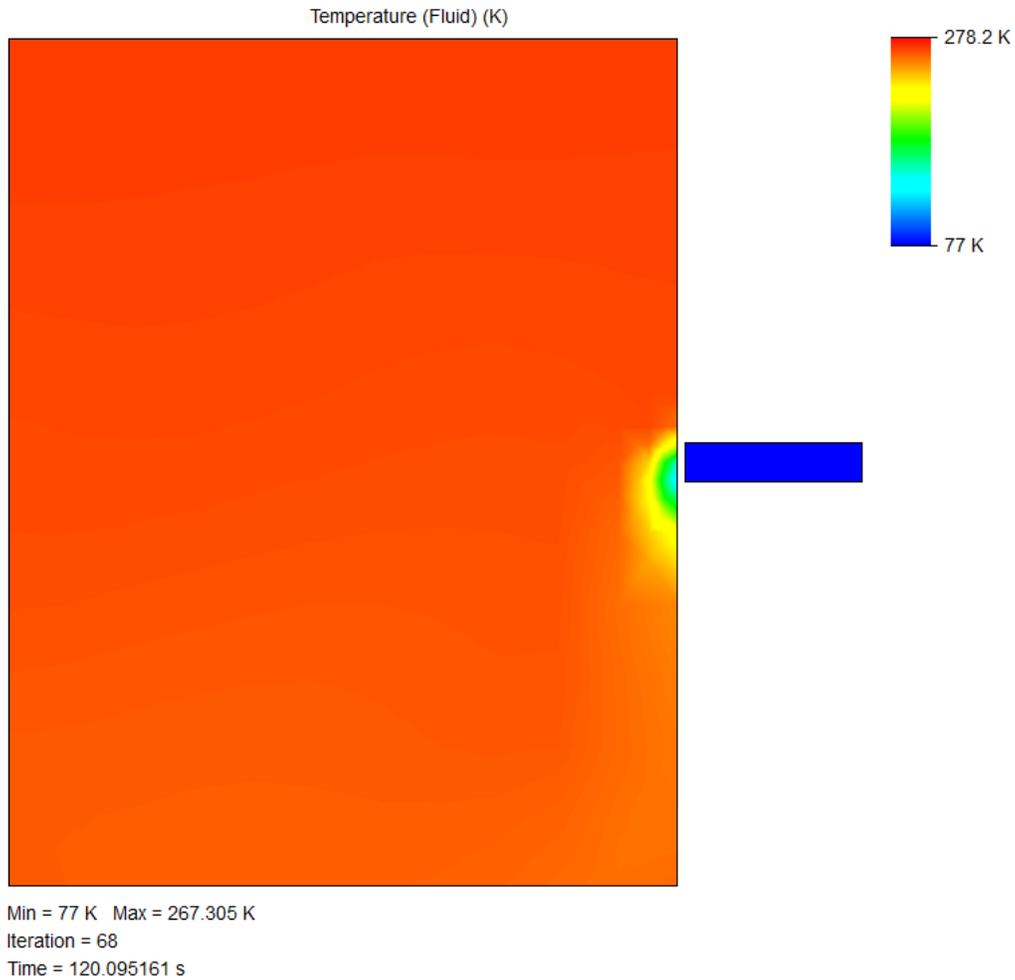
Figura 3.1 Respuestas al cambio del flujo másico de Nitrógeno.
Fuente: Propia

Con la ecuación de gases ideales ($PV = NRT$) teniendo a favor los datos de presión, volumen del tanque (el cual puede variar dependiendo del nivel en el que este se encuentre), la constante del gas de nitrógeno líquido y temperatura siendo este un valor variable se puede despejar la masa de la ecuación y teniendo en cuenta que se requiere calcular la masa a inyectar dentro del contenedor para alcanzar las temperaturas requeridas imitando así el comportamiento de la curva de congelación para semen bovino. Prácticamente en la ecuación se sustituyó la temperatura a partir de los 5°C hasta los -145°C . Cabe mencionar que la mayor parte de los trabajos publicados utilizan congeladores programables a un ritmo de congelación de $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ entre los 5 hasta los -10°C ; De $-40^{\circ}\text{C}/\text{min}$ entre los -10 a -100°C ; De $-20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ entre los -100°C a -140°C (Arango et al, 2017.) Al conocer la masa necesaria para alcanzar dichas temperaturas solo falta conocer que cantidad de masa suministrar durante el tiempo correcto, es decir, llegar a los -140°C en 7 minutos o mejor dicho en 435 segundos. De manera que teniendo ya despejada la masa ($m = \frac{PV}{RT}$) se llega a que el nitrógeno necesario para alcanzar una temperatura de 5°C es de 0.07287 kg durante el primer minuto. Solidworks simulation maneja esas cantidades en segundos, es decir que se dividirá la masa entre 60. Para ello se obtendrá una suministración de masa de 0.001214 kg cada segundo para alcanzar la temperatura de 5°C en un minuto. Después se hace una diferencia de la masa requerida para alcanzar los 0°C con la necesaria para alcanzar los 5°C y se divide entre 60 y se repite el proceso para las siguientes temperaturas. Obteniendo como resultados de la simulación las siguientes figuras:



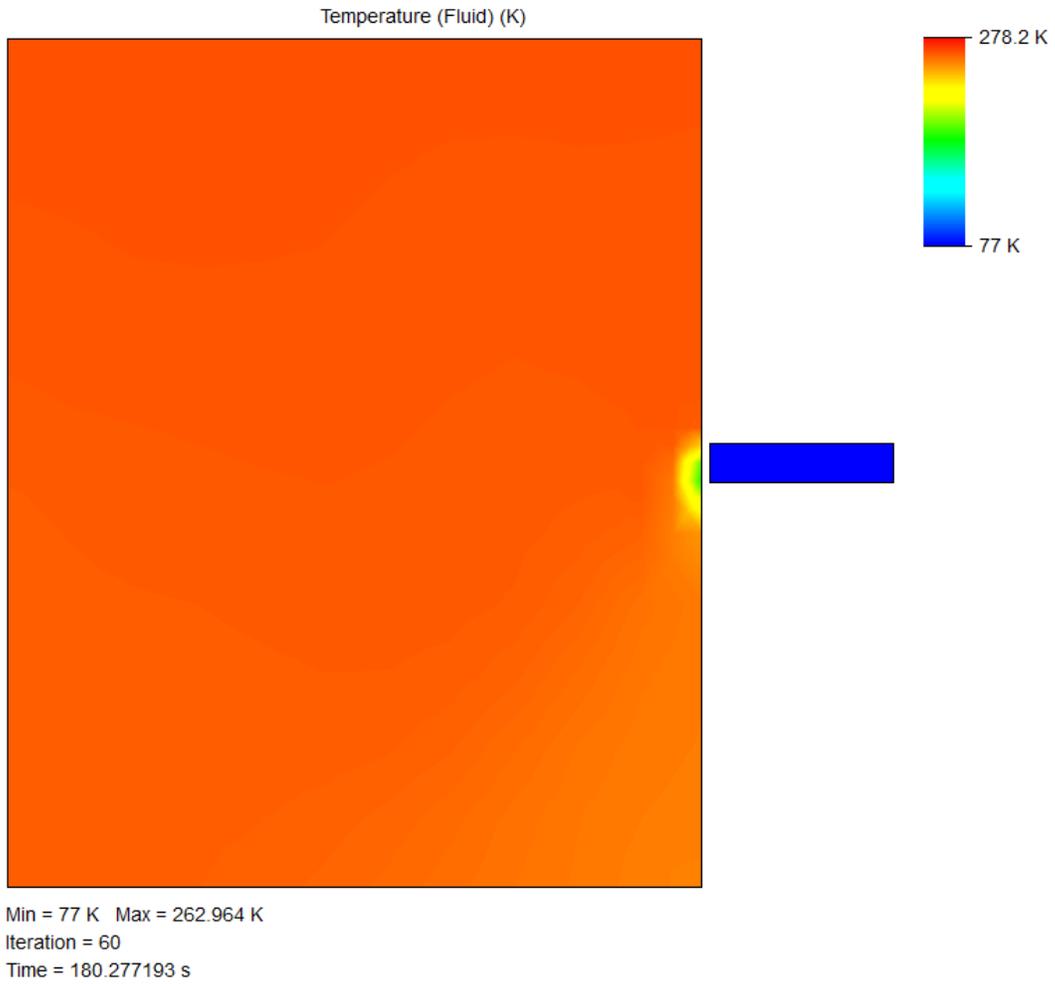
*Figura 4.2 Temperatura del contenedor al segundo 60 mediante simulación en SolidWorks®.
Fuente: Propia*

En la figura 4.2 se puede mostrar que normalmente el contenedor está a la temperatura ambiente del lugar, pero cabe destacar que esta simulación es un proceso adiabático, es decir que el sistema no intercambia calor con su entorno. El requisito es que el calor del sistema permanezca constante.

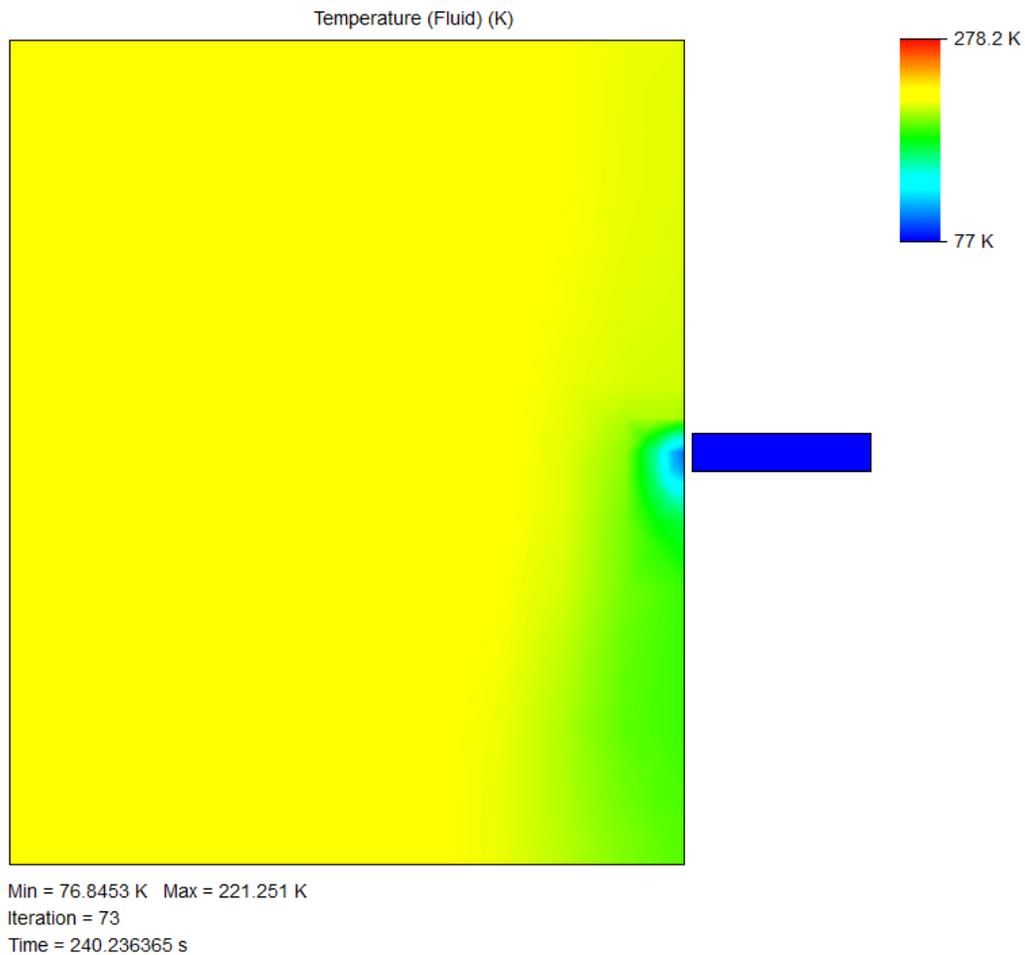


*Figura 4.3 Temperatura del contenedor al segundo 120 mediante simulación en SolidWorks®.
Fuente: Propia*

En la figura 4.3 se empieza a notar como interactúa ya la entrada del gas de nitrógeno con el tanque cambiando su color y de esa manera cambiando su temperatura.

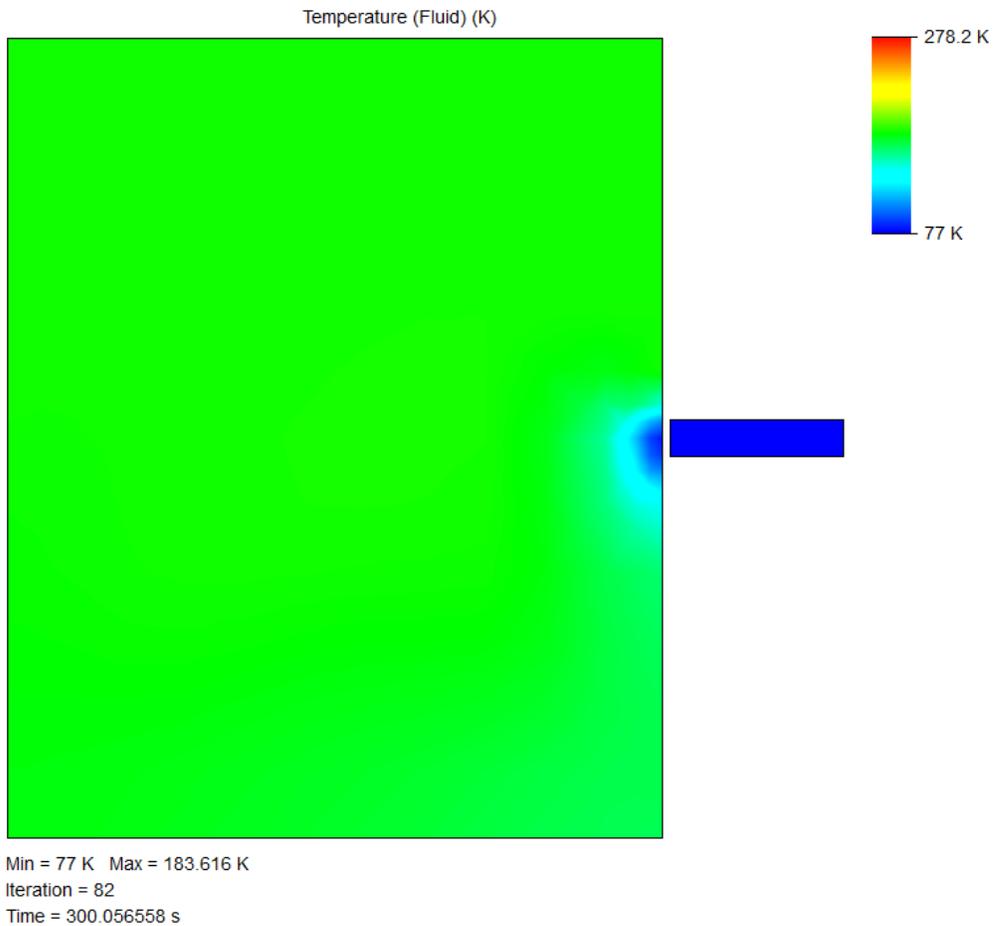


*Figura 4.4 Temperatura del contenedor al segundo 180 mediante simulación en SolidWorks®.
Fuente: Propia*



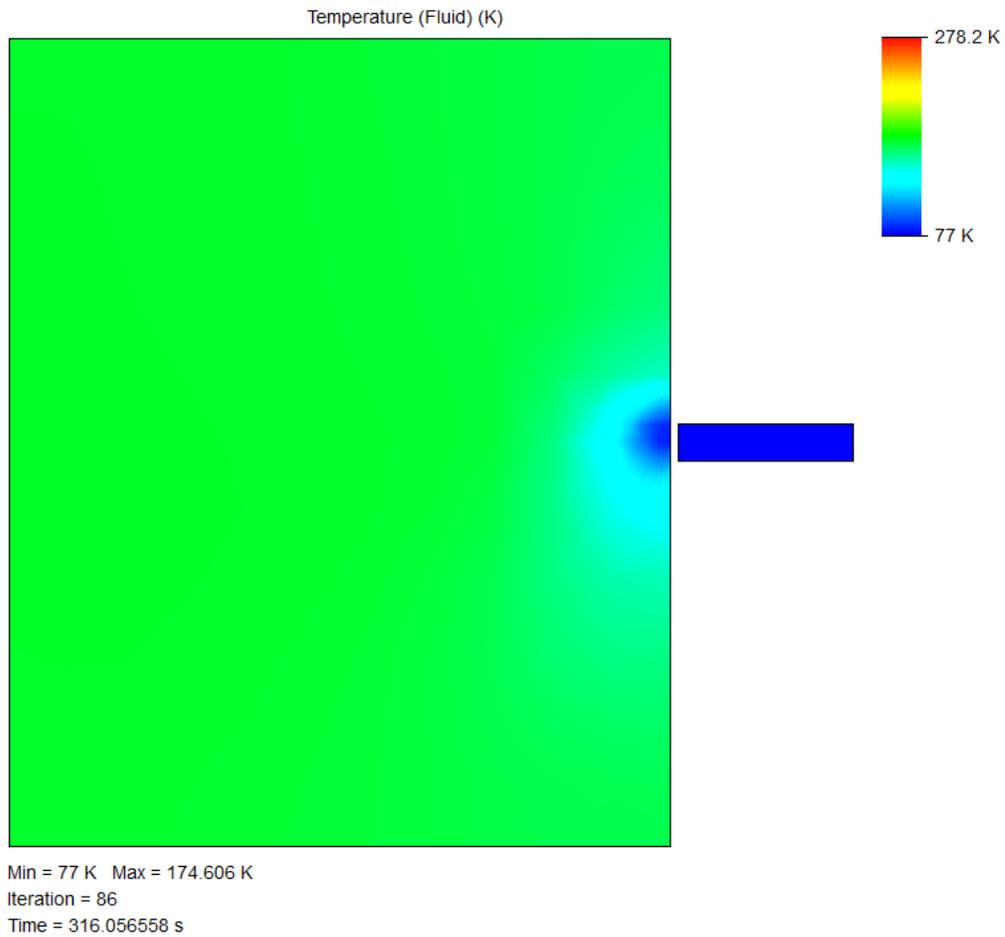
*Figura 4.5 Temperatura del contenedor al segundo 240 mediante simulación en SolidWorks®.
Fuente: Propia*

En la figura 4.5 es aún más destacable el intercambio de la temperatura dentro del tanque ajustable mediante el gas de nitrógeno líquido a los 240 segundos, teniendo ya casi en su totalidad una temperatura de 221.251 K (-51.899°C).



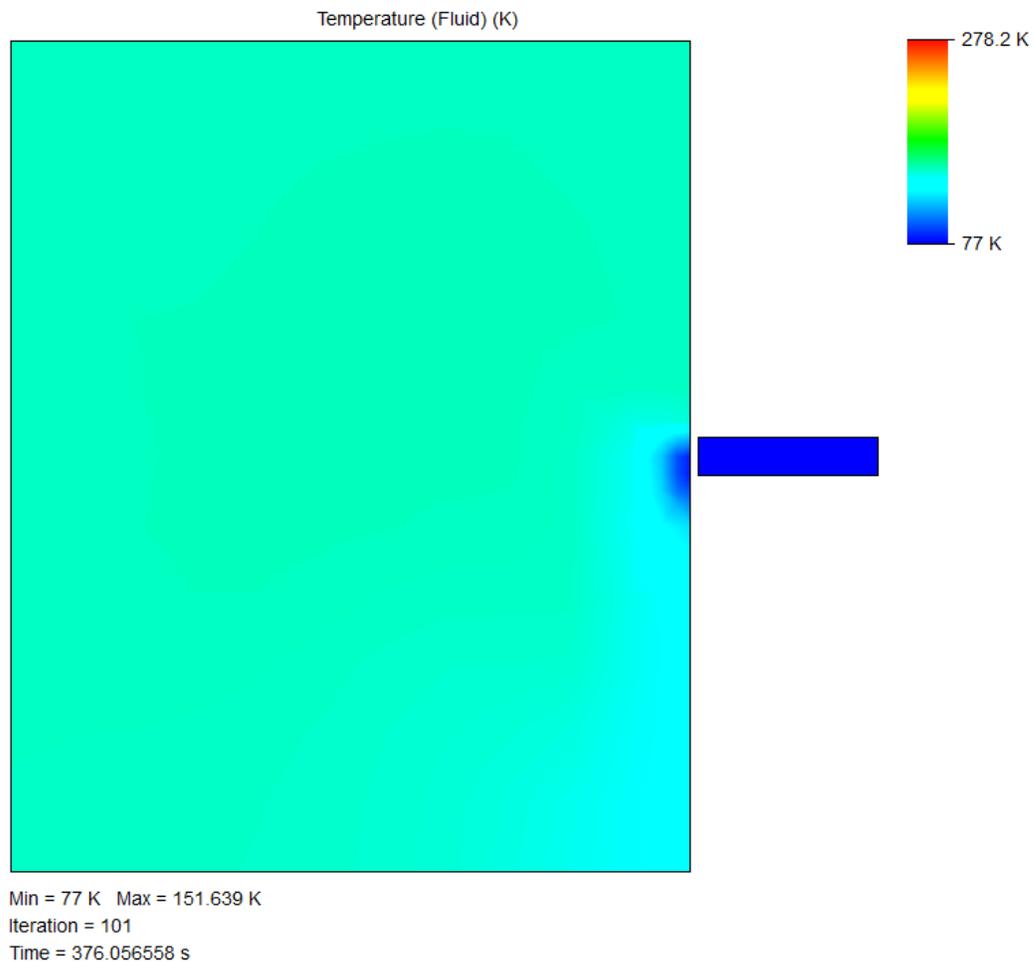
*Figura 4.6 Temperatura del contenedor al segundo 300 mediante simulación en SolidWorks®.
Fuente: Propia*

En la figura 4.6 se muestra ya como a los 300 segundos (5mins) hubo un cambio gradual desde que se inició con el enfriamiento desde la temperatura inicial teniendo ya como registro una temperatura de 183.616 K (-89.534 °C).



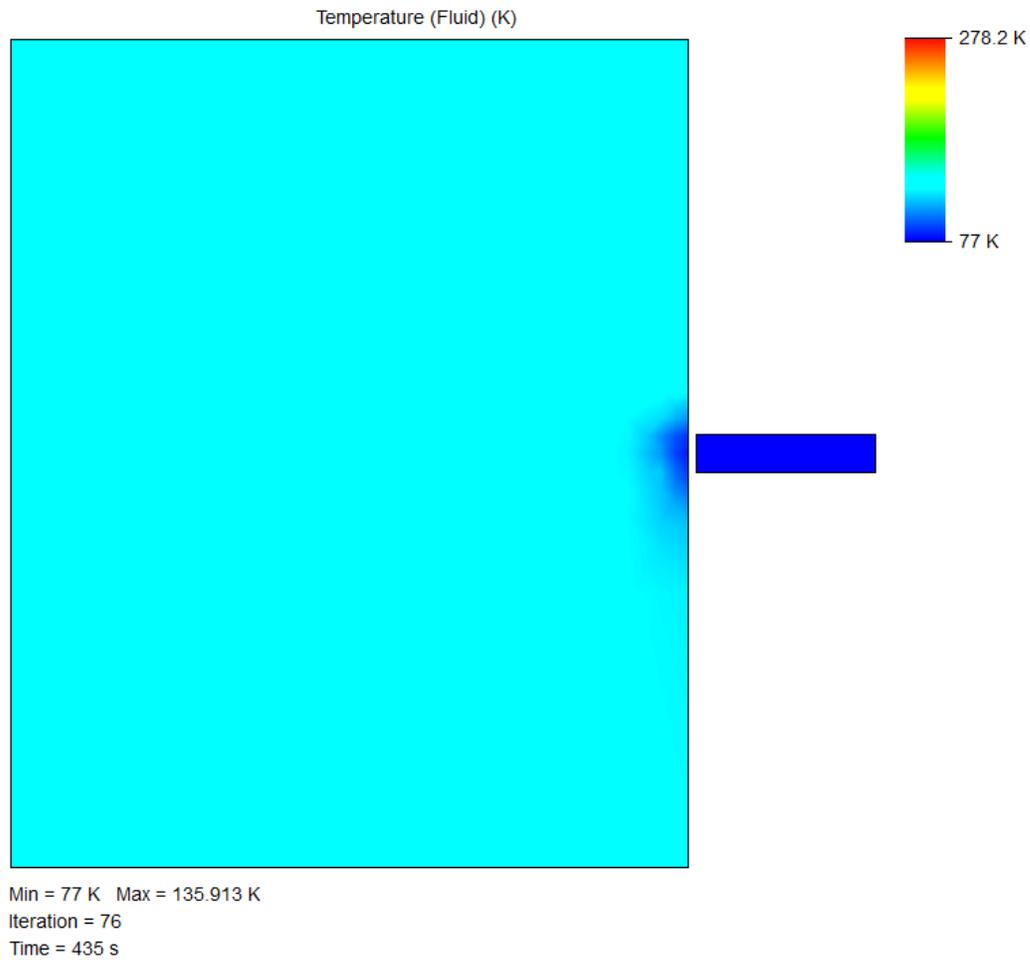
*Figura 4.7 Temperatura del contenedor al segundo 316 mediante simulación en SolidWorks®.
Fuente: Propia*

En la figura 4.7 es notable que solo con diferencia de 15 segundos a comparación de la figura 4.6 en la entrada del gas de nitrógeno se muestra como rápidamente cambia el color del tanque haciendo notar el cambio de temperatura.



*Figura 4.8 Temperatura del contenedor al segundo 376 mediante simulación en SolidWorks®.
Fuente: Propia*

En la figura 4.8 se percata ya dentro del tanque un cambio radical nuevamente de color siendo ya en el segundo 376 que son aproximadamente 6.26 minutos teniendo un registro de una temperatura de 151.639 k (-121.511°C) estando ya cerca de los -140 °C que es el rango dentro de la curva de congelación de semen bovino.



*Figura 4.9 Temperatura del contenedor al segundo 435 mediante simulación en SolidWorks®.
Fuente: Propia*

Finalmente, en la figura 4.9 se muestra el tanque a una temperatura de 135.913 K (-137.237 °C) lo que es un valor aproximado a la temperatura deseada a llegar entre los -140 a -145 respetando la curva característica para la preservación de semen bovino y también respetando el tiempo para lograr llegar a esa temperatura sin afectar la célula animal de las muestras.

5.- Conclusiones y recomendaciones

Con la implementación del instrumento calefactor se demostró que aumenta la velocidad con la cual se gasifica el nitrógeno líquido, de tal manera que también aumenta la velocidad de transporte a través de las tuberías instaladas del tanque de almacenamiento hacia el tanque ajustable. La velocidad aumenta debido a que conforme genera un aumento de presión y por consecuente eleva la temperatura dentro del tanque de almacenamiento, el gas tiende a expandirse con el fin de comenzar el proceso de enfriamiento mediante el gas del nitrógeno. Los resultados obtenidos en las gráficas muestran, que, al aplicar la fórmula general para gases ideales aplicadas para 4 niveles de volumen establecidos en el tanque, permiten optimizar las condiciones de operación por gasto de nitrógeno y la respuesta del dispositivo controlador son adecuadas para el congelamiento de las pajillas con semen bovino en el tiempo sugerido por los autores de sistemas criogénicos fijos. Para validar los resultados, el proceso de simulación en el software SolidWorks® y los cálculos analíticos apegados a la gráfica de respuesta, demuestran la factibilidad en la reducción de consumo del nitrógeno líquido al identificar que el flujo másico se ajusta conforme el nivel volumétrico deseado para congelación en el contenedor ajustable es acorde con el tiempo de enfriamiento requerido en función de la curva de temperatura descendente establecida para semen bovino.

Mediante la reducción de volumen de la cámara interna del tanque para el congelamiento de esperma mediante el mecanismo pistón/sinfín es posible optimizar gastos de operación y podría tener un impacto favorable como trabajo a futuro en el diseño científico tecnológico para este tipo de sistemas criogénicos.

El desarrollo de este proyecto promueve el desarrollo tecnológico a la comunidad científica para la búsqueda de mejoras del diseño estructural e implementación de un sistema de control más adecuado para manipulación de la cantidad de nitrógeno líquido suministrado. Así mismo, se recomienda mejorar el método de enfriamiento ya que el utilizado no fue lo suficientemente eficaz para generar dentro del tanque, la temperatura idónea para la conservación del esperma.

Referencias

Arango T., Jhon E., Durán, Cristhian M., Lizarazo, Jhon E., & Duarte, Jorge A.. (2017). Development of an Automation and Control System for Bovine Semen Freezing. *Tecciencia*, 12(23), 61-69

A.Ribeiro Peres , L. Munita Barbosa , M. Yumi Kanazawa , M.I. Mello Martins , F. Ferreira de Souza. (2014) Cryopreservation of bovine spermatozoa from the epididymal tail using conventional and automated methods *Arch med vet* 46, 31-38

Atrey M.D. (2012) Cryogenic Engineering NPTEL. Online Lectures

Casallas, P.E. (2007) Crioconservación de semen bovino usando un congelador programable (CL-8800) y determinación de su calidad postdescongelación por medio de un sistema de análisis espermático asistido por computador (CASA). *Orinoquia*, vol.11, núm. 1, pp 75-86

Costa López, J. Cervera March, S. Cunill García, F. Esplugas Vidal, S. Mans Teixido, C. Mata Álvarez, J. (1991). Curso de ingeniería química. Introducción a los procesos, las operaciones unitarias y los fenómenos de transporte. Reverté

C.R.M Silva, T.F.O. Melo, J.A. Araujo, J.L.A. Ferreira, S.J. Goobi. (2015) Evaluation of deep criogenic treatment at microabrasive wear of Aisi D2 Steel

DeWaele ATAM.(2011) Basic operation of cryocoolers and related termal machines. *J low Temp Phys* 164:179-236

Garza Alejandro V.J. (2016) Análisis del ciclo de vida de aislantes térmicos para la aplicación en edificaciones. UANL

I.S. Jawahir, H. Attia, D. Biermann, J. Duflou, F. Klocke, D. Meyer, S.T. Newman, F. Pusavec, M. Putz, J. Rech, V. Schulze, D. Umbrello. (2016) Cryogenic manufacturing processes, *CIRP Annals*, vol.65, Issue 2, pp. 713-736

Lvovsky Y, Stautner EW, Zhang T (2013) Novel technologies and configurations of superconducting magnets for MRI. *Supercond Sci Technol* 26:093001

Medina Robles, V.M , Sanchez Carvajal, E. , Velasco Santamaria, Y.M , Cruz Rogelio González Pérez. (2013) Criogenia: Cálculo de equipos. Recipientes a presión

Milind D.Atrey (2020). Cryocoolers Theory and Applications. Chapter I Cryocooler Technology: The Path to Invisible and Reliable cryogenics, (pág.1). Switzerland

Proaño Quezada Héctor Mauricio. (2014) Determinación de la eficiencia térmica del poliuretano utilizado como aislante térmico, en la empresa ESPROM-PUR AMBATO. Escuela superior politécnica de Chimborazo. Riobamba – Ecuador

Radebaugh R. (2007) “Cryogenic Engineering” Springer- Verlag, New York.

Radebaugh, R (2009) Cryocoolers: the state of the art and recent developments. J Phys Condens Matter 21(16):164219

Walker G (1983) Cryocoolers part—1 & 2. Plenum Press, New York

Referencias web

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2019). *INEGI*, Existencia de bovinos por función y actividad zootécnica. Obtenido de https://www.inegi.org.mx/temas/ganaderia/#Informacion_general

Notigram (Mayo 2017). *Billy Estrada*, En Durango hay ganado de calidad genética, es referente mundial. Obtenido de <https://arribaelcampo.com.mx/en-durango-hay-ganado-de-calidad-genetica-es-referente-mundial-estrada/>

PREFITERM (sf) Vidrio celular. <http://www.prefiterm.com/vidrio-celular.html>

PREFITERM (sf) Cryogel®. <http://www.prefiterm.com/cryogel.html>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Junio de 2015). *SADR*, Ganadería bovina y sus derivados. Obtenido de <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/ganaderia-bovina-y-sus-derivados>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Marzo de 2020). *SADR*, La producción de carne de res en México mantiene un crecimiento anual sostenible del 2.5%. Obtenido de <https://www.gob.mx/agricultura/prensa/la-produccion-de-carne-de-res-en-mexico-mantiene-un-crecimiento-anual-sostenible-del-2-5-agricultura>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (Marzo de 2018). *SIAP*. La ganadería: símbolo de fortaleza del campo mexicano.