

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO Y DE CONTROL PARA  
EL CONGELAMIENTO DE SEMEN BOVINO



JHON ELIER ARANGO TRILLOS

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA

MAESTRIA EN CONTROLES INDUSTRIALES

PAMPLONA

2017

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO Y DE CONTROL PARA  
EL CONGELAMIENTO DE SEMEN BOVINO



JHON ELIER ARANGO TRILLOS

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título:

Master en Controles Industriales

Director:

Cristhian Manuel Durán Acevedo

Ingeniero electrónico

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA

MAESTRIA EN CONTROLES INDUSTRIALES

PAMPLONA

2017

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**  
**MAESTRIA EN CONTROLES INDUSTRIALES**  
**AUTORIZACIÓN PARA SUSTENTAR**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN  
CONTROLES INDUSTRIALES.**

**TÍTULO:**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO Y DE CONTROL  
PARA EL CONGELAMIENTO DE SEMEN BOVINO**

**NOMBRES Y FIRMAS DE AUTORIZACIÓN**

**AUTOR**

**Ing. JHON ELIER ARANGO TRILLOS**

**DIRECTOR**

**Ph.D CRISTHIAN MANUEL DURÁN ACEVEDO**

**JURADOS:**

**Ph.D ALDO PARDO GARCIA**

**Ph.D AMAURY ANTONIO CABALLERO**

**Pamplona, Colombia**

**2017**

### **Dedicatoria**

Esta tesis de grado se la dedico a DIOS, por darme la vida y la oportunidad de llegar a este nivel académico, a mi esposa Camila que ha estado siempre a mi lado apoyándome, animándome y que ha sido el motor para lograr este objetivo, a mis queridos padres Carmen Elías Arango (Q. E. P. D) y Carmelina Trillos, quienes con su cariño y ejemplo han dado lo mejor de ellos para mi formación, a mis compañeros y amigos que al igual que yo, se encuentran felices con este nuevo logro para mi vida.

A mis hermanos Hílder y Carlina, que me inspiran día tras día para lograr las metas.

## **Agradecimientos**

A la Universidad de Pamplona por contribuir totalmente en mi formación académica profesional lo cual ha abierto puertas sus puertas, para mi desarrollo profesional.

A mis profesores de la maestría, que con su paciencia, experiencia y consejos pude llegar a este logro con éxito.

A los asesores de tecnoparque nodo Ocaña liderado por el Ing. Wilmer Guevara en especial al ing. Jhon Lizaraso y July Andrea Gomez

Y por último a mis compañeros de trabajo del Centro Agroempresarial SENA Aguachica, Regional Cesar en especial a los Instructores Jorge Duarte Noriega, Cesar Tulio Caselles, Iván Rodríguez, Francisco Chinchilla, Jhon Tymi López, Josefina Trespacios los cuales han sabido esperar, aconsejar y apoyar este proceso, muchas gracias por sus buenos deseos, oraciones y bendiciones.

## Resumen

El proceso de congelamiento de semen bovino (criopreservación) consiste en reducir la temperatura de la muestra hasta alcanzar el punto de estabilidad biológica. Este proceso de congelamiento se lleva a cabo sumergiendo las muestras de semen en nitrógeno líquido (LN2). Cuando una muestra se sumerge en nitrógeno líquido (LN2), entra en un régimen de ebullición debido a las grandes diferencias de temperatura que existen entre la muestra y el nitrógeno líquido (LN2) provocando la evaporación del nitrógeno líquido (LN2) y la cristalización de muestra de forma brusca lo cual afectaría en su totalidad a la muestra biológica. El proceso de evaporación del nitrógeno líquido (LN2) es un fenómeno que ocurre debido a que el flujo de calor desde la muestra hacia el nitrógeno líquido (LN2), en la cercanía de la muestra se genera una capa de vapor aislante que retarda la transferencia de energía. Este fenómeno se le conoce como efecto “Leidenfrost”. Las curvas de frío para el congelamiento de muestras biológicas de semen bovino no son muy frecuentes en la literatura; además existen varios ritmos de congelamiento que se han logrado de forma manual y que han tenido resultados aceptables. El presente estudio permite diseñar e implementar un sistema automático y de control de congelamiento de semen bovino, que pueda seguir o simular la curva de frío ideal para el óptimo congelamiento después de su estabilización, para lograrlo es necesario modelar matemáticamente las ecuaciones que describen la transferencia de calor usando métodos de muestreo.

### **Abstract**

In the process of freezing of bovine semen (cryopreservation) it is to reduce the temperature of the sample until the point of biological stability. This freezing process is carried out by immersing the semen samples in liquid nitrogen (LN2). When a sample is immersed in liquid nitrogen (LN2) enters a boiling regime due to the large temperature differences between the sample and the liquid nitrogen (LN2) causing evaporation of the liquid nitrogen (LN2) and crystallization Sample abruptly which would affect the entire biological sample. The process of evaporation of liquid nitrogen (LN2) is a phenomenon that occurs because the heat flow from the sample into liquid nitrogen (LN2), in the vicinity of the sample an insulating layer which retards steam energy transfer is generated. This phenomenon is known as effect "Leidenfrost". Cold curves for freezing biological samples of bovine semen are rare in the literature; there are also various rhythms freeze that has been made manually and have taken acceptable results. This study allows us to design and implement an automated system control and freezing of bovine semen that can follow or simulate the curve ideal cold for optimal freezing after stabilization, to achieve this it is necessary to mathematically model the equations describing transfer heat using sampling methods.

## Contenido

Dedicatoria .....	IV
Agradecimientos .....	V
Resumen .....	VI
Abstract.....	VII
Introducción.....	1
1. Problema y estado del arte .....	3
1.1 Formulación del Problema .....	3
1.2 Justificación.....	4
1.3 Estado del Arte .....	5
1.4 Objetivo General .....	14
1.5 Objetivos Específicos .....	14
1.6 Alcances y Limitaciones.....	14
1.6.1 Alcances. ....	14
1.6.2 Limitaciones. ....	14
1.7 Metodología.....	15
1.8 Marco Conceptual .....	15
1.9 Técnicas y Criterios de Desarrollo .....	16
2. Estudio y Determinación del Comportamiento del Proceso de Congelamiento de Semen Bovino, Identificando los Niveles de las Variables Necesarios para Llevar a cabo dicho Proceso Óptimamente.....	18

2.1 Proceso de Congelamiento de Semen, Tratamiento Inicial y Proceso de Equilibrio .....	18
2.2 Envasado del semen Bovino.....	19
2.3 Métodos de Congelamiento.....	20
3. Determinación de las Características de los Recursos Físicos Necesarios para la Implementación del Sistema .....	23
3.1 Marco Teórico y Selección de Dispositivos .....	23
3.1.1 Sensores.....	23
3.1.2 Selección del tipo de sensor. ....	24
3.1.3 Alcance.....	24
3.1.4 Exactitud.....	24
3.1.5 Tipo de medición:.....	24
3.1.6 Tipos de termopares o termocuplas. Hay siete tipos de termocuplas que tienen designaciones con letras elaboradas por el Instrument Society of America (ISA). ....	27
3.1.7 Software.....	29
3.1.8 Hardware de adquisición. ....	30
3.1.9 Hardware control de flujo neumático.....	31
3.1.10 Hardware cámara criogénica. ....	32
3.1.11 Pajillas (Pajuela, pajitas o pitillos plásticos) .....	34
3.1.12 Hardware portacajillas.....	35
3.1.13 Diseño portacajillas. ....	37

4. Modelamiento del Sistema que Satisfaga las Condiciones dadas en un Proceso de Congelamiento y Embale de Semen Bovino.....	39
4.1 Aplicación en la Industria.....	39
4.2 Aplicación en Actividades de Trabajo .....	39
4.2.1 Aplicación a clases de instrumentación y funciones de instrumentos.....	40
Definiciones para un mejor entendimiento de la norma, se tienen las siguientes definiciones .....	40
4.2.2 Identificación funcional.....	42
4.2.3 Identificación del lazo. ....	43
4.2.4 Nomenclatura de instrumentos. ....	45
4.2.5 Identificación lazos de control del sistema de congelamiento diseñado. ....	50
4.2.6 Identificación del sistema. ....	52
4.2.6.1 Modelos de un sistema. ....	53
4.2.6.2 Métodos de obtención del modelo.....	54
4.2.6.3 Métodos de identificación. ....	56
4.2.6.4 Identificación experimental del sistema (método gráfico) de sistema de congelamiento de semen bovino. ....	57
4.2.6.5 Diseño de controlador del sistema.....	63
4.2.6.6 Calculo del controlador adecuado para el sistema. ....	68
5. Puesta en marcha del Sistema de Automatización y Control de Congelamiento de Semen Bovino Como Prueba Piloto para Determinar la Correcta Funcionalidad del Mismo .....	71

5.1 Ensamble del Hardware.....	71
5.2 Programación del Software de Adquisición e Implementación del Controlador Calculado para el Control del flujo Neumático por Medio de la Electroválvula .....	74
6. Análisis de Resultados.....	77
6.1 Análisis con otras congeladoras programables.....	85
Figura 67. Sistema modificado para su portabilidad	
7. Conclusiones .....	89
Referencias Bibliográficas.....	92
ANEXOS.....	95
Anexo 1. Sistemas 1 que se experimentó en la investigación .....	96
Anexo 2. Sistemas 2 que se experimentaron en la investigación .....	97
Anexo 3. Sistemas 3 definitivo que se experimentaron en la investigación .....	98
Anexo 4. Sistema desarrollado después de congeladas las pajillas pruebas .....	99
Anexo 5. Elementos de protección personal (EPP).....	100
Anexo 6. Consecuencias de no usar los EPP.....	101

## Lista de Figuras

Figura 1. Ritmo de congelamiento más utilizado.....	7
Figura 2. Proceso de congelamiento de semen bovino en el SENA centro agro-empresarial Aguachica Cesar .....	8
Figura 3. Vertimiento del Nitrógeno Líquido a la cava para su estabilización y alcance de nivel deseado .....	9
Figura 4. Después de verter varias veces nitrógeno líquido en la cava se alcanza en nivel deseado para el congelamiento.....	9
Figura 5. Depositando las pajillas estabilizadas a 4°C en el carro o portapajillas.....	10
Figura 6. Depositando las pajillas en la cava para su posterior congelamiento .....	10
Figura 7. Ubicación centro Agro-empresarial SENA Aguachica Fuente: Google maps, 2016.....	11
Figura 8. Dewar recipiente lleno de LN2 y Testo Adquisición conectado a un PC.....	12
Figura 9 Straw inicialmente llena de agua pura con el termopar roscado en la aguja y montado en la pajita para evitar el movimiento radial durante el experimento .....	12
Figura 10. Metodología .....	15
Figura 11. Ritmo 1 de congelamiento .....	21
Figura 12. Ritmo 2 de congelamiento .....	21
Figura 13. Ritmo 3 de congelamiento .....	21
Figura 14 Tipos de termocuplas .....	29
Figura 15. Tarjeta de adquisición de datos NI 9211.....	30

Figura 16. Chasis NI cDAQ 9174 .....	31
Figura 17 Electroválvula 6223 y modulo tipo 8605 controlador digital .....	31
Figura 18. Diagrama a bloques del sistema de adquisición y control .....	32
Figura 19. Corte esquemático de un termo criogénico usado para el almacenamiento de semen en la inseminación artificial [35] .....	32
Figura 20. Tanque que se utilizó como cámara criogénica .....	33
Figura 21. a) Tanque adecuado para ser cámara criogénica, b) Serpentín para la distribución uniforme de frio, c) Tanque listo para las primeras pruebas .....	34
Figura 22. Pajitas utilizadas para empackado el semen bovino .....	34
Figura 23. Portapajillas usado actualmente para el congelamiento de semen bovino.....	36
Figura 24. Portapajillas diseñado .....	36
Figura 25. Vista del portapajillas en él se observan los anillos, 1) Anillo, 2) Orificio para depositar la pajilla, 3) Pajilla depositada.....	36
Figura 26. Imagen del portapajillas desensamblado por anillos individuales .....	37
Figura 27. Simulación software SolidWork .....	38
Figura 28. Impresora 3D.....	38
Figura 29. P&ID sistema de congelamiento (PVC: Válvula Controladora de Presión, PCVM: Válvula Controladora de Presión Manual) .....	50
Figura 30. Diagrama P&DI .....	51
Figura 31. Diagrama a bloques del P&DI de la Figura 31 .....	51
Figura 32 Tanque proveedor de N2 donde se ve la Válvula de Control de Presión PVC..	52

Figura 33. Sistema dinámico con entrada $u(t)$ , perturbación $e(t)$ y salida $y(t)$ .....	53
Figura 34. Diagrama de flujo proceso de identificación experimental [20] pág. 5 .....	56
Figura 35. Toma de datos en lazo abierto de las variables temperatura y presión por medio del DAQ al PC.....	57
Figura 36. Ritmo de escalonamiento de presión al tanque de nitrógeno líquido N <sub>2</sub> .....	58
Figura 37. A medida que transcurre el proceso de enfriamiento el tiempo para alcanzar un grado es menor .....	59
Figura 38. A medida que transcurre el proceso de enfriamiento el tiempo para alcanzar un grado es menor .....	60
Figura 39. A medida que transcurre el proceso de enfriamiento el tiempo para alcanzar un grado es un poco mayor .....	61
Figura 40. A medida que transcurre el proceso el tiempo para alcanzar un grado es mayor que a 33 psi.....	62
Figura 41. A medida que transcurre el proceso el tiempo empieza a reducirse pero le cuesta aun recuperar el ritmo que llevaba .....	62
Figura 42. Se muestra que a medida que transcurre el proceso de enfriamiento el tiempo empieza a reducirse .....	63
Figura 43. Se muestra la curva de comportamiento del sistema a los diferentes escalones .....	67
Figura 44. Se estimó la función de transferencia y el porcentaje de aproximación de 94.17%.....	68
Figura 45 Respuesta del controlador tipo P a la señal escalón (step).....	69
Figura 46 Respuesta controlador PI .....	70

Figura 47. a) Símbolo compresor P&DI, b) Compresor .....	71
Figura 48 Figura 60 y 61. a) Símbolo Unidad de tratamiento de aire P&DI, b) Unidad de tratamiento de aire .....	72
Figura 49 a) Símbolo Presostato P&DI, b) Presostato .....	72
Figura 50. 1) Entrada de aire, 2) Salida de gas Nitrógeno, 3) Salida para Válvula de seguridad .....	73
Figura 51. Sistema de enfriamiento ensamblado A) Cámara Criogénica, B) Tanque con nitrógeno líquido N2 .....	73
Figura 52. Sistema de congelamiento bovino ensamblado funcionando .....	73
Figura 53. Sistema de adquisición de temperatura .....	74
Figura 54. Sistema de adquisición de presión .....	74
Figura 55. Implementación del PID en el sistema de control.....	75
Figura 56 Panel frontal .....	75
Figura 57 Grafica comportamiento del sistema tiempo vs temperatura a 33 PSI .....	77
Figura 58. Diagrama a bloques del sistema en lazo abierto (arriba) y en lazo cerrado (abajo) con el PID .....	78
Figura 59. Respuesta en lazo abierto.....	78
Figura 60 Respuesta en lazo cerrado controlador tipo P .....	79
Figura 61 Respuesta en lazo cerrado del sistema con controlador PI .....	80
Figura 62. Respuesta en lazo cerrado tiempo de respuesta de 21min .....	80
Figura 63. Congeladora Computarizada Automática Digicool IMV .....	86

Figura 64. Congeladora TurboFreezer de Minitube .....	86
Figura 65. Frezze control CL8800 System.....	86
Figura 66. Congeladora Automática De Semen Y Embriones CRYOGEN HSE Portátil .	87
Figura 67. Sistema modificado para su portabilidad7.....	89

**Lista de Tablas**

Tabla 1. Ventajas y desventajas de tipos de sensores	26
Tabla 2. Datos de fertilidad y preñez Fuente: Según el Dr. Kaproth.	35
Tabla 3. Definiciones	40
Tabla 4. Nomenclatura de instrumentación	45
Tabla 5. Elementos primarios	48
Tabla 6. Data de salida a 33 psi	58
Tabla 7. Data de salida a 45 psi	59
Tabla 8. Data de salida a 33 psi	60
Tabla 9. Data de salida a 20 psi	61
Tabla 10. Data de salida a 33 psi	62
Tabla 11. Data de salida a 45 psi	63
Tabla 12. Data de salida que cumple el ritmo de los escalones	63
Tabla 13. Ritmo de congelamiento	81
Tabla 14. Ritmo de congelamiento del sistema	82
Tabla 15. Respuesta del sistema con la modificación de las constantes $K_c$ y $K_i$	83
Tabla 16. Características comparativas de congeladoras comerciales vs sistema diseñado	87

## Introducción

La inseminación artificial (I.C) se utiliza en muchas especialidades, pero es en los bovinos en los que ha aportado las mayores ventajas; una de ellas es el mejoramiento de las razas y en consecuencia mejora las exportaciones ganaderas a países que exigen mejor calidad en las carnes. La inseminación artificial es una técnica antigua, grandemente usada en los países Europeos, los Estados Unidos, Rusia, Japón [7]. En latino América lleva cinco o seis décadas en las zonas dedicadas al ganado de leche y carne.

El principal objetivo que persigue el productor que adopta la Inseminación Artificial es el mejoramiento genético y los productores de las mejores razas ven dicha inseminación como una herramienta idónea, de bajo costo y ágil para lograr el objetivo, sin embargo, Los métodos actuales de congelamiento de semen bovino son invasivos lo que pueden traer como consecuencia que muchas de las muestras resulten defectuosas y el índice de pérdida de las mismas sea muy grande, por lo cual se pretende reemplazar este método por un sistema automatizado no invasivo en el que el proceso de congelamiento sea realizado completamente en una cámara sin necesidad de intervención humana que pueda contaminar las muestras [17].

El proceso de inseminación artificial inicia con semen puro y fresco, luego refrigerado y después con semen congelado; actualmente la tecnología está inmersa en todos los aspectos de la vida y este procedimiento que es muy utilizado por diferentes instituciones no puede quedarse atrás de dichos avances lo cual motiva el diseño e implementación de un sistema automático y de control para el congelamiento de semen bovino que permita dar solución a la necesidad de reproducción asistida ampliamente empleada para lograr el mejoramiento genético [7].

Con esta investigación se busca incorporar nuevas estrategias de automatización y el control con vistas a mejorar el proceso de congelamiento de semen bovino. Dicha mejora dará como resultado una mejor calidad al semen, repercutiendo en una mayor tasa de preñeces y permitiendo así congelar un mayor número de pajillas mientras que se aprovecha al máximo el nitrógeno líquido, que es el agente congelante y conservante.

La implementación de los métodos de automatización y control ofrecen al sector industrial la posibilidad de mejorar la calidad de los productos optimizando los recursos utilizados en los

procesos [14], [24], reduciendo los riesgos ocupacionales y ambientales, alcanzando mayor armonía entre los productos, medio ambiente y personal que labora; aspectos importantes que se desean alcanzar con esta propuesta.

## **1. Problema y estado del arte**

### **1.1 Formulación del Problema**

A nivel mundial la utilización de la inseminación artificial ha permitido un gran avance en el mejoramiento genético de las especies bovinas, especialmente en aquellas de razas lecheras; este avance se ha dado teniendo en cuenta que ha podido llegar a ser ampliamente difundida y estudiada por muchos profesionales de la medicina, científicos, ingenieros y muchos otros profesionales que se han interesado en investigar dicho procedimiento.

La inseminación artificial es la herramienta más idónea para lograr el mejoramiento genético, porque permite usar directamente el material seminal de toros mejoradores de razas, sin embargo el procedimiento requerido para este método de reproducción asistida sufre eventos que influyen negativamente en la calidad, como el traslado de las muestras de semen hasta el lugar de estudio, la temperatura, el medio de almacenamiento, el periodo de conservación, entre otras pueden inducir variaciones en la interacción célula a célula requerida en este proceso.

En el proceso de conservación de semen bovino usados actualmente son invasivos lo que pueden traer como consecuencia que muchas de las muestras resulten defectuosas y el índice de pérdida de las mismas sea muy grande al no ser apto para la realización del procedimiento de reproducción asistida, generando la necesidad de reemplazar este método por un sistema automatizado no invasivo en el que el proceso de congelamiento sea realizado completamente en una cámara con mínima intervención humana, el cual puede contaminar las muestras.

El Municipio de Aguachica, Cesar cuenta con alta calidad de razas bovinas que son apetecidas por productores nacionales e internacionales haciendo uso de la inseminación artificial y requiriendo para este proceso el congelamiento del semen que es producido en esta región para ser trasladado a diferentes lugares, pero no se cuenta con un sistema que garantice la calidad de las muestras puesto que las altas temperaturas del departamento del Cesar y la manipulación humana que se efectúa para lograr la comercialización de las muestras no es el más adecuado.

Por lo anterior se hace necesario que en el Municipio de Aguachica, Cesar se diseñe e implemente un sistema de automatización y control de congelamiento de semen bovino para lograr mejorar la calidad de las muestras de semen y que estas puedan ser comercializadas.

## 1.2 Justificación

En los últimos años se ha comprobado que los métodos de automatización y control son efectivos en todas las áreas donde se han aplicado alcanzando estándares máximos de calidad, aprovechamiento del tiempo y de recursos, reducción de los riesgos ocupacionales y ambientales alcanzando mayor armonía entre los productos, medio ambiente y personal que labora, por otra parte los procedimientos que son realizados manualmente sin uso tecnológico, requieren mayor operatividad y por ende mayor intervención humana generando mayor probabilidad de error.

En el proceso de inseminación artificial es muy importante la correcta conservación del semen, puesto que se inicia con semen puro y fresco, luego refrigerado y después con semen congelado; actualmente la tecnología está inmersa en todos los aspectos de la vida y este procedimiento que es muy utilizado por diferentes instituciones no puede quedarse atrás de dichos avances lo cual motiva el diseño e implementación de un sistema automático y de control para el congelamiento de semen bovino que permita dar solución a la necesidad de reproducción asistida ampliamente empleada para lograr el mejoramiento genético.

Esta tesis se ubica en la unión entre la Inseminación Artificial (IA) desde el punto de vista biológico, fisiológico y la Ingeniería de Control para la automatización y control de procesos, específicamente los procesos de congelamiento y conservación del semen bovino [36].

Una visión conjunta de la IA y del Control Automático puede permitir resolver problemas en los que se integre la información biológica, fisiológica, con la información cuantitativa y continua de la percepción y la acción de los sistemas de automatización y control.

La inseminación artificial ha generado estrategias y técnicas útiles en el campo del congelamiento y preservación del semen bovino, puesto que hoy en día los sistemas de automatización y control pueden ser usados para construir procesos más flexibles y robustos que mejoren la calidad del semen bovino [1], [22], [23], razón que lleva a que la ingeniería de control puede mejorar los procedimientos de congelamiento y preservación de semen bovino incorporando conceptos como la causalidad temporal y estructural, la dinámica de procesos y el análisis paramétrico procedentes de la teoría de sistemas y la teoría de control clásico; componentes que surgen naturalmente en esta interfaz son los sensores y los actuadores, ya que estos han tenido

siempre roles similares.

El objetivo central de la tesis que aquí se propone es el diseño e implementación de un sistema automático y de control para el congelamiento de semen bovino. El diseño tiene como bases la implementación de técnicas para la automatización, la teoría de control y el estudio del modelado de la dinámica del proceso de congelamiento con nitrógeno líquido.

### **1.3 Estado del Arte**

Las primeras técnicas de congelamiento utilizaban hielo seco ( $\text{CO}_2$  sólido) y alcohol, obteniendo una temperatura de  $-79^\circ\text{C}$ , logrando un estado de inactividad metabólica reversible en los espermatozoides; desde entonces el uso del semen congelado ha podido introducirse en muchos países mediante diferentes programas basados en el almacenamiento del semen a bajas temperaturas, por períodos prolongados [7].

El proceso mencionado anteriormente no está exento de problemas ya que, puede inducir variaciones extremas en las propiedades químicas, térmicas y eléctricas, las cuales pueden alterar las membranas celulares, los organelos y la delicada interacción célula-célula inherente en las células y tejidos a crio-preservar.

La posibilidad de preservar el semen mediante su congelamiento abrió una nueva dimensión al empleo de la inseminación artificial, otorgándole más potencia a esta valiosa biotecnología reproductiva y es importante mencionar, que lo verdaderamente importante del semen congelado es el logro que los espermatozoides perduren muchos años mediante la acción crio-protectora del glicerol, lo que ha permitido, desde el punto de vista biológico, mantenerlos "vivos" con una longevidad prácticamente indefinida [1], [22], [23].

El nitrógeno líquido ( $\text{LN}_2$ ) es un gas licuado, ampliamente empleado en las tecnologías y biotecnologías reproductivas para la conservación de semen, ovocitos, embriones, sueros, enzimas, tejidos, células y productos químicos.

Su uso requiere conocer bien sus propiedades y seguir las recomendaciones de seguridad para evitar los efectos negativos.

Su empleo establece 3 riesgos:

1. La explosión a través de la condensación.
2. El congelamiento a través del contacto.
3. La asfixia por saturación del aire.

El nitrógeno líquido ( $N_2$ ) es un líquido no agresivo con una temperatura de ebullición de  $-196^\circ C$ . Esa temperatura puede provocar lesiones en los tejidos semejantes a las quemaduras.

El  $N_2$  se evapora más o menos intensamente, según el grado de aislamiento del recipiente que lo contiene. Por esa razón el recipiente, termo o botella que lo contiene debe permitir la pérdida de los vapores. La explosión del contenedor es posible si está sellado en forma hermética o el orificio de salida de los gases está obturado por alguna razón. Si el  $N_2$  toma contacto con el aire puede condensarse el oxígeno del aire en el  $N_2$ .

Bajar la temperatura gradualmente de forma controlada y mantener la temperatura uniforme en todas las zonas de la cámara de congelamiento donde se encuentran las pajillas, es lo más importante en el proceso de congelamiento para lograr que todas las pajillas soporten las mismas condiciones.

Los métodos de congelamiento consiste en encontrar la una velocidad óptima de congelamiento [36].

Se han hecho diversas investigaciones para determinar la tasa óptima del congelamiento y sobre la adaptación de las curvas de enfriamiento inclusive para cada toro, pero ha habido muy poco progreso en el sentido práctico [36].

**Métodos de congelamiento:** El semen bovino se puede congelar sobre congeladoras de vapores estáticos, vapores de nitrógeno líquido o mediante el uso de congeladoras programables [36].

La mayoría de los trabajos publicados utilizan congeladores programables siguiendo el siguiente ritmo de congelamiento:

Ritmo 1:  $5^\circ C/min$  entre los  $+5^\circ C$  a  $-10^\circ C$ ; de  $-40^\circ C/min$  entre  $-10^\circ C$  a  $-100^\circ C$ ; de  $-20^\circ C/min$  entre los  $-100^\circ C$  a  $-140^\circ C$  (SCIEMPRESA, 2010) en esta misma bibliografía se encuentran otros 2

ritmos de congelamiento de  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  entre los  $+5^{\circ}\text{C}$  a  $-10^{\circ}\text{C}$ , y  $-40^{\circ}\text{C}/\text{min}$  entre los  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $-150^{\circ}\text{C}$  denominado ritmo 2 y un ritmo 3 de congelamiento más agresivo, de  $-60^{\circ}\text{C}/\text{min}$  entre  $+5^{\circ}\text{C}$  y  $-120^{\circ}\text{C}$ , transfiriendo luego a nitrógeno líquido [1], [11], [22], [23] y [36].

La Figura 1 presenta la respuesta de uno de los ritmos 1 de congelamiento, uno de los más utilizados, en ella se observa que partiendo de  $+5^{\circ}\text{C}$  tarda un tiempo aproximado de 3 min en alcanzar los  $-10^{\circ}\text{C}$  haciendo un recorrido de  $15^{\circ}\text{C}$  y una pendiente no tan prolongada. Luego entre  $-10^{\circ}\text{C}$  y se observa que la pendiente es mayor logrando recorrer  $90^{\circ}\text{C}$  en tan solo 2.25 min para alcanzar los  $-100^{\circ}\text{C}$  y para finalizar la pendiente se reduce logrando recorrer  $40^{\circ}\text{C}$  en un tiempo de 2 min.

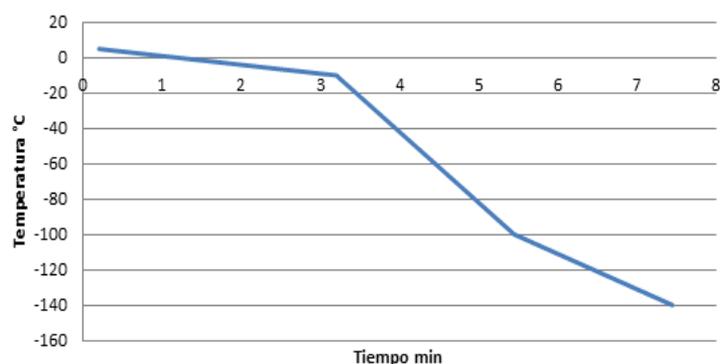


Figura 1. Ritmo de congelamiento más utilizado

- **Método de congelamiento actual en la región después del proceso de equilibrio o estilización del semen bovino**

Con ayuda del flujo-grama que se muestra a continuación Figura 2 se evidencia el proceso realizado actualmente para el congelamiento del semen bovino el cual es de forma manual, cabe mencionar que con el transcurrir del tiempo se ha mejorado el proceso.

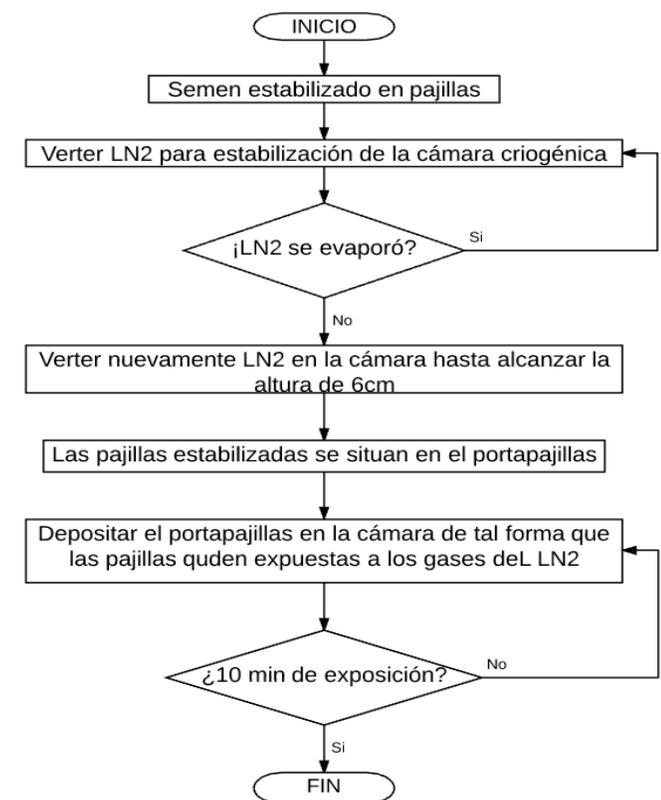


Figura 2. Proceso de congelamiento de semen bovino en el SENA centro agro- empresarial Aguachica Cesar

El proceso de congelamiento de semen bovino descrito en la Figura 2 comienza con la estabilización del semen envasado en pajillas de 0.5ml se identifican las siguientes fases:

**Estabilización térmica:** En la Figura 3 se observa el procedimiento de estabilización térmica de la cámara criogénica, el cual comienza vertiendo nitrógeno líquido dentro de esta, esto genera un choque térmico donde el nitrógeno líquido se evapora dejando así la cámara criogénica con la temperatura adecuada para verter nuevamente nitrógeno líquido y que no se evapore con la misma rapidez que el primer vertimiento.



Figura 3. Vertimiento del Nitrógeno Líquido a la cava para su estabilización y alcance de nivel deseado

**Verter nitrógeno líquido por 2ª vez:** El objetivo de la estabilización térmica es que con la temporización de la cámara el nitrógeno que se vierta por segunda vez alcance el nivel de 6 cm en la cámara y sirva para congelar de forma uniforme cada una de las pajillas sin sumergirlas, puesto que este proceso se lleva a cabo con el aprovechamiento de los gases que expulsa el nitrógeno (Ver Figura 4).



Figura 4. Después de verter varias veces nitrógeno líquido en la cava se alcanza en nivel deseado para el congelamiento

**Depositar el semen envasado en pajillas a la cámara:** Luego en un tiempo de más o menos 10 minutos, las pajillas se pueden depositar directamente al nitrógeno líquido sacando la porta pajilla para ser utilizada de nuevo y repetir el proceso de congelamiento para otras pajillas (Se debe revisar el nivel de nitrógeno con la regla, pues si no se cumple con los niveles ya estudiados, se verte más nitrógeno hasta que alcance el nivel deseado).



Figura 5. Depositando las pajillas estabilizadas a 4°C en el carro o portapajillas



Figura 6. Depositando las pajillas en la cava para su posterior congelamiento

La prueba del proceso de congelamiento se hace descongelando 2 o 3 pajillas tomadas al azar para ser analizadas en el microscopio.

Lo anterior conlleva a una variabilidad descontrolada de temperaturas que incrementa los índices de mortalidad de espermatozoides y aporta al desmejoramiento del semen.

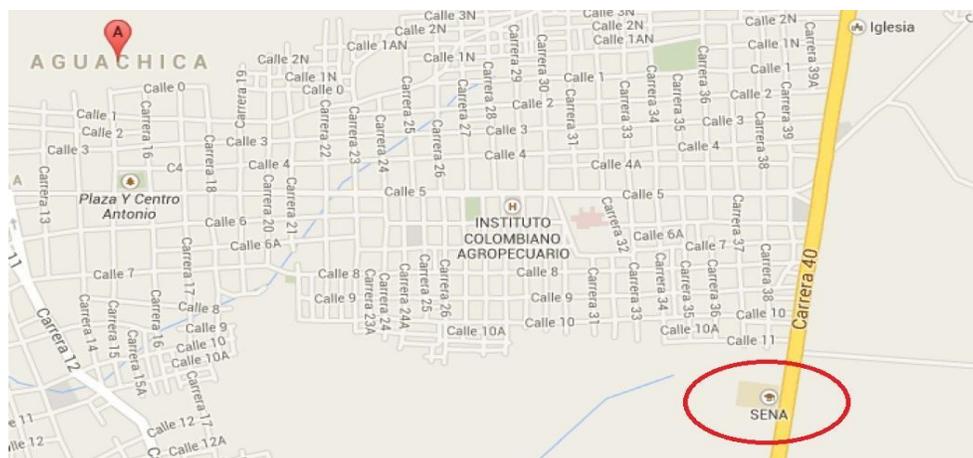


Figura 7. Ubicación centro Agro-empresarial SENA Aguachica Fuente: Google maps, 2016

En Argentina el departamento de ingeniería química, facultad de ingenierías, universidad de La Plata y centro de investigación y desarrollo de alimentos (CIDCA – CONICET) en el año 2014 se hizo un experimento donde se determinó de forma experimental los coeficientes de transferencia de calor de sistemas biológicos durante el enfriamiento en nitrógeno líquido bajo régimen de ebullición de la capa y nucleadas en recipientes [28], [30].

El proceso experimental que se llevó a cabo fue el siguiente:

Pajitas de plástico cilíndricas utilizadas para semen bovino criopreservación se obtuvieron de AB Technology, Inc., Pullman, Washington, EE.UU.). Los diámetros externo promedio, longitud y espesor eran  $D = 2.805\text{mm}$ ,  $L = 124\text{ mm}$ ,  $e = 0.21\text{mm}$ , respectivamente.

Para la determinación de los coeficientes de transferencia de calor superficial en la interfase de paja LN<sub>2</sub>, la paja se llenó de ultra-pura, ósmosis inversa de agua filtrada (Milli-Q, Milipore Corporation, MA, EE.UU.), que se congela a  $0 \pm 0.3^\circ\text{C}$ . La curva de tiempo-temperatura se registró usando un termopar de tipo T (Copper - Constantan) insertado en el eje central de la paja, que contiene agua pura inicialmente. La paja que contiene agua pura se agitó lentamente en vapor de nitrógeno sobre nitrógeno líquido en un tanque de Dewar para generar los cristales de hielo. En contraste con los experimentos realizados en el pasado para cables o tubos (Nukiyama, 1934, Drew y Mueller, 1937), en el caso de los dispositivos de criopreservación como pajillas francesas ni la temperatura o flujo de calor se puede controlar durante el experimento. El hielo ha conocido termofísicas propiedades en el rango de enfriamiento de  $-2$  a  $-194^\circ\text{C}$  (Choi y Okos, 1986; Choi y Bishof, 2010). Una vez que se completó la región de la meseta de congelamiento de la paja se

mantuvo en un termostática baño usando una solución de etileno glicol-agua (30 % v / v) a una temperatura por debajo de  $-2^{\circ}\text{C}$  y anterior  $-9^{\circ}\text{C}$ . Después de equilibrar la paja se hundió rápidamente en nitrógeno líquido utilizando los botes de Dewar. La ventaja de utilizar hielo en la paja es evitar los cambios de fase y de esta manera la muestra contenía hielo en la paja experimentada sólo de enfriamiento durante el intervalo de temperatura de  $-3^{\circ}\text{C}$  a  $-194^{\circ}\text{C}$ . El termopar se conectó a un dispositivo de adquisición (TESTO, Alemania). La Figura 8 muestra el recipiente Dewar con el Testo usado en los experimentos y cómo el termopar se acopló y se monta en la paja [28], [30].



Figura 8. Dewar recipiente lleno de LN2 y Testo Adquisición conectado a un PC

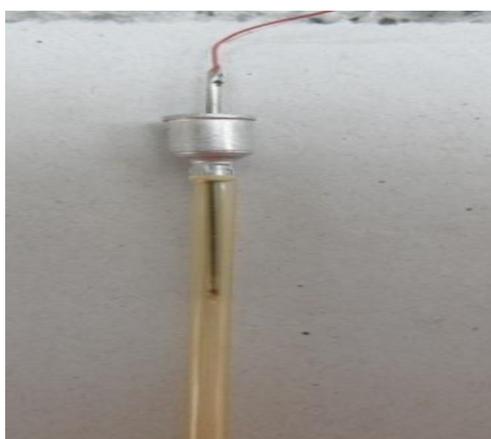


Figura 9 Straw inicialmente llena de agua pura con el termopar roscado en la aguja y montado en la pajita para evitar el movimiento radial durante el experimento

De este experimento se obtuvo un modelado del sistema. El sistema (paja de plástico y el material interno) puede ser descrito como dos cilindros finitos concéntricos de diferentes

sustancias: el material interno de ser hielo o células biológicas (semen + extensor) y la pajita de plástico. Las ecuaciones diferenciales parciales que representan la transferencia de calor en el líquido que se somete al proceso de congelamiento (Ec. 1) y el soporte de plástico (Ec. 2) teniendo en cuenta coordenadas radial y axial se han descrito a fondo en [28], [30] y son los siguientes:

$$\rho_s(T)Cp_s(T)\frac{\partial T}{\partial t}r = \frac{\partial}{\partial r}\left[K_s(T)r\frac{\partial T}{\partial r}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K_s(T)r\frac{\partial T}{\partial z}\right] \quad (Ec. 1)$$

$$\rho_pCp_p\frac{\partial T}{\partial t}r = \frac{\partial}{\partial r}\left[K_p r\frac{\partial T}{\partial r}\right] + \frac{\partial}{\partial z}\left[K_p r\frac{\partial T}{\partial z}\right] \quad (Ec. 2)$$

Dónde: T es la temperatura,  $\rho$  es la densidad, calor específico Cp, k la conductividad térmica.

Los subíndices s corresponden al hielo o fluido biológico y p al material plástico. Puede ser notado que el hielo y la suspensión biológica tienen propiedades térmicas que son dependientes de la temperatura debido a la presencia de la transición de cambio de fase. En el caso del soporte de plástico las propiedades termo-físicas ( $K_p, \rho_p, Cp_p$ ) se consideran constantes. El modelado del fluido biológico constituye un problema matemático altamente no lineal debido al cambio brusco de las propiedades térmicas con la temperatura durante la transición de cambio de fase [28],[30].

La condición inicial de temperatura se consideró uniforme en ambos materiales.

La condición de frontera de convección en el plástico de interfaz de soporte-LN2 es:

$$k_p \nabla T \cdot n = h(T_{wall} - T_{ext}) \quad (ec. 3)$$

Donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor de superficie,  $k_p$  es la conductividad térmica de plástico,  $T_{wall}$  es la variable de temperatura de la pared de superficie en el nitrógeno líquido soporte plástico interfaz,  $T_{ext}$  es la temperatura exterior (en este caso la temperatura de saturación de LN2 a presión atmosférica),  $n$  es el vector normal exterior, y  $\nabla T$  es el gradiente de temperatura evaluada en la superficie.

Se aplicó una malla triangular utilizando elementos de Lagrange de orden 2 para discretizar. El número de elementos que constituyen la malla para el fluido biológico y dominios de soporte de plástico eran 30656 y 23808, respectivamente [28], [30].

## **1.4 Objetivo General**

Desarrollar un sistema de automatización y control del congelamiento del semen bovino en el Centro Agro-empresarial SENA Aguachica, Cesar.

## **1.5 Objetivos Específicos**

- Determinar el comportamiento del proceso de congelamiento de semen bovino, identificando los niveles de las variables necesarios para llevar a cabo dicho proceso óptimamente.
- Seleccionar los elementos necesarios para el control, automatización e implementación del sistema.
- Modelar el sistema que satisfaga las condiciones dadas en un proceso de congelamiento y embale de semen bovino.
- Poner en marcha el sistema de automatización y control de congelamiento de semen bovino como prueba piloto para determinar la correcta funcionalidad del mismo.
- Validar el sistema de congelamiento de semen

## **1.6 Alcances y Limitaciones**

**1.6.1 Alcances.** El presente proyecto será puesto en marcha como prueba piloto para analizar los resultados obtenidos al congelar las pajillas, para ello se tomará una muestra significativa y se observará el resultado de mortalidad que debe ser inferior al 10% y el porcentaje de espermatozoides vivos debe superar el 90%.

**1.6.2 Limitaciones.** A continuación se describen algunas limitaciones:

**Operativa.** Para el diseño de la cámara criogénica no existía una estructura física que se

podiera adaptar a la misma, por tanto se hizo necesario hacer la estructura física.

Dificultades en la puesta en marcha de pruebas del sistema por desconocimiento en la manipulación del nitrógeno.

**Conceptual.** Existe poca documentación relacionada con el tema, por lo tanto se hace necesario el estudio detallado de cada uno de los estudios realizados para lograr tomar datos que resulten relevantes para esta investigación.

## 1.7 Metodología

A continuación se define la metodología a seguir para el desarrollo del sistema de automatización y control del congelamiento de semen.

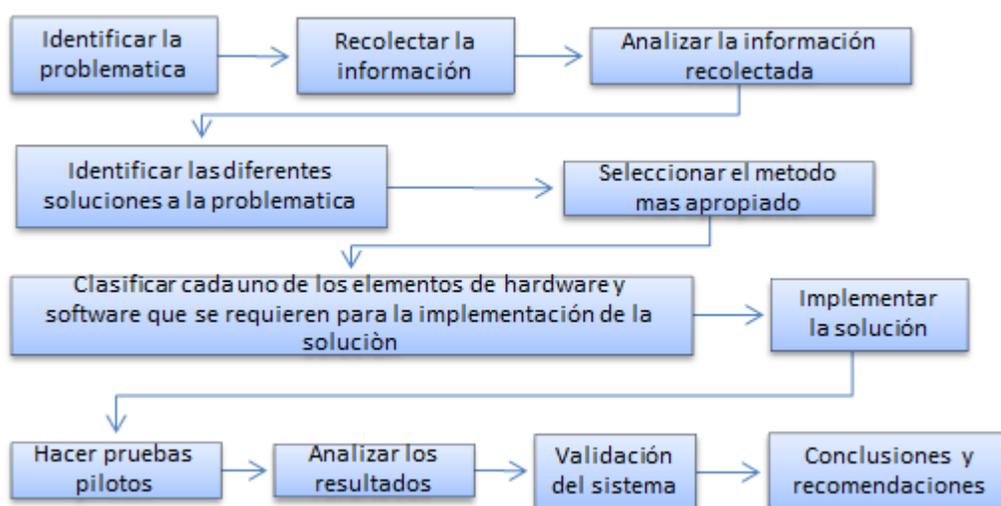


Figura 10. Metodología

## 1.8 Marco Conceptual

LN2

Nitrógeno líquido.

DEWAR

Recipiente diseñado para proporcionar aislamiento térmico.

## STRAW

Paja, pajuela, pajita o pajilla es el recipiente donde se deposita el semen para el proceso de congelamiento.

## TESTO AG

Empresa europea fabricante líder a nivel mundial de tecnología de medición fija y portátil.

## IA

Inseminación Artificial.

## NI

National Instruments.

## POLIESPAN

Conocido en Colombia como ICOPOR (Industria Colombiana de Porosos)

### **1.9 Técnicas y Criterios de Desarrollo**

En el segundo capítulo se presenta el estudio y determinación del comportamiento del proceso de congelamiento de semen bovino, identificando los niveles de las variables necesarios para llevar a cabo dicho proceso óptimamente.

En el tercer capítulo se presenta el estudio en forma detallada de las características de los recursos físicos necesarios para la implementación del sistema.

En el cuarto capítulo se presenta la descripción detallada del proceso de diseño e impresión en 3D del porta-pajillas (elementos donde se depositaran las pajillas para su congelamiento); en la primera parte se describirán las razones que se tuvieron en cuenta para llegar a definir el diseño; en la segunda parte se presentan detalladamente los cálculos que se aproximan para determinar el número de pajillas por área ya determinada; en tercer lugar se mostrarán los diseños del porta-pajilla en los software en 3D de AutoCAD, solid edge y SolidWorks con las imágenes de la respectiva impresión del diseño en material polímero.

El capítulo cinco presenta el estudio y descripción detallada para la determinación del calor latente de vaporización del nitrógeno líquido en presencia de flujo de corriente cero y diferente de cero que pasa por una resistencia; en la primera parte se harán pruebas en los montajes experimentales con fuente de alimentación apagada y encendida; en segundo lugar se tomará la data de la masa del conjunto vaso-nitrógeno líquido cada 20 segundos hasta llegar a 4 minutos; en tercer lugar se calcula cada tiempo de la masa de vapor ( $m_v$ ) de nitrógeno que sea formado y a si mismo se presenta una Tabla  $m_v$  frente al tiempo  $t$ , por último, se obtiene la identificación de la pendiente que mejor se ajuste a los datos experimentales para su posterior modelación y simulación.

En el capítulo seis se presenta en primer lugar, el estudio y desarrollo del controlador para el proceso de congelamiento del semen bovino; en él se muestran los beneficios de aplicar este tipo de control en los procesos de congelamiento de semen bovino, como también sus desventajas y limitaciones del mismo Por último se presentan los resultados con la aplicación desarrollada ya su vez, se describe una la interfaz de usuario gráfica para la supervisión del proceso.

## **2. Estudio y Determinación del Comportamiento del Proceso de Congelamiento de Semen Bovino, Identificando los Niveles de las Variables Necesarios para Llevar a cabo dicho Proceso Óptimamente**

### **2.1 Proceso de Congelamiento de Semen, Tratamiento Inicial y Proceso de Equilibrio**

Los procedimientos de tratamiento del esperma inmediatamente después de la recolección varían considerablemente, sobre todo los métodos de uso que han adaptado diferentes organizaciones como requisito para el control de enfermedades y los protocolos de exportación de semen. Muchos países exigen que el semen importado, deba ser tratado bajo un procedimiento de antibióticos como es el caso de la normatividad (84/407) exige tratar el semen de especies de toros con 4 diferentes antibióticos (Lincomicina, Espectinomina, Tilosina, Gentamicina) [36], [42].

Por los anteriores requisitos, los procedimientos varían entre las organizaciones que participan activamente en el comercio internacional de semen bovino.

El semen es usualmente diluido de 30°C a 37°C con un medio equilibrador que contiene todos los ingredientes básicos del diluyente de congelamiento. La tasa de dilución es de aproximadamente de 1:5 (semen/diluyente). Este procedimiento es necesario para proporcionar un medio tampón (reacciones químicas) para los espermatozoides [36], [42].

Una vez diluido el esperma es necesario permitir que este se estabilice, de modo que los espermatozoides estén bien protegidos durante el proceso de congelamiento y descongelamiento.

“Durante el equilibrado se produce un descenso de la temperatura del esperma desde los +20 - 30°C, hasta llegar a los +5°C, el cual debe realizarse a una velocidad uniforme y durante un periodo de 1,5 a 2 horas” [1], [11], [22], [23] y [36].

En Algunos trabajos en toros no se observan efectos significativos del tiempo de equilibrado, en relación a la motilidad pos-descongelado y la tasa de fertilidad, mientras que otros recomiendan, por lo menos, de 4-6 horas en el tiempo de equilibrado.

Resultados obtenidos por Dhamy y Shan, demuestran que por lo menos 2 horas de equilibrado a 5°C son esenciales para el congelamiento del semen bovino, obteniendo buenos resultados de fertilidad [1], [11], [22], [23] y [36].

Los doctores Kumar y *cols*, han investigado el tiempo de equilibrado en relación a la motilidad pos descongelado, encontrando mejores resultados cuando el semen era sometido a un periodo de 4 horas a 5°C.

Por su parte Ticiano y *cols* mencionan que el equilibrado durante el proceso de congelamiento es esencial para el mantenimiento de la motilidad y la integridad de la membrana plasmática, encontrando que el tiempo de equilibrado de 4 horas muestra la mayor viabilidad espermática, independientemente del tipo de diluyente.

## **2.2 Envasado del semen Bovino**

Existe escasa bibliografía sobre el método de envasado del esperma congelado - descongelado, sin embargo, hay algunos estudios en marruecos (Maxwell y *cols.*, 1995 tomado de [36]) que obtienen los mejores resultados de fertilidad con el esperma envasado en pellets. Aun así, la demanda de mercado hace que otros tipos de envases tomen una mayor importancia, como las pajuelas francesas selladas de 0.25 y 0.5 ml con alcohol de polivinilo o por ultrasonidos.

Los actuales métodos de envasado de semen de toros se realizan en mini pajuelas de 0,25 ml, aunque no se puede obviar que también se usan las mini pajuelas de 0,50 ml.

Estudios realizados por Clulow y *cols.* (2008), indican que en el congelamiento en pajuelas de 0,25 y 0,50 ml, no se observan diferencias significativas en los parámetros evaluados después de la criopreservación del semen [36].

Para el congelamiento de espermatozoides de carnero usando pajuelas de 0,5 ml, han sido reportadas mejoras de la motilidad pos descongelado, en comparación con pajuelas de 0,25 ml. (Maxwell y *cols.*, 1995). Estos autores plantearon la hipótesis de que la diferencia en el área de superficie, con la tasa de volumen entre los dos tamaños de pajueta, resulta en una tasa de congelamiento lenta para las pajuelas de 0,50 ml, lo que resulta beneficioso para los espermatozoides de carnero.

Cochran y *cols.* (1984) observan que los espermatozoides de caballo toleran una amplia gama de porcentaje de congelamiento, lo que sugiere que las pequeñas diferencias entre las tasa de congelamiento entre pajuelas de 0,25 y 0,50 ml, puede no contribuir a las diferencias de la viabilidad

pos-descongelado [36].

### **2.3 Métodos de Congelamiento**

El proceso de congelamiento de semen expone a las células espermáticas a una pérdida de agua y a un incremento de la concentración de solutos intra y extracelulares; la búsqueda de una velocidad optima de congelamiento para prevenir la formación de cristales intracelulares y minimizar el tiempo de exposición a la concentración de solutos, es un hecho de mucha relevancia, ya que de ello depende el éxito de un proceso de congelamiento.

La disminución de la temperatura debe realizarse de forma más o menos lenta, con el fin de mantener las características de las proteínas del plasma seminal que interaccionaran con las del núcleo espermático.

Un gran número de protocolos de congelamiento han sido desarrollados, debido principalmente a las diferencias observadas entre especies, sin que se haya determinado con exactitud una curva estándar. Esto se debe principalmente a que los resultados dependen de factores tales como diluyentes, crioprotectores, calidad seminal (parámetro altamente variable entre individuos), etc.

Aunque se han realizados considerables investigaciones para determinar “la tasa optima de congelamiento y la adaptación de las curvas de enfriamiento individuales para cada toro, ha habido muy poco progreso en el sentido práctico”. [36]

El semen de bovinos, puede ser preservado usando sistemas de congelamiento experimentales de exposición a gases de nitrógeno líquido o a través de los sistemas de congelamiento automatizados programables que puedan seguir un determinado ritmo de congelamiento. La mayor parte de los trabajos publicados en relación a la crio-preservación [1], [11], [22], [23] y [36] emplean sistemas de congelamiento automatizados programables a diferentes tasas de congelamiento (velocidad de descenso térmico) como se describe a continuación:

Velocidad de descenso de 5°C/min dentro de los parámetros de temperatura de los 5°C hasta los -10°C, de 40°C/min dentro de los parámetros temperatura de los -10°C hasta los -100°C y de 20°C/min dentro de los -100°C hasta los -140°C (Ver Figura 11).

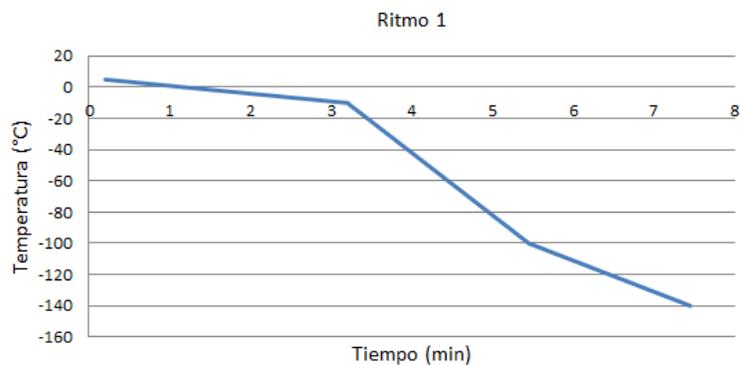


Figura 11. Ritmo 1 de congelamiento

Además, en la bibliografía se encuentran otras pautas de congelamiento, de  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  entre los  $+5^{\circ}\text{C}$  a  $-10^{\circ}\text{C}$ , y  $-40^{\circ}\text{C}/\text{min}$  entre los  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $-150^{\circ}\text{C}$ . Figura 12 [1], [11], [22], [23] y [36]

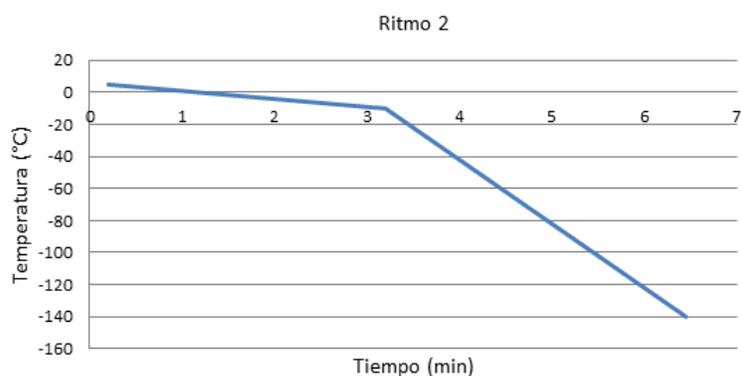


Figura 12. Ritmo 2 de congelamiento

Otros proponen un ritmo de congelamiento más agresivo, de  $-60^{\circ}\text{C}/\text{min}$  entre  $+5^{\circ}\text{C}$  y  $-120^{\circ}\text{C}$ , transfiriendo luego a nitrógeno líquido [1], [11], [22], [23] y [36] (Figura 13).

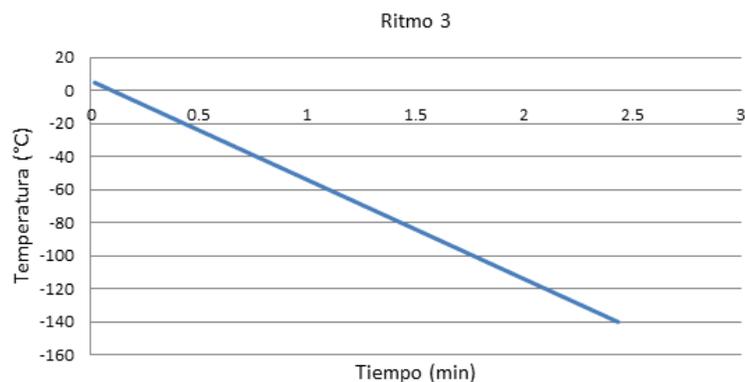


Figura 13. Ritmo 3 de congelamiento

En relación al congelamiento en vapores estáticos de nitrógeno, algunos centros aun lo siguen utilizando, aunque este sistema presenta grandes desventajas, ya que las muestras seminales están

sometidas a condiciones incontrolables de congelamiento.

Cuando el congelamiento se realiza sobre vapores de nitrógeno líquido, el ritmo de congelamiento varía según la altura a la que se colocan las pajuelas. En este tipo de congelamiento, la tasa de descenso de la temperatura oscila entre los 150°C/min y 300°C/min. Thum y cols. (2002) utilizan bajo este sistema, un ritmo de congelamiento de -150°C en 7 minutos, con buenos parámetros seminales pos-descongelado [36].

La ventaja de congelar en vapores estáticos es que todas las pajuelas en cualquier ciclo dado de congelamiento, están sujetas a las mismas tasas de enfriamiento, porque las pajuelas están colocadas a un solo nivel del nitrógeno líquido. En cambio, en los congeladores programables las pajuelas están colocadas en más de un nivel, y ello contribuye a considerables variaciones en la tasa de congelamiento [39].

El uso de vapores de nitrógeno líquido se hace mayormente en cajas de poliespan (poliestireno expandido (*EPS*)).

Este sistema es muy parecido al anterior. Las pajuelas son colocadas comúnmente a una altura de 4 cm sobre el nivel de nitrógeno, por un periodo de exposición de 10 minutos [3]. El ritmo de congelamiento depende exclusivamente de la distancia que existe entre las pajuelas y el nivel de nitrógeno, siendo por lo general de 60°C/min. Trabajos llevados a cabo por diferentes autores, como Cochran y cols.(1984), no han encontrado diferencias significativas en la motilidad pos-descongelado del semen a distancias variables sobre la superficie del nitrógeno líquido [36].

En la bibliografía se encuentra discrepancias entre autores, en lo que respecta al tiempo de exposición a vapores de nitrógeno líquido, así como la distancia de separación entre las pajuelas y la superficie del líquido. De esta forma, Tuli y Holtz (1992), citado por Hidalgo (2004), observan mejor viabilidad espermática cuando colocan las pajuelas a una distancia de 2 cm sobre la superficie del nitrógeno líquido durante 8-9 minutos. Para Vázquez y cols. (1998), el congelamiento en vapores de nitrógeno líquido debe realizarse durante al menos 10 minutos [3], [36].

### **3. Determinación de las Características de los Recursos Físicos Necesarios para la Implementación del Sistema**

#### **3.1 Marco Teórico y Selección de Dispositivos**

**Introducción:** En este capítulo y antes de comenzar el diseño se ha realizado una búsqueda de sensores que existan en el mercado de la región de influencia, con el fin de escoger el sensor apropiado que mejor se adapte a nuestros requerimientos.

**3.1.1 Sensores.** Los sensores de temperatura son dispositivos que transforman los cambios de temperatura en cambios en señales eléctricas que son procesados por equipo eléctrico o electrónico.

Existen tres tipos de sensores de temperatura donde se puede clasificar como los termistores, los RTD y los termopares.

En el mercado de nuestra región, fácilmente se consiguen los termopares y es de aclarar que

los termopares están de forma masiva en todos los campos de monitoreo de la variable térmica.

**3.1.2 Selección del tipo de sensor.** Seleccionar un sensor de temperatura puede ser muy sencillo y algunas veces difícil, pero siempre, el objetivo es de hacerlo bien. Esto es porque los sensores, especialmente para uso científico o para la ingeniería, pueden significar la diferencia entre mediciones repetibles o números disparados. El objetivo es medir con exactitud y con incertidumbres aceptables.

Se muestran los principales requisitos a considerar en la selección de termómetros:

**3.1.3 Alcance.** Determina que alcance es crítico para su operación, en este momento se selecciona según las escalas mínimas y máximas donde va a trabajar el sensor. Lo importante aquí es que cubra todo el alcance térmico que se va a trabajar.

**3.1.4 Exactitud.** La segunda más importante decisión. Al establecer los requisitos de exactitud del laboratorio o proceso, la inversión apropiada en el instrumento correcto puede eliminar los errores que se pasan a menudo por alto. La exactitud de un instrumento depende no solo de los resultados de la calibración sino de sus características físicas y metrológicas [24].

**Termómetros Patrón de Resistencia de Platino (SPRT)** por su precisión de medida están especificados para uso de laboratorio

**Termómetros de Resistencia (RTD y PRT) Industriales.** Ofrecen grandes beneficios por su exactitud y estabilidad. Las tolerancias de temperatura especificadas en la norma IEC-751 para sensores industriales se clasifican en clase A y B, para mayores precisiones se utilizan tolerancias de 1/3 y 1/10 DIN.

**Termómetros de Termopar (TC).** Tienen un alcance de temperatura muy amplio, sin embargo la precisión es limitada. Los errores máximos de los diferentes tipos de termopares se clasifican en clase a y clase 2.

**Termistores:** Ofrecen grandes beneficios cuando se requieren de alta resolución sobre un reducido alcance.

**3.1.5 Tipo de medición:** Normalmente se pueden realizar mediciones por inmersión (líquidos

y gases) y en superficie.

El principal problema en mediciones de temperatura superficial viene por conseguir el equilibrio térmico entre la superficie a medir y el sensor.

Las mediciones por inmersión presentan menos problemas, por esto, se tiene que asegurar de una longitud correcta de inmersión; en líquidos entre 8 y 10 veces el diámetro del sensor y para gases de 10 a 15 veces el diámetro.

### **Sensores de temperatura en superficie**

#### **- Sin contacto**

Pirómetros infrarrojos

Pirómetros ópticos

Radiación

#### **- Contacto**

Termopares

Termómetros de resistencias

Indicadores de calor y crayones

#### **- Medición de inmersión**

#### **Gas**

Termómetros de resistencia

Termopares

Bimetálicos

#### **Líquido**

Termómetros de resistencia

Termopares

Líquido de vidrio

Bimetálicos

Actuados por gas

### Sólidos

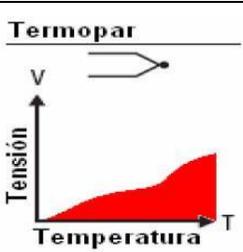
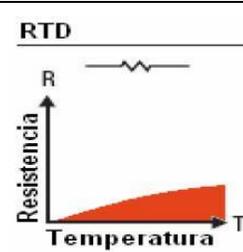
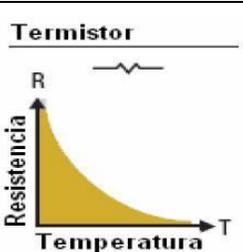
Termómetros de resistencia

Termopares

Bimetálicos

Actuados por gas

Tabla 1. Ventajas y desventajas de tipos de sensores

Termopar	RTD	Termistor
		
<b>VENTAJAS</b> Rango $-270...+1\ 800\ ^\circ\text{C}$ Sencillo Robusto, resistencia a vibraciones y golpes Económico Amplia variedad de formas físicas Gran rango de temperatura	<b>RTD</b> Rango $-260...+850\ ^\circ\text{C}$ Muy estable Amplio alcance de temperatura Buena exactitud Mejor linealidad que el termopar Mejor deriva que el termopar	<b>Termistor</b> Rango $-80...+150\ ^\circ\text{C}$ Tiempo de respuesta rápida Medición a 2 hilos Cambios grandes de resistencia vs. Temperatura Pequeños Baratos Buena estabilidad
<b>DESVENTAJAS</b> No lineal Baja tensión Requiere compensación en la unión fría Baja sensibilidad Baja estabilidad	<b>RTD</b> Caro Frágil, sensible a vibraciones y golpes Tiempo de respuesta lento Requiere fuente de corriente Cambios pequeños de resistencia Para precisión requiere medir a 4 hilos	<b>Termistor</b> No lineal Requiere fuente de corriente Alcance de temperatura limitado Frágil

El termopar por su rango de operación, sencillez, sensibilidad aceptable, robusta, común y económica se selecciona para esta investigación [31].

### **3.1.6 Tipos de termopares o termocuplas. Hay siete tipos de termocuplas que tienen designaciones con letras elaboradas por el Instrument Society of America (ISA).**

**Tipo B ( PtRh 30% - PtRh 6%).** Las ventajas de la termocupla Tipo B sobre la Tipo R o Tipo S son su capacidad para medir temperaturas levemente más altas, su mayor estabilidad y resistencia mecánica, y su aptitud de ser utilizada sin compensación de junta de referencia para fluctuaciones normales de la temperatura ambiente. Las termocuplas Tipo B resultan satisfactorias para uso continuo en atmósferas oxidantes o inertes a temperaturas hasta 1.700° C. También resultan satisfactorias durante cortos períodos de tiempo en vacío.

Las desventajas de la termocupla Tipo B son su baja tensión de salida y su incapacidad para ser utilizada en atmósferas reductoras (como ser hidrógeno o monóxido de carbono) y cuando se encuentran presentes vapores metálicos (eso es, de plomo o zinc) o no metálicos (eso es, de arsénico, fósforo o azufre).

**Tipo R (PtRh 13% - Pt).** Las termocuplas Tipo R pueden ser utilizadas en forma continua en atmósferas oxidantes o inertes hasta 1.400° C. No son tan estables como las Tipo B en vacío. La ventaja de la termocupla Tipo R sobre la Tipo B es su mayor fem de salida.

Se aplican las siguientes limitaciones al uso de las termocuplas Tipo R:

Nunca se las deben usar en atmósferas reductoras, ni tampoco en aquellas que contienen vapores metálicos o no metálicos u óxidos fácilmente reducidos, a menos que se las protejan adecuadamente con tubos protectores no metálicos.

**Tipo S (PtRh 10 % - Pt).** La termocupla Tipo S es la termocupla original platino-rodio. Es el estándar internacional para la determinación de temperaturas entre el punto de solidificación del antimonio 630,74° C y el punto de solidificación del oro 1.064,43° C.

Las termocuplas Tipo S, igual que las Tipo R, pueden ser utilizadas en forma continua en atmósferas oxidantes o inertes hasta 1.480° C. Tienen las mismas limitaciones que las termocuplas Tipo R y Tipo B y también son menos estables que la termocupla Tipo B cuando se las utiliza en vacío.

**Tipo J (Fe - CuNi).** La termocupla Tipo J es la conocida como la termocupla hierro -

constantán. El hierro es el conductor positivo, mientras que para el conductor negativo se recurre a una aleación de 55 % de cobre y 45 % de níquel (constantán).

Las termocuplas Tipo J resultan satisfactorias para uso continuo en atmósferas oxidantes, reductoras e inertes y en vacío hasta 760° C. Por encima de 540° C, el alambre de hierro se oxida rápidamente, requiriéndose entonces alambre de mayor diámetro para extender su vida en servicio. La ventaja fundamental de la termocupla Tipo J es su bajo costo.

Las siguientes limitaciones se aplican al uso de las termocuplas Tipo J: No se deben usar en atmósferas sulfurosas por encima de 540° C.

A causa de la oxidación y fragilidad potencial, no se las recomienda para temperaturas inferiores a 0° C.

No deben someterse a ciclos por encima de 760° C, aún durante cortos períodos de tiempo, si en algún momento posterior llegaran a necesitarse lecturas exactas por debajo de esa temperatura.

**Tipo K (NiCr Ni).** La termocupla Tipo K se la conoce también como la termocupla Chromel-Alumel (marcas registradas de Hoskins Manufacturing Co., EE.UU.). El Chromel es una aleación de aproximadamente 90% de níquel y 10% de cromo, el Alumel es una aleación de 95% de níquel, más aluminio, silicio y manganeso. La Tipo K es la termocupla que más se utiliza en la industria, debido a su capacidad de resistir mayores temperaturas que la termocupla Tipo J.

Las termocuplas Tipo K pueden utilizarse en forma continua en atmósferas oxidantes e inertes hasta 1.260° C y constituyen el tipo más satisfactorio de termocupla para uso en atmósferas reductoras o sulfurosas o en vacío.

**Tipo T (Cu - CuNi).** La termocupla Tipo T se conoce como la termocupla de cobre constantán. Resulta satisfactoria para uso continuo en vacío y en atmósferas oxidantes, reductoras e inertes. Su desventaja reside en el hecho de que su límite máximo de temperatura es de tan sólo 370° C para un diámetro de 3,25 mm.

**Tipo E (NiCr - CuNi).** La termocupla Tipo E, o Chromel-constantán, posee la mayor fem de salida de todas las termocuplas estándar. Para un diámetro de 3,25 mm su alcance recomendado es - 200° C a 980° C.

Estas termocuplas se desempeñan satisfactoriamente en atmósferas oxidantes e inertes, y resultan particularmente adecuadas para uso en atmósferas húmedas a temperaturas subcero a raíz de su elevada fem de salida y su buena resistencia a la corrosión. La termocupla Tipo E es mejor que la Tipo T, para este propósito a causa de su mayor salida y puesto que la conductividad térmica del alambre de Chromel es menor que la del alambre de cobre de la termocupla Tipo T [24], [31].

Codigo ANSI	Aleación		Codigo de Colores		Rango de Temp. Usado	Rango en mV Generado
	Positivo (+)	Negativo (-)	Termocupla	C. Compensado		
J	Hierro (Fe)	Constantan Cobre-Niquel Cu-Ni			0 °C a 750 °C	-8,095 a 69,553
K	Cromel Ni-Cr Niquel- Cromo	Niquel Aluminio Ni-Al			-200 °C a 1200 °C	-6,458 a 54,886
T	Cobre (Cu)	Constantan Cobre-Niquel Cu-Ni			-200 °C a 350 °C	-6,528 a 20,872
E	Cromel Niquel- Cromo Ni-Cr	Constantan Cobre-Niquel Cu-Ni			-200 °C a 900 °C	-9,835 a 76,373
R	Platino 13% Rhodio Pt-Rh	Platino (Pt)	No Establecido		0 °C a 1450 °C	-0,226 a 21,101
S	Platino 10% Rhodio Pt-Rh	Platino (Pt)	No Establecido		0 °C a 1450 °C	-0,236 a 18,893

Figura 14 Tipos de termocuplas

Ecuaciones de conversión de temperaturas

$$\text{Desde } ^\circ\text{C a } ^\circ\text{F} = (1.8 \times ^\circ\text{C}) + 32$$

$$\text{Desde } ^\circ\text{F a } ^\circ\text{C} = (^\circ\text{F} - 32) \times 0.555$$

$$\text{Desde } ^\circ\text{C a Kelvin} = ^\circ\text{C} + 273.2$$

$$\text{Desde } ^\circ\text{F a } ^\circ\text{Rankin} = ^\circ\text{F} + 459.67$$

En esta investigación se trabajara con temperaturas muy bajas alrededor de los  $-150\text{ }^\circ\text{C}$  y máximo  $5\text{ }^\circ\text{C}$  que es la temperatura de estabilización e inicio del congelamiento, se seleccionaron los termopares tipo K, tipo T y Tipo E. Cualquiera que se use, puede servir pero la más común seria la tipo K y es lo disponible en el comercio actual y a la hora de remplazarla hay que esperar [24], [31].

**3.1.7 Software.** El tipo de software utilizado en el proyecto fue un software de lenguaje de programación gráfico para el desarrollo de aplicaciones de pruebas, adquisición, control y medidas.

NI LabVIEW ofrece un lenguaje de programación gráfico diseñado para ingenieros y científicos para desarrollar aplicaciones de pruebas, control y medidas. La naturaleza intuitiva de la programación gráfica de LabVIEW lo hace fácil de usar por investigadores para incorporar el software a varias aplicaciones y en especial para este proyecto.

Este software en nuestra región de influencia es común y sobre todo en el centro agroempresarial SENA Aguachica y Tecnoparque Ocaña que son las entidades que se han integrado a este proyecto, su soporte técnico es excelente, reduce el tiempo de desarrollo, integra fácilmente tecnologías hardware de alta resolución para la adquisición de datos, control y análisis de señal. Labview ofrece un completo módulo de adquisición de datos y control llamado DAQ.

**3.1.8 Hardware de adquisición.** Se utilizó la tecnología que proveen las instituciones como tecnoparque nodo Ocaña y del centro agroempresarial SENA Aguachica de la región Cesar. Estas instituciones cuentan con tarjetas de adquisición de datos de alta resolución como la NI 9211 de National Instrument que es un módulo de entrada de termopares J, K, T, E, N, B, R y S de cuatro canales con resolución de 24 Bit. Por medio de esta tarjeta se adquirirán los datos de temperatura obtenido desde el sensor termopar.



Figura 15. Tarjeta de adquisición de datos NI 9211

Esta tarjeta de adquisición de datos para su funcionamiento necesita un chasis de alojamiento modular, en nuestro caso se utilizó el NI cCompactDAQ NI cDAQ-9174 USB robusto de cuatro ranuras para cuatro módulos de adquisición y/o control provisto por Tecnoparque nodo Ocaña.



Figura 16. Chasis NI cDAQ 9174

**3.1.9 Hardware control de flujo neumático.** El módulo Burkert fluid control systems actúa como elemento de control de flujo de aire. Este módulo está conformado por la electroválvula proporcional tipo 6223 conector tipo A y el módulo electrónico, tipo 8605 de control digital de válvulas proporcionales Burkert, con un intervalo máximo comprendido entre 40 - 2000 mA.

El módulo electrónico de control transforma la señal externa estándar en una señal de tensión modulada en ancho de pulso (PWM), que se suministra a la bobina del solenoide de la válvula proporcional. Por lo tanto, al valor de cada señal de entrada se le asigna un valor determinado de la corriente media de la bobina. La apertura proporcional de la válvula puede ajustarse a través de la corriente de la bobina [9].

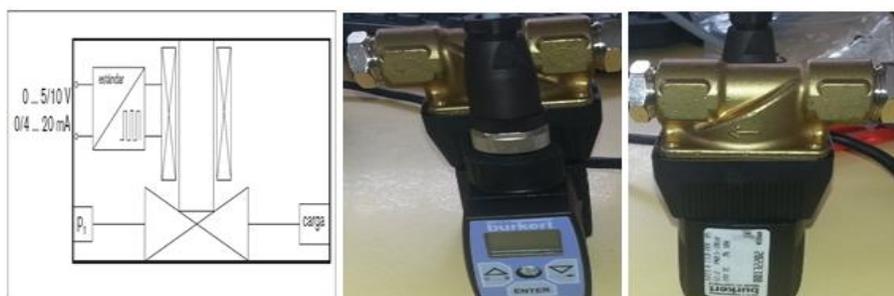


Figura 17 Electroválvula 6223 y modulo tipo 8605 controlador digital

Se utilizó la tecnología que proveen las instituciones como tecnoparque nodo Ocaña y del centro agroempresarial SENA Aguachica de la región Cesar. Estas instituciones cuentan con tarjetas de adquisición de datos de alta resolución como la NI 9263 de National Instrument que es un módulo de salida analógica de  $\pm 10V$  de canales con una resolución de 16 bits. Por medio de la tarjeta NI 9263 es que se alimenta la señal estándar de la electroválvula para su posterior control.



Figura 18. Diagrama a bloques del sistema de adquisición y control

El nitrógeno líquido (LN2) para el proceso de criopreservación se obtuvo del Centro Agroempresarial SENA Aguachica regional Cesar, este líquido es acopiado en tanques de almacenamiento criogénico.

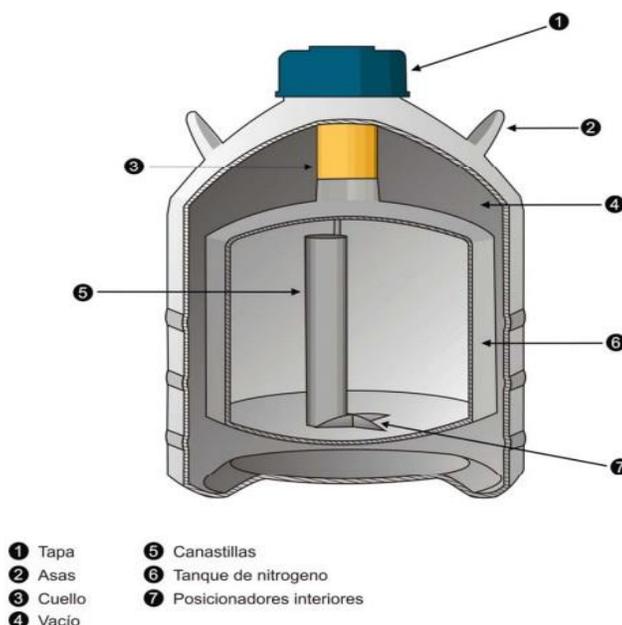


Figura 19. Corte esquemático de un termo criogénico usado para el almacenamiento de semen en la inseminación artificial [35]

Para el sistema se reciclo un tanque que ya previamente estaba roto, dado de baja por la institución, el tanque es de las siguientes características:

Tanque Criogénico marca MVE MODELO Apollo SX 18 con capacidad de 35 Litros de 63.5cm de altura, una apertura del cuello del tubo de 5 cm, diámetro exterior de 35.56 cm, tiempo de mantenimiento estático en días de 227 y con una tasa de evaporación estática de 0.09 (L/día).

**3.1.10 Hardware cámara criogénica.** El tanque descrito anteriormente y que se muestra en Figura 20 es el que se utilizó como cámara criogénica del proyecto donde se adecuó en el taller

de soldadura del Centro-Agroempresarial SENA Aguachica por el Instructor del área Cesar Tulio Caselles donde se procedió a hacer los cortes, alinear los mismos tanto del termo interno como del externo en tornos para que calzaran perfectamente. Se le adaptaron unos cauchos de puerta de automovil especificamente del Renault Clio para que la camara quedara hermetica, un serpentín que recorre todo el cuerpo del tanque para la distribución uniforme del frio (Ver Figura 21).



Figura 20. Tanque que se utilizó como cámara criogénica

Debido a que el tanque fue cortado para su adecuación, todo el aislante que separa a la cámara interior (donde finalmente es depositado el nitrógeno) de la externa para su aislamiento térmico fue removido y remplazado por un basado con polietileno rígido que lo componen dos químicos que son el polioliol y diisocianato. Estos químicos se mezclan en los siguientes porcentajes:

Polioliol 60% diisocianato 40% el aislante queda rígido poroso aislando en menor medida

Polioliol 40% diisocianato 60% el aislante queda rígido menos poroso aísla en mayor medida.

Para el proyecto se utilizó (Polioliol 40% diisocianato 60%) por que ofrece mejor aislamiento térmico de tal forma que el termo externo no se enfría.

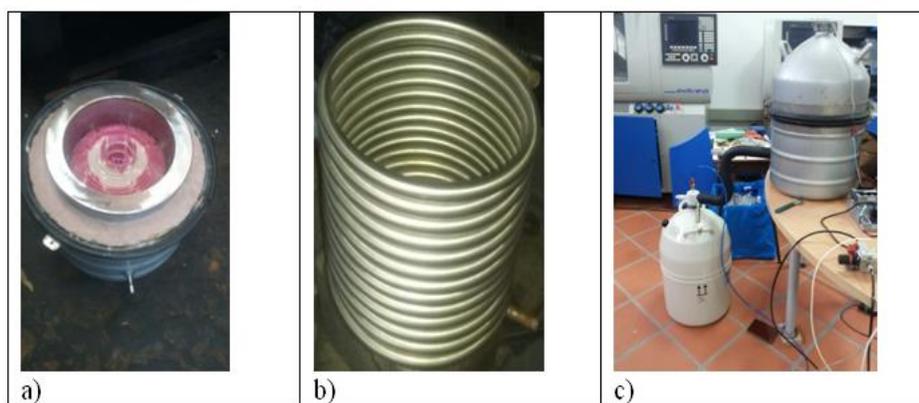


Figura 21. a) Tanque adecuado para ser cámara criogénica, b) Serpentín para la distribución uniforme de frío, c) Tanque listo para las primeras pruebas

**3.1.11 Pajillas (Pajuela, pajitas o pitillos plásticos).** El semen es empacado en pequeños pitillos plásticos, conocidos como pajillas, que vienen en dos tamaños, de 0.55 c.c o 0.25 c.c y son marcadas con el código del toro, su número de registro y su nombre, además de fecha en que fue colectado. La impresión se realiza con impresoras de tinta "ink jet" especiales que aseguran que la información no se borre fácil [35].

Las Pajitas de plástico cilíndricos utilizados para semen bovino criopreservación se obtuvieron del Centro Agroempresarial SENA Aguachica regional Cesar). Los diámetros externos promedio, longitud y espesor eran  $D = 2.805\text{mm}$ ,  $L = 124\text{ mm}$ ,  $e = 0.21\text{mm}$ , respectivamente, en el mercado son conocidas como pajillas de 0.5cc [38].



Figura 22. Pajitas utilizadas para empacado el semen bovino

Es conveniente aclarar que hay publicado un artículo titulado “*Sabe usted ¿por qué se decidió comercializar pajillas de 0.25cc en lugar de la pajilla convencional de 0.50cc en el semen bovino?*” por los MVZ José Vergara y Carlos I Ortiz Espinosa en Julio del 2009 donde se plasma los resultados del uso de la pajilla de 0.25cc frente a la pajilla tradicional de 0.5cc. Las ventajas de la pajilla 0.25cc son innegables reportando una mayor fertilidad. Este comenzó en el año 2005

cuando un grupo de científicos reportan sus resultados acerca de los beneficios de usar la pajilla más pequeña, dicho trabajo se encuentra publicado en la revista científica de *Theoriology* y por el *USDA*. La pajilla de 0.25cc es el envase que hace que cada espermatozoide cuente, el concepto es muy simple; las pajillas de 0.25cc contiene el mismo número de espermatozoides que la de 0.50cc, pero más concentrados. Adicionalmente, la pajilla de menor diámetro y con mayor porcentaje de su volumen en contacto con la superficie, hace que el proceso de congelado y descongelado sea más rápido. El beneficio es que se logra un menor daño interno. En general, la motilidad post descongelado es mejor con las pajillas de 0.25cc. El resultado es un pequeño pero significativo incremento en el porcentaje de preñeces [38].

Un reciente estudio en Estados Unidos, realizado por el Dr. M.T. Kaproth et al., en el 2005, publicado en la revista científica "*Reproduction, fertility and development*" donde se monitoreo a un grupo de inseminadores que realizó 11,215 servicios durante un período de 16 meses en 4 establos comerciales. El estudio midió el efecto del descongelado del semen en las 4 estaciones del año y su interacción con los distintos establos, inseminadores, tamaño del envase y concentración espermática de las pajillas utilizadas en dichos establos. Concluyo que "El descongelado del semen en las 4 estaciones del año no tiene un impacto significativo sobre la concepción, sin embargo el tamaño de la pajilla afecta la tasa de concepción significativamente". La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos en establos de Estados Unidos.

Las pajillas de 0.25cc, según el Dr. Kaproth y colaboradores se traducen en:

1. Mayor concentración espermática viable por un menor daño a los espermatozoides durante el proceso de congelado y descongelado.
2. Mejor tolerancia por el útero.
3. Mayor fertilidad y más preñeces [38].

Tabla 2. Datos de fertilidad y preñez Fuente: Según el Dr. Kaproth.

Numero de vacas	Detección de celo	Ganancia por la fertilidad pajilla de 0.25cc	Aumento en la tasa de preñez	Beneficio económico
250	60%	1.5%	1%	\$ 1,500
500	60%	1.5%	1%	\$ 3,000
1000	60%	1.5%	1%	\$ 6,000
2000	60%	1.5%	1%	\$ 12,000

**3.1.12 Hardware portacajillas.** La pajitas cuando ya están estabilizadas actualmente son puestas encima de un carro o llamado portapajillas para su posterior congelamiento con vapores de nitrógeno.

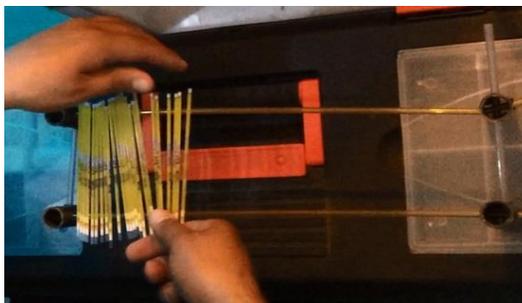


Figura 23. Portapajillas usado actualmente para el congelamiento de semen bovino

Para el sistema de control de congelamiento de semen bovino se diseñó un portapajillas más práctico y de mayor capacidad de portar pajillas, el anterior tenía capacidad máxima de 100 (cien) pajillas y la que se diseñó y utilizó para el diseño del sistema de congelamiento es circular y tiene la capacidad máxima de 1028 pajillas.



Figura 24. Portapajillas diseñado

Este portapajillas está constituido por 13 anillos independientes móviles donde se puede adecuar su uso según el número de pajillas a congelar, dependiendo del número de pajillas se usará un número determinado de anillos, tiene un diámetro máximo de 20 cm.



Figura 25. Vista del portapajillas en él se observan los anillos, 1) Anillo, 2) Orificio para depositar la pajilla, 3) Pajilla depositada

El primer, segundo y tercer anillo (de afuera a adentro) con diámetros de 20, 19, 18 cm

respectivamente está constituido por ocho secciones con una distribución de 15 y 14 pajillas intercaladas sumando un total de 116 pajillas.

Los anillos cuatro, cinco, seis y siete constan de diámetros 16.5, 16, 14, 13 cm de ocho secciones de 12, 12, 11 y 10 con un número de pajillas de 96, 96, 88 y 80 respectivamente.

Los anillos ocho, nueve, diez, once, doce y trece constan de diámetros de 12, 11, 10, 9.5, 8.5, 7.3, y 6.3 cm de cuatro secciones de 19, 18, 14, 11, 10 y 9 con un número de pajillas de 76, 72, 56, 44, 40 y 36 respectivamente.



Figura 26. Imagen del portapajillas desensamblado por anillos individuales

**3.1.13 Diseño portacajillas.** Para el diseño del portapajillas se tuvo en cuenta la forma, medidas de la cámara criogénica y volumen de la pajilla para el grosor de los anillos y número de pajillas por cada sección. Cabe entender que no existe un diseño establecido por lo cual se basó en los parámetros básicos anteriormente mencionados y pensando en el tipo de personal que van a manipular el dispositivo, la practicidad para su uso y número de pajillas.

En este diseño fue fundamental el apoyo de Tecnopaque nodo Ocaña en la línea de diseño e ingeniería liderada por la ing. July Andrea Gómez Camperos gestora de la línea de electrónica y telecomunicaciones donde se dispuso al servicio del proyecto el personal idóneo, software, hardware y herramientas necesarias. Se usó la herramienta software CAD 3D Solidworks donde se diseñaron y simularon las diferentes piezas por medio de croquis, instrucción y cortes, hardware como la impresora 3D de material polímero donde se hacen realidad los diseños. La Figura 27 muestra en la simulación de la deformación de los anillos modulares a las diferentes fuerzas extremas a las que podría ser expuesta y la Figura 28 muestra la impresora 3D utilizada para la elaboración del portapajillas diseñado.

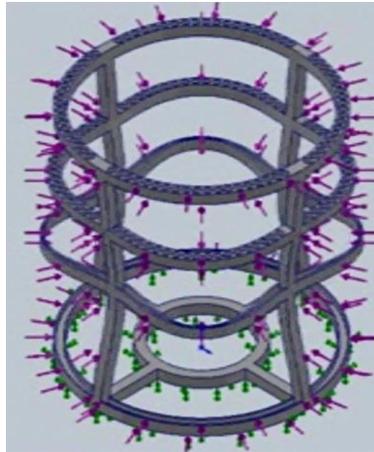


Figura 27. Simulación software SolidWork



Figura 28. Impresora 3D

## **4. Modelamiento del Sistema que Satisfaga las Condiciones dadas en un Proceso de Congelamiento y Embale de Semen Bovino**

**Introducción.** En instrumentación y control, se emplea un sistema especial de símbolos con el objeto de transmitir de una forma más fácil y específica la información. Esto es indispensable en el diseño, selección, operación y mantenimiento de los sistemas de control.

Un sistema de símbolos ha sido estandarizado por la ISA (Sociedad de Instrumentistas de América). La siguiente información es de la norma: ANSI/ISA-S5.1-1984(R 1992).

Las necesidades de varios usuarios para sus procesos son diferentes. La norma reconoce estas necesidades, proporcionando métodos de simbolismo alternativos. Se mantienen varios ejemplos agregando la información o simplificando el simbolismo, según se desee.

Los símbolos de equipo en el proceso no son parte de esta norma, pero se incluyen para ilustrar aplicaciones de símbolos de la instrumentación.

### **4.1 Aplicación en la Industria**

La norma es conveniente para el uso en la química, petróleo, generación de poder, aire acondicionado, refinando metales, y otros numerosos procesos industriales.

Ciertos campos, como la astronomía, navegación, y medicina, usan instrumentos muy especializados, diferentes a los instrumentos de procesos industriales convencionales. Se espera que la norma sea flexible, lo bastante para encontrarse muchas de las necesidades de campos especiales.

### **4.2 Aplicación en Actividades de Trabajo**

La norma es conveniente para usar siempre cualquier referencia de un instrumento o de una función de sistema de control se requiere para los propósitos de simbolización e identificación. Pueden requerirse tales referencias para los usos siguientes, así como otros:

- Bocetos del plan
- Ejemplos instrucción
- Papeles técnicos, literatura y discusiones

- Diagramas de sistemas de instrumentación, diagramas de vuelta, diagramas lógicos
- Descripciones funcionales
- Diagramas de flujo: Procesos, Mecánicos, Ingeniería, Sistemas, que Conduce por tuberías (el Proceso) e instrumentación
- Dibujos de construcción
- Especificaciones, órdenes de compra, manifiestos, y otras listas
- Identificación (etiquetando) de instrumentos y funciones de control
- Instalación, operación e instrucciones de mantenimiento, dibujos, y archivos

Se piensa que la norma proporciona la información suficiente para habilitar a cualquiera de los documentos del proceso de medida y control (quién tiene una cantidad razonable de conocimiento del proceso) para entender los medios de medida y mando del proceso. El conocimiento detallado de un especialista en la instrumentación no es un requisito previo a esta comprensión.

**4.2.1 Aplicación a clases de instrumentación y funciones de instrumentos.** El simbolismo y métodos de identificación proporcionados en esta norma son aplicables a todas las clases de medida del proceso e instrumentación de control. Ellos no sólo son aplicables a la descripción discreta de instrumentos y sus funciones, pero también para describir las funciones análogas de sistemas que son "despliegue compartido," "control compartido", "control distribuido" y "control por computadora".

Definiciones para un mejor entendimiento de la norma, se tienen las siguientes definiciones

Tabla 3. Definiciones

<b>Definiciones</b>	
<b>Accesible</b>	Este término se aplica a un dispositivo o función que puede ser usado o visto por un operador con el propósito de controlar el desempeño de las acciones de control; como ejemplo: cambios en el set-point, transferencia auto-manual o acciones de encendido y apagado.
<b>Alarma</b>	Es un dispositivo o función que detecta la presencia de una condición anormal por medio de una señal audible o un cambio visible discreto, o puede tratarse de ambas señales al mismo tiempo, las cuales tienen el fin de atraer la atención.
<b>Asignable</b>	Este término se aplica a una característica que permite el cambio (o dirección) de una señal de un dispositivo a otro sin la necesidad de la activación de un switch o algún otro elemento.
<b>Estación auto-manual</b>	Término empleado como sinónimo de estación de control.
<b>Balón</b>	Se emplea como sinónimo de burbuja.
<b>Detrás del panel</b>	Este término se refiere a la posición de un instrumento, el cual ha sido montado en un panel de control, pero no es normalmente accesible al operador.

<b>Definiciones</b>	
<b>Binario</b>	Término aplicado a una señal o dispositivo que tiene solo dos posiciones o estados discretos. Cuando es usado en su forma más simple, como en “señal binaria” (lo que es opuesto a señal analógica), el término denota un estado de “encendido-apagado” o de “alto-bajo”.
<b>Board</b>	Término en inglés el cual se interpreta como sinónimo de panel.
<b>Burbuja</b>	Símbolo circular usado para denotar e identificar el propósito de un instrumento o función. Puede contener una etiqueta con un número. Es también un sinónimo de balón.
<b>Dispositivo computable o de cómputo</b>	Dispositivo o función que emplea uno o más cálculos u operaciones lógicas, o ambas, y transmite uno o más resultados a las señales de salida.
<b>Configurable</b>	Término aplicado a un dispositivo o sistema cuyas características funcionales pueden ser seleccionadas a través de un programa o de otros métodos.
<b>Controlador</b>	Dispositivo con una salida que varía para regular una variable de control de una manera específica. Un controlador manual varía su salida automáticamente en respuesta a una entrada directa o indirecta de un proceso variable. Un controlador manual es una estación manual de carga y su salida no depende de una medida de un proceso variable pero puede variarse solamente por medio de un procedimiento manual.
<b>Estación de control</b>	Una estación de carga manual que también proporciona un control en el cambio de manual a automático de los modos de control dentro de lazo de control, a ésta también se le conoce como estación auto-manual.
<b>Válvula de control</b>	Es un dispositivo, el más comúnmente usado, que actúa manualmente o por sí mismo, que directamente manipula el flujo de uno o más procesos.
<b>Convertidor</b>	Es un dispositivo que recibe información en determinada manera de un instrumento y transmite una señal de salida en otra forma. Un convertidor es también conocido como <i>transductor</i> , de cualquier forma, transductor es un término general, y su uso para conversión de señales no es recomendado.
<b>Digital</b>	Término aplicado a una señal o dispositivo que usa dígitos binarios para representar valores continuos o estados discretos.
<b>Sistemas de control distribuidos</b>	Sistema el cual, mientras es funcionalmente integrado, consiste de subsistemas los cuales pueden ser físicamente separados y colocarse de una forma remota unos de otros.
<b>Elemento final de control</b>	Dispositivo que controla directamente los valores de la variable manipulada en un lazo de control. Generalmente el elemento final de control es una válvula de control.
<b>Función</b>	Propósito que debe cumplir un dispositivo de control.
<b>Identificación</b>	Secuencia de letras o dígitos, o ambos, usados para señalar un instrumento en particular o un lazo.
<b>Instrumentación</b>	Colección de instrumentos o sus aplicaciones con el fin de observar mediciones, control, o cualquier combinación de estos.
<b>Local</b>	Es la localización de un instrumento que no está ni dentro ni sobre un panel o consola, ni está montado en un cuarto de control. Los instrumentos locales están comúnmente en el ámbito de un elemento primario o un elemento de control, la palabra “ <i>campo</i> ” es un sinónimo muy usado con local.
<b>Panel local</b>	Que no está en un panel central, los paneles locales están comúnmente en el ámbito de subsistemas de plantas o sub áreas. El término instrumento local de panel no puede ser confundido con instrumento local.
<b>Lazo</b>	Combinación de uno o más instrumentos o funciones de control que señalan el paso de uno a otro con el propósito de medir y/o controlar las variables de un proceso.
<b>Estación manual de carga</b>	Dispositivo o función que tiene un ajuste de salida manual que es usado con un actuador o como más dispositivos. La estación no proporciona un cambio entre un modo de control automático o manual de un lazo de control. La estación puede tener indicadores integrados, luces u otras características. Esto es normalmente conocido

<b>Definiciones</b>	
	como estación manual o cargador manual.
<b>Medida</b>	Determinación de la existencia o magnitud de una variable.
<b>Monitor</b>	Término general para un instrumento o sistema de instrumentos usados para la medición o conocer la magnitud de una o más variables con el propósito de emplear la información en determinado momento. El término monitor no es muy específico, algunas veces significa analizador, indicador, o alarma.
<b>Luz del monitor</b>	Sinónimo de luz piloto.
<b>Panel</b>	Estructura que tiene un grupo de instrumentos montados sobre ella. El panel puede consistir de una o varias secciones, cubículos, consolas o escritorios.
<b>Montado en panel</b>	Término aplicado a un instrumento que está montado sobre un panel o consola y es accesible para un operador en uso normal.
<b>Luz piloto</b>	Es una luz que indica cual número o condiciones normales de un sistema o dispositivo existe. Una luz piloto es también conocida como una luz monitor o de monitor.
<b>Elemento primario</b>	Sinónimo de sensor.
<b>Proceso</b>	Es cualquier operación o secuencia de operaciones que involucren un cambio de energía, estado, composición, dimensión, u otras propiedades que pueden referirse a un dato.
<b>Variable de proceso</b>	Cualquier propiedad variable de un proceso. El término variable de proceso es usado en como un standard para la aplicación a todas las variables.
<b>Programa</b>	Secuencia respetable de acciones que definen el nivel de las salidas como una compostura de las relaciones al establecimiento de las entradas.
<b>Controlador lógico programable</b>	Un controlador, usualmente con entradas y salidas múltiples que contiene un programa alterable, es llamado de esta manera o comúnmente conocido como PLC.
<b>Relay</b>	Dispositivo cuya función es pasar información sin alterarla o solo modificarla en determinada forma. Relay es comúnmente usado para referirse a dispositivos de cómputo.
<b>Sensor</b>	Parte de un lazo o un instrumento que primero detecta el valor de una variable de proceso y que asume una correspondencia, predeterminación, y estado inteligible o salida. El sensor puede ser integrado o separado de un elemento funcional o de un lazo. Al sensor también se le conoce como detector o elemento primario.
<b>Set point</b>	El set point o punto de referencia puede ser establecido manualmente, automáticamente o programado. Su valor se expresa en las mismas unidades que la variable controlada.
<b>Switch</b>	Dispositivo que conecta, desconecta, selecciona, o transfiere uno o más circuitos y no está diseñado como un controlador, un relay o una válvula de control.
<b>Punto de prueba</b>	Proceso de una conexión el cual no está permanentemente conectado, su conexión es solamente temporal o intermitente a un instrumento.
<b>Transductor</b>	Término general para un dispositivo que recibe información en forma de uno o más cuantificadores físicos, modificadores de información y/o su forma si requiere, y produce una señal de salida resultante. Dependiendo de la aplicación un transductor puede ser un elemento primario, un transmisor un relay, un convertidor u otro dispositivo. Porque el término transductor no es específico, su uso para aplicaciones específicas no es recomendado.
<b>Transmisor</b>	Dispositivo que detecta la variable de un proceso a través de un sensor y tiene una salida la cual varía su valor solamente como una función predeterminada de la variable del proceso. El sensor puede estar o no integrado al transmisor.

**4.2.2 Identificación funcional.** La identificación funcional de un instrumento o su equivalente funcional consiste de letras, las cuales se muestran en la Tabla 4 e incluyen una primera letra (designación de la medida o variable inicial) y una o más letras sucesivas (identificación de funciones).

La identificación funcional de un instrumento está hecha de acuerdo a su función y no a su construcción. Un registrador de diferencia de presión usado para medir flujo se identifica como *FR*; un indicador de presión y un switch actuado a presión conectado a la salida de un transmisor de nivel neumático están identificados por *LI* y *LS*, respectivamente.

En un lazo de instrumentos, la primera letra de una identificación funcional es seleccionada de acuerdo a la medida y a la variable inicial y no de acuerdo a la variable manipulada. Una válvula de control varía el flujo de acuerdo a lo dictaminado por un controlador de nivel, esto es una *LV*.

La sucesión de letras en la identificación funcional designa una o más funciones pasivas y/o salidas de función. Una modificación de las letras puede ser usada, si se requiere, en adición a una o más letras sucesivas. Por ejemplo, *TDAL* contiene dos modificadores. La variable medida *D* cambia a una nueva variable *T*, como diferencia de temperatura. La letra *L* restringe la lectura de la función *A*, alarma, para representar solamente una alarma baja.

La secuencia de identificación de las letras llega a ser con una primera letra seleccionada de acuerdo a la Tabla 4. Las letras de funciones pasivas o activas siguen cualquier orden, y las letras de la salida funcional siguen a ésta en cualquier frecuencia, excepto que la salida de la letra *C* (control) precede la salida de la letra *V* (válvula), por ejemplo: *PCV* (válvula controladora de presión).

Un dispositivo de función múltiple puede ser simbolizado en un diagrama por muchas burbujas como haya variables medidas, salidas y/o funciones. Un controlador de temperatura con un switch puede ser identificado por dos burbujas una con la inscripción *TIC-3* y una con la inscripción *TSH-3*. El instrumento podría estar designado como *TIC-3/TSH-3* para todos los usos y sus referencias.

El número para las letras funcionales agrupadas en un instrumento pueden mantenerse con un mínimo de acuerdo al ajuste del usuario. El número total de letras contenidas en un grupo no pueden exceder de cuatro.

**4.2.3 Identificación del lazo.** La identificación del lazo consiste en la primera letra y un número. Cada instrumento en un lazo tiene asignado a él el mismo número de lazo y, en caso de una numeración paralela, la misma primera letra. Cada lazo de instrumentos tiene un único número

de identificación de lazo. Un instrumento común a dos o más lazos podría cargar la identificación del lazo al cual se le considere predominante.

La numeración de los lazos puede ser paralela o serial. La numeración paralela involucra el inicio de una secuencia numérica para cada primera letra nueva, por ejemplo: TIC-100, FRC-100, LIC-100, AL-100, etc. La numeración serial involucra el uso de secuencias simples de números para proyectar amplias secciones. Una secuencia de numeración de un lazo puede realizarse con uno o cualquier otro número conveniente, tal como 001, 301 o 1201. El número puede incorporarse al código de operación; de cualquier manera su uso es recomendado.

Si un lazo dado tiene más de un instrumento con el mismo identificador funcional, un sufijo puede ser añadido al número del lazo, por ejemplo: FV-2A, FV-2B, FV-2C, etc., o TE-25-1, TE-25-2, etc. Esto puede ser más conveniente o lógico en un instante dado para designar un par de transmisores de flujo, por ejemplo, como FT-2 y FT-3 en vez de FT-2A y FT-2B. Los sufijos pueden ser asignados de acuerdo a los siguientes puntos:

Se pueden usar sufijos tales como A, B, C, etc.

Para un instrumento tal como un multipunto que registra los números por puntos de identificación, el elemento primario puede ser numerado TE-25-1, TE-25-2, TE-25-3, etc., correspondiendo al punto de identificación del número.

Las subdivisiones de un lazo pueden ser designadas serial-mente alternadas con letras como sufijos y números.

Un instrumento que desempeña dos o más funciones puede ser designado por todas sus funciones, por ejemplo un registrador de flujo FR-2 con una presión PR-4 puede ser designado FR-2/PR-4. Y dos registradores de presión pueden ser PR-7/8, y una ventana como anunciador común para alarmas de altas y bajas temperaturas puede ser TAHL-21.

Los accesorios de instrumentación tales como medidores de presión, equipo de aire, etc., que no están explícitamente mostrados en un diagrama, pero que necesitan una designación para otros propósitos, pueden ser etiquetados individualmente de acuerdo a sus funciones y podría usarse la misma identificación del lazo, como estos sirven directamente al lazo. La aplicación de

una designación no implica que el accesorio deba ser mostrado en el diagrama. Alternativamente los instrumentos pueden ser usados con el mismo número de etiqueta con el cual ha sido asociado el instrumento, pero aclarando las palabras agregadas.

Las reglas para la identificación del lazo no necesitan ser aplicados a los instrumentos y accesorios. Un usuario u operador puede identificar a estos por otros medios.

**4.2.4 Nomenclatura de instrumentos.** La Tabla 4 muestra las diferentes letras que se utilizan para clasificar los diferentes tipos de instrumentos.

Tabla 4. Nomenclatura de instrumentación

1 <sup>ra</sup> Letra		2 <sup>da</sup> Letra		
Variable medida(3)	Letra de Modificación	Función de lectura pasiva	Función de Salida	Letra de Modificación
A. Análisis (4)		Alarma		
B. Llama (quemador)		Libre (1)	Libre (1)	Libre (1)
C. Conductividad			Control	
D. Densidad o Peso específico	Diferencial (3)			
E. Tensión (Fem.)		Elemento Primario		
F. Caudal	Relación (3)			
G. Calibre		Vidrio (8)		
H. Manual				Alto (6)(13)(14)
I. Corriente Eléctrica		Indicación o indicador (9)		
J. Potencia	Exploración (6)			
K. Tiempo			Estación de Control	
L. Nivel		Luz Piloto (10)		Bajo (6)(13)(14)
M. Humedad				Medio o intermedio (6)(13)
N. Libre(1)		Libre	Libre	Libre
O. Libre(1)		Orificio		
P. Presión o vacío		Punto de prueba		
Q. Cantidad	Integración (3)			
R. Radiactividad		Registro		
S. Velocidad o frecuencia	Seguridad (7)		Interruptor	
T. Temperatura			Transmisión o transmisor	
U. Multivariable (5)		Multifunción (11)	Multifunción (11)	Multifunción (11)
V. Viscosidad			Válvula	
W. Peso o Fuerza		Vaina		
X. Sin clasificar (2)		Sin clasificar	Sin clasificar	Sin clasificar
Y. Libre(1)			Relé o compensador	Sin clasificar

			(12)	
Z. Posición			Elemento final de control sin clasificar	

Para cubrir las designaciones no normalizadas que pueden emplearse repetidamente en un proyecto se han previsto letras libres. Estas letras pueden tener un significado como primera letra y otro como letra sucesiva.

La letra sin clasificar X, puede emplearse en las designaciones no indicadas que se utilizan solo una vez o un número limitado de veces. Se recomienda que su significado Figura en el exterior del círculo de identificación del instrumento. Ejemplo XR-3 Registrador de Vibración.

Cualquier letra primera se utiliza con las letras de modificación D (diferencial), F (relación) o Q (interpretación) o cualquier combinación de las mismas cambia su significado para representar una nueva variable medida. Por ejemplo, los instrumentos TDI y TI miden dos variables distintas, la temperatura diferencial y la temperatura, respectivamente.

La letra A para análisis, abarca todos los análisis no indicados en la Tabla 4 anterior que no están cubiertos por una letra libre. Es conveniente definir el tipo de análisis al lado del símbolo en el diagrama de proceso.

El empleo de la letra U como multivariable en lugar de una combinación de primera letra, es opcional.

El empleo de los términos de modificaciones alto, medio, bajo, medio o intermedio y exploración, es preferible pero opcional.

El termino seguridad, debe aplicarse solo a elementos primarios y a elementos finales de control que protejan contra condiciones de emergencia (peligrosas para el equipo o el personal). Por este motivo, una válvula autorreguladora de presión que regula la presión de salida de un sistema mediante el alivio o escape de fluido al exterior, debe ser PCV, pero si esta misma válvula se emplea contra condiciones de emergencia, se designa PSV. La designación PSV se aplica a todas las válvulas proyectadas para proteger contra condiciones de emergencia de presión sin tener en cuenta las características de la válvula y la forma de trabajo la colocan en la categoría de válvula de seguridad, válvula de alivio o válvula de seguridad de alivio.

La letra de función pasiva vidrio, se aplica a los instrumentos que proporciona una visión directa no calibrada del proceso.

La letra indicación se refiere a la lectura de una medida real de proceso, No se aplica a la escala de ajuste manual de la variable si no hay indicación de ésta.

Una luz piloto que es parte de un bucle de control debe designarse por una primera letra seguida de la letra sucesiva I. Por ejemplo, una luz piloto que indica un periodo de tiempo terminado se designara KI. Sin embargo, si se desea identificar una luz piloto fuera del bucle de control, la luz piloto puede designarse en la misma forma o bien alternativamente por una letra única I. Por ejemplo, una luz piloto de marcha de un motor eléctrico puede identificarse. EL, suponiendo que la variable medida adecuada es la tensión, o bien XL. Suponiendo que la luz es excitada por los contactos eléctricos auxiliares del arrancador del motor, o bien simplemente L.

El empleo de la letra U como multifunción en lugar de una combinación de otras letras es opcional.

Se supone que las funciones asociadas con el uso de la letra sucesiva Y se definirán en el exterior del símbolo del instrumento cuando sea conveniente hacerlo así.

Los términos alto, bajo y medio o intermedio deben corresponder a valores de la variable medida, no a los de la señal a menos que se indique de otro modo. Por ejemplo, una alarma de nivel alto derivada de una señal de un transmisor de nivel de acción inversa debe designarse LAH incluso aunque la alarma sea actuada cuando la señal cae a un valor bajo.

Los términos alto y bajo, cuando se aplican a válvulas, o a otros dispositivos de cierre apertura, se definen como sigue:

Alto: indica que la válvula esta, o se aproxima a la posición de apertura completa.

Bajo: Denota que se acerca o está en la posición completamente cerrada.

Ejemplo para leer un instrumento FTE-120:

La F (caudal), la T (transmisor), la E (sensor) y el 120 es el número que indica que ese elemento corresponde al lazo 120.

Describir los elementos que conforman el esquema:

Proceso: Cambio físico o químico de la materia, o conversión de energía.

Elementos Primarios: Elemento que convierte la energía de la variable medida en una forma apropiada para ser medidas (Sensores).

Sensores: Elemento responsable del aloe de la variable medida.

Tipos de elementos primarios:

Tabla 5. Elementos primarios

Mecánicos	Eléctronicos
Tubo de bourdon tipo C	Termopares
Tubo de bourdon helicoidal	Termoresistencias
Tubo de bourdon espiral	Termisores
Bulbo y capilar (sistemas llenos)	Celdas capacitivas
Flotadores	Piezoeléctricos
Placas de orificio	Piezresistivos
Acusticos/emisor	Radar

**Transmisores.** Captan la variable de proceso a través del elemento primario (sensores) y lo transmite a distancias en forma de señal neumática de margen de 3 a 15 psi (libras por pulgadas cuadradas) o de 0,206 – 1,033 bar (unidades métricas) o electrónica de 4 a 20 miliamperios de corriente continua o digital. Las señales electrónicas también se pueden dar de 1-5 miliamperios c.c., de 10- 50 miliamperios c.c., y de 0-20 miliamperios c.c., si bien la señal normalizada es de 4-20 miliamperios c.c. La señal digital es la más ampliamente utilizada y es apta directamente para las comunicaciones, ya que utiliza protocolos estándares. NOTA: El sensor puede formar parte integral del transmisor.

Tipos de transmisores:

- Neumáticos
- Electrónicos
- Hidráulicos
- Inteligentes

**Transductores.** Reciben una señal de entrada función de una o más cantidades físicas y la convierten modificada o no a una señal de salida. Son transductores, un relé, un elemento primario, un transmisor, un convertidor PP/I (presión de proceso a intensidad), un convertidor PP/P (Presión

de proceso a señal neumática), etc.

**Convertidores.** Son aparatos que reciben una señal de entrada neumática (3-15 psi) o electrónica (4-20 miliamperios c.c.) procedente de un instrumento y después de modificarla envían la resultante en forma de señal de salida estándar. Ejemplo: un convertidor P/I (señal de entrada neumática a señal de salida electrónica), un convertidor I/P (señal de entrada eléctrica a señal de salida neumática) [5], [24].

**Receptores.** Reciben las señales procedentes de los transmisores y las indican o registran. Los receptores controladores envían otra señal de salida normalizada a los valores ya indicados señal neumática de margen de 3 a 15 psi (libras por pulgadas cuadradas) o señal electrónica de 4 a 20 miliamperios c.c., que actúan sobre el elemento final de control.

**Indicadores.** Se refieren a la lectura de una medida real analógica o digital de proceso.

*Controladores:* A partir de las señales obtenidas por los sensores a través de los transmisores, compara la variable controlada (presión, nivel, temperatura) con una referencia o valor preestablecido (Punto de ajuste o set point) y ejerce una acción correctiva de acuerdo con la desviación.

**Tipos de controladores.** De acuerdo con la energía utilizada, se puede decir que los controladores más utilizados son los neumáticos, electrónicos y según su ubicación hay instrumentos para instalar en campo y en las salas de control.

Proporcionales.

Integrales.

Derivativos.

Combinación de los anteriores.

Fuzzy Logic [5], [24].

**Elementos finales de control.** El elemento final de control recibe la señal del controlador y modifica directamente el valor de la variable manipulada. El elemento más utilizado es la válvula de control.

1. Tipos de elementos finales de control:
2. Válvulas de control.
3. Hojas de ventiladores de paso variable.
4. Alabes en compresores.
5. Motores de velocidad variable.
6. SCRs
7. Amplificadores Magnéticos

**4.2.5 Identificación lazos de control del sistema de congelamiento diseñado.** El sistema de congelamiento de semen bovino Figura 29 se identifica un lazo de control con el siguiente número de lazos:

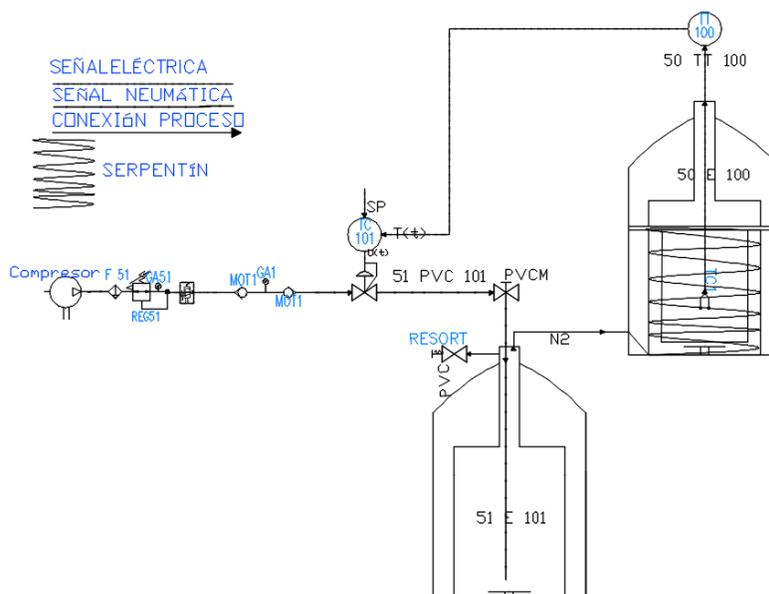


Figura 29. P&ID sistema de congelamiento (PVC: Válvula Controladora de Presión, PCVM: Válvula Controladora de Presión Manual)

**101:** Este lazo es el que controla el flujo de aire proveniente del compresor sirviendo como en mecanismo dinamizador para el suministro de gas nitrógeno proporcionado a través del tanque **51 E 101** que contiene el Nitrógeno líquido LN<sub>2</sub> debido al choque térmico que allí se da. Por medio de la válvula **51-PCV-101** (válvula control de presión neumática) se controla el paso de flujo de aire que y que a su vez es el elemento final de control. El controlador de temperatura **TC-101** que compara la variable controlada (temperatura del tanque **50-E-100** cámara criogénica) con una referencia **SP** o valor preestablecido (Punto de ajuste o set point) y ejerce una acción correctiva al elemento final de control (por medio de una señal electrónica) de acuerdo con la desviación. El

estado de la variable controlada (temperatura del tanque **50-E-100** cámara criogénica) para su comparación con **SP** es suministrada de forma electrónica por el transmisor de temperatura **TT-100**, en este transmisor el sensor hace parte integral como se muestra en la Figura 30 y su respectivo diagrama a bloques representado en la Figura 31.

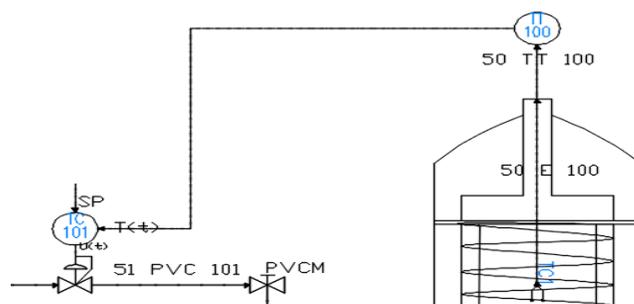


Figura 30. Diagrama P&DI

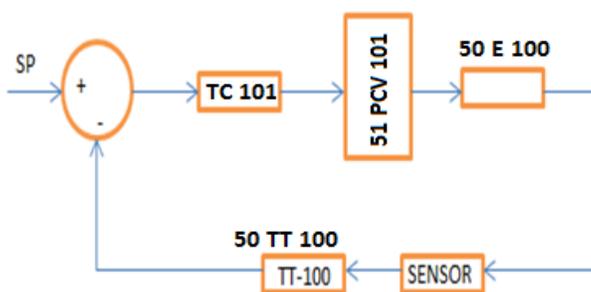


Figura 31. Diagrama a bloques del P&DI de la Figura 31

**Narrativas de Control.** El sistema de control está asociado a las variables de presión y temperatura; a continuación se describen cada una de las narrativas de control asociada a esta variable

**Narrativa del Lazo de Control de Temperatura.** El primer objetivo de este sistema es mantener la temperatura del tanque **50 E** en un nivel determinado que se desea (Nota: aquí no se está teniendo en cuenta el nivel de líquido) para que con este dato de temperatura el sistema incremente o decremente el flujo de aire al tanque **51 E** por medio de la electro válvula de control de presión **PCV-101**.

El segundo objetivo del sistema de control es mantener la presión necesaria controlada por medio de la válvula de control de flujo **PCV-101** debido a la diferencia de temperatura del SP (Set

Point fijado por el operario) y el dato de temperatura adquirido por medio del transmisor de temperatura **TT-100** en el intercambiador de calor **50 E** manteniendo así la temperatura deseada.

El lazo de control está compuesto por un transductor de temperatura que lo antepone un sensor de temperatura tipo K **FT-100** que transmite la señal electrónica percibida del sensor al controlador **TC-101**. La señal de control procedente del controlador **TC-101** es enviada a la válvula **PCV-101**, que es la encargada de controlar la presión originada en el compresor para que salga mayor o menor proporción de gas nitrógeno que circula hacia el tanque **50 E**.

**Narrativa de seguridad.** En cuanto al sistema de seguridad, el sistema (ver Figura 32) permite ejercer acciones correctivas de acuerdo con las desviaciones, pero no permite observar continuamente las variables críticas de operación, no tiene sistema de alarma y no permite el cierre remoto de válvulas en los casos que sea necesario. En la Figura 32 se observa que la seguridad esta implementada en el tanque donde está depositado el nitrógeno líquido LN<sub>2</sub>. Estos lazos permiten controlar las variables críticas como la presión de operación por medio de un elemento final de control que es la válvula ON-OFF (**PCV y PCVM**) disparándose a un nivel predeterminado de presión evitando así que el sistema colapse.

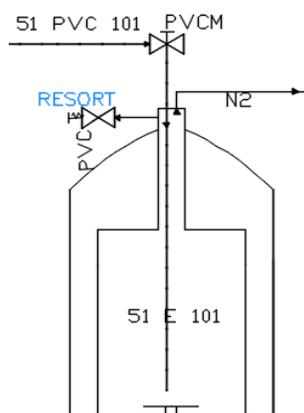


Figura 32 Tanque proveedor de N<sub>2</sub> donde se ve la Válvula de Control de Presión PVC

#### 4.2.6 Identificación del sistema. Como se muestra a continuación:

**Introducción.** El diseño de un controlador continuo o discreto, ya sea mediante las diferentes técnicas (clásicas o en variables de estado), requieren un modelo de la planta a controlar que caracterice su comportamiento dinámico, para llegar a este modelo existen diferentes alternativas y es el paso previo para el diseño del controlador. Obtener el modelo de la planta le permitirá al

diseñador validar los diferentes parámetros del controlador de forma simulada para obtener la mejor respuesta [20].

**Concepto sistema.** Un sistema es aquel donde interactúan diferentes tipos variables para originar señales observables, estas señales observables son las que llamamos señales de salida o variable controlada del sistema y las señales que pueden ser manipuladas con un alto grado de libertad son las señales de entrada o variable manipulada. En el sistema también existen señales que no son observables e influyen en las señales de salida, estas señales las denominamos perturbaciones Figura 33.

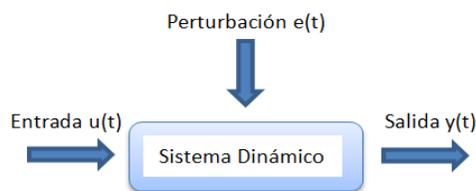


Figura 33. Sistema dinámico con entrada  $u(t)$ , perturbación  $e(t)$  y salida  $y(t)$

**4.2.6.1 Modelos de un sistema.** Cuando existe la necesidad de predecir el comportamiento de un sistema con determinadas realidades ante una o unas determinadas entradas, se puede apelar a la experimentación sobre dicho sistema para hacer la observación de sus salidas. Sin embargo, en muchos casos la experimentación puede ser compleja y a veces imposible de llevar a cabo, lo que nos lleva a recurrir a algún tipo de representación matemática que se aproxime a la realidad, esta representación es llamada modelo.

**Tipos de modelos.** Los tipos de identificación se clasifican según el grado de formalismo matemático que son descritos.

**Modelos intuitivos o verbales:** Estos modelos carecen casi que totalmente de formalismo matemático, por ejemplo al cruzar una calle, se requiere un modelo intuitivo sobre el efecto que produce la habilidad de cruzar la calle dependiendo a la velocidad que lo hagamos.

**Modelos no para métricos:** Muchos modelos que dan perfectamente caracterizados mediante un gráfico o Tabla que describe. Por ejemplo podemos tomar un sistema de características lineales y definirlo simplemente con aplicar un impulso o escalón en circuito abierto tomando la data en una Tabla definiendo la señal de entrada (manipulada) y la señal de salida (Controlada).

**Modelos paramétricos o matemáticos:** Utilizados en aplicaciones avanzadas. Este modelo es utilizado cuando definitivamente es necesario relacionar matemáticamente las variables del sistema, en este modelo se utilizan ecuaciones diferenciales (sistemas continuos) o en diferencias (sistemas discretos). Dentro de estos modelos existen los siguientes tipos:

**Determinísticos:** Un modelo es determinístico cuando la expresión matemática es exacta, esto quiere decir que para una señal de entrada se produce una invariable señal de salida, es muy predecible.

**Estocásticos:** Un modelo es estocástico es cuando la expresión matemática no es exacta, esto quiere decir que tienes un grado de incertidumbre y que no puede ser predecible, para una misma señal de entrada no siempre se tiene la misma señal de salida. Este modelo se define por conceptos probabilísticos o estadísticos.

**Dinámicos:** Un modelo es dinámico cuando la relación de la señal de entrada con la señal de salida depende del tiempo para su evolución.

**Estático:** Un modelo es estático cuando la señal de salida depende de la entrada independiente del tiempo para su evolución.

**Continuos:** Los modelos continuos son aquellos que trabajan con señales continuas y se expresan matemáticamente en ecuaciones diferenciales.

**Discretos:** Los modelos discretos son aquellos que trabajan con señales muestreadas, y su expresión matemática se describe mediante ecuaciones en diferencia.

#### 4.2.6.2 Métodos de obtención del modelo. Como se muestra a continuación:

**Modelado teórico:** Este método consiste en recurrir a leyes básicas de la física para describir el comportamiento dinámico de un proceso, este es un método analítico.

**Identificación del sistema:** Consiste en que en forma experimental se recoja una data (datos reales tomados de la planta que se estudia). Este método debe contar con la planta que se estudia y hacer experimentos en lazo abierto, se toman los datos para analizarlos y a partir de estos obtener el modelo que describa su comportamiento.

Cada método tiene sus ventajas y desventajas por lo tanto uno es complemento del otro. En la práctica se necesitan los datos experimentales para una mayor exactitud pero entre mayor conocimiento de las leyes físicas facilitará el proceso de identificación [20].

**Identificación del sistema.** Por medio de este método se busca conocer el modelo suficientemente correcto que describa las características dinámicas del proceso en estudio de forma experimental para la obtención de unos datos para ser analizados.

**Proceso de identificación.** Los siguientes pasos son los que comprende el proceso de identificación.

*Obtención de datos entrada – salida:* Para obtener los datos se tiene que aplicar sobre el sistema una señal de entrada manipulada (variable manipulada) en lazo abierto, se registra la evolución porcentual de las señales de entrada y salidas por un intervalo de tiempo, tiempo en la que el sistema se estabiliza.

*Tratamiento previo de los datos registrados:* Los datos registrados previamente guardados son analizados, este análisis es el tratamiento previo de los datos ya que con este análisis podemos identificar que los datos están contaminados con señales indeseadas que en el experimento se mezclaron y que es necesario perfeccionar para empezar luego el proceso de la identificación del sistema.

*Elección de la estructura del modelo:* En caso de que el modelo deseado sea paramétrico, lo que se debe tener en cuenta en primer lugar es determinar la estructura. Para llevar a cabo este modelo se debe de tener conocimiento de las leyes físicas que rigen el proceso.

*Obtención de los parámetros del modelo:* La obtención de estos parámetros de la estructura es importante para mejorar y ajustar la respuesta del modelo a los datos de entrada-salida obtenidos en el experimento.

*Validación del modelo:* Este es el último paso donde se determina si el modelo obtenido satisface en grado de exactitud requerido. De no lograrse el grado de satisfacción y decidimos que el modelo no es válido se tendrán que revisar los aspectos como: la data recolectada, la estructura

escogida y el criterio de ajuste seleccionado.

Dependiendo de la causa estimada se deberá hacerse de nuevo la identificación desde el punto estimado. En la Figura 34 se muestra el organigrama de identificación [20].

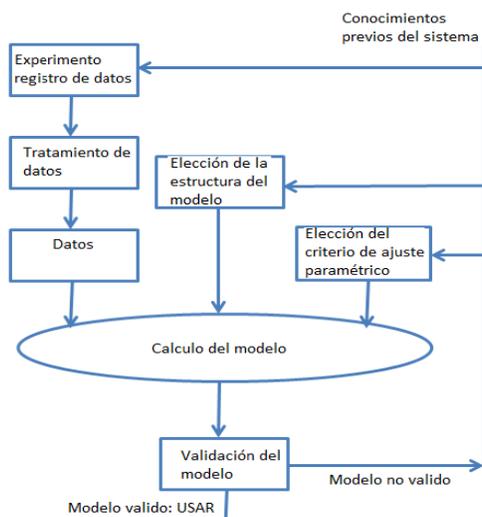


Figura 34. Diagrama de flujo proceso de identificación experimental

#### 4.2.6.3 Métodos de identificación. Como se muestra a continuación:

Existen varios métodos de identificación, se pueden clasificar según diferentes criterios.

Dependiendo del tipo de modelo obtenido:

**Métodos no paramétricos:** Este método permite obtener modelos no paramétricos del sistema. Algunos de estos métodos son: análisis de la respuesta transitoria, análisis de la respuesta en frecuencia, análisis de la correlación, análisis espectral, análisis de Fourier, etc.

**Métodos paramétricos:** Estos métodos requieren la elección de una posible estructura del modelo, de un criterio de ajuste de parámetros, y la estimación de los parámetros que mejor ajustan el modelo a los datos experimentales.

#### Dependiendo de la aplicación

**Método de identificación off-line (a posteriori):** Utilizado en aquellos sistemas que no requieren un ajuste continuo del modelo. Se desacopla la planta, se pone a prueba en lazo abierto con diferentes perturbaciones para tomar los datos y ser analizado posteriormente para su

identificación.

**Métodos de identificación on-line (identificación recursiva):** Los parámetros estimados son calculados recursivamente dentro del límite de tiempo impuesto para el periodo de muestreo. Los parámetros se van actualizando continuamente a partir de los nuevos datos de entrada – salida [20].

**4.2.6.4 Identificación experimental del sistema (método gráfico) de sistema de congelamiento de semen bovino.** Siguiendo los pasos del flujo-grama de la Figura 34 procederemos el experimento registro de datos que consiste llevar al sistema a un punto de operación, para aplicar una entrada diferente y adquirir los datos tabulándolos. Esta adquisición de datos se hace en lazo abierto como se muestra la Figura 35.

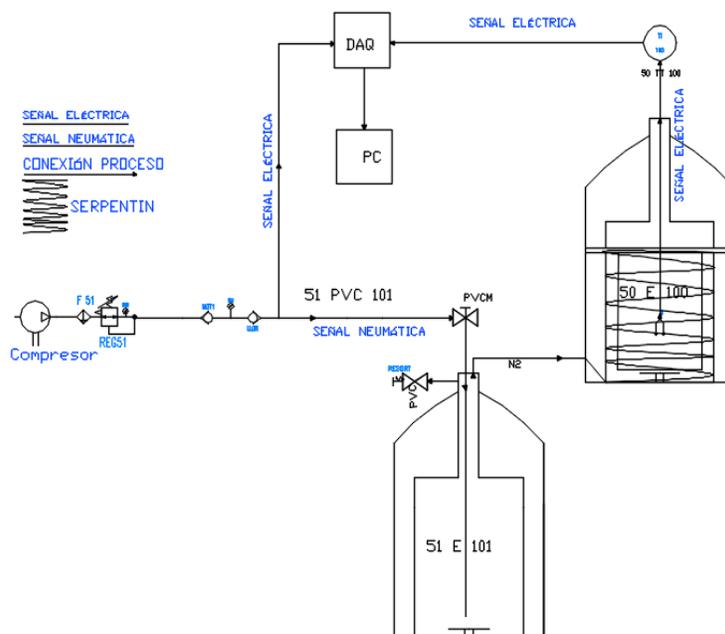


Figura 35. Toma de datos en lazo abierto de las variables temperatura y presión por medio del DAQ al PC

La variable manipulada o variable de entrada es el flujo de aire proveniente del compresor hacia en tanque de nitrógeno líquido ( $N_2$ ) para controlar la temperatura.

La variable controlada o de salida es la variable que se puede observar y que para el sistema es la temperatura.

Para el experimento se tuvo en cuenta la presión máxima que puede soportar el tanque de almacenamiento de nitrógeno líquido que es, según las pruebas experimentales de 75 psi y que fue

la presión máxima con la que se experimentó, esta información sirvió para definir que cuando la electroválvula estuviese 100% abierta el sistema estuviese sometido a una presión de 66 psi de presión y así evitar accidentes.

Considerando que la presión de 66 psi representa el máximo valor aceptado por el tanque (100%), El siguiente ritmo de escalonamiento de presión de entrada fue aplicado inicialmente con una presión de 33 psi por un tiempo de 20 min, después de este tiempo la presión se incrementó a 45 psi por 10 min, inmediatamente la presión de entrada se manipulo para que se estableciera en 33 psi nuevamente por un tiempo de 10 min, se siguió bajando la presión llevándola a 20 psi por un tiempo de 10 min y finalmente se trabajó con una presión de entrada de 45 psi por un tiempo de 10 min Figura 36.

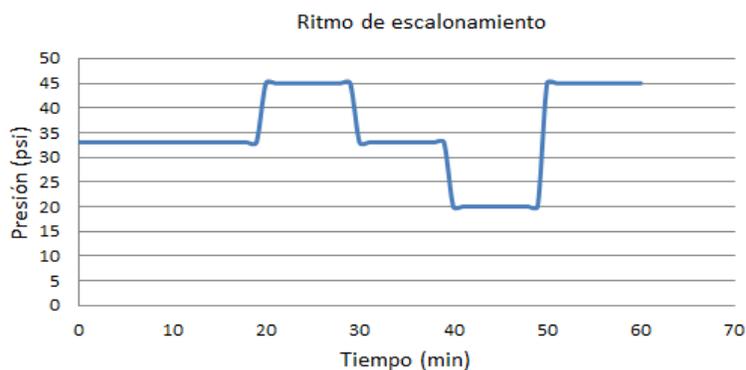


Figura 36. Ritmo de escalonamiento de presión al tanque de nitrógeno líquido N2

El sistema se sometió al 50%, esto quiere decir a 33 PSI por 20 min dando como resultado la siguiente Tabla 6 y Figura 37

Tabla 6. Data de salida a 33 psi

PSI	°C	Segundos	Minutos	Diferencia de tiempo (m)
33	25	0	0	0
33	23	421.421	7.02368333	1.4476
33	21	501.578	8.35963333	0.57493333
33	19	551.782	9.19636667	0.40168333
33	17	593.131	9.88551667	0.32981667
33	15	629.86	10.4976667	0.2926
33	13	662.662	11.0443667	0.26693333
33	11	693	11.55	0.25281667
33	9	722.337	12.03895	0.24126667
33	7	749.826	12.4971	0.22586667
33	5	777.007	12.9501167	0.22073333
33	3	803.11	13.3851667	0.2156
33	1	828.751	13.8125167	0.2156
33	0	841.687	14.0281167	0.2156

PSI	°C	Segundos	Minutos	Diferencia de tiempo (m)
33	-1	867.405	14.45675	0.42863333
33	-3	892.353	14.87255	0.20918333
33	-5	916.454	15.2742333	0.20148333
33	-7	940.17	15.6695	0.1925
33	-9	964.348	16.0724667	0.20405
33	-11	988.526	16.4754333	0.20533333
33	-13	1013.474	16.8912333	0.2079
33	-15	1038.576	17.3096	0.20918333
33	-17	1063.832	17.7305333	0.42093333
33	-19	1092.014	18.2002333	0.24126667
33	-21	1120.273	18.6712167	0.23741667
33	-23	1148.147	19.1357833	0.22458333
33	-25	1176.56	19.6093333	0.23485
33	-27	1205.743	20.0957167	0.24255

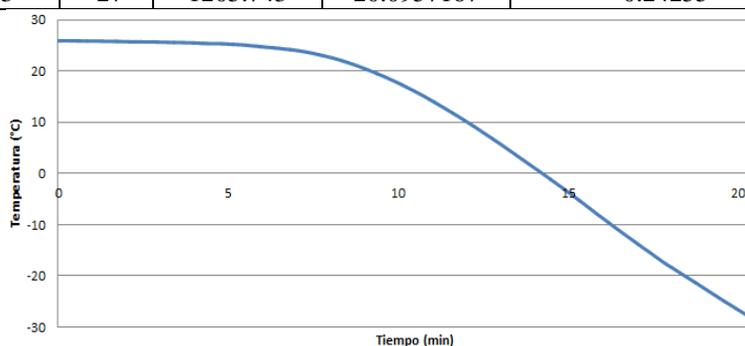


Figura 37. A medida que transcurre el proceso de enfriamiento el tiempo para alcanzar un grado es menor

Se observa en la Tabla 6 y en la Figura 37 la dinámica del sistema, por la dinámica del mismo tiende a continuar su temperatura inicial de 25°C razón por la cual el tiempo de cambio de temperatura es mayor mientras se atempera la cámara criogénica pero cuando se empieza a enfriar el cambio de grado a grado es cada vez menor en tiempo, para este intervalo se obtuvo un promedio de 0.38645609 min.

El sistema se sometió al 68%, esto quiere decir a 45 PSI por 10 min dando como resultado la siguiente Tabla 7 y Figura 38

Tabla 7. Data de salida a 45 psi

PSI	°C	Segundos	Minutos	Diferencia de tiempo (m)
45	-28	1220.681	20.3446833	0.24896667
45	-30	1251.635	20.8605833	0.26436667
45	-32	1283.667	21.39445	0.26436667
45	-34	1316.623	21.9437167	0.27335
45	-36	1349.579	22.4929833	0.27976667
45	-38	1382.997	23.04995	0.27591667
45	-40	1416.8	23.6133333	0.28361667
45	-42	1449.91	24.1651667	0.2695
45	-44	1484.791	24.7465167	0.30158333
45	-46	1517.67	25.2945	0.27335

PSI	°C	Segundos	Minutos	Diferencia de tiempo (m)
45	-48	1551.011	25.8501833	0.2772
45	-50	1586.123	26.4353833	0.30928333
45	-52	1622.236	27.0372667	0.30415
45	-54	1661.121	27.68535	0.32468333
45	-56	1704.087	28.40145	0.35291667
45	-58	1745.051	29.0841833	0.34265
45	-60	1786.785	29.77975	0.35163333

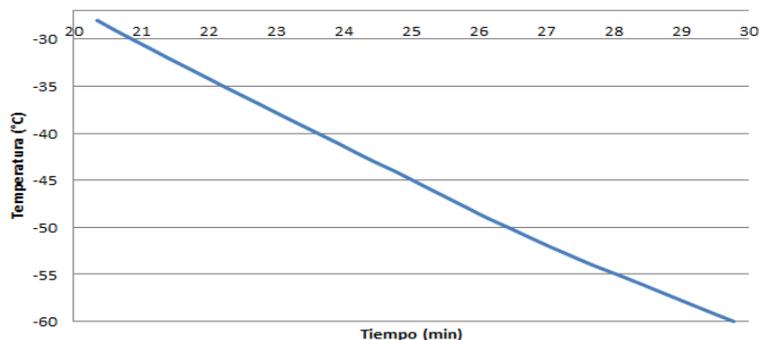


Figura 38. A medida que transcurre el proceso de enfriamiento el tiempo para alcanzar un grado es menor

Se observa en la Tabla 7 y en la Figura 38 la dinámica del sistema en estos 10 minutos sigue cayendo la temperatura en menor tiempo entre grado y grado, para este intervalo se obtuvo un promedio de 0.293455556 minutos.

El sistema se sometió al 50%, esto quiere decir a 33 PSI por 10 min siguiendo la pauta de escalonamiento dando como resultado la siguiente Tabla 8 y Figura 39

Tabla 8. Data de salida a 33 psi

PSI	°C	Segundos	Minutos	Diferencia de tiempo (m)
33	-61	1807.652	30.1275333	0.34778333
33	-63	1849.925	30.8320833	0.3773
33	-65	1892.968	31.5494667	0.35548333
33	-67	1935.78	32.263	0.35933333
33	-69	1980.594	33.0099	0.39526667
33	-71	2092.629	34.87715	0.58006667
33	-73	2157.694	35.9615667	0.55183333
33	-75	2223.144	37.0524	0.56338333
33	-77	2276.428	37.9404667	0.308
33	-79	2300.606	38.3434333	0.24896667
33	-81	2362.129	39.3688167	0.56466667

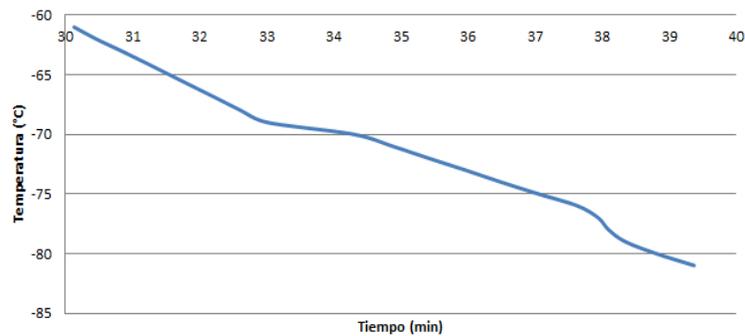


Figura 39. A medida que transcurre el proceso de enfriamiento el tiempo para alcanzar un grado es un poco mayor

Para este intervalo, la presión viene en descenso de 45 psi a 33 psi donde se puede notar el cambio, ya que se observa que el tiempo entre grado y grado es un poco mayor, donde el promedio 0.456622222 minutos.

El sistema se sometió al 30%, esto quiere decir a 20 PSI por 10 min dando como resultado la siguiente Tabla 9 y Figura 40

Tabla 9. Data de salida a 20 psi

PSI	°C	Segundos	Minutos	Diferencia de tiempo (m)
20	-82	2407.79	40.1298333	0.76101667
20	-83	2461.613	41.0268833	0.89705
20	-84	2509.969	41.8328167	0.80593333
20	-85	2552.781	42.54635	0.71353333
20	-86	2606.681	43.4446833	0.89833333
20	-87	2670.514	44.5085667	1.06388333
20	-88	2769.69	46.1615	1.65293333
20	-89	2858.009	47.6334833	1.47198333
20	-90	2965.27	49.4211667	1.78768333

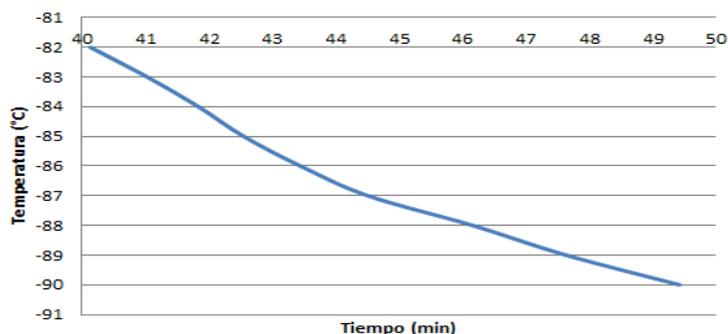


Figura 40. A medida que transcurre el proceso el tiempo para alcanzar un grado es mayor que a 33 psi

Para este intervalo la presión viene en descenso de 33 psi a 20 psi donde se puede notar el cambio, se observa que el tiempo entre grado y grado es un poco mayor que a 33 psi, promedio 1.116927778 minutos.

El sistema se sometió al 50%, esto quiere decir a 33 PSI por 10 min dando como resultado la siguiente Tabla 10 y figura 41

Tabla 10. Data de salida a 33 psi

PSI	°C	Segundos	Minutos	Diferencia de tiempo (min)
33	-91	3142.37	52.37283333	2.951666667
33	-92	3338.951	55.64918333	3.27635
33	-93	3534.3	58.905	3.255816667

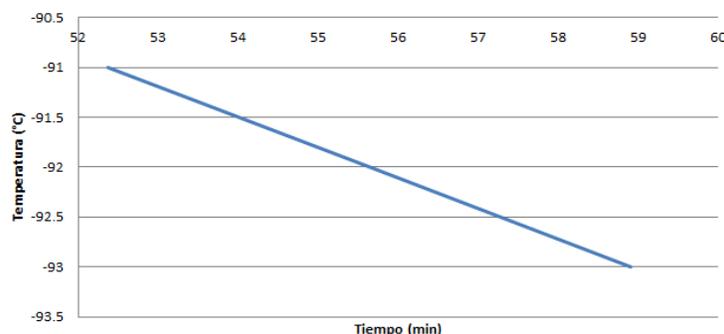


Figura 41. A medida que transcurre el proceso el tiempo empieza a reducirse pero le cuesta aun recuperar el ritmo que llevaba

Para este intervalo la presión viene en ascenso de 20 psi a 33 psi donde se puede notar que aunque la presión subió no se recupera tan rápido del descenso anterior, dando un promedio de 3.161277778 min por grado.

El sistema se sometió al 68%, esto quiere decir a 45 PSI por 10 min dando como resultado la siguiente Tabla 11 y Figura 42

Tabla 11. Data de salida a 45 psi

PSI	°C	Segundos	Minutos	Diferencia de tiempo (m)
45	-94	3774.925	62.9154167	4.01041667
45	-95	3869.789	64.4964833	1.58106667
45	-96	4048.891	67.4815167	2.98503333
45	-97	4210.206	70.1701	2.68858333
45	-98	4346.958	72.4493	2.2792

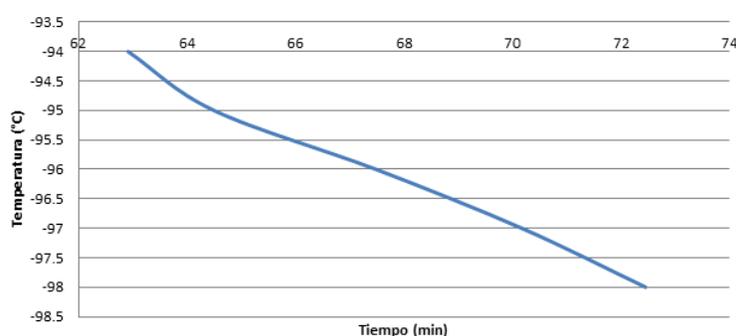


Figura 42. Se muestra que a medida que transcurre el proceso de enfriamiento el tiempo empieza a reducirse

Para este intervalo, la presión viene en ascenso de 33 a 45 psi donde se puede notar que aunque la presión subió se recupera lentamente dando un promedio de promedio 2.70886 minutos por grado.

Con este análisis se pudo demostrar que la temperatura es directamente proporcional a la entrada de presión.

**4.2.6.5 Diseño de controlador del sistema.** Para obtener el controlador del sistemas se toma la data anteriormente expuesta por diferencias de presión y que se muestra a continuación con su respectiva grafica que se muestran en la Tabla 12 y Figura 43.

Tabla 12. Data de salida que cumple el ritmo de los escalones

PSI	°C	Segundos	Minutos	Diferencia de tiempo (m)
33	25	0	0	0
33	24	334.565	5.57608333	5.57608333
33	23	421.421	7.02368333	1.4476
33	22	467.082	7.7847	0.76101667

<b>PSI</b>	<b>°C</b>	<b>Segundos</b>	<b>Minutos</b>	<b>Diferencia de tiempo (m)</b>
33	21	501.578	8.35963333	0.57493333
33	20	527.681	8.79468333	0.43505
33	19	551.782	9.19636667	0.40168333
33	18	573.342	9.5557	0.35933333
33	17	593.131	9.88551667	0.32981667
33	16	612.304	10.2050667	0.31955
33	15	629.86	10.4976667	0.2926
33	14	646.646	10.7774333	0.27976667
33	13	662.662	11.0443667	0.26693333
33	12	677.831	11.2971833	0.25281667
33	11	693	11.55	0.25281667
33	10	707.861	11.7976833	0.24768333
33	9	722.337	12.03895	0.24126667
33	8	736.274	12.2712333	0.23228333
33	7	749.826	12.4971	0.22586667
33	6	763.763	12.7293833	0.23228333
33	5	777.007	12.9501167	0.22073333
33	4	790.174	13.1695667	0.21945
33	3	803.11	13.3851667	0.2156
33	2	815.815	13.5969167	0.21175
33	1	828.751	13.8125167	0.2156
33	0	841.687	14.0281167	0.2156
33	-1	867.405	14.45675	0.42863333
33	-2	879.802	14.6633667	0.20661667
33	-3	892.353	14.87255	0.20918333
33	-4	904.365	15.07275	0.2002
33	-5	916.454	15.2742333	0.20148333
33	-6	928.62	15.477	0.20276667
33	-7	940.17	15.6695	0.1925
33	-8	952.105	15.8684167	0.19891667
33	-9	964.348	16.0724667	0.20405
33	-10	976.206	16.2701	0.19763333
33	-11	988.526	16.4754333	0.20533333
33	-12	1001	16.6833333	0.2079
33	-13	1013.474	16.8912333	0.2079
33	-14	1026.025	17.1004167	0.20918333
33	-15	1038.576	17.3096	0.20918333
33	-17	1063.832	17.7305333	0.42093333
33	-18	1077.538	17.9589667	0.22843333

<b>PSI</b>	<b>°C</b>	<b>Segundos</b>	<b>Minutos</b>	<b>Diferencia de tiempo (m)</b>
33	-19	1092.014	18.2002333	0.24126667
33	-20	1106.028	18.4338	0.23356667
33	-21	1120.273	18.6712167	0.23741667
33	-22	1134.672	18.9112	0.23998333
33	-23	1148.147	19.1357833	0.22458333
33	-24	1162.469	19.3744833	0.2387
33	-25	1176.56	19.6093333	0.23485
33	-26	1191.19	19.8531667	0.24383333
33	-27	1205.743	20.0957167	0.24255
45	-28	1220.681	20.3446833	0.24896667
45	-29	1235.773	20.5962167	0.25153333
45	-30	1251.635	20.8605833	0.26436667
45	-31	1267.805	21.1300833	0.2695
45	-32	1283.667	21.39445	0.26436667
45	-33	1300.222	21.6703667	0.27591667
45	-34	1316.623	21.9437167	0.27335
45	-35	1332.793	22.2132167	0.2695
45	-36	1349.579	22.4929833	0.27976667
45	-37	1366.442	22.7740333	0.28105
45	-38	1382.997	23.04995	0.27591667
45	-39	1399.783	23.3297167	0.27976667
45	-40	1416.8	23.6133333	0.28361667
45	-41	1433.74	23.8956667	0.28233333
45	-42	1449.91	24.1651667	0.2695
45	-43	1466.696	24.4449333	0.27976667
45	-44	1484.791	24.7465167	0.30158333
45	-45	1501.269	25.02115	0.27463333
45	-46	1517.67	25.2945	0.27335
45	-47	1534.379	25.5729833	0.27848333
45	-48	1551.011	25.8501833	0.2772
45	-49	1567.566	26.1261	0.27591667
45	-50	1586.123	26.4353833	0.30928333
45	-51	1603.987	26.7331167	0.29773333
45	-52	1622.236	27.0372667	0.30415
45	-53	1641.64	27.3606667	0.3234
45	-54	1661.121	27.68535	0.32468333
45	-55	1682.912	28.0485333	0.36318333
45	-56	1704.087	28.40145	0.35291667
45	-57	1724.492	28.7415333	0.34008333

<b>PSI</b>	<b>°C</b>	<b>Segundos</b>	<b>Minutos</b>	<b>Diferencia de tiempo (m)</b>
45	-58	1745.051	29.0841833	0.34265
45	-59	1765.687	29.4281167	0.34393333
45	-60	1786.785	29.77975	0.35163333
45	-61	1807.652	30.1275333	0.34778333
33	-62	1827.287	30.4547833	0.32725
33	-63	1849.925	30.8320833	0.3773
33	-64	1871.639	31.1939833	0.3619
33	-65	1892.968	31.5494667	0.35548333
33	-66	1914.22	31.9036667	0.3542
33	-67	1935.78	32.263	0.35933333
33	-68	1956.878	32.6146333	0.35163333
33	-69	1980.594	33.0099	0.39526667
33	-70	2057.825	34.2970833	1.28718333
33	-71	2092.629	34.87715	0.58006667
33	-72	2124.584	35.4097333	0.53258333
33	-73	2157.694	35.9615667	0.55183333
33	-74	2189.341	36.4890167	0.52745
33	-75	2223.144	37.0524	0.56338333
33	-76	2257.948	37.6324667	0.58006667
33	-77	2276.428	37.9404667	0.308
33	-78	2285.668	38.0944667	0.154
33	-79	2300.606	38.3434333	0.24896667
33	-80	2328.249	38.80415	0.46071667
33	-81	2362.129	39.3688167	0.56466667
20	-82	2407.79	40.1298333	0.76101667
20	-83	2461.613	41.0268833	0.89705
20	-84	2509.969	41.8328167	0.80593333
20	-85	2552.781	42.54635	0.71353333
20	-86	2606.681	43.4446833	0.89833333
20	-87	2670.514	44.5085667	1.06388333
20	-88	2769.69	46.1615	1.65293333
20	-89	2858.009	47.6334833	1.47198333
20	-90	2965.27	49.4211667	1.78768333
33	-91	3142.37	52.3728333	2.95166667
33	-92	3338.951	55.6491833	3.27635
33	-93	3534.3	58.905	3.25581667
45	-94	3774.925	62.9154167	4.01041667
45	-95	3869.789	64.4964833	1.58106667
45	-96	4048.891	67.4815167	2.98503333

PSI	°C	Segundos	Minutos	Diferencia de tiempo (m)
45	-97	4210.206	70.1701	2.68858333
45	-98	4346.958	72.4493	2.2792

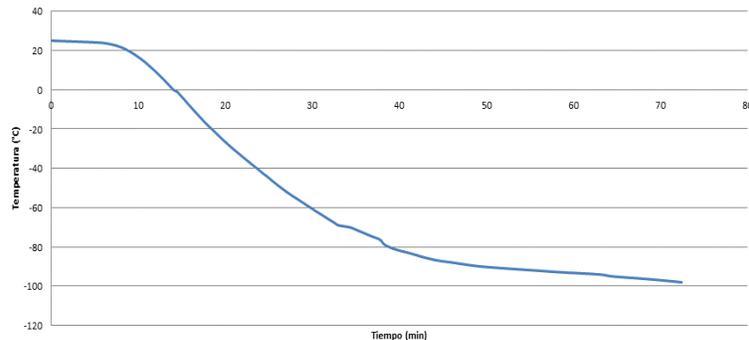


Figura 43. Se muestra la curva de comportamiento del sistema a los diferentes escalones

Utilizando el software laboratorio de matemáticas MATLAB R2013a, la herramienta System Identification Tool para identificar por medio de métodos gráficos la ecuación de transferencia de la planta basado en la data de la Tabla 12 [5], [14], [20].

Como primer paso se crean las variables presión (psi) y temperatura (°C) que consiste en copiar y pegar los valores correspondiente a la Tabla 12.

En el editor de MATLAB, se escribe *ident* o dar clic en el menú *apps* para seleccionar el comando *system identification* para trabajar con la herramienta System Identification Tool y proceder a hacer la identificación del sistema [41], [41].

En esta herramienta de identificación se selecciona la opción Time domain data... para ingresar la variable de entrada Tiempo y la variable de salida Temperatura anteriormente asignadas, para este caso el tiempo de inicio es cero y el tiempo de muestreo es 1000ms (1s) si se trabajan respuestas rápidas el tiempo de muestreo debe ser mucho más pequeño y se da clic en el botón Import para que importe la data, con esto, logre identificar y pueda hacer el proceso de modelación seleccionando la opción Transfer Function Models..., para que de la función de transferencia del sistema, seguidamente nos pide el número de polos y ceros que en lo posible se deben colocar 1 polo y 0 zero para lograr una función de transferencia sencilla si el sistema lo permite. La Figura 44 muestra el porcentaje de aproximación que para este caso fue del 94.17%.

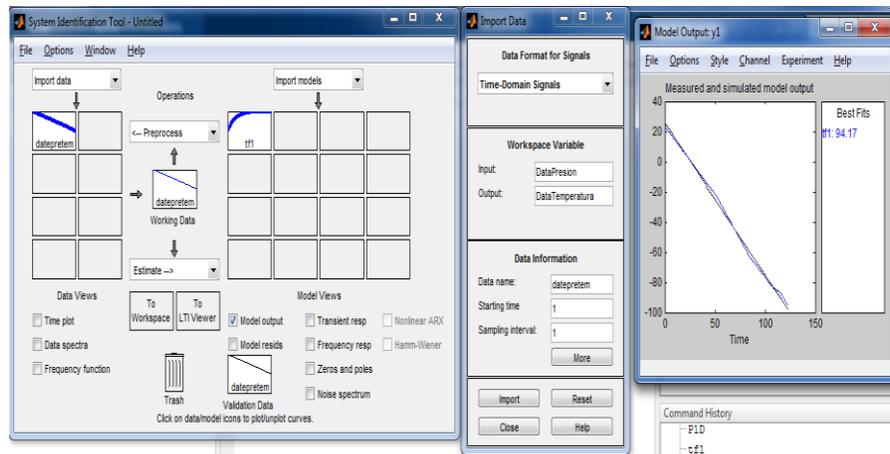


Figura 44. Se estimó la función de transferencia y el porcentaje de aproximación de 94.17%

Para que muestre el porcentaje de aproximación de la función de transferencia chuleamos la opción *model output*, si muestra una aproximación mayor del 90% se considera que la función de transferencia es buena.

Se procede a pasar la función de transferencia calculada a Workspace arrastrando el bloque *tf1* al recuadro *to Workspace*.

Ya en el workspace digitamos el nombre del bloque que identifica la función de transferencia que en este caso es *tf1* y así nos mostrara la función de transferencia de forma matemática en parámetros de la frecuencia. El código que se digita es el siguiente:

```
>> tf1
```

Y da la siguiente respuesta que es la función de transferencia que describe al sistema.

$$tf1 = \frac{-0.02732}{s+0.0002303} \text{ (ec.4)}$$

**4.2.6.6 Calculo del controlador adecuado para el sistema.** Utilizando la herramienta PID Tuning de MATLAB y por medio de (ec.4) se calcularon los diferentes valores correspondientes a los coeficientes P (proporcional), I (Integral) y D (derivativo).

Primero se simuló la respuesta del sistema ante una señal escalón (step) para un controlador tipo P dando como respuesta un tiempo de respuesta  $T_r$  de 3140 s equivalentes a 52 min, un tiempo

de estabilidad  $T_s$  de 5580 s equivalentes a 93 min visto en la Figura 45 y la constante de proporcionalidad  $K_p = -0.017216$ .

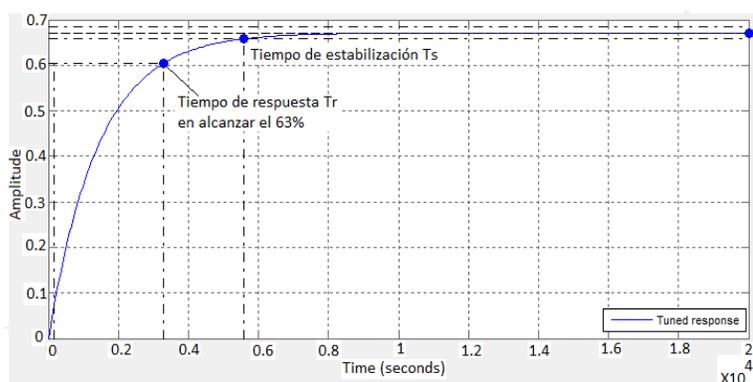


Figura 45 Respuesta del controlador tipo P a la señal escalón (step)

La Figura 45 muestra que la señal nunca llega a 1 que sería el valor deseado.

La simulación de la respuesta del sistema al escalón (step) para el controlador PI que cuyos valores de constantes calculados con la herramienta PID Tuning de MATLAB fueron  $K_p = -0.0087863$  y  $K_i = -6.0718e-06$  se obtuvo un tiempo de respuesta  $T_r$  de 3510s equivalentes a 58.5min Figura 46.

Los valores  $K_p$  y  $K_i$  para el controlador PI fueron implementados en el bloque PID del software LabView y se obtuvo un tiempo de respuesta de 4880 s (81 min) en recorrer desde la temperatura ambiente  $25^\circ\text{C}$  hasta  $-120^\circ\text{C}$  temperatura final del proceso de congelamiento tiempos que se pueden mejorar variando los valores de las constantes del controlador PI [3], [18], [24], [25] y [41].

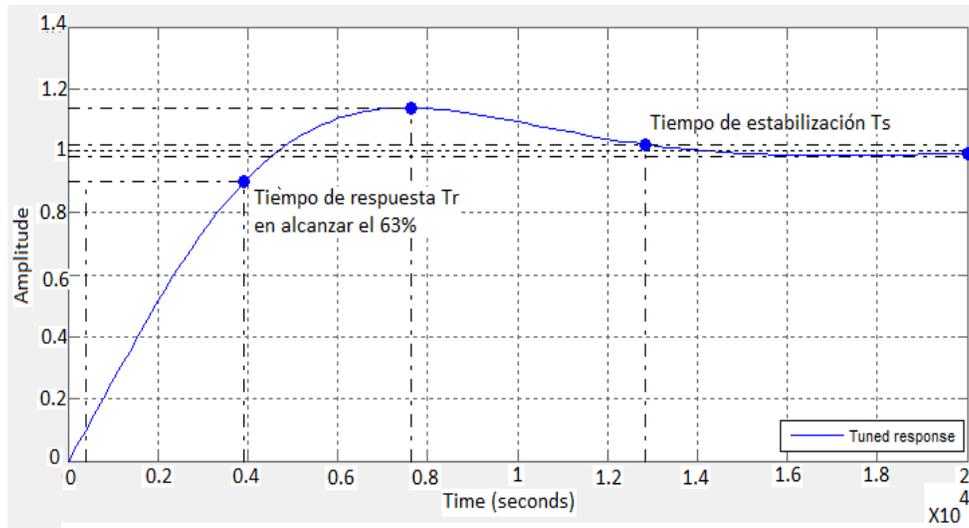


Figura 46 Respuesta controlador PI

El controlador seleccionado para este sistema es el PI que cuyos valores de constantes son  $K_p = -0.0087863$  y  $K_i = -6.0718e-06$  calculados.

## 5. Puesta en marcha del Sistema de Automatización y Control de Congelamiento de Semen Bovino Como Prueba Piloto para Determinar la Correcta Funcionalidad del Mismo

El objetivo principal de este capítulo es la puesta en marcha del sistema de automatización y control de semen bovino y validar el funcionamiento en prueba piloto. Para lo anterior describimos los siguientes componentes:

### 5.1 Ensamble del Hardware

Para este numeral se expone gráficamente el proceso de ensamble de todos los componentes de hardware que componen el sistema.

Como se describe en el capítulo anterior basado en el diagrama P&DI los componentes de hardware serían los siguientes:

**Compresor.** Proporciona un máximo de 150 psi de presión de aire, motor trifásico, tres pistones utilizado como fuente neumática para el sistema y que es suficiente para el sistema dado que el sistema exige como 100% 66 psi.

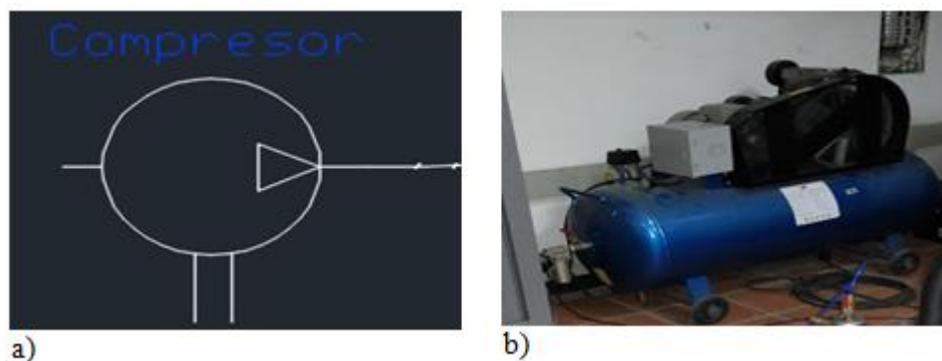


Figura 47. a) Símbolo compresor P&DI, b) Compresor

**Unidad de tratamiento de aire con válvula distribuidora 3/2:** Compuesto por filtro, regulador y manómetro de 1MPa, filtraje de 5 $\mu$ m e Incluye una válvula de descarga de 3/2 con silenciador para la conexión/desconexión del resto de circuitos.

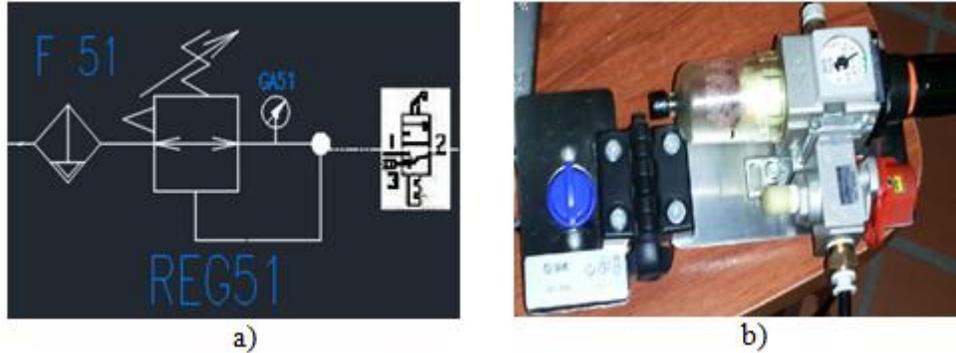


Figura 48 Figura 60 y 61. a) Símbolo Unidad de tratamiento de aire P&DI, b) Unidad de tratamiento de aire

**Presostato digital programable. Salida Digital/analógica:** Compuesto por un display indicador de presión en psi y bar seleccionable, mide la presión que está circulando con salida analógica en voltios que representan la presión para ser adquirida en una pc.

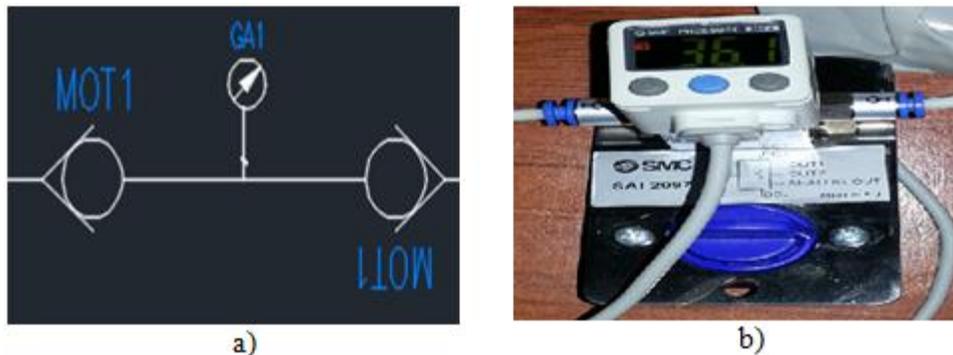


Figura 49 a) Símbolo Presostato P&DI, b) Presostato

**Tapón para la entrada de aire y salida de gas nitrógeno:** Se fabricó una cubierta en aluminio para el tanque de capacidad de 20 litros que contiene el nitrógeno líquido para la entrada de aire que viene del compresor que deja pasar la electroválvula según la proporción necesaria. Este tapón entra a presión, esta sujeta con unos resortes al tanque y contiene 3 agujeros, uno por dónde entra el aire, el segundo por donde sale el gas de nitrógeno que es producido por el burbujeo del aire entrante en el nitrógeno líquido y un tercero para una válvula de seguridad.



Figura 50. 1) Entrada de aire, 2) Salida de gas Nitrógeno, 3) Salida para Válvula de seguridad

Los demás elementos de control, la cámara criogénica y tanque de almacenamiento de nitrógeno líquido N<sub>2</sub> están descritos en el capítulo 3.

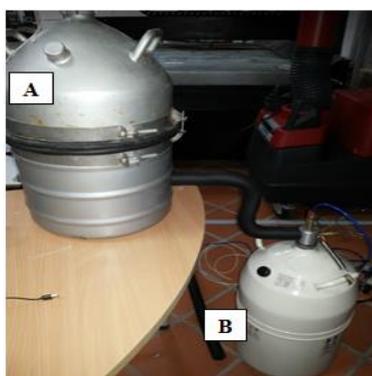


Figura 51. Sistema de enfriamiento ensamblado A) Cámara Criogénica, B) Tanque con nitrógeno líquido N<sub>2</sub>



Figura 52. Sistema de congelamiento bovino ensamblado funcionando

## 5.2 Programación del Software de Adquisición e Implementación del Controlador Calculado para el Control del flujo Neumático por Medio de la Electroválvula

El software de adquisición y control de variables utilizado fue el NI LabView 2012, fue seleccionada por su fácil programación en relación con otros programas, su popularidad en la academia, funcionalidad y excelente soporte técnico de parte de los Ing. de la National Instruments.

Se diseñó la fase de adquisición de datos para las variables de temperatura y presión como se ven a continuación Figura 53 y Figura 54 [36], [40].

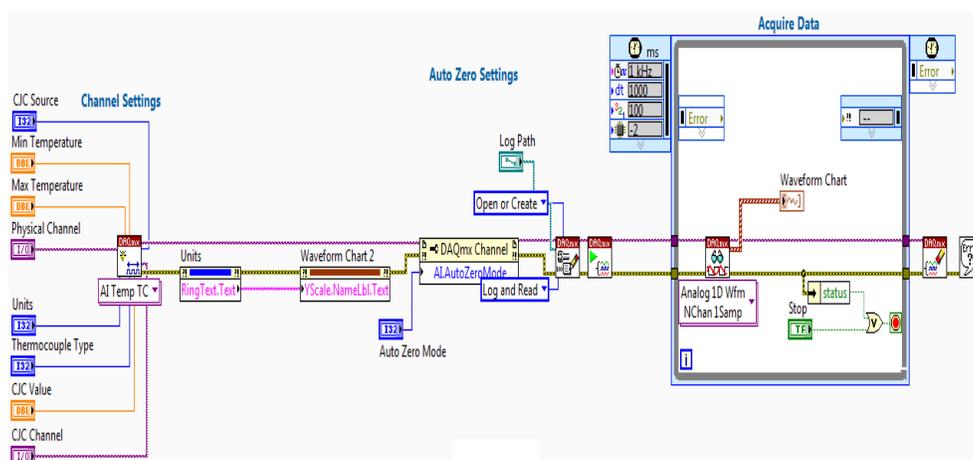


Figura 53. Sistema de adquisición de temperatura

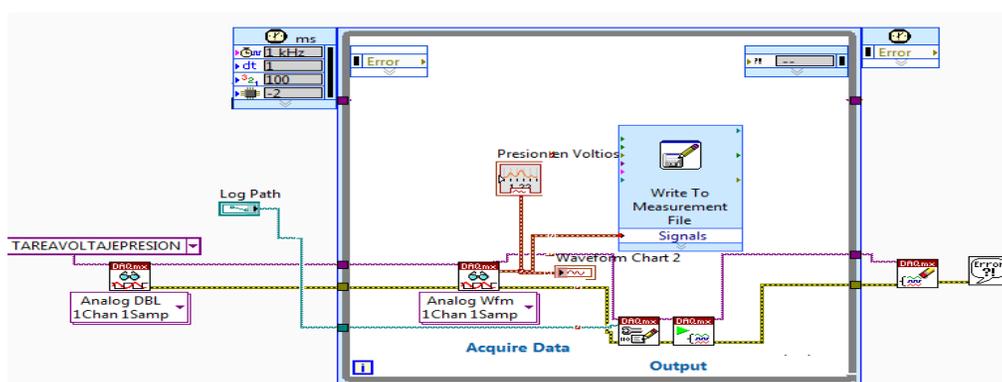


Figura 54. Sistema de adquisición de presión

En el sistema de adquisición de datos de la variable temperatura y presión se almacenaron en archivo .tdms que representaron la data para posteriormente ser analizados e identificado el sistema.

Ya identificado el sistema utilizando herramientas computacionales como MATLAB R2013a se calcularon las constantes  $K_c$  (Proporcional),  $K_i$  (Integral) y  $K_d$  (derivativa). En controlador calculado fue uno tipo PI donde fue implementado en el software NI LabView 2012 utilizando el bloque PID.vi que mostramos a continuación en sus respectivas ventanas de bloque de diagrama y el panel frontal [36], [40].

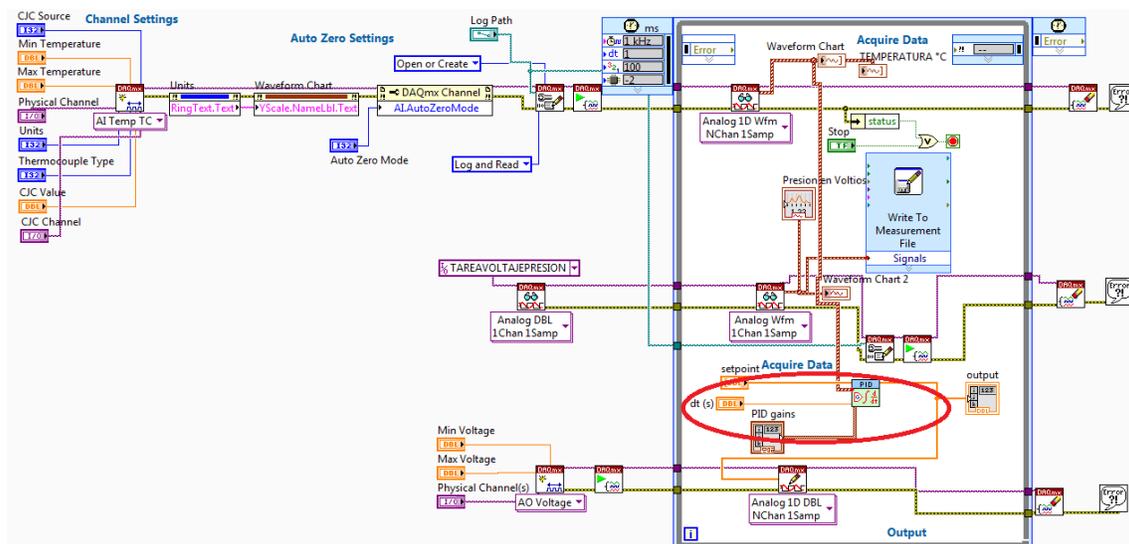


Figura 55. Implementación del PID en el sistema de control

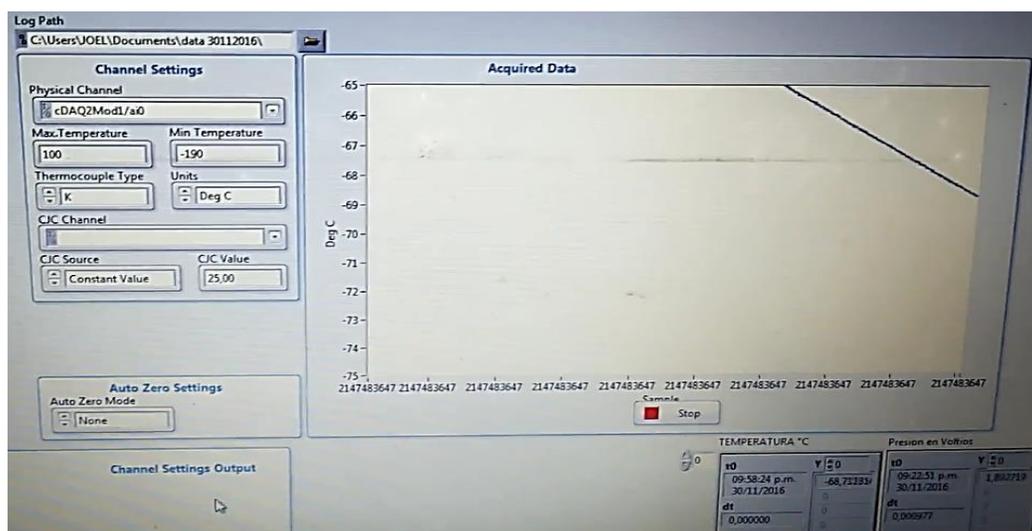


Figura 56 Panel frontal

Para esta investigación es de gran importancia hacer uso de los elementos de protección personal EPP como son guantes, bata o chaqueta manga larga, gafas, jeans y botas para la manipulación del nitrógeno líquido  $LN_2$  [1].



## 6. Análisis de Resultados

Con el fin de lograr los objetivos planteados al inicio de la tesis y concluidas las etapas de modelamiento y puesta en marcha del sistema se inicia esta importante fase de la investigación.

### Variables Necesarias para llevar a Cabo el Proceso:

Para llevar a cabo el proceso de congelamiento de semen bovino se tuvieron en cuenta la presión neumática como variable de entrada o variable manipulada y la temperatura como la variable de salida o variable controlada.

A través la Tabla 12 o Tabla 6 podemos analizar que a 33 psi el sistema muestra un tiempo muerto de 5.576 min en mostrar una respuesta de decremento de la temperatura desde la temperatura ambiente al siguiente grado. Luego el tiempo va decreciendo a 1.4476 min hasta lograr un valor entre cada cierto grado de 0.249 min grado como se puede observar en la siguiente grafica representada en la figura 57.

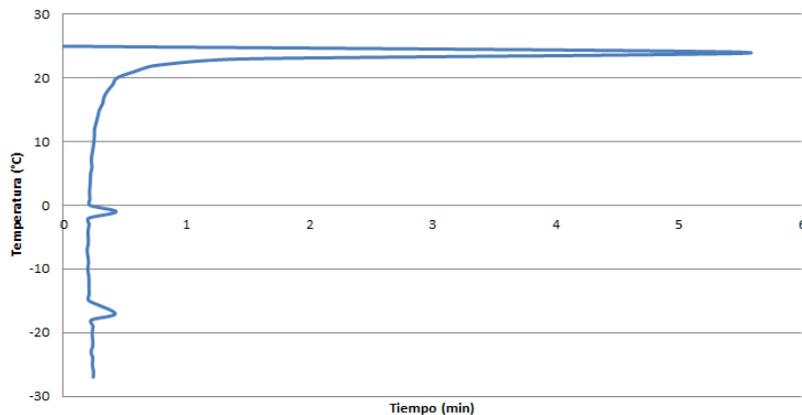


Figura 57 Grafica comportamiento del sistema tiempo vs temperatura a 33 PSI

A 33 PSI se obtuvo un promedio de 0.38645609 min por grado centígrado lo que indica que a mayor presión se puede lograr un mejor tiempo de respuesta y descenso gradual de la temperatura.

**Respuesta del sistema modelado.** Para el análisis del modelado del sistema utilizamos la herramienta simulink de Matlab para simular las respuestas de la planta con un controlador proporcional (P) como se muestra en la Figura 58.

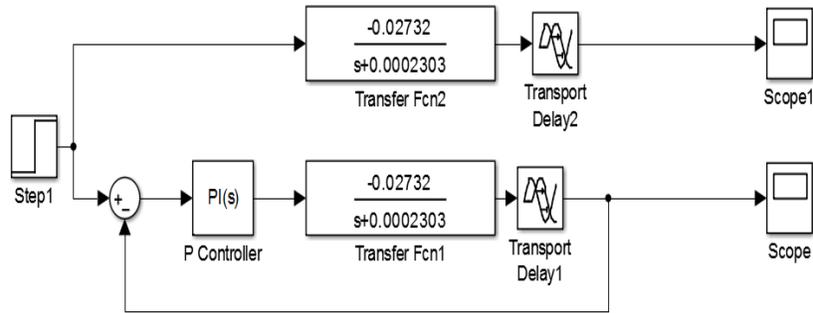


Figura 58. Diagrama a bloques del sistema en lazo abierto (arriba) y en lazo cerrado (abajo) con el PID

De esta simulación tendremos dos respuestas; respuesta en simulink en lazo abierto ante una señal escalón (step) de la planta representada por la función de transferencia ecu. (4) en el bloque Transfer Fcn2 ver Figura 59 y la respuesta en simulink en lazo cerrado ante una señal escalón (step) donde encontramos el bloque del controlador tipo P (P Controller) seguido por el bloque que representa la planta (Transfer Fcn1) modelada por la función de transferencia ecu. (4) ver Figura 60.

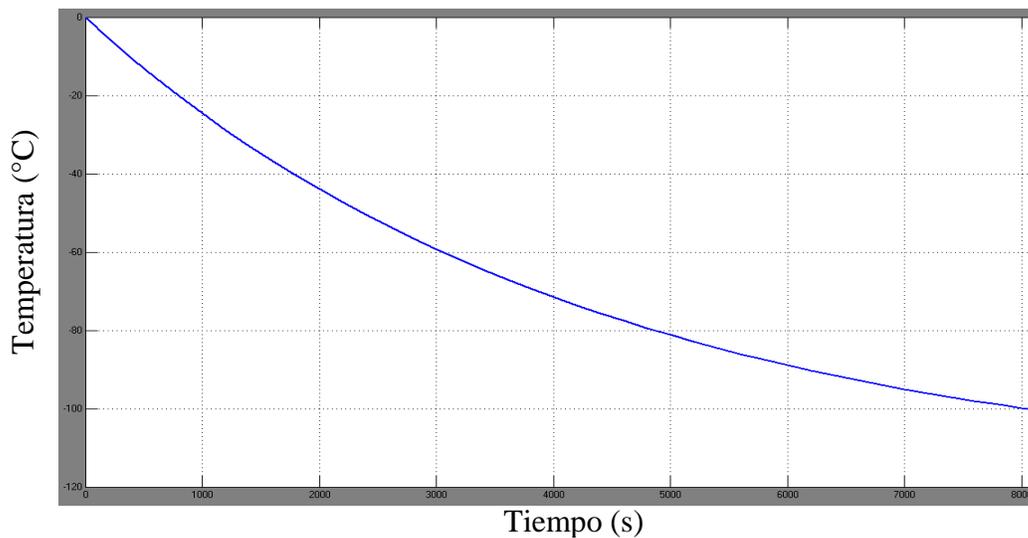


Figura 59. Respuesta en lazo abierto

En la Figura 59 se puede ver que, a medida que transcurre el tiempo la temperatura va disminuyendo gradualmente.

Respuesta en simulink en lazo cerrado del sistema ante una señal escalón (step) con controlador proporcional (P) Figura 60 se puede apreciar que el sistema no alcanza en valor de 1

que sería el valor deseado. Esta es la razón por la que se descarta la utilización del controlador proporcional (P).

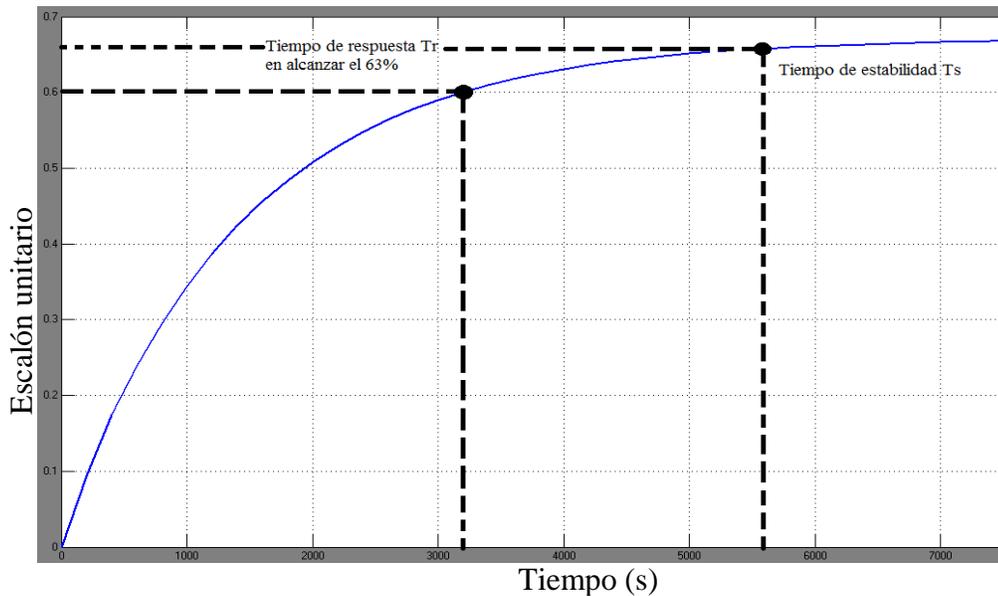


Figura 60 Respuesta en lazo cerrado controlador tipo P

Para el análisis del modelo con un controlador proporcional integral (PI) se utilizó el diagrama a bloques de la Figura 58 con la diferencia que ya no utilizamos un controlador proporcional P si no un controlador proporcional integral PI donde se digitaron los valores correspondientes a  $K_p = -0.0087863$  y  $K_i = -6.0718e-06$  calculados.

La respuesta en lazo cerrado al escalón (step) para el sistema con un controlador PI proporcionó unos resultado que mejoran las respuestas ya que es capaz de seguir y alcanzar el valor set point, estabilizarse y el tiempo de respuesta del sistema  $T_r$  es menor 2350s 39.17 minutos donde si lo comparamos con el controlador proporcional este no alcanza nunca el valor set point como se observa Figura 61 .

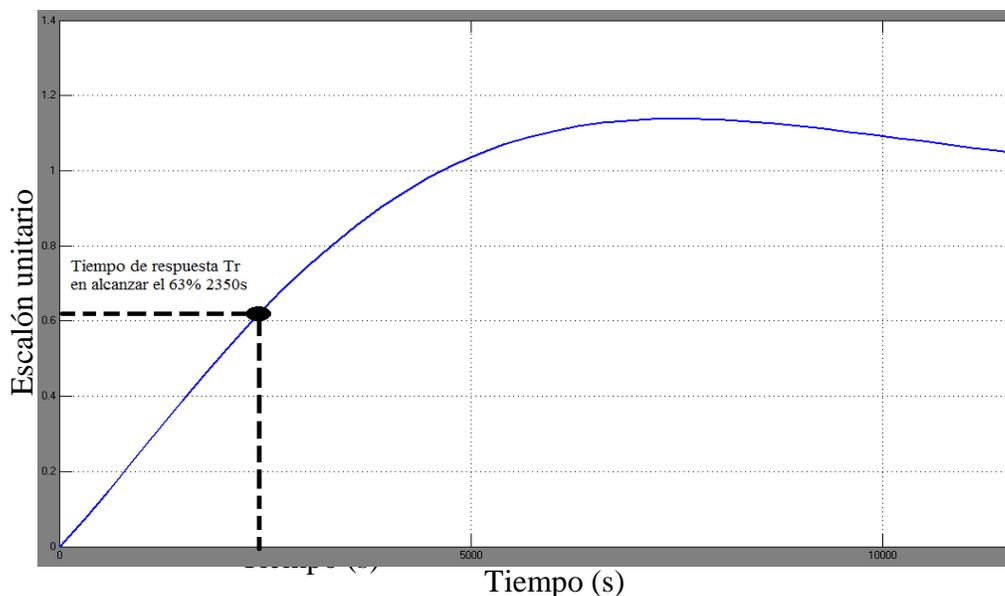


Figura 61 Respuesta en lazo cerrado del sistema con controlador PI

Estos tiempos se pueden mejorar variando los valores de las constantes  $K_p$  y  $K_i$  del controlador PI

Figura 62. Para este sistema se recalcularon los valores de las constantes siguiendo el anterior procedimiento y se lograron los siguientes valores de las constantes  $K_p$  (-0.045213) y  $K_i$  (-5.5875e-05). Estos valores dieron unos resultados considerablemente mejores alcanzando tiempos de respuesta  $T_r$  de 550s equivalentes a 9.166 min tiempo deseado y que cumple con los estándares de estudios teóricos [29] realizados donde el tiempo de congelamiento es el factor determinante en la disminución o aumento del estrés en los espermatozoides.

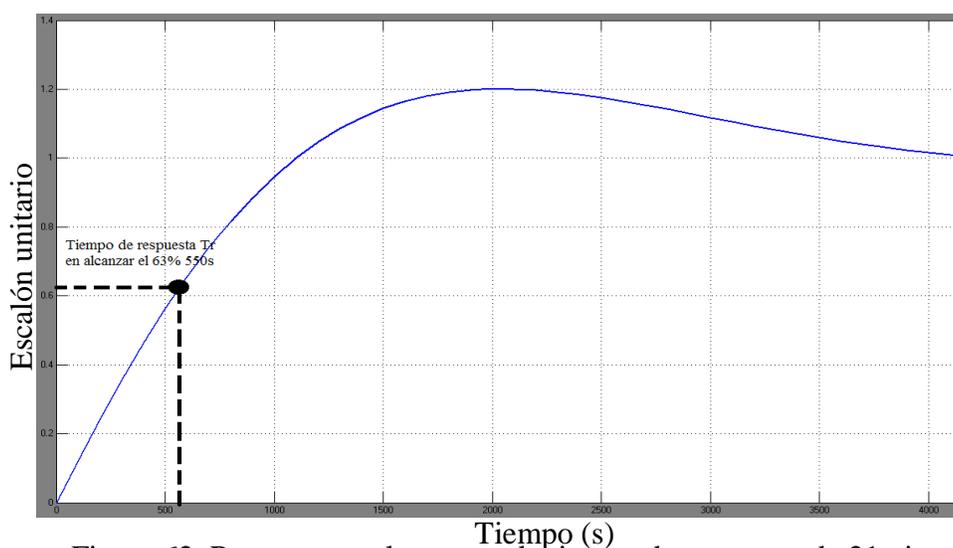


Figura 62. Respuesta en lazo cerrado tiempo de respuesta de 21min

**Puesta en marcha.** A partir de los valores para mantener el ritmo de congelamiento comúnmente usado descritos anteriormente de  $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$  entre los  $+5^{\circ}\text{C}$  a  $-10^{\circ}\text{C}$ ; de  $-40^{\circ}\text{C}/\text{min}$  entre los  $-10^{\circ}\text{C}$  a  $-100^{\circ}\text{C}$ ; de  $-20^{\circ}\text{C}/\text{min}$  entre los  $-100^{\circ}\text{C}$  a  $-140^{\circ}\text{C}$  descrito en la Tabla 13 se trató seguir este patrón.

Tabla 13. Ritmo de congelamiento

RITMO DE CONGELAMIENTO									
Tiempo S	C°	208.5	-29	261	-64	313.5	-99	417	-134
0	5	210	-30	262.5	-65	315	-100	420	-135
12	4	211.5	-31	264	-66	318	-101	423	-136
24	3	213	-32	265.5	-67	321	-102	426	-137
36	2	214.5	-33	267	-68	324	-103	429	-138
48	1	216	-34	268.5	-69	327	-104	432	-139
60	0	217.5	-35	270	-70	330	-105	435	-140
72	-1	219	-36	271.5	-71	333	-106		
84	-2	220.5	-37	273	-72	336	-107		
96	-3	222	-38	274.5	-73	339	-108		
108	-4	223.5	-39	276	-74	342	-109		
120	-5	225	-40	277.5	-75	345	-110		
132	-6	226.5	-41	279	-76	348	-111		
144	-7	228	-42	280.5	-77	351	-112		
156	-8	229.5	-43	282	-78	354	-113		
168	-9	231	-44	283.5	-79	357	-114		
180	-10	232.5	-45	285	-80	360	-115		
181.5	-11	234	-46	286.5	-81	363	-116		
183	-12	235.5	-47	288	-82	366	-117		
184.5	-13	237	-48	289.5	-83	369	-118		
186	-14	238.5	-49	291	-84	372	-119		
187.5	-15	240	-50	292.5	-85	375	-120		
189	-16	241.5	-51	294	-86	378	-121		
190.5	-17	243	-52	295.5	-87	381	-122		
192	-18	244.5	-53	297	-88	384	-123		
193.5	-19	246	-54	298.5	-89	387	-124		
195	-20	247.5	-55	300	-90	390	-125		
196.5	-21	249	-56	301.5	-91	393	-126		
198	-22	250.5	-57	303	-92	396	-127		
199.5	-23	252	-58	304.5	-93	399	-128		
201	-24	253.5	-59	306	-94	402	-129		
202.5	-25	255	-60	307.5	-95	405	-130		
204	-26	256.5	-61	309	-96	408	-131		

RITMO DE CONGELAMIENTO							
205.5	-27	258	-62	310.5	-97	411	-132
207	-28	259.5	-63	312	-98	414	-133

Este ritmo de congelamiento se seleccionó basado en tesis doctoral [36].

Para la puesta en marcha del sistema se tienen la limitante de la presión máxima que puede soportar el tanque que contienen el nitrógeno líquido y que según sus características experimentales es de 74 PSI lo cual nos llevó a acordar que el 100% de presión de entrada sea de 66 PSI por motivos de seguridad.

Como se pudo ver en la Tabla 6 cuando el sistema se puso en marcha a 33 PSI (50%) el ritmo de congelamiento (rampa de descenso de la temperatura) fue de 15°C en 3.5 minutos desde 5°C a -10°C lo que nos da un promedio de 0.23604778 min por grado en descenso ver Tabla 13 mostrando una diferencia de solo 0.5 min con respecto al ritmo de congelamiento de la Tabla 12.

Tabla 14. Ritmo de congelamiento del sistema

Diferencia	Temperatura °C	PSI
0.22073333	5	33
0.21945	4	33
0.2156	3	33
0.21175	2	33
0.2156	1	33
0.2156	0	33
0.42863333	-1	33
0.20661667	-2	33
0.20918333	-3	33
0.2002	-4	33
0.20148333	-5	33
0.20276667	-6	33
0.1925	-7	33
0.19891667	-8	33
0.20405	-9	33
0.19763333	-10	33

Cuando se cambiaron los valores de las constantes del controlador Kp (-0.045213) y Ki (-5.5875e-05) para mejorar los tiempos de respuesta se observó la linealidad del sistema cuyo

producto fue que su tiempo disminuyo a la mitad dando un promedio entre grado y grado de descenso de 0.112168791 min por grado lo que podemos concluir que el proceso de congelamiento se demoró unos 17 min en alcanzar  $-140^{\circ}\text{C}$ . La electroválvula llego a una abertura del 100% dejando pasar 66 PSI de presión y logrando la siguiente respuesta descrita en la Tabla 15 de resultados.

*Tabla 15. Respuesta del sistema con la modificación de las constantes Kc y Ki*

<b>Diferencia</b>	<b>Temperatura °C</b>	<b>PSI</b>
0.11036667	5	66
0.11489529	4	66
0.11977778	3	66
0.09988208	2	66
0.1078	1	66
0.11287958	0	66
0.23812963	-1	66
0.09746069	-2	66
0.10459167	-3	66
0.10481675	-4	66
0.11193519	-5	66
0.09564465	-6	66
0.09625	-7	66
0.10414485	-8	66
0.11336111	-9	66
0.09322327	-10	66
0.1078	-11	66
0.22441536	-12	66
0.11478704	-13	66
0.09867138	-14	66
0.1001	-15	66
0.10548866	-16	66
0.11264815	-17	66
0.09080189	-18	66
0.09945833	-19	66
0.10683246	-20	66
0.1097963	-21	66
0.1041195	-22	66
0.109725	-23	66
0.11287958	-24	66
0.11763889	-25	66
0.10169811	-26	66
0.098	-27	66
0.25213725	-28	66
0.10330833	-29	66
0.11556719	-30	66
0.12191667	-31	66
0.10169811	-32	66
0.105875	-33	66
0.11287958	-34	66
0.11977778	-35	66
0.20218553	-36	66

<b>Diferencia</b>	<b>Temperatura °C</b>	<b>PSI</b>
0.10330833	-37	66
0.10952007	-38	66
0.11122222	-39	66
0.09503931	-40	66
0.10138333	-41	66
0.10078534	-42	66
0.11050926	-43	66
0.09625	-44	66
0.09881667	-45	66
0.11287958	-46	66
0.23812963	-47	66
0.09746069	-48	66
0.10459167	-49	66
0.10481675	-50	66
0.11193519	-51	66
0.09564465	-52	66
0.09625	-53	66
0.10414485	-54	66
0.11336111	-55	66
0.09322327	-56	66
0.11036667	-57	66
0.11489529	-58	66
0.11977778	-59	66
0.09988208	-60	66
0.08983333	-61	66
0.12682353	-62	66
0.21431667	-63	66
0.10817627	-64	66
0.11621296	-65	66
0.09443396	-66	66
0.10074167	-67	66
0.10616056	-68	66
0.10694444	-69	66
0.09382862	-70	66
0.102025	-71	66
0.10347295	-72	66
0.12262963	-73	66
0.10351415	-74	66
0.1078	-75	66
0.11086387	-76	66
0.10694444	-77	66
0.09382862	-78	66
0.102025	-79	66
0.10347295	-80	66
0.12262963	-81	66
0.10351415	-82	66
0.1078	-83	66
0.11086387	-84	66
0.12262963	-85	66
0.10351415	-86	66
0.1078	-87	66
0.11086387	-88	66
0.11977778	-89	66

Diferencia	Temperatura °C	PSI
0.10169811	-90	66
0.21431667	-91	66
0.10817627	-92	66
0.12262963	-93	66
0.10351415	-94	66
0.098	-95	66
0.12455882	-96	66
0.1078	-97	66
0.11287958	-98	66
0.23812963	-99	66
0.09746069	-100	66
0.10459167	-101	66
0.10481675	-102	66
0.11193519	-103	66
0.09564465	-104	66
0.09625	-105	66
0.10414485	-106	66
0.23812963	-107	66
0.09746069	-108	66
0.10459167	-109	66
0.10481675	-110	66
0.11193519	-111	66
0.09564465	-112	66
0.09625	-113	66
0.10414485	-114	66
0.11336111	-115	66
0.09322327	-116	66
0.1078	-117	66
0.22441536	-118	66
0.11478704	-119	66
0.09867138	-120	66

## 6.1 Análisis con otras congeladoras programables

En la actualidad existen congeladoras de semen bovino fabricadas en países europeos líderes a nivel mundial como Francia (Congeladora Computarizada Automática Digicool IMV), su accesibilidad es muy baja, pues solo tiene presencia en países como Francia, USA, China, Países bajos, India e Italia [32] Figura 63. En Alemania la empresa de tecnologías en reproducción animal (minitube), ofrece en el mercado la congeladora TurboFreezer Figura 64 (versión más pequeña) donde el precio es muy alto, alrededor de los 100.000 dólares y son voluminosas. Minitube tiene presencia en países como Alemania, USA, España, Chile, Brasil, Austria, China, India y centro de Europa según se reporta en [43].



Figura 63. Congeladora Computarizada Automática Digicool IMV



Figura 64. Congeladora TurboFreezer de Minitube

En Estados Unidos y Australia se produce la congeladora portable Freeze control, modelo CL-2200, CL-3300, CL-5500, CL8800 del labBiogenics, Napa, California, USA y Cryologic, Mulgrave, Australia, a la cual hay que adicionarle el nitrógeno líquido de forma manual y solo congela un máximo de 23 pajillas de 0.5ml teniendo en cuenta que los modelos que controlan temperaturas de  $40^{\circ}\text{C}$  hasta  $-120^{\circ}\text{C}$  son la CL-3300 y CL-8800 Figura 65. [3] pág. 23 y [32].



Figura 65. Freeze control CL8800 System

En Suramérica Brasil se lanza como una de las potencias en investigación aplicada con respecto al desarrollo de congeladoras de semen bovino. En este país se desarrolló la Congeladora

Automática De Semen y Embriones CRYOGEN HSE Portátil de la empresa NEOVET con capacidad para 300 pajillas de 0.5ml y 600 de 0.25ml Figura 66 y tiene distribuidores de sus productos en Colombia.

La Tabla 16 muestra las características más importantes de cada una de las congeladoras comunes que hay en el mercado para compararla con los resultados del sistema de congelamiento desarrollado en esta investigación.



Figura 66. Congeladora Automática De Semen Y Embriones CRYOGEN HSE Portátil

Tabla 16. Características comparativas de congeladoras comerciales vs sistema diseñado

Congeladora	N° de pajillas 0.5ml	Cantidad LN2 (L)	Tamaño	Alimentación
TurboFreezer de Minitube	1500	8,5	153 x 132 x 86 cm (anx alx pro)	220 V/50 Hz
MT Freezer 2.0 de Minitube	1200	8,5	112 x 88 x 105 cm	110 V/60 Hz or 230 V/50 Hz
Micro-Digicool IMV	240	8	600 x 380 x 520 mm	220V/50Hz/6A
Freeze control, modelo CL-8800	23	1.5	195 x 225 x 90mm (WxDxH) del controlador	110-220V/50-60Hz
Congeladora Automática CRYOGEN HSE Portátil	300	6	C45,0 x L35,0 cm x A25,0	127 y 220 Vac (50 y 60 Hz)
Sistema desarrollado en la presente investigación	1028	6	Tanque de LN2 de 20 L	110-220V/50-60Hz

Las congeladoras TurboFreezer de Minitube y Micro-Digicool IMV no tendrían accesibilidad en Colombia por que la frecuencia de red a la que trabaja es de 50Hz y en Colombia

se trabaja a 60Hz [21] pág. 27 y [33] pág.6 respectivamente y aunque existen convertidores comerciales que transforman frecuencias 50Hz a 60Hz y viceversa son costosos y la instalación final se vería afectada desde el punto de vista financiero. Las congeladoras MT Freezer 2.0 de Minitube no tienen problema con la energía pero es voluminosa y no se puede considerar su portabilidad.

Las congeladoras Freeze control, modelo CL-8800 es accesible, portátil pero se observó en la Tabla 16 que la capacidad en pajillas es muy pequeña en comparación con las demás congeladoras.

La Tabla 16 muestra que la congeladora comercial que se adapta a las necesidades de la región sería la CRYOGEN HSE Portátil, no tiene inconvenientes por el suministro de energía, con una capacidad para congelar 300 pajillas.

Por las razones anteriormente expuestas, podríamos afirmar que en nuestra región continuará la aplicación manual de los procesos de congelamiento de semen bovino cuyos resultados no son los deseados. Por ello, fue necesario desarrollar sistemas automáticos de congelamiento de semen bovino para que se dé un desarrollo tecnológico autóctono con recursos propios aprovechando cada uno de los equipos y elementos disponibles. Es esta razón que impulsó el desarrollo del sistema de automatización y control para el congelamiento de semen bovino donde se congelan un número de 1028 pajillas de 0.5ml, con un consumo de LN<sub>2</sub> de 6 litros por ciclo a partir de 5°C en 13 min aproximadamente.

Algunas modificaciones pueden ser realizadas sobre el sistema desarrollado como mostrado en la Figura 29 a fin de eliminar el problema de la portabilidad ya que con la utilización del compresor esta cualidad es limitada.

El sistema modificado ya no contará con el compresor de 120 libras, este será sustituido por una estación de calor a la cual se le controlara la temperatura a la que se calentará el aire que entra al tanque que contiene el nitrógeno líquido LN<sub>2</sub> ver **Figura 67**, este choque térmico generará mayor cantidad de gas nitrógeno y con menor presión de entrada.

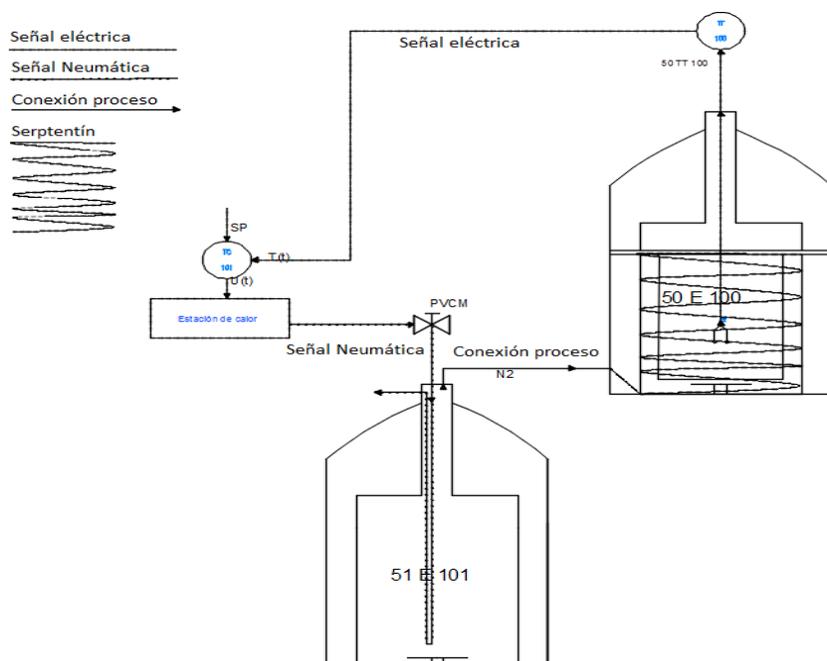


Figura 67. Sistema modificado para su portabilidad

## 7. Conclusiones

En este proyecto de investigación aplicada se encontró una mejor alternativa para llevar a cabo el proceso de congelamiento de semen bovino, mejorando la curva de frío para tener un semen congelado de mejor calidad, “teniendo en cuenta los tiempos estipulados para que los espermatozoides no entren en estrés por causa de la velocidad de enfriamiento con respecto al proceso manual” que se hace en la región y los procesos que llevan a cabo las congeladoras analizadas previamente.

Se mejoró en el uso del nitrógeno líquido ya que el proceso se pudo llevar a cabo de 5 a 6 litros para congelar 1028 pajillas, mientras que anteriormente se usaban 6 litros para atemperar la cava donde se llevaba a cabo el proceso manual y considerando el rendimiento de las congeladoras comerciales, en cantidad de nitrógeno versus cantidad de pajillas, el prototipo desarrollado es mejor ver Tabla 16.

Para el desarrollo del sistema de congelamiento de semen de Bovino se utilizaron materiales y equipos que existen en el centro Agroempresarial SENA Aguachica y tecnoparque nodo Ocaña, los cuales fueron de gran importancia para el diseño y desarrollo del sistema y sobre todo para la ejecución de la tesis. .

Es ineludible reconocer que el sistema está sujeto a mejoras tanto de diseño como de tecnología así como se mencionó anteriormente haciendo un análisis y comparativa con otras congeladoras.

A través de los estudios llevados a cabo es posible adecuar otras curvas de congelamiento para semen de diferentes especies de ganado e investigar con otros tipos de diluyentes, generando tiempos más largos o cortos que puedan disminuir el estrés de los espermatozoides expuestos en el artículo de Stornelli

Cabe mencionar que Se pueden a partir del sistema desarrollado es posible congelar un máximo de 1028 pajillas, gracias al diseño del portapajillas que aprovecha todo el espacio disponible de la cámara criogénica.

A partir de un nuevo diseño, el cual consistió en utilizar una bala de oxígeno, se logró adecuar térmicamente para envasar el nitrógeno líquido en ella con el fin de que sencillamente el nitrógeno líquido pasara hacia la cámara criogénica por medio de una electroválvula como elemento final de control. Pese a eso fue inviable depositar el nitrógeno líquido en la bala a través de un orificio (forma de embudo) ya que hubo alto riesgo de accidentalidad por derramamiento del nitrógeno que producen quemaduras frías por baja temperatura y en controlador de la válvula se congeló.

Con la ejecución de este proyecto se determinó que para llevar a cabo el proceso de congelamiento se tiene que imprimir aire en el tanque de nitrógeno a través de un compresor o aire caliente a través de una estación de calor para que la presión y el choque térmico puedan hacer fluir gases o líquido.

Para esta investigación es de gran importancia advertir sobre hacer uso de los elementos de protección personal EPP (es decir, guantes, bata o chaqueta manga larga, gafas, jeans y botas) para la manipulación del nitrógeno líquido LN<sub>2</sub>, de lo contrario estaría en riesgo alto la integridad física por quemaduras frías causadas por las bajas temperaturas llegando a casos de amputación de miembros por exposiciones peligrosas.

## Referencias Bibliográficas

- [1] Ahmed, M., Sinha, S., Deka, B. C., Biswas, R. K., & Burhagohain, R. (2016). Effect of Rates of Freezing on Quality of Swamp Buffalo Semen Cryopreserved Using Programmable Freezer. *Indian Vet. J*, 93(08), 22-24.
- [2] Álvarez, S. G., GÓMEZ, F. J. G., GARCÍA, I., & MANCERAS, D. Y. A. Á. C. (2007). Riesgos de los líquidos criogénicos. *Técnica Industrial*, 268, 32.
- [3] Amirat, L., Anton, M., Tainturier, D., Chatagnon, G., Battut, I., & Courtens, J. L. (2005). Modifications of bull spermatozoa induced by three extenders: Biociphos, low density lipoprotein and Triladyl, before, during and after freezing and thawing. *Reproduction*, 129(4), 535-543.
- [4] Ang, K. H., Chong, G., & Li, Y. (2005). PID control system analysis, design, and technology. *IEEE transactions on control systems technology*, 13(4), 559-576.
- [5] Aranguren, S. & Tarantino, R. (2011). Modelado e identificación de sistemas.
- [6] Beckwith, T. G., Marangoni, R. D., & Lienhard, J. H. (2007). *Mechanical measurements* (Vol. 768). Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall.
- [7] BARON, E. M. P., & TUNJA, C. (2012). Módulo reproducción animal avanzada. UÑAD
- [8] Bertolino, G; Cantero, M; Storti, M. & Teruel, F. (2014). Modelado para la renderización foto-realista de pan. *Mecánica Computacional*, 33(14), 3295–3312
- [9] Burkert Fluid Control System. (2015). *Manual electrónico de control digital para válvulas proporcionales*.
- [10] Cancino Aguirre, S. A. (2011). *Comparación de la motilidad posdescongelado del semen bovino criopreservado mediante la utilización de la técnica manual y automática con el diluyente comercial One Step* (Doctoral dissertation).
- [11] DALAL, J., KUMAR, A., HONPARKHE, M., SINGHAL, S., & SINGH, N. (2016). COMPARISON OF THREE PROGRAMMABLE FREEZING PROTOCOLS FOR THE CRYOPRESERVATION OF BUFFALO BULL SEMEN. *The Indian Journal of Animal Reproduction*, 37(2).
- [12] Daza, J. F. (1994). Inseminación artificial y andrología bovina. *Editorial Multimpresos. Montería (Córdoba)*.
- [13] Escalona, I. (2000). *Transductores y sensores en la automatización industrial*. El Cid Editor-Ingeniería.
- [14] García, M. Á. P. (2014). *Instrumentación electrónica*. Ediciones Paraninfo, SA.
- [15] Hamed, B. (2012). Design & implementation of smart house control using LabVIEW. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 1(6), 2231-2307.
- [16] Hastuti, H., & Suparman, S. (2016). THE ROLE OF DILUENTS IN MAINTAINING

- QUALITY OF BULL SPERM DURING FREEZING. *Chalaza Journal of Animal Husbandry*, 1(2 December), 58-64.
- [17] Huanca, W. (2001). Inseminación artificial a tiempo fijo en vacas lecheras. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 12(2), 161-163.
- [18] Jiménez, L. M., Puerto, R., Reinoso, O., Fernández, C., & Neco, R. (2005). RECOLAB: Laboratorio remoto de control utilizando Matlab y Simulink. *Revista Iberoamericana de automática e informática industrial*, 2(2), 64-72.
- [19] LAKESHORE. (2014). DIN IEC 751 Temperature/Resistance Table for Platinum Sensors Form Number F038-00-00 Revision A — ©2014 Lake Shore Cryotronics.
- [20] López, M.E. (2002). Identificación de sistemas: *Aplicación al modelado de un motor de continua*.
- [21] Minitube Catálogo Bovino\_Reproducción Animal\_ES\_2017.pdf: Tecnología de Reproducción Animal Bovina. Disponible en la página web de la empresa
- [22] Muiño, R., Fernandez, M., & Peña, A. I. (2007). Post-thaw Survival and Longevity of Bull Spermatozoa Frozen with an Egg Yolk-based or Two Egg Yolk-free Extenders after an Equilibration Period of 18 h. *Reproduction in domestic animals*, 42(3), 305-311.
- [23] Muiño, R., Peña, A. I., Rodríguez, A., Tamargo, C., & Hidalgo, C. O. (2009). Effects of cryopreservation on the motile sperm subpopulations in semen from Asturiana de los Valles bulls. *Theriogenology*, 72(6), 860-868
- [24] Ogata, K. (2003). Ingeniería de control moderna. *Pearson Educación*.
- [25] Orozco, O. A., & Ruiz, V. M. A. (2011). Sintonización de controladores PI y PID utilizando los criterios integrales IAE e ITAE. *Ingeniería: Revista de la Universidad de Costa Rica*, 13(1), 31-39.
- [26] Ramos, S. (1996). Anotaciones sobre inseminación artificial. *Facultad de Medicina Veterinaria. Universidad de la Salle. Bogotá*.
- [27] Roldán, R. (2005). A 50 años del inicio del semen congelado en la argentina. Primera parte. *Taurus*
- [28] Santos, M. V., Sansinena, M., Zaritzky, N., & Chirife, J. (2013). How important are internal temperature gradients in french straws during freezing of bovine sperm in nitrogen vapor?. *CryoLetters*, 34(2), 158-165.
- [29] Stornelli, M. C., Tittarelli, C. M., Savignone, C. A., & Stornelli, M. A. (2005). Efecto de los procesos de criopreservación sobre la fertilidad seminal. *Analecta veterinaria*, 25.
- [30] Santos, M; Sansinena, M; Chirife, J. & Zaritzky, N. (2014). Determination of heat transfer coefficients in plastic French straws plunged in liquid nitrogen. *Cryobiology*, 69(3), 488-495.
- [31] SCIEMPRESA. (2010). Suministros y calibración industrial, elegir el tipo de sensor de temperatura y su instalación.

- [32] The Biogenics catalog: cryopreservation and life science instrument specialist (2006). Napa California USA.
- [33] The imv technologies catalog Digitcool\_en.pdf 2011: Programmable automatic freezers. Disponible en página web de la empresa.
- [34] Tvrdá, E., Halenár, M., Greifová, H., Mackovich, A., Hashim, F., & Lukáč, N. (2016). The Effect of Curcumin on Cryopreserved Bovine Semen. *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Biological, Biomolecular, Agricultural, Food and Biotechnological Engineering*, 10(11), 663-667.
- [35] Uribe, P. (2006). Diseño y desarrollo de un sistema para mejorar el transporte de termos criogénicos empleados en la inseminación artificial dirigido a la empresa DISTRISEMEN LTDA. Tesis grado. Universidad EAFIT. Medellín, Colombia.
- [36] Vallecillo, A. F. (2011). *Caracterización reproductiva de toros de la raza marismeña como base a su conservación*, (Doctoral dissertation, Universidad de Córdoba). España
- [37] Vázquez López, S. (2008). Desarrollo de un sistema para la adquisición de datos climáticos de un invernadero utilizando Lab View.
- [38] Vergara, J. & Ortiz, I. (2009). *Sabe usted ¿por qué se decidió comercializar pajillas de 0.25cc en lugar de la pajilla convencional de 0.50cc en el semen bovino?*
- [39] Vishwanath, R., & Shannon, P. (2000). Storage of bovine semen in liquid and frozen state. *Animal Reproduction Science*, 62(1), 23-53.
- [40] Vizcaíno, J. R. L., & Sebastián, J. P. (2011). *LabView: entorno gráfico de programación*. Marcombo.
- [41] Wang, L. (2009). *Model predictive control system design and implementation using MATLAB®*. Springer Science & Business Media.
- [42] Woods, E. J., Benson, J. D., Agca, Y., & Critser, J. K. (2004). Fundamental cryobiology of reproductive cells and tissues. *Cryobiology*, 48(2), 146-156.
- [43] Zhou, C., Dobrinsky, J., Tsoi, S., Foxcroft, G. R., Dixon, W. T., Stothard, P., ... & Dyck, M. K. (2014). Characterization of the altered gene expression profile in early porcine embryos generated from parthenogenesis and somatic cell chromatin transfer.

**ANEXOS**

### Anexo 1. Sistemas 1 que se experimentó en la investigación

Este sistema aunque parece eficiente y sencillo fue inviable por lo complejo y peligroso para envasar el nitrógeno líquido a la bala y además afecta físicamente a la electroválvula congelándolo.



Sistema bala de oxígeno adaptada para nitrógeno líquido



Sistema bala de oxígeno aislada térmicamente adaptada para nitrógeno líquido

## Anexo 2. Sistemas 2 que se experimentaron en la investigación

Este sistema funciona pero por muy poco tiempo ya que la presión generada por el choque térmico del tubo de cobre que transporta el nitrógeno líquido hasta la superficie se atemperaba a la temperatura del nitrógeno líquido disminuyendo a cero la transferencia térmica y no liberando ninguna presión que empuje el nitrógeno a la superficie.

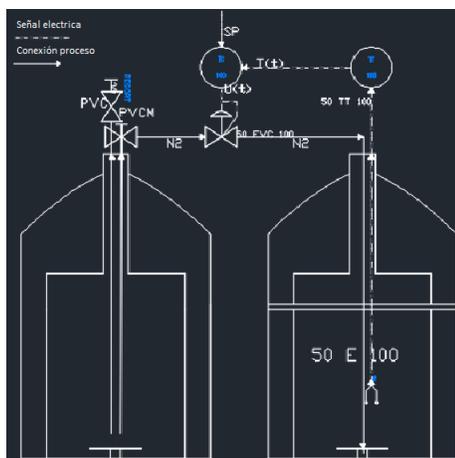


Diagrama PI&D del sistema



Sistema implementado laboratorio

### Anexo 3. Sistemas 3 definitivo que se experimentaron en la investigación

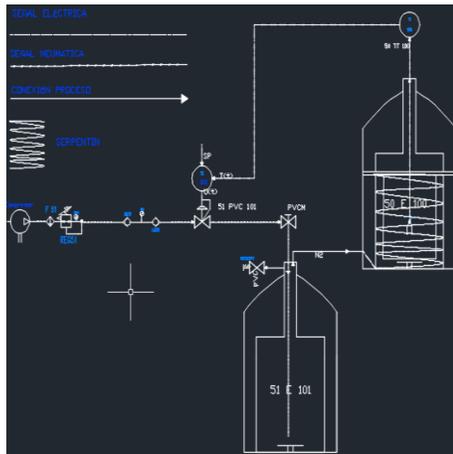


Diagrama PI&D del sistema



Sistema implementado laboratorio

#### Anexo 4. Sistema desarrollado después de congeladas las pajillas pruebas



### Anexo 5. Elementos de protección personal (EPP)



Guantes



Gafas



Bata



Pantalón



Botas



Uso de los EPP

**Anexo 6. Consecuencias de no usar los EPP**

