



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL PARA EL
EXPERIMENTO DAMIC

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA MECATRÓNICA

PRESENTA:

CAROLINA ARLETTE SALAZAR LAGUNES

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JUAN CARLOS D'OLIVO SAEZ



MÉXICO D.F.

ABRIL, 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mi Universidad, por haberme brindado la mejor experiencia de mi vida.

A mi familia por siempre apoyarme, por creer en mí y por ayudarme a ser mejor cada día, este logro es de todos.

Investigación realizada gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM con clave IN112213 titulado Fenomenología y experimentación con neutrinos y materia oscura.

Agradezco a la DGAPA-UNAM la beca recibida.

Agradecimientos

Es para mí un verdadero placer utilizar este espacio para expresar mis más sinceros agradecimientos y cariño con todas las personas e instituciones que hicieron posible que mis estudios como ingeniera mecatrónica, y este trabajo de tesis, lleguen a un feliz término.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Juan Carlos D'Olivo por su apoyo y confianza en la realización de este trabajo, muchas gracias por darme la oportunidad de ser parte de tan maravilloso equipo. Al Dr. Juan Estrada por haber compartido conmigo todos sus conocimientos y haberme guiado durante mi estancia en el laboratorio Fermilab, así como a los técnicos Jorge, Andrew, Michelle y a todo el grupo del SiDet por todo el apoyo brindado.

A mi mamá por siempre creer en mí, escucharme y apoyarme cuando más lo necesitaba. A mi papá por todo tu apoyo, por compartirme el amor por la UNAM y por ser un ejemplo en todos los sentidos. A mis hermanas, gracias por siempre haber sido comprensivas, y por todo su apoyo que me ayuda a ser mejor cada día.

A mis amigas: Alba y Mary gracias por todo su apoyo, por siempre escucharme y apoyarme para lograr mis metas, A mis amigos: Sami, Iñaki, Gerardo, Julio, Abraham, Pinedo y César por todo su apoyo y cariño. A mis amigos de la Universidad de Guelph: a Scott, siempre te voy a recordar con mucho cariño y admiración, a Rosie por todo tu apoyo y cariño, a Danielle y a Kim, gracias por todo su cariño y por toda su ayuda.

A Eduardo: gracias por todo tu cariño, por toda la comprensión y paciencia, por siempre impulsarme a realizar mis metas.

Pero principalmente GRACIAS UNAM, gracias a la Facultad de Ingeniería y gracias a todos los maestros que me formaron en éstos cinco años. No tengo palabras para agradecer la formación integral que me fue brindada, me siento muy orgullosa y afortunada de ser parte de tan grande institución.

Por mi raza hablará el espíritu

Índice general

1. Introducción	7
1.1 Planteamiento del problema	9
1.2 Objetivos	10
1.3 Justificación	10
2. Estado del arte	11
2.1 Materia Oscura y experimentos actuales	11
2.2 Sistemas involucrados en detectores de Materia Oscura	20
3. Antecedentes	24
3.1 Experimento DAMIC	24
3.2 Situación actual de DAMIC en SNOLAB	33
4. Análisis general del sistema	35
4.1 Requerimientos y especificaciones	43
4.2 Algoritmo de programación	45
5. Desarrollo de interfaces con LabVIEW®	49
5.1 Programación de las interfaces	49
5.2 Comunicación TCP/IP	66
6. Pruebas y resultados	70
7. Conclusiones y recomendaciones	83
Bibliografía	86
Anexos	88

Índice de Figuras y Tablas

Figura 1: Velocidad de rotación de las galaxias debido a la presencia de materia oscura	12
Figura 2: Lente gravitacional (NASA, 2012).....	13
Figura 3: Estado actual de las búsquedas de materia oscura en el rango de baja masa (Tiffenger, 2013) ...	15
Figura 4: Tipos de detectores de materia oscura	16
Figura 5: Flujo de partículas WIMP alrededor de la Tierra.....	17
Figura 6 Funcionamiento del sensor CCD (Fernández, 2006)	26
Figura 7 Estructura de una CCD	27
Figura 8: Obtención de datos para un CCD	28
Figura 9: Corrimiento de datos en cada pixel.....	29
Figura 10: Lectura de las CCDs.....	29
Figura 11: Imágenes de las señales obtenidas de la lectura de un CCD	30
Figura 12: Nivel de ruido en sensor CCD (prueba realizada el 31 de octubre de 2013).....	32
Figura 13: Experimento DAMIC	33
Figura 14: Protección del experimento DAMIC	34
Figura 15: Distribución del sistema	35
Figura 16 Ciclo Gifford-McMahon.....	37
Figura 17: Sensor CCD dañado	41
Figura 18: Detector CONNIE	42
Figura 19: Diagrama de fase del agua.....	44
Figura 20: Diagrama de secuencia para la presión.....	46
Figura 21: Programación comunicación Serial por VISA	51
Figura 22: Flujo de comunicación.....	51
Figura 23: Lectura de comandos mediante LabVIEW®	52
Figura 24: Entradas y salidas de comandos para bomba de presión	53
Figura 25: Curva de saturación de gases más comunes.....	54
Figura 26: Programación de la gráfica del agua.....	55
Figura 27: Toma de decisiones	56
Figura 28: Encendido de la bomba.....	56
Figura 29: Información general de la bomba	56
Figura 30: Programación de tiempo en gráfica	57
Figura 31: Establecimiento de parámetros para controlador de temperatura	58
Figura 32: Programación del interlock.....	59
Figura 33: Liberación del botón interlock para encendido de bomba.....	59
Figura 34: Programación del relevador del crio refrigerador	60
Figura 35: Programación Alarmas	61
Figura 36: Generación de reporte de fallas	61
Figura 37: Programación de la lógica de Notificaciones.....	62
Figura 38: Programación del envío de notificaciones por correo	63

Figura 39: Programación del apagado de bomba en caso de emergencia	63
Figura 40: Notificación al correo electrónico.....	64
Figura 41: Configuración del Calentador.....	64
Figura 42: Punto de referencia	65
Figura 43: Generación de gráfica de temperatura	66
Figura 44: Comunicación TCP/IP en LabVIEW®.....	67
Figura 45: Comando escuchar en LabVIEW®	68
Figura 46: Configuración de alarmas en TCP/IP	68
Figura 47: Punto de referencia en LabVIEW®	69
Figura 48: Lectura de Presión en TCP/IP.....	69
Figura49: Interfaz temperatura (Comunicacion VISA).....	70
Figura 50: Interfaz Temperatura (Relevador y Calentador)	71
Figura51:Interfaz temperatura (Visualización de temperatura).....	72
Figura52: Interfaz temperatura (Tipo de control).....	75
Figura53: Interfaz temperatura (Configuración relevador)	76
Figura 54: Alarmas	77
Figura 55: Notificaciones.....	78
Figura 56: Correo de notificación	78
Figura 57: Correo en Linux.....	79
Figura 58: Interfaz Presión.....	80
Figura 59: Interfaz presión (Visualización de Curva)	81
Figura 60: Interfaz presión (información bomba)	81
Figura 61: While loop.....	88
Figura 62: Event Structure	88
Figura 63: Edit Events	89
Figura 64: Estructuras LabVIEW®.....	89
Figura 65: Localización de las Estructuras en LabVIEW®.....	90
Figura 66: Property Node	91
Tabla 1: Ruido en los sensores CCDs	31
Tabla 2: Sensores de Temperatura	40
Tabla 3: Comparación entre los lazos de control 1 y 2.....	75

Capítulo 1

Introducción

Los experimentos modernos en física de partículas emplean un sin fin de técnicas y equipamiento, además de una instrumentación sofisticada y dispositivos especializados, cuya operación y mantenimiento requieren la utilización de técnicas y procedimientos propios de la Ingeniería Mecatrónica. Conforme la tecnología avanza se crean nuevos campos de aplicación, es por esta razón que se tiene la necesidad de crear equipos interdisciplinarios de profesionistas dedicados al diseño, construcción, mantenimiento y operación de los experimentos actuales.

El campo de la física de partículas busca estudiar los componentes elementales de la materia y las interacciones entre ellos, hoy en día un tema muy estudiado en el campo es la llamada materia oscura (MO), tal es el nombre con el que se ha designado a todo aquello que no se ha podido ver ni detectar en forma directa, pero que se hace evidente a través de su atracción gravitatoria sobre otros cuerpos celestes, por lo que se han desarrollado un gran número de experimentos en torno a la detección directa de dicha materia.

El estudio para la detección de esta entidad se ha convertido en un gran desafío para la astrofísica moderna así como para la ingeniería, poniendo a prueba el ingenio de los investigadores para hacer uso del desarrollo tecnológico de diversos dispositivos en los experimentos, esto con el fin de tener una mejor comprensión de nuestro universo y sus orígenes.

El experimento DAMIC (del inglés Dark Matter in CCD's) busca evidencia directa de MO haciendo uso de sensores CCD, comúnmente conocidos en su aplicación en las cámaras digitales. DAMIC es operado por una colaboración internacional en la que participa el laboratorio FERMILAB integrado por investigadores de diversas áreas, la Universidad de Chicago, el laboratorio SNOLAB, el centro atómico Bariloche, la Universidad de Zurich, la Universidad Nacional del Sur y un grupo de la UNAM, integrado por investigadores del Instituto de Ciencias

Nucleares y el Instituto de Ingeniería así como por estudiantes de las facultades de Ciencias e Ingeniería.

El experimento DAMIC está instalado actualmente en el laboratorio SNOLAB en Canadá, laboratorio subterráneo (con una profundidad de 2km) que es en su mayoría, una instalación limpia de clase 2000, esto significa que existen como máximo 2000 partículas suspendidas en el aire menores a un micrón por metro cúbico.

La primera versión del detector ya fue diseñada, construida y operada (2012), la cual arrojó resultados optimistas para el equipo por lo que ahora se planea realizar mejoras en DAMIC para tener una elevada calidad en los datos y de esta manera asegurar la veracidad de los resultados. La colaboración DAMIC pretende instalar y operar a diferentes latitudes varios detectores del mismo tipo que el que se tiene en SNOLAB, teniendo así un grupo DAMIC-NORTH y otro en el sur DAMIC-SOUTH, grupo del cual la UNAM forma parte. Si todo funciona de acuerdo con lo planeado, uno de estos detectores se instalará en el interior de una mina en territorio nacional y otro en el hemisferio sur (Chile o Argentina).

Es importante destacar el papel que juega la seguridad e integridad de los componentes del detector, ya que, debido a la alta sensibilidad de los sensores CCD (los sensores encargados de la detección de partículas), cualquier falla puede afectar tanto los resultados del experimento como al detector mismo. Es así como la ingeniería mecatrónica juega un papel destacado en este proyecto, contribuyendo a diseñar un sistema de monitoreo del funcionamiento del experimento DAMIC, que brinde la seguridad necesaria para proteger las partes más sensibles del detector contra pérdidas de potencia eléctrica y mal funcionamiento de algunos de sus componentes.

1.1 Planteamiento del problema

El laboratorio SNOLAB se encuentra a 2 km de profundidad esta localización ofrece un entorno de bajo fondo radiactivo ideal, y permite la aislación de los rayos cósmicos (partículas que llegan desde el espacio y bombardean constantemente a la Tierra desde todas las direcciones) al que estarían expuestos en la superficie. En el caso de DAMIC, la interacción de las partículas de materia oscura con la materia ordinaria de los detectores, es muy débil por lo que además de la protección que brinda la capa terrestre, el detector está rodeado de un escudo de ladrillos de plomo con un grosor de 6 pulgadas, el cual a su vez está rodeado por una estructura de polietileno de alta densidad con un grosor de unas 16 pulgadas.

A pesar de que el laboratorio SNOLAB es uno de los más grandes y mejor equipados de su tipo en el mundo, no está exento de situaciones como cortos en el suministro de potencia eléctrica, los cuales afectan el funcionamiento del experimento, generan pérdidas de tiempo para la adquisición de datos y ponen en peligro la integridad de sus componentes, en particular para DAMIC, los sensores CCD.

Los sensores CCD son una tecnología reciente, la cual se empieza a estudiar para aplicaciones astronómicas y científicas, después de haber operado la primera versión de DAMIC se aprendieron lecciones muy importantes acerca del mismo, una de ellas es el extremo cuidado que se debe tener con los sensores, ya que a fin de evitar que resulte dañado, las condiciones bajo las que opera deben ser monitoreadas y controladas en todo momento.

A fin de evitar estos inconvenientes, es preciso contar con un sistema de monitoreo y control, del cual no se dispone a la fecha. Por lo tanto, nos planteamos la siguiente cuestión:

¿De qué manera puede mejorarse el sistema descrito, manteniendo las condiciones de funcionamiento, cuando suceden pérdidas de potencia eléctrica y además monitorearlo de manera continua para su protección?

1.2 Objetivos

Diseñar un sistema de monitoreo del funcionamiento del experimento DAMIC, que brinde la seguridad necesaria para proteger las partes más sensibles del detector contra pérdidas de potencia eléctrica y mal funcionamiento de algunos de sus componentes. Con éste propósito se analizará el sistema a fin de elegir los componentes con los que se hará la implementación del monitoreo y control.

1.3 Justificación

Mantener las condiciones de presión y temperatura estables es crucial para proteger los sensores CCD de DAMIC, así como mantener el funcionamiento adecuado del detector para de esa forma, garantizar la calidad de los datos adquiridos. Desde el inicio de las operaciones en el laboratorio SNOLAB han ocurrido varios cortes inesperados en el suministro de corriente eléctrica, los cuales han puesto en riesgo la integridad del detector al permitir que tanto la presión del criostato como la temperatura de las CCD aumenten rápidamente, sin siquiera poder monitorearse en el proceso.

Hasta la fecha el monitoreo del detector se ha realizado de tal manera que se requiere de intervención de un operador para indagar el estado de los diversos sistemas, por lo que se corre el riesgo de que los sensores CCD se dañen irreparablemente si el sistema se deja desatendido por unas horas. Por otra parte, cabe mencionar que el sistema tiene una inercia considerable, puesto que para lograr condiciones de presión y temperatura estables se requiere de un tiempo del orden de una semana, esto limita el tiempo de adquisición de datos.

En resumen, el sistema actual no cubre todas las necesidades requeridas para el buen desarrollo de las mediciones en torno al experimento.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1 Materia Oscura y los experimentos actuales

Por mucho tiempo se ha creído que todo lo que compone nuestro universo está hecho de materia que emite fotones, y por lo tanto es posible observar. Recientemente mediante observaciones astrofísicas y cosmológicas se ha hallado evidencia de la existencia de un tipo de materia desconocida que conforma cerca del 23% de la densidad de la energía total del Universo (Hamuy, 2011)

La información con la que hasta ahora se cuenta indica que esta materia interacciona sólo gravitacionalmente y no emite ni dispersa fotones, por lo que se le ha dado del nombre de “Materia Oscura” (MO). Las WIMP, partículas masivas que interactúan débilmente (del inglés *Weakly Interacting Massive Particles*) son los candidatos más fuertes hasta ahora, pueden tener masas de hasta unas 1000 veces la masa de un protón, tendrían la capacidad de influenciar el comportamiento de las galaxias (formación y movimiento), y al mismo tiempo sus probabilidades de interacción son similares a la de los neutrinos solares, por lo que su detección directa se ha convertido en un gran reto para la comunidad científica.

Se cree que millones de estas partículas atraviesan la Tierra cada segundo por lo que se podría pensar que la probabilidad de detectarlas es alta, el problema es que no es así. Además los rayos cósmicos (protones y núcleos más pesados) al interactuar con nuestra atmósfera generan chubascos de partículas secundarias (muones, electrones y fotones) que llegan a la superficie terrestre en cantidades abundantes. Es por esta razón que los experimentos de detección de MO buscan un resguardarse de estas partículas y son instalados y operados en laboratorios subterráneos, a cientos o miles de metros bajo tierra.

Los científicos que estudian la MO no están seguros aún de que es exactamente o de qué está compuesta, sin embargo han descartado una serie de posibilidades. Es importante destacar en primera instancia que la materia oscura no es antimateria, ya que no se observan los rayos gamma (López, 2009) (únicos en su tipo) que se producen cuando la antimateria se aniquila con la materia. Por otro lado, la materia oscura no son grandes agujeros negros, esto se descartó con base en las observaciones de las lentes gravitacionales, ya que el efecto al pasar a través de la MO es diferente al efecto causado por los agujeros negros (López, 2009). Finalmente, se tiene que, aunque la composición de la materia oscura se desconoce aún, los modelos actuales predicen que puede estar compuesta por partículas elementales, llamadas colectivamente materia oscura no bariónica (WIMPs o axiones). (López, 2009)

Hay una fuerte evidencia de la existencia de la materia oscura, todas ellas tienen que ver con observaciones astronómicas de efectos gravitacionales. La primera evidencia se tuvo alrededor de 1920, cuando se desarrolló la tecnología necesaria para ver al universo profundamente y se descubrió que es más grande que nuestra galaxia, la Vía Láctea (Matos, 2009) . Posteriormente se notó un comportamiento extraño en las agrupaciones de las nuevas galaxias observadas, cuando se midió la velocidad de rotación de las galaxias en función a la masa que debían de tener y su distancia al centro de la galaxia, descubrieron que había algo más no visible que mantenía constante la velocidad de rotación de la galaxia independientemente de su distancia al centro, concluyeron que a menos de que hubiera una gran cantidad de materia “no visible” no había manera que el grupo de galaxias fuera estable.

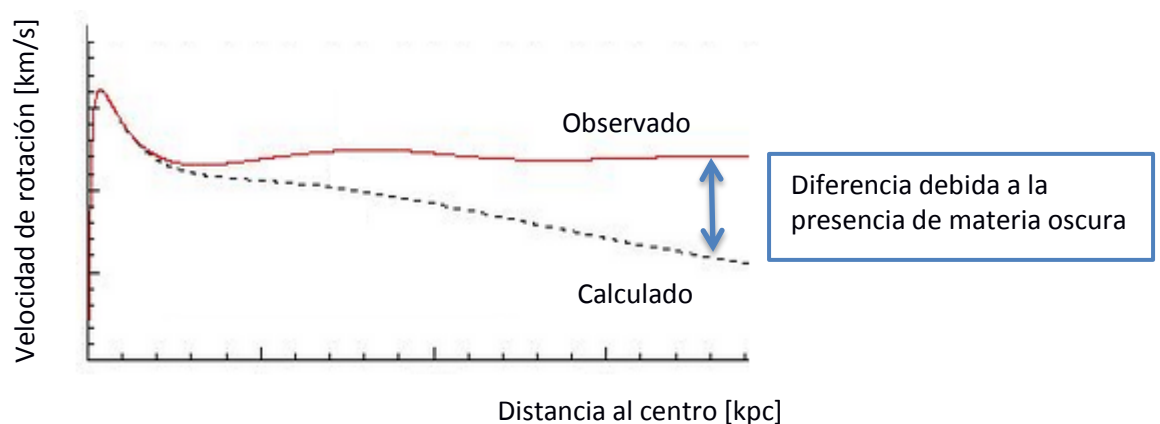


Figura 1: Velocidad de rotación de las galaxias debido a la presencia de materia oscura

Una lente gravitacional se forma cuando un objeto luminoso se sitúa tras una acumulación de masa en nuestra línea de visión, la imagen del objeto se ve deformada cuando la agrupación de masa se sitúa delante de ella. Este fenómeno fue responsable de la segunda evidencia de la existencia de materia oscura (Santos, 2012) ya que gracias a que su principio de funcionamiento está basado únicamente en efectos gravitatorios fue posible observar que existía “algo” responsable de la deformación de las imágenes obtenidas, y además es posible saber cuánta materia oscura existe y la manera en la que está distribuida gracias a que es posible medir la distorsión de los rayos que pasan a través de la materia oscura.

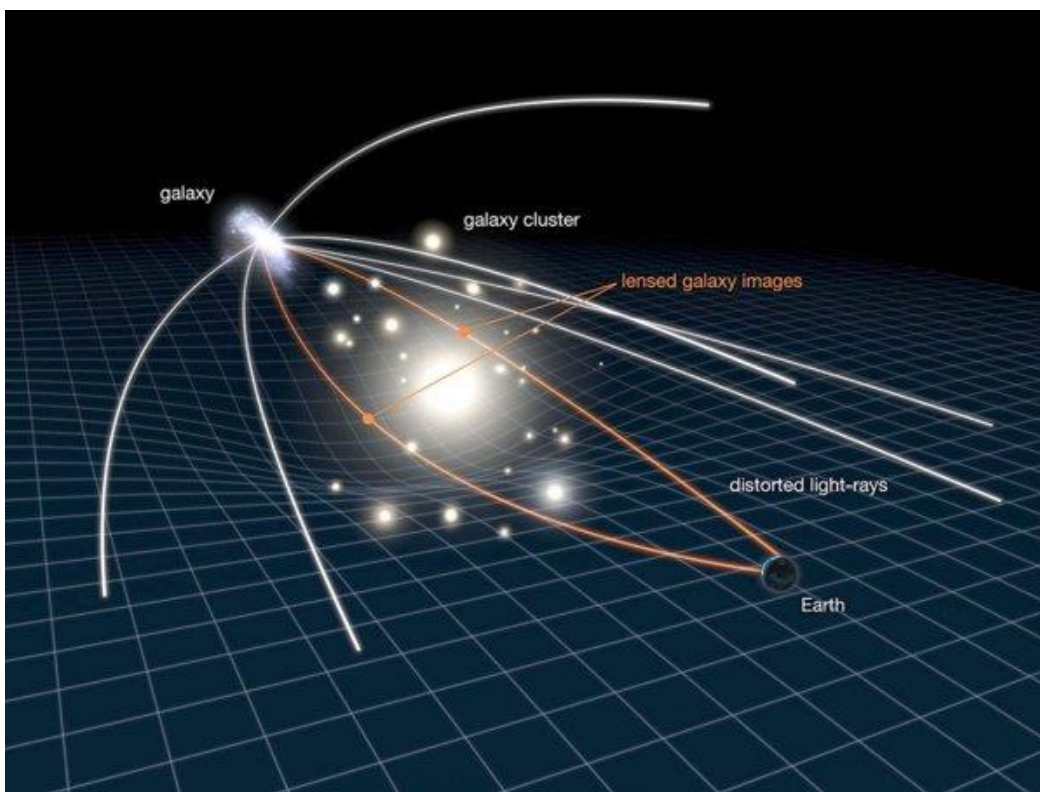


Figura 2: Lente gravitacional (NASA, 2012)

En la figura 2 se muestra como un cúmulo de galaxias (*galaxy cluster*) distorsiona el tejido del espacio-tiempo en su contenido. Los rayos de luz (naranja) de una galaxia detrás del cúmulo, se desvían y aparecen imágenes distorsionadas por esta galaxia ante el observador desde la Tierra. Las características de la teoría de la gravitación y la distribución de materia en el cúmulo, influyen, en la forma de las imágenes de las galaxias.

Los científicos creían que aunque el universo continuaba creciendo, existiría un momento en dónde la gravedad dominaría y el universo comenzaría a colapsar. Recientemente fue descubierto todo lo contrario, el universo se está expandiendo cada vez más rápido (Rodríguez, 2011) (sólo el espacio que existe entre las galaxias se expande, no las galaxias mismas) Esta expansión acelerada requiere de una fuente de energía llamada “energía oscura”

Con ayuda de técnicas como el “*redshift*” y “*standard candles*” se puede medir la velocidad y la distancia de los objetos en el universo, es con éstas técnicas que se descubrió el pasado del universo dónde la materia oscura dominaba por sobre la energía oscura, manteniendo las galaxias unidas pero hace 5 billones de años la energía oscura comenzó a dominar ya que el universo se encontraba menos denso y caliente que cuando se produjo el Big Bang, haciendo favorables para su dominación las nuevas condiciones.

La mejor evidencia a favor de la existencia de materia oscura (Rogerson, 2013) es la llamada cúmulo bala o *bullet cluster* lo cual se refiere a imágenes tomadas en rayos x, de dos cúmulos de galaxias en colisión (*bullet cluster*), si no existiera materia oscura, lo normal es que las galaxias (hechas de materia ordinaria) y el gas estuvieran mezclados, y en caso de choque de dos cúmulos el gas interactuaría con la masa contenida en las galaxias (Rogerson, 2013). Sin embargo no así, como la masa de materia oscura es mucho mayor que la del gas y las galaxias juntas, son los dos pozos de materia oscura las que dinámicamente dominan el choque. Esto quiere decir que las galaxias están atrapadas en pozos de gravitación. Por ello, es fácil ver que la mayor parte de las galaxias se encuentran distribuidas de acuerdo con la materia oscura y el gas calentado por el choque de galaxias está entre los dos cúmulos (Rogerson, 2013).

Los resultados más concluyentes fueron inferidos a partir de las observaciones del satélite chandra en este cúmulo, publicados por Markevitch *et al.* y Clowe *et al.*, ambos en 2004. Estos autores reportan que el cúmulo experimenta una alta velocidad de fusión, la cual resulta evidente de la distribución espacial del gas caliente emisor de rayos X (Rogerson, 2013).

La importancia de esta evidencia es que representa uno de los primeros ejemplos de cómo la materia oscura domina dinámicamente las interacciones entre los objetos más grandes del universo.

Experimentos actuales

Hoy en día existe un gran número de experimentos que buscan detectar directamente a las WIMP empleando una gran variedad de técnicas (López, 2009). En general, las búsquedas se basan en el conteo de eventos en un detector, buscando un exceso sobre el fondo esperado. La energía depositada por la colisión de una WIMP con un núcleo dentro de un detector es muy pequeña, y puede confundirse fácilmente con ruido, por lo que estos experimentos usualmente se realizan con detectores muy sensibles, en laboratorios a grandes profundidades para reducir el flujo de rayos cósmicos, y a baja temperatura para reducir en la medida de lo posible las vibraciones de los átomos del cristal.

Una variedad de experimentos se han realizado para la detección de éstas partículas como se muestra en la Figura 1, el experimento DAMIC (Tiffengerg, 2013) busca encontrar éstas partículas con dispositivos que tengan una sensibilidad más baja y de esta manera se puedan estudiar rangos de masa más pequeños que experimentos antecesores.

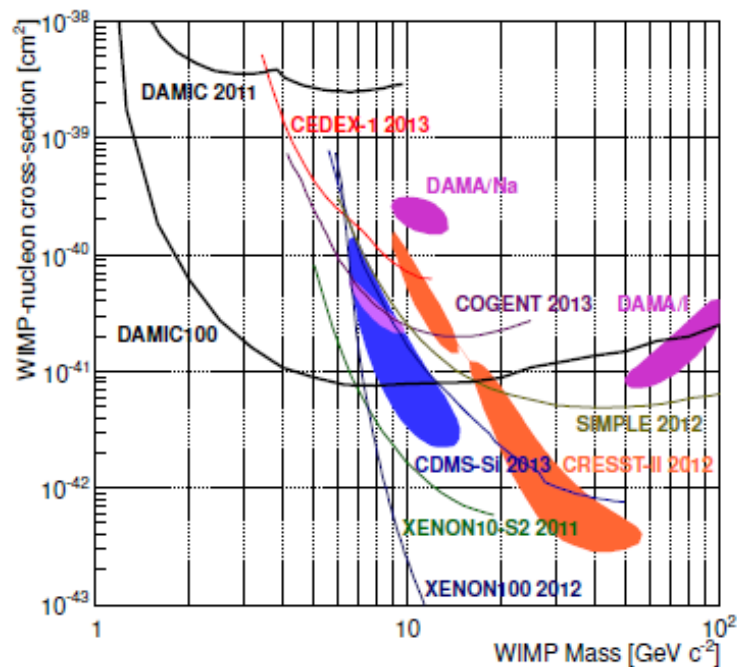


Figura 3: Estado actual de las búsquedas de materia oscura en el rango de baja masa (Tiffengerg, 2013)

Existen varios tipos de detectores que emplean diversos métodos para lograrlo, como lo muestra la figura 4, se pueden agrupar por su principio de operación en detectores por ionización, centelladores, con líquidos súper calentados y por fonones.

La figura muestra cada una de las técnicas que se utiliza el detector junto con el nombre de los experimentos que se están realizando en base a las mismas y el componente químico involucrado para cada uno de los experimentos nombrados (por debajo). Además nos da información de la eficiencia en la detección para cada una de las técnicas, como se puede observar por ejemplo, la técnica en base a fonones tiene un 100% de energía capturada por cada 10 meV/ph.

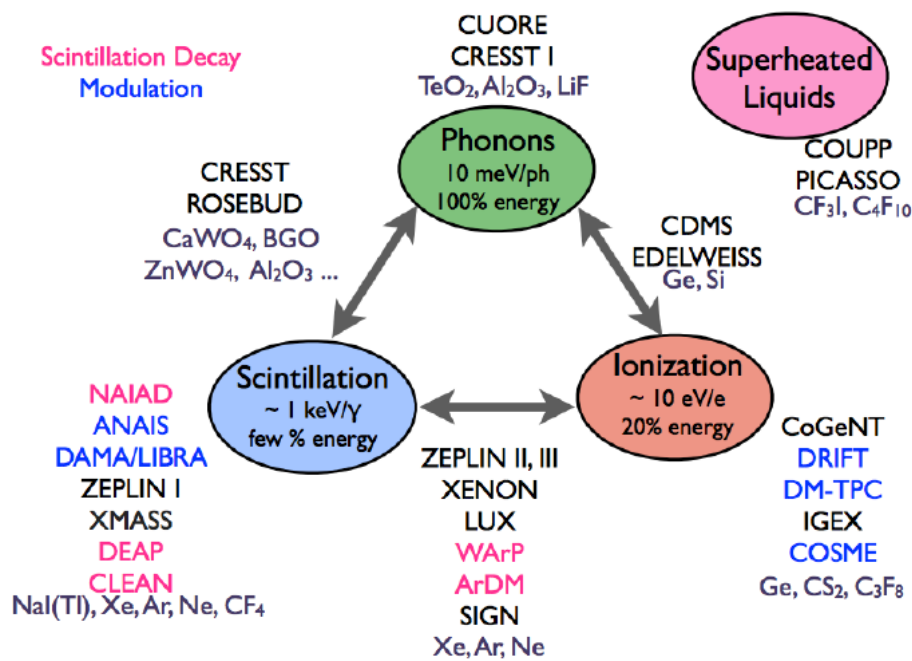


Figura 4: Tipos de detectores de materia oscura

Muchos de estos experimentos ya han recogido datos y se encuentran en una fase de mejora ya que el ruido es constantemente un problema en el análisis de los datos.

Uno de los experimentos más conocidos en el área es CDMS (*Cryogenic Dark Matter Search*) (R. Agnese, 2013) que también buscan detectar partículas WIMP, este experimento utiliza sin embargo una técnica diferente basada en cristales de germanio y silicio a bajas temperaturas (alrededor de

0.05 K), por lo que si una partícula WIMP impactara contra un átomo de alguno de los cristales, se produciría una onda de sonido, pues el átomo que recibe el impacto desplaza en su vibración a los átomos de su alrededor. El impacto es recibido por una capa de metal hecha a base de aluminio y tungsteno a temperatura crítica, haciendo que las vibraciones recibidas calienten al metal y se detecte el cambio midiendo la resistencia del mismo.

Otro modo de detectar el impacto de WIMPs sobre átomos es mediante el uso de cristales de yoduro de sodio con impurezas de Talio (NaI(Ta)), como en el experimento DAMA-LIBRA (R. Bernabei, 2013) El experimento situado en el laboratorio Gran Sasso en Italia utiliza un conjunto de cristales de yoduro de sodio para detectar los raros momentos en que los WIMPs chocan contra átomos en los detectores, produciendo así destellos de luz. Existe una teoría que dice que el número de centelleo sube y baja con las estaciones, los miembros del equipo de DAMA-LIBRA argumentan tener resultados que prueba este comportamiento. Esto se explica mediante la velocidad tangencial de la Tierra alrededor del Sol. Si la galaxia está rodeada de un halo de WIMPs y éstas no giran con la misma velocidad del Sol, entonces la Tierra estaría recibiendo impactos continuos, sin embargo, la Tierra gira alrededor del Sol, de modo que a veces nos movemos más rápido contra la “lluvia de WIMPs” y a veces más lentamente (ver Figura 4). En el verano del hemisferio norte, la velocidad tangencial de la Tierra en su órbita alrededor del Sol se encuentra en la misma dirección que el movimiento del sistema solar. Como resultado, el número de colisiones detectadas por DAMA debería alcanzar un máximo en verano y caer en el invierno. Es así como se explica que varíe la frecuencia de choques de estas partículas con la época del año.

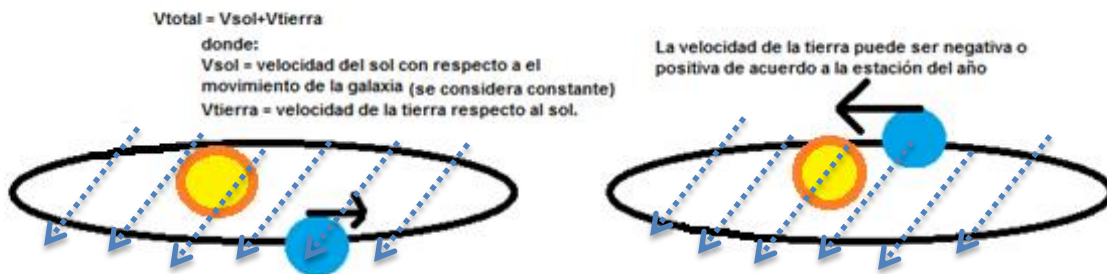


Figura 5: Flujo de partículas WIMP alrededor de la Tierra

El experimento DAMA-LIBRA pretende, aparte de probar la existencia de los WIMPs y de determinar alguna de sus características, comprobar que la época del año influye en la frecuencia de los impactos, pues esta es una de las características que se ha predicho.

Este experimento, de hecho, detectó impactos contra los átomos del cristal que son compatibles con las características de los WIMPs, y verificó una variación estacional de los sucesos de detección pero la comunidad aún sigue siendo escéptica en cuanto a estos resultados ya que el nivel de confiabilidad suficiente no ha sido alcanzado por lo que aún no se ha confirmado ni la existencia de MO ni la variación estacional oficialmente. (López, 2009)

En el mismo año CoGent (Nieves, 2013), un experimento basado en un detector que comprende 0,440 kg de cristales de germanio enfriados a temperatura de nitrógeno líquido (-195.8 °C), anunció que obtuvo resultados similares con un sigma de confiabilidad de 2.8. Este experimento se encuentra localizado en una mina en Soudan, Minnesota su principio de funcionamiento se basa en la ionización de estos cristales cuya ventaja es que es capaz de distinguir y rechazar fondos no deseados.

Sin embargo, la única prueba de la existencia de los WIMPs aportada por ambos experimentos es dicha variación estacional, que aunque no se encuentra reconocida oficialmente los científicos de estos experimentos se encuentran optimistas con sus resultados.

En el área de los detectores mediante gases existe un experimento llamado XENON10 (Nieves, 2013) experimento situado en el laboratorio subterráneo de Gran Sasso, cerca de L'Aquila, Italia, está formado por 122 tubos fotomultiplicadores, con capas de agua especialmente diseñadas, plomo, cobre y diverso blindaje, para filtrar las radiaciones y otras fuentes de energía. Utiliza 62 kg de xenón líquido así como señales de luz, se espera que se disparen cuando haya una colisión entre WIMPs y los átomos de xenón. Cuando se produce una colisión, se crea una luz azulada que puede ser detectada con cámaras de alta sensibilidad colocadas en el extremo del detector, capturando así los destellos de luz emitida si alguna partícula WIMP colisiona con el núcleo del xenón. Este experimento es considerado de los más sensibles del mundo y aunque no ha detectado una señal en menos de un año que tiene de funcionamiento, ha descartado la existencia de partículas más pesadas y con una interacción más fuerte. En pocos meses, la colaboración XENON comenzará a ampliar su detector a más de 1 tonelada de xenón, por lo que será 100 veces más sensible (XENON100) (Collaboration, 2011).

El nuevo experimento en el que se ha utilizado el detector de materia oscura de alta sensibilidad y alta precisión, LUX (*Large Underground Xenon*), que es capaz de descubrir los eventos en los que se emplea una cantidad ínfima de energía, no ha logrado detectar aún partículas de materia oscura (Science, 2014). El experimento se compone de la tercera parte de una tonelada de xenón enfriado en un tanque que dispone de múltiples sensores de luz, cada uno de ellos capaz de detectar un único fotón. Cuando las WIMP pasan a través del tanque, en algunas ocasiones se encontraría con el núcleo de un átomo de xenón, produciendo un pequeño destello de luz, que sería recogido por los sensores.

Los primeros resultados de la búsqueda de la materia oscura con el detector LUX fueron hechos públicos en octubre de 2013. A pesar de utilizar este detector ultrasensible, no se ha encontrado ninguna evidencia de la existencia de la materia oscura durante los 90 días de funcionamiento. Esto contradice los anteriores experimentos que habían detectado posibles trazas de materia oscura de muy poca masa. El último trabajo consistió en demostrar la alta sensibilidad del detector LUX a las posibles señales. (Science, 2014)

La búsqueda de las partículas WIMP no ha llegado a su fin pero ya sea detectando las variaciones estacionales o delimitando las interacciones de las partículas, los experimentos existentes han jugado un papel de vital importancia para el entendimiento de nuestro universo y las leyes que lo rigen así como para despertar el interés en la comunidad para crear nuevos experimentos que sean capaces de detectar materia oscura y de esta manera la interacción de las partículas de materia oscura con los detectores construidos por diferentes materiales, tales como germanio, argón, xenón, silicio, en más de una docena de experimentos en todo el mundo.

Todo lo que se puede decir hasta este momento es que la sensibilidad de los detectores empleados en estos experimentos se incrementa en un orden de magnitud cada pocos años

2.2 Sistemas involucrados en detectores de Materia Oscura

Un componente esencial de los experimentos de física de partículas modernos es el sistema de monitoreo “*housekeeping*” de sus distintas componentes. A diferencia de la adquisición de datos experimentales, la cual se lleva a cabo en escalas de tiempo muy cortos (nano a micro segundos), el *housekeeping* se realiza típicamente en tiempos mucho más largos (segundos, minutos, horas, e incluso días), razón por la cual se conoce como monitoreo lento. Naturalmente, la complejidad de este sistema depende del número de partes que lo integran.

Los experimentos típicamente registran el estado de un instrumento o sensor en computadoras a través del uso de transductores o convertidores analógico-digitales adecuados. Una vez que se cuenta con una señal digitalizada que representa, por ejemplo, la temperatura o la presión en una parte del aparato, se utilizan herramientas de software para su almacenamiento y análisis, tanto en tiempo real como a posteriori. Existen soluciones tanto de software comercial como de software libre para este propósito.

Un ejemplo de software comercial es el sistema LabVIEW®, ampliamente usado tanto en ciencia como en procesos industriales, mientras que entre los software libres podemos mencionar el sistema MIDAS (*Maximum integrated Data Acquisition System*), usado en laboratorios como TRIUMF en Canadá y el Instituto Paul Scherer en Suiza. Estos ofrecen al usuario una interfaz común para el tratamiento y adquisición de los datos experimentales y el monitoreo lento.

Dado que LabVIEW® es un entorno de desarrollo gráfico con una extensa gama de funciones para crear aplicaciones el laboratorio FERMILAB cuenta con una licencia de uso y las funciones necesarias para llevar a cabo el desarrollo del sistema por lo que será empleado para llevar a cabo el mismo.

LabVIEW® es un lenguaje de programación gráfico creado por la empresa National Instruments, su principio de operación está basado en proveer al programador un lenguaje de programación visual gráfico simplificando así el trabajo realizado. Este software usa la programación conocida como lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje gráfico. Los programas en LabVIEW® son llamados instrumentos virtuales (VIs) que se crean con una gran variedad de herramientas y objetos, el usuario utilizará para comunicarse una interfaz gráfica llamada panel frontal mientras que el código de programación será contenido en un panel llamado diagrama de bloque, es aquí donde los

datos fluyen a través de los nodos del programa que determina el orden de la ejecución del programa. Por otro lado, cuenta con diversas interfaces de comunicación previendo una amplia gama de opciones para el usuario, entre las más comunes se encuentran: la comunicación puerto serial, puerto paralelo, GBIP, PXI, TCP/IP, bluetooth y USB.

Los detectores de este tipo constan de diversos componentes que mantienen las condiciones adecuadas al interior de los mismos. Es de vital importancia conocer la disposición y la función que llevan a cabo los elementos que los componen para, de esta manera, implementar el sistema de monitoreo sin afectar ninguna de sus partes.

Una de las condiciones que se controla en los experimentos de detección de materia oscura es la temperatura, para DAMIC por ejemplo, el rango de operación está entre 130K y 173 K para, de esta manera, reducir las vibraciones de la red cristalina del Si en las CCD, además de que se intenta minimizar los niveles de ruido producidos por el efecto de la temperatura. A diferencia de otros experimentos, DAMIC no maneja temperaturas tan bajas, como por ejemplo CDMS dónde el experimento opera a temperaturas tan bajas como 10 mk.

Los equipos que se utilizan para generar estas condiciones de temperatura dependen principalmente del rango de temperatura el cual se quiera alcanzar, para temperaturas de hasta 4 k se usa la compresión gases como el nitrógeno o el helio y para alcanzar temperaturas de milikelvin se utiliza la refrigeración magnética mediante el principio desimanación adiabática, este principio dice que elementos como Cr, Mn, Fe, Co, Ni y otros menos conocidos que poseen un momento magnético, es decir, que se comportan como imanes atómicos, está orientado en una dirección al azar, y cuando se aplica un campo magnético mediante un electroimán, los momentos magnéticos tienden a alinearse con él. A esto se opone la agitación térmica que tiende a desordenar la dirección en la que apunta cada uno de estos imanes atómicos dando como resultado que al aplicar el campo, se pierde la mayor parte de la energía de agitación térmica de los momentos magnéticos. Esta energía pasa en forma de calor al resto de los átomos del material y a los objetos que están en contacto térmico con él; consecuentemente la temperatura sube. A la inversa, si el material está en presencia de un campo externo y de repente se suprime el campo, el material se enfría. Es así como actualmente se logra alcanzar temperaturas tan bajas como 10 mk en cuestión de horas en los laboratorios.

Para la medición de la temperatura en sistemas criogénicos es común utilizar diodos, que no actúan como tales sino que para realizar la medición se aprovecha su característica tensión-temperatura para realizar la medición, que es conocida y muy estable. Estos sensores están calibrados en un rango de temperatura de 10 a 325 K dándole al sistema estabilidad y confiabilidad.

Otra manera de medir la temperatura en sistemas criogénicos es con ayuda de un sensor PT100, el cual está hecho a base de platino y es un tipo de sensor RTD. Los elementos puntuales se encapsulan en un tubo de acero inoxidable, lleno de gas Argón para evitar la condensación de agua en el interior del sensor a bajas temperaturas.

Para contribuir a las condiciones dónde las vibraciones de los átomos de los elementos detectores de partículas, además de descender la temperatura drásticamente, se crean condiciones de vacío en algunos experimentos, aunque esta práctica no es tan común en ellos.

Los instrumentos para medición de presión del vacío se dividen en dos categorías: alto vacío y bajo vacío. Combinando diferentes tipos de sensores es posible realizar mediciones de presión con rangos desde 10 mbar hasta 10^{-11} mbar. Para medir el bajo vacío se tiene un sensor de tipo pirani que cubre el rango de 30 mbar hasta 10^{-3} mbar y para alto vacío se cuenta con un sensor de cátodo frío para cubrir el rango de 10^{-8} mbar.

El sensor Pirani consta de un filamento metálico suspendido dentro de un tubo conectado al sistema al que se le mide el vacío. Funciona bajo dos principios de operación: i) la variación de la conductividad térmica de un gas con el cambio de presión y ii) el cambio de temperatura de un filamento con el cambio de corriente eléctrica y el cambio de su conductividad eléctrica con el cambio de temperatura. Entonces si la presión disminuye, la transferencia de calor del filamento por conducción también disminuirá, lo que provocará un cambio en su resistencia eléctrica.

En cuanto a los sensores por ionización de cátodo frío operan bajo el principio de altas diferencias de potencial, dónde se realiza una medición de la ionización, registrando la diferencia de potencial necesaria para producir la ruptura del dieléctrico (en este caso el aire) y originar una chispa.

Uno de los aspectos esenciales en los experimentos de materia oscura es la de eliminar tanto como sea posible el ruido de fondo causado por neutrones y rayos gamma generados por rayos cósmicos o por la radiactividad natural del entorno. Por ello, además del extremo cuidado puesto en la construcción del detector éstos experimentos deben llevarse a cabo en instalaciones subterráneas,

con un blindaje apropiado, para protegerlos de la radiación propia del lugar y de los propios componentes del experimento, los materiales más usados en la actualidad para los experimentos son: el agua desionizada, el polietileno, el plomo, cera de parafina y concreto.

Por último, en este apartado mencionaremos sistemas para proveer energía eléctrica en caso de un corte en el suministro de la misma. Los sistemas UPS (del inglés *Uninterruptible Power Supply*) almacenan energía para suministrarla en caso de que se genere un corte en el suministro eléctrico, la principal diferencia con una planta generadora es que sólo funcionan con lo que tienen almacenado en un rango entre 3 y 10 horas, mientras que una planta que produce energía eléctrica por medio de un generador quemando gasolina o algún otro combustible suministrando energía por más tiempo.

Estos dispositivos funcionan por medio de la activación de un inversor cuando se interrumpe el servicio de electricidad, y luego vuelven a su funcionamiento regular cuando regresa la energía. Esta fuente de poder simplemente produce electricidad de corriente alterna CA por medio de un inversor de servicio continuo hasta que la batería de corriente directa se descargue por completo o la energía sea restaurada. El diseño de este tipo de fuentes de poder es sencillo y también permite que más de un tipo de fuente de alimentación de corriente directa pueda participar en la carga de la batería.

Capítulo 3

Antecedentes

3.1 Experimento DAMIC

Como ya se ha mencionado hay una fuerte evidencia de la existencia de una gran cantidad de materia oscura en el universo por lo que ahora se busca detectarla de manera directa, ya se habló acerca algunos de los experimentos que buscan detectar esta materia, el detector DAMIC es un experimento muy novedoso ya que se busca detectar éstas partículas mediante sensores CCD, desarrollados originalmente para la cámara de un telescopio para el experimento *Dark Energy Survey camera* (Santos, 2012). Los CCDs son una mejor versión de la misma tecnología utilizada en las cámaras digitales, la diferencia es que estos sensores registran imágenes de la carga que se crearía si la materia oscura colisionara con el volumen de un CCD.

El experimento DAMIC (del Inglés *Dark Matter In CCD's*) funciona a base de ionización de sensores CCDs mismos que son utilizados en las cámaras digitales y que dieron el premio Nobel de física en 2009 a los científicos Charles K. Kao, Willard S. Boyle, George E. Smith. (AB, 2013), para la búsqueda de WIMP livianas (masas 1 a 50 veces la masa de un protón).

¿Por qué usar este tipo de sensores para la búsqueda de WIMP's? Los sensores CCDs son comúnmente usados en aplicaciones astronómicas ya que se pueden operar a temperaturas por debajo de los 175 K o -99 °C (reduciendo así la corriente generada en sensores fotoeléctricos) muestran un nivel de ruido térmico bajo (de alrededor de los 2 e-RMS) y poseen energía de ionización en el silicio del orden de 7.3eV ($1,17 \times 10^{-18}$ J) (Tiffengerg, 2013)

Para lograr estas temperaturas el detector usa un crió refrigerador que enfría un depósito (llamado criostato) dónde están colocados los sensores CCD, además de crear condiciones de vacío con ayuda de un conjunto de bombas para su operación. Todos estos componentes se explican a detalle en el capítulo 4.

Todas estas características hacen muy atractivos a estos sensores para la detección de la materia oscura, la razón por la que no habían sido considerados anteriormente es que poseían poco material activo y esto no podría detectar masas tan pequeñas. Actualmente se han desarrollado CCDs

DECam con 10 veces el espesor que los anteriores además de que poseen silicio de alta resistividad ($\sim 10\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$) en el laboratorio Berkeley para el proyecto denominado *Dark Energy Survey* (DES) (Santos, 2012), este proyecto está diseñado para buscar el origen de la aceleración de la expansión del universo midiendo 14 billones de años de historia de expansión cósmica con gran precisión, esto se logra mediante una cámara de 570 megapíxeles hecha de sensores CCDs. Esta cámara es capaz de ver la luz de más de 100.000 galaxias de hasta 8 millones de años luz de distancia en cada toma. (Santos, 2012)

El detector DAMIC se encuentra situado actualmente en el laboratorio SNOLAB ubicado en Canadá a 2 km de profundidad en una mina, es uno de los laboratorios subterráneos más grandes, profundos y mejor equipados del mundo. Alberga una docena de experimentos de física y astrofísica de partículas y provee a los usuarios de los servicios necesarios para operar sus experimentos. Entre estos se incluyen: sistema de aire acondicionado, subestación eléctrica, sistema de ventilación, caldera, sistema de distribución de agua potable, planta de agua ultra pura, bio reactor para el tratamiento de agua, por mencionar algunos.

El laboratorio es, en su conjunto, una instalación limpia de clase 2000, esto significa que existen como máximo 2000 partículas suspendidas menores a un micrón por metro cúbico, lo cual se consigue controlando las condiciones ambientales (temperatura, humedad, descarga electrostática, presión, etc.) gracias al empleo de diversos materiales de construcción y dispositivos como por ejemplo: muros (tabla roca forrada con FRP (Plástico Reforzados con Fibra), pintura epóxica o cubiertas plásticas o de vinil.), pisos (recubrimiento epóxico y/o poliuretano, pisos vinílicos en rollo con juntas soldadas), iluminación (lámparas de empotrar para plafón), etcétera.

La colaboración busca tener instalado el experimento en diversos laboratorios ya que se desea tener información en diversas latitudes para la corroboración de la teoría acerca de la interacción de éstas partículas, es por ésta razón que se planea tener un detector de este tipo en México diseñado por ingenieros y físicos del ICN-UNAM que podrá ser colocado en el laboratorio subterráneo ANDES (*Agua Negra Deep Experiment Site*), laboratorio que planea ser construido en América del Sur, único en su tipo (puesto que no existen laboratorios subterráneos en el hemisferio sur) una vez que este se encuentre finalizado, por el momento se tiene pensado buscar una mina que se adecúe a las necesidades del proyecto y que cuide de la seguridad de los operadores.

El sistema se encuentra en un depósito de cobre de tipo *Dewar*, dentro de este envase se encuentran los sensores CCDs protegidos por una cubierta de plomo, a temperatura de 129K y una presión de $10E-5$ mbar. Estos sensores captan el instante en el que una partícula de MO colisiona con el silicio ionizándolo permitiendo capturar el registro de la ionización de partículas que inciden en ellas. Otro de los factores que deben de cuidarse es, como ya se dijo, la calidad de los resultados; esto se logrará creando un sistema que proteja a los componentes de cualquier tipo de afectación que pueda llegar a tener. El entendimiento de la función que tiene cada componente es de vital importancia ya que a partir de esto se diseñará un sistema eficiente y confiable.

- **Funcionamiento**

Cuando un fotón o una partícula ionizante, deposita su energía en el silicio del sensor, los electrones la absorben y pasan de la banda de valencia a la banda de conducción, siendo transportados por un campo eléctrico hasta pozos de potencial donde son acumulados. Los pozos forman un arreglo de pixeles de dimensiones que van de unas μm a cientos de μm . La carga almacenada en los pixeles es posteriormente transportada hasta un circuito amplificador dónde es extraída y cuantificada.

Las cargas se almacenan en la zona de agotamiento dónde con ayuda de un arreglo de cambio de voltajes, éstas se mueven de una cavidad a otra para ser leídas posteriormente. La figura a continuación describe el funcionamiento del sensor.

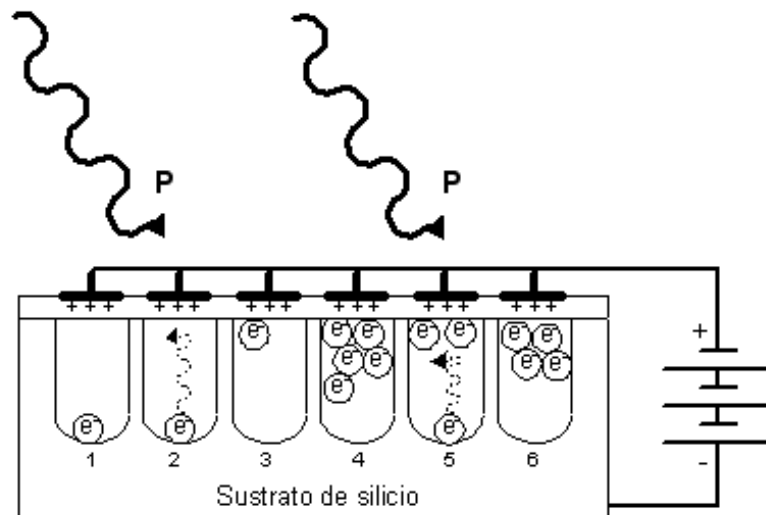


Figura 6: Funcionamiento del sensor CCD (Fernández, 2006)

Durante la exposición los pozos se polarizan externamente con una diferencia de potencial y los electrones cargados negativamente permanecen en el sustrato de silicio (1), cuando un fotón (P) alcanza al pozo la energía que suministra permite que un electrón del sustrato se “libere” (2,5) y se mueva hacia la zona con polaridad positiva (3) de esta forma los pozos se van llenando de electrones (4,6). Al final de la exposición el número de electrones acumulados será proporcional a la cantidad de luz (señal) recibida.

La estructura de estos sensores está dada por un conjunto de electrodos que son los responsables de mover la información a través del sensor además necesita de dos registros de corrimiento para obtener la información de las cargas depositadas. También tienen una capa de dióxido de silicio que funciona para proveer de aislamiento a los electrodos, y finalmente poseen unos canales (*channel stops*) que separan la información captada formando así pixeles junto con los electrodos.

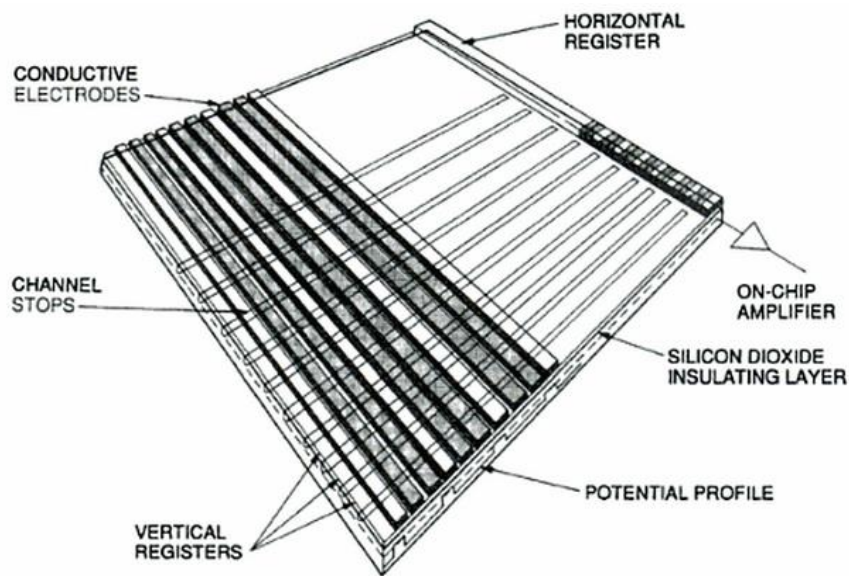


Figura 7: Estructura de una CCD

Para poder formar una imagen digital a partir de la de la señal analógica formada por los electrones acumulados en el sensor es necesario medir el número de electrones en cada pozo y convertir esta medida en un valor que indique la cantidad de señal recogida.

Para hacer esta lectura, la señal analógica del sensor se obtiene mediante un registro de corrimiento que ‘empuja’ la información de arriba abajo y de izquierda a derecha, posteriormente se amplifica la información obtenida para finalmente digitalizarla en un conversor analógico digital.

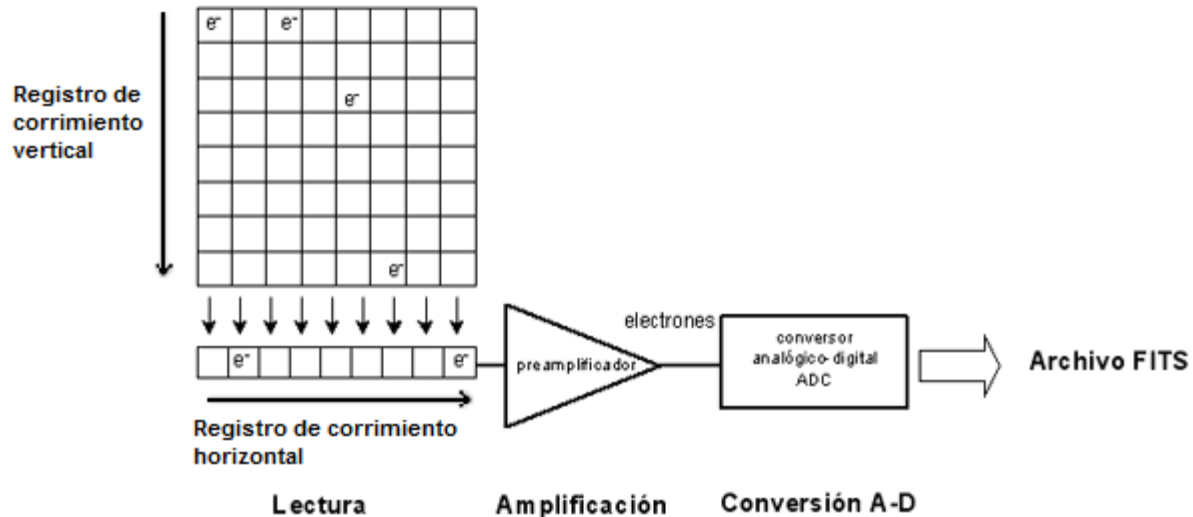
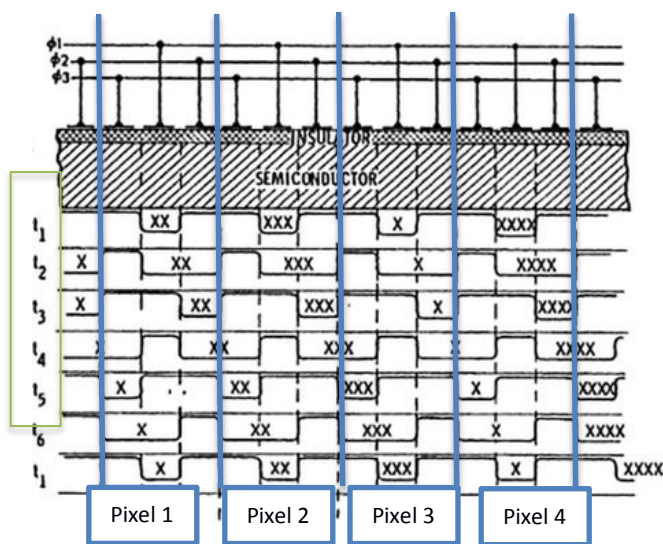


Figura 8: Obtención de datos para un CCD

Cada uno de estos pozos está conectado a uno de los tres electrodos como se puede observar en la figura 10 (conocidas como fase 1, fase 2 y fase 3) éstos son los responsables de coordinar la tarea de corrimiento de cargas. Las fases que están conectadas a altos potenciales cuando se recolectan los electrones son llamados fases colectoras mientras que las fases que se encuentran a potenciales más bajos son llamadas fases de barrera ya que estas separan las cargas en cada uno de los pixeles.

Un pixel se mueve a través del registro con ayuda de las 3 fases, una vez que se encuentra la carga colectada en el pozo, para empujar la carga por el registro son necesarios 6 tiempos. En el primer tercio de tiempo, la carga es empujada dentro de su mismo pixel a la orilla del mismo, a partir del 4to tiempo, la carga avanza al nuevo pixel quedando en el paso 6 al inicio del pixel y de esta manera cuando vuelve al tiempo 1 la carga ha avanzado un pixel completo.

El diagrama mostrado en la figura 9 ilustra este procedimiento, dónde t es el tiempo y ϕ la fase.



	$\phi 1$	$\phi 2$	$\phi 3$
t1	1	0	0
t2	1	1	0
t3	0	1	0
t4	0	1	1
t5	0	0	1
t6	1	0	1

Figura 9: Corrimiento de datos en cada pixel

Finalmente para la medición de la carga de cada uno de éstos pozos se tiene un pequeño capacitor del orden de los 50fF conectado a un amplificador para leer el voltaje de la carga, se tiene así entonces una manera muy fácil de convertir a digital el valor de la carga.

La figura 10 muestra el circuito que se encarga de hacer esta adquisición de datos.

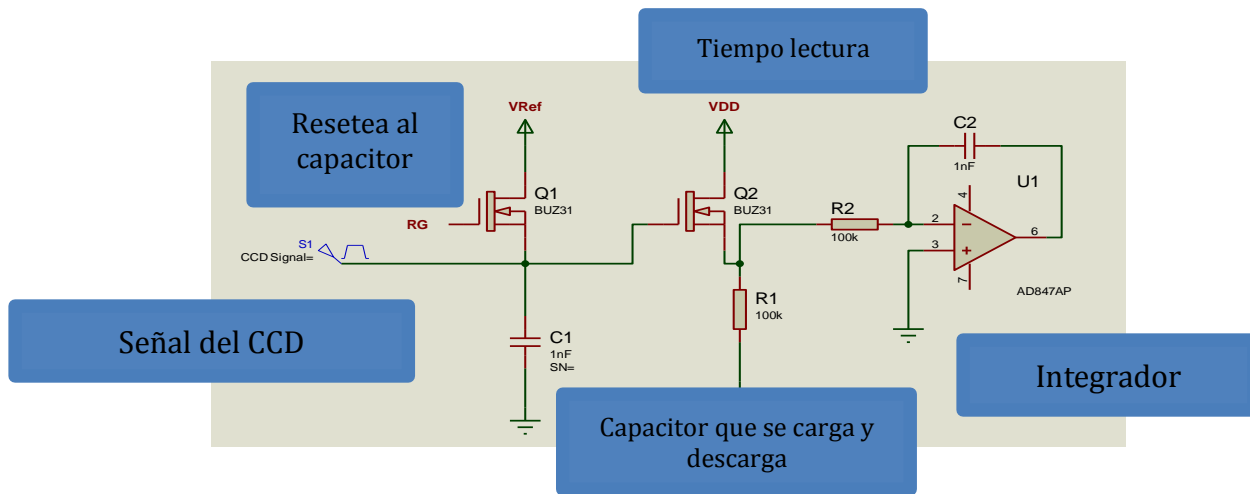


Figura 10: Lectura de las CCDs

Como se observa en la figura 10 la lectura de los datos se obtiene mediante por medio de un capacitor (C1), este voltaje se resetea con ayuda de un transistor de tipo MOSFET (Q1) que lo coloca en una referencia después de haber hecho la lectura, el primer transistor (Q1) coloca el valor

de la referencia mientras que el segundo transistor (Q2) controla el tiempo total de lectura por pixel (*integration width*).

Una vez que se ha obtenido una lectura de los datos, un integrador (U1,R2,C2) que es el encargado de transportar la información del voltaje de referencia y de la señal a un convertidor ADC de 16 bits para finalmente desplegarlo como un archivo FITS (Flexible Image Transport System). La imagen que se muestra a continuación es la señal obtenida después del segundo transistor (izquierda) y la imagen obtenida en .FITS (derecha)

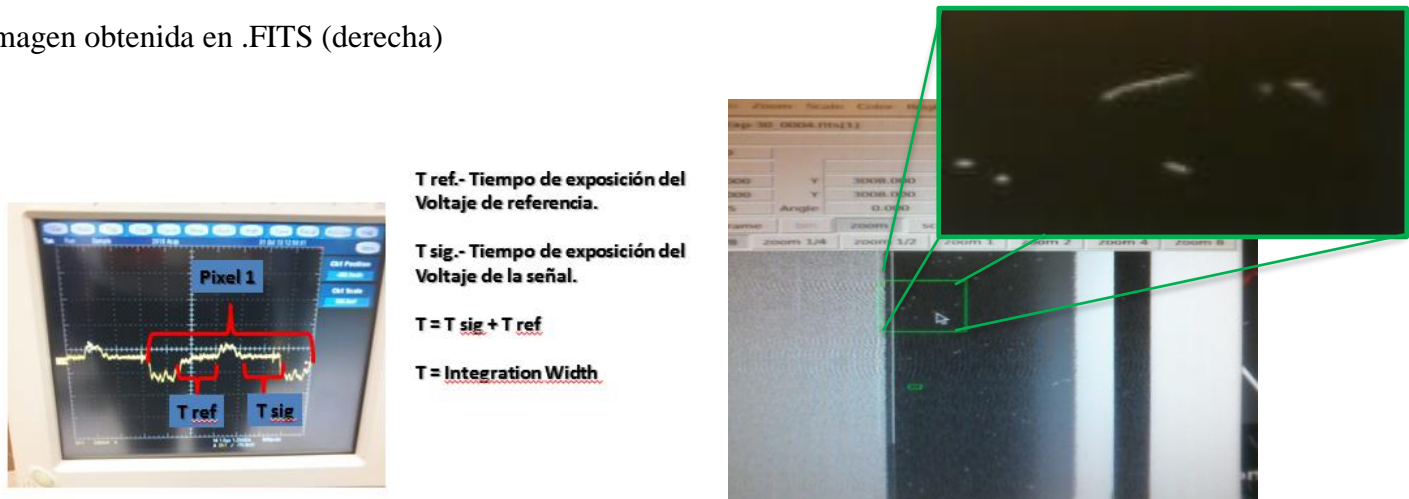


Figura 11: Imágenes de las señales obtenidas de la lectura de un CCD

Un archivo FITS es a menudo utilizado para almacenar también datos que no son imágenes, como espectros electromagnéticos o en este caso fotones incidentes por lo que un fichero FITS podría contener varias extensiones, y cada una de ellas podría contener datos de un objeto. (Janesick, 2001)

La eficiencia cuántica de un sensor describe su respuesta a diversas longitudes de onda de la luz. La frecuencia de aumento de la luz (longitudes de onda más cortas) será absorbida más fácilmente por el sustrato del sensor que frecuencias más bajas (una longitud de onda más larga). Por lo tanto, como las longitudes de onda llegan a ser más cortas, la sensibilidad del sensor decrece rápidamente en el sensor CCD nos habla de la fracción de fotones incidentes que producen una carga útil en el chip de silicio, esta interacción sólo ocurre si el fotón tiene la suficiente energía para lograrlo. (Janesick, 2001)

Estos sensores son útiles para tanto niveles bajos de energía como altos y serán los responsables de captar la información del experimento DAMIC.

- Ruido

Se considera ruido a todas señales "no deseadas" y que también quedan registradas, bien en el sensor durante la exposición, bien durante el proceso de lectura y conversión analógico-digital o durante el procesado de las imágenes.

Para obtener los resultados esperados se debe de bajar el ruido a sus niveles más bajos para que de esta manera no haya interferencias en las mediciones. Para conocer cómo se comporta el ruido dependiendo del tiempo de la ventana de integración se realizaron unas pruebas variando esta ventana y haciendo una gráfica del ruido que se obtiene.

Con ayuda del software ds9 (OBSERVATORY, 2011) usado ampliamente en la industria de la astronomía, se obtuvo el ruido de las imágenes tanto en la parte derecha como en la izquierda, en una se obtiene la imagen y en la otra se obtiene información del ruido. Se tiene establecida la siguiente relación de ruido entre la ventana de integración y el convertidor analógico-digital (*Analogic Digital Converter*) de pruebas realizadas anteriormente:

$$\text{Int_Width} = 80 \rightarrow 2.5 \text{ ADC} = 10 e$$

Esta relación nos dice que para una ventana de integración de 80 será equivalente a 10e a 2.5 del ADC. Con ayuda de esta información se obtuvo la siguiente tabla que nos muestra la información del ruido que se genera en las diversas pruebas realizadas a una temperatura de 173 K, dónde RMS_L es el ruido en la parte izquierda del sensor, RMS_R la derecha y el Sigma e- el ruido obtenido con el software ds9 de la imagen entre el ruido electrónico (Sigma e- = RMS_L/ADC)

Tabla 1: Ruido en los sensores CCDs

Test	Integr_Width	RMS_L	RMS_R	ADC	Sigma e-
1	8	2.34	2.464	0.25	9.36
2	100	28.79	30.01	3.125	9.2128
3	200	42.35	45.14	6.25	6.776
4	300	21.32	25.41	9.375	2.274133
5	400	17.66	24.95	12.5	1.4128
6	500	30.33	37.54	15.625	1.94112
7	600	48.24	55.15	18.75	2.5728
8	700	34.7	46.49	21.875	1.586286
9	800	31.76	47.58	25	1.2704

Ahora si ponemos en una gráfica esta información podemos notar que el ruido decrece dramáticamente a partir de los 300 μ s en el tiempo de lectura.

Figura 12: Nivel de ruido en sensor CCD (prueba realizada el 31 de octubre de 2013)

Por lo que observando la gráfica de la figura 12 se recomienda que la lectura se haga a 400 us ya que se obtendrán niveles bajos de ruido y no será tan tardada la lectura de la información ya que aunque a 800 us se muestra el nivel más bajo, además que el tiempo de espera para la adquisición de datos puede llegar a ser hasta de una hora (tiempo medido durante las pruebas).

Por otro lado se detectó otra fuente de ruido en los sensores, este es cuando se está haciendo la recolección de la información del sensor. Cuando se realiza la lectura de las imágenes se produce un efecto llamado *overscan* que es lo mismo que un sobre escaneado de la información leyendo así información en lugares donde no existe tal. Este efecto es producido debido a que en el instante en el que se transfiere información de una columna a otra, se sigue leyendo información pero debido a que no hay nada que leer ésta es puro ruido.

Se sigue trabajando actualmente para buscar posibles fuentes de ruido y tomar acciones para reducirlo al mínimo.

3.2 Situación actual de DAMIC en SNOLAB

DAMIC fue instalado y probado en SNOLAB, obteniéndose así buenos resultados ya que el sistema funciona adecuadamente. Por el momento se encuentra en un periodo de *upgrade* dónde se planea reducir el ruido lo más bajo posible (1 a 2 e-RMS), detectar posibles fuentes de radiación que estén emitiendo ciertos materiales que formen parte del interior del experimento (como la electrónica, conectores, etc.) e instalar sensores de mayor espesor. El equipo planea instalar las mejoras en el detector para la primavera de 2014.

Actualmente DAMIC se conforma de la siguiente manera (ver fig. 13)

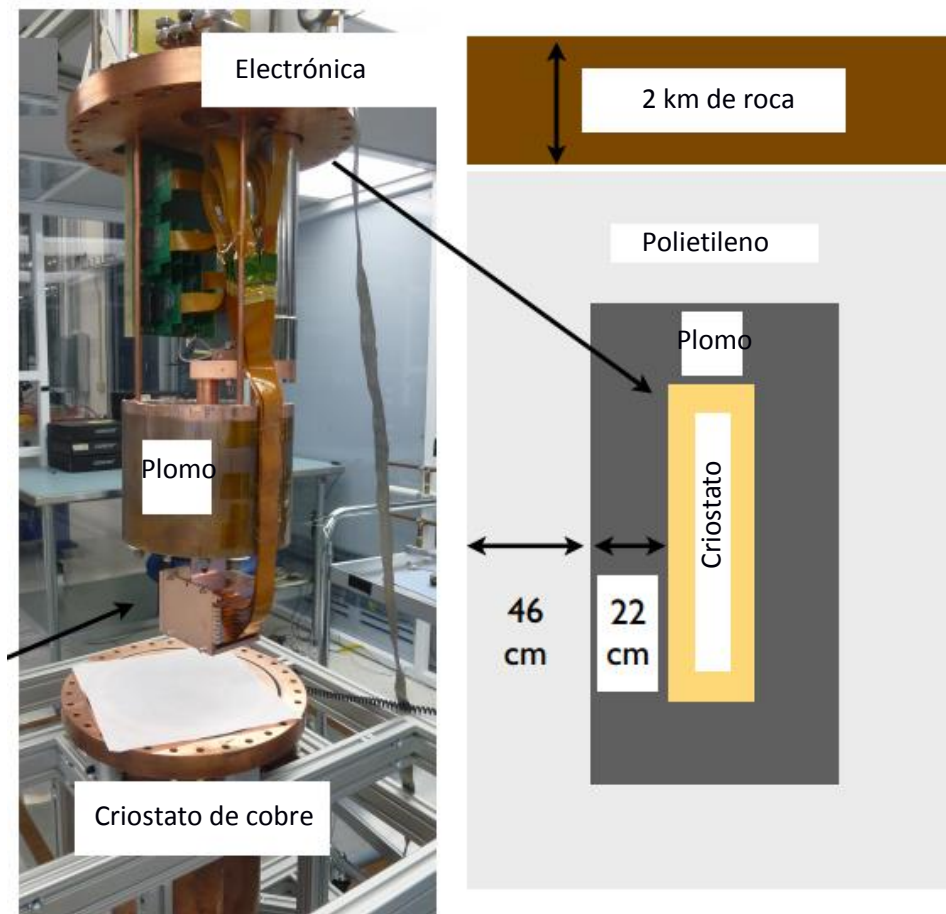


Figura 13: Experimento DAMIC

Para proteger al experimento de señales provenientes por rayos cósmicos y demás fuentes de contaminación radiactiva, el experimento está blindado por una capa de polietileno y plomo y está colocado a 2 km de profundidad de la superficie terrestre.

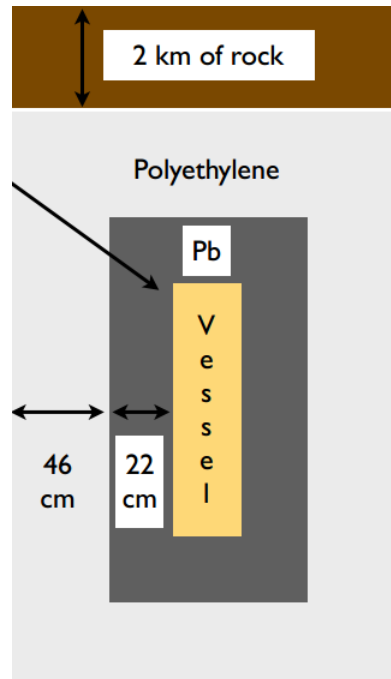


Figura 14: Protección del experimento DAMIC

Uno de los problemas a los que se enfrentan los investigadores en SNOLAB, son los continuos cortes de energía que se presentan de manera inesperada. Cuentan con una planta de energía de 2MW y planea incrementar su capacidad a 3MW, además de instalar una planta de emergencia con una capacidad de 150 kW para agosto del 2014. (Duncan, 2013)

Aunque no se tiene registro oficial del número de cortes actuales en SNOLAB, los investigadores reportan que han llegado a tener hasta 4 cortes de energía en un año, y aunque el laboratorio busca continuamente dar solución a la situación actual, se busca proteger al experimento frente a cualquier situación de esta naturaleza. (Duncan, 2013)

Capítulo 4

Análisis general del sistema

Para lograr una correcta instrumentación para el monitoreo de los datos se debe entender por completo el sistema para la adecuada toma de decisiones. Es por esta razón que a continuación se definen los requerimientos y especificaciones mínimas que debe tener el sistema para que el usuario pueda operar al sistema de manera fácil y adecuada.

El detector está compuesto principalmente por los siguientes componentes (ver figura 16):

- Un crio refrigerador marca CRYOMECH modelo AL63 (CRYOMECH, 2012)
- Un criostato de cobre
- Un controlador de temperatura LAKESHORE modelo 332s (Lakeshore, 2013)
- Bomba generadora de vacío Pfeiffer Vacuum modelo HiCube 80 (Vacuum, 2012)
- Un controlador de presión Pfeiffer Vacuum modelo TPG 261 (Pfeiffer Vacuum, 2013)
- Una tarjeta de adquisición de datos marca MONSOON
- Computadora Dell para procesamiento de datos.

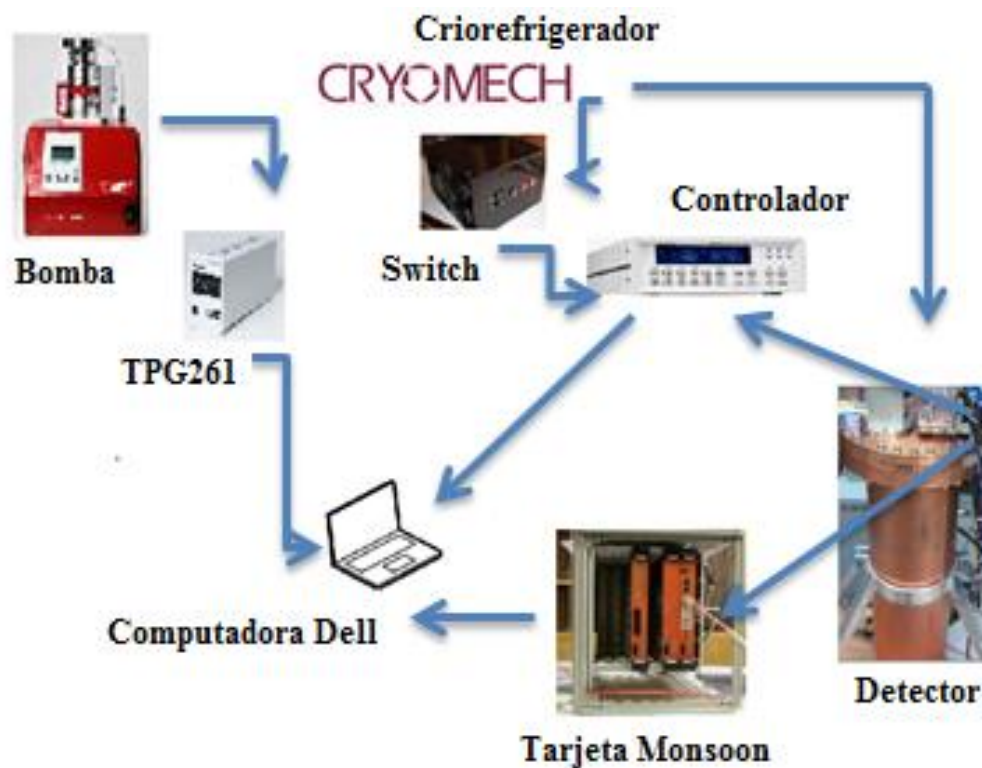


Figura 15: Distribución del sistema

- Crio refrigerador y criostato

Para lograr estas bajas temperaturas es necesario contar con dispositivos especiales que puedan contener en su interior, al experimento de manera aislada del ambiente exterior; estos dispositivos son conocidos como criostatos. Para reducir los efectos de conducción térmica se debe de tener un amplio conocimiento del comportamiento de los materiales en distintos rangos de temperatura, los materiales comúnmente usados en criostatos son: acero inoxidable, cobre libre de oxígeno o de alta pureza (que es el caso de DAMIC), aluminio, garolita y teflón entre otros, además de que son usados materiales de epóxicos y soldaduras para realizar uniones térmicas. Estos criostatos se someten a un gran estrés debido a las variaciones en su coeficiente de expansión, es por esta razón que dichos materiales, deben ser mecánicamente y térmicamente resistentes.

Existen diferentes tipos de crio refrigeradores, la diferencia radica en el tipo de fluido que se utilice para su operación. Cuando se usan ciclos térmicos por bombeo de helio, se les denomina de ciclo cerrado. Por otro lado cuando se emplean fluidos criogénicos del tipo helio líquido o nitrógeno líquido se les denomina de ciclo abierto. Cuando se usan ambos métodos simultáneamente se habla de crio refrigeradores híbridos. El sistema criogénico de DAMIC emplea helio es (gaseoso) puro 99,999%, siendo entonces un sistema de ciclo cerrado de la marca CRYOMECH modelo AL63.

El sistema completo consiste en dos componentes principales: uno es el compresor, este comprime al refrigerante para generar las condiciones de temperatura, a su vez el compresor debe ser enfriado ya que genera una gran cantidad de calor como resultado del trabajo de comprimir helio, para ello se utiliza un circuito de ciclo cerrado de agua o aire. Para que el compresor funcione debidamente deben cumplirse varias condiciones: la temperatura ambiente debe estar entre los 7 y 38 °C, la temperatura del agua entrante deber estar entre 4 y 27 °C, la del agua saliente de ser < 41 °C, el caudal de presión de agua debe estar entre 2 y 6.9 bar, el flujo de agua desmineralizada refrigerante debe ser > 2.26 l/m.

El otro componente es el cabezal frío, que lleva refrigerante a través de un ciclo de expansión (este modelo cuenta con un ciclo de expansión pero existen modelos con varios ciclos para alcanzar temperaturas más bajas) a través de una válvula con una muesca que gira expandiendo así al helio en un ciclo irreversible. La figura 16 muestra el diagrama del ciclo Gifford-McMahon.

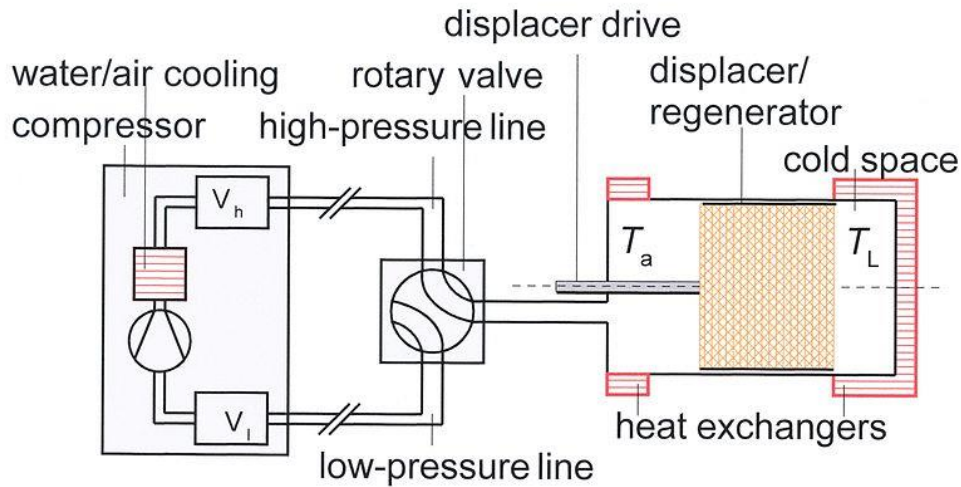


Figura 16 Ciclo Gifford-McMahon

En una primera etapa el pistón se mueve hacia la izquierda mientras que la cabeza fría está conectada al lado de alta presión del compresor. El gas entra en el regenerador a temperatura ambiente (T_a) luego con la válvula de alta presión cerrada y la de baja presión se abre parte del gas fluye a través del regenerador hacia el lado de baja presión del compresor por lo que el gas se expande. La expansión es isotérmica y el calor es absorbido por el criostato. El pistón se mueve hacia la derecha con la cabeza fría conectada al lado de baja presión del compresor a fin de forzar el gas frío para pasarlo al regenerador, mientras que toma el calor desde el regenerador. La válvula de baja presión se cierra y la de alta presión se abre. El gas, ahora en el extremo caliente de la cabeza fría, se comprime y se libera calor a los alrededores, llegando así a su posición inicial de nuevo para completar el ciclo.

Estos equipos presentan la desventaja de introducir vibraciones y ruido que pueden alterar las mediciones además de crear un ambiente de trabajo dificultoso. Un sistema de más reciente tecnología es el enfriador por tubo de pulsos, que tiene un mínimo de vibraciones, ya que no hay partes mecánicas en la última etapa de enfriamiento pudiendo lograr temperaturas de hasta 2K.

- Bomba de vacío

Las bombas de vacío son aquellos dispositivos que se encargan de extraer moléculas de gas de un cierto volumen sellado; dependiendo del nivel de vacío que se quiera alcanzarse el proceso separa en etapas de bombeo. El funcionamiento de una bomba de vacío está caracterizado por su velocidad de bombeo y la cantidad de gas que se succiona por unidad de tiempo, siendo estos de los

principales parámetros que se toman en cuenta para la adquisición de una bomba de vacío. Este sistema es un sistema de vacío seco y posee dos etapas para la generación del vacío: una bomba previa de tipo diafragma y una bomba secundaria de tipo turbo molecular.

El sistema de vacío seco se caracteriza por que no usa ningún tipo de aceite en su operación, las ventajas de estos sistemas es que su mantenimiento es sumamente sencillo, además de no ser contaminantes en su proceso.

Las bombas previas, son capaces de bombear a partir de la presión atmosférica, hasta una presión a la cual empiezan a funcionar las bombas de alto vacío. El tipo de bomba que se utiliza en este caso es la bomba de diafragma, cuyo elemento de bombeo es un diafragma flexible colocado dentro de un cuerpo cerrado que se acciona desde el exterior por un mecanismo reciprocante (de tipo pistón). Este movimiento reciprocante hace aumentar y disminuir el volumen debajo del diafragma, se colocan un par de válvulas a la entrada y la salida para darle dirección al fluido que circula en la dirección de bombeo.

Al igual que la mayoría de las bombas actuales, la que se emplea en este sistema está equipada con la llamada válvula de lastre de gas o "gas ballast". Una vez que se ha comprimido el gas en el cuerpo de la bomba, se inyecta aire desde el exterior a través de la válvula de lastre, con lo cual la válvula que descarga a la atmósfera se abre antes, y reduce la relación de compresión para el vapor. Dejando entrar gas de lastre mejora la descarga de condensado y la bomba alcanza el vacío final especificado más rápidamente además que el gas actúa como un agente de extracción que se saturará con los vapores contaminantes presentes en la bomba y expulsados fuera la descarga de la bomba.

Una vez que ha pasado por la bomba de diafragma el fluido pasa a la bomba turbo molecular para ser comprimido a alto vacío, este tipo de bombas constan de un número de juegos de paletas móviles (el rotor) y otro juego de paletas fijas (el estator) y funcionan de la siguiente manera:

Tanto las paletas móviles como las fijas están orientadas para que las moléculas presentes a la entrada (área de baja presión) sean lanzadas progresivamente hacia el área de alta presión (salida) donde son extraídas por una bomba auxiliar (la bomba de diafragma). Cuando una molécula de gas entra en su trayectoria la impulsan en dirección al área de alta presión, extrayendo así las moléculas de gas del contenedor.

Para que una bomba de este tipo sea eficaz, su velocidad lineal tiene que ser igual o superior que la velocidad de las moléculas que es del orden de 450 m/s. Para conseguir esto las paletas de estas bombas con un diámetro de giro de 6 cm tienen que alcanzar 60.000 revoluciones por minuto para que esto suceda, la bomba HiCube alcanza 90,000 rpm.

La bomba HiCube 80 tiene un consumo de energía total de 230 W, su velocidad de bombeo del nitrógeno es de 67 l/s, tiene una presión máxima de vacío de $1E-7$ mbar (alcanzando 3.5 mbar en su primera etapa) está controlado de manera automática por un panel que se ajusta a las necesidades del usuario.

- Protector de Plomo

Es una cubierta que rodea al detector para bloquear la incidencia de rayos gamma, cuya corta longitud de onda, los hace el tipo más penetrante de radiación electromagnética. Se utilizan alrededor de 830 ladrillos de plomo para hacer una cubierta de 8'' alrededor de DAMIC, estos se encuentran pintados para evitar contaminación por plomo en el área. (Memorandum, 2008)

- Controladores

Este sistema consta de dos controladores uno la temperatura y otro para la presión. El controlador de temperatura es un Lakeshore modelo 332s (Lakeshore, 2013) y soporta 2 entradas para sensores de diferentes tipos: diodos, RTD's y termopares. El control se puede realizar mediante un PID automático, PI automático, P automático, en modo manual y en modo zona (este se refiere a que una vez que se introducen los parámetros del PID para una cierta temperatura en modo manual, el sistema calculará los demás parámetros si se llegara a cambiar la temperatura establecida) el usuario podrá introducir hasta 10 zonas de temperatura. Incluye 2 calentadores (50 y 10 W) para mantener la temperatura estable en el sistema, cada uno con su controlador PID independiente.

La elección del sensor apropiado es de vital importancia, y debe hacerse tomando en cuenta las necesidades del sistema y del usuario. A continuación se presenta una tabla con las características principales de los tipos de sensores compatibles con el controlador LakeShore 332s.

Tabla 2: Sensores de Temperatura

Tipo de sensor	Rango de operación	Consideraciones	Restricciones
Diodos de silicio	1.4K - 500K	Coeficiente de temperatura negativo, sensibilidad a 77K de -1.73 mV/K, precisión $\pm 75\text{mK}$, siguen la curva de calibración estándar.	No se pueden utilizar bajo campos de magnetismo o radiación ionizante.
Diodos GaAIAs	1.4K- 300K	Coeficiente de temperatura negativo, sensibilidad a 77K de -1.25 mV/K, precisión $\pm 180\text{mK}$.	Requieren calibración, no se pueden operar bajo campos magnéticos o radiación ionizante.
Sensores de platino con coeficiente positivo.	30K – 675K	Coeficiente de temperatura positivo, sensibilidad a 77K de 0.42 m Ω /K, precisión $\pm 14\text{mK}$, siguen la curva de calibración estándar.	No se pueden operar en temperaturas muy bajas.
Sensores de platino con coeficiente negativo.	1K – 420K	Coeficiente de temperatura negativo, sensibilidad a 77K de -0.42 m Ω /K, precisión $\pm 14\text{mK}$, resistencia a fuertes campos magnéticos y radiación por ionización.	Requieren calibración
Termopares	3.2K- 1500K	Coeficiente de temperatura positivo, sensibilidad a 4.2K de 12.6 $\mu\text{V/K}$, precisión $\pm 288\text{mK}$, económicas.	Menor precisión, requieren calibración.

- Controlador TPG261

En cuanto al controlador de la presión es un TPG 261 que es el encargado de la comunicación entre el sensor de temperatura y la computadora, este controlador posee una entrada con compatibilidad con sensores pirani, piezoeléctricos y de cátodo frío. Una interface se comunicación con cable RS232 con una velocidad de muestreo de 50 muestras por segundo. Su rango de medición va de 55,000 mbar a los 5E^{-11} mbar operando entre 5 y 50 °C

- Escudo de Polietileno

El escudo de polietileno protege al experimento de la incidencia de radiación proveniente de aparatos dentro del laboratorio; como la electrónica de adquisición de datos, los controladores, la bomba de vacío y el crio refrigerador, y demás componentes de experimentos que no son de DAMIC pero que se encuentran en SNOLAB.

- Contenedor de CCDs

El contenedor de los sensores está hecho a base de cobre de alta pureza acoplado mecánicamente con ayuda de tornillos y pegamento EPOXI.

El cuidado de la temperatura y la presión es imprescindible en el experimento, por un lado para mantener la fidelidad de las mediciones y por otro para el cuidado de los sensores CCD, lo que resulta de vital importancia ya que una CCD se puede dañar irreparablemente si se llega a una determinada combinación de condiciones de presión y temperatura.

En la figura 17 se muestra la imagen de una CCD dañada junto con la de una que no lo está. En ocasiones, una CCD dañada puede ser reparada mediante compuestos químicos, pero la finalidad de monitorear la presión y temperatura es que no se llegue a esta situación o a un punto en el que el daño sea irreparable.

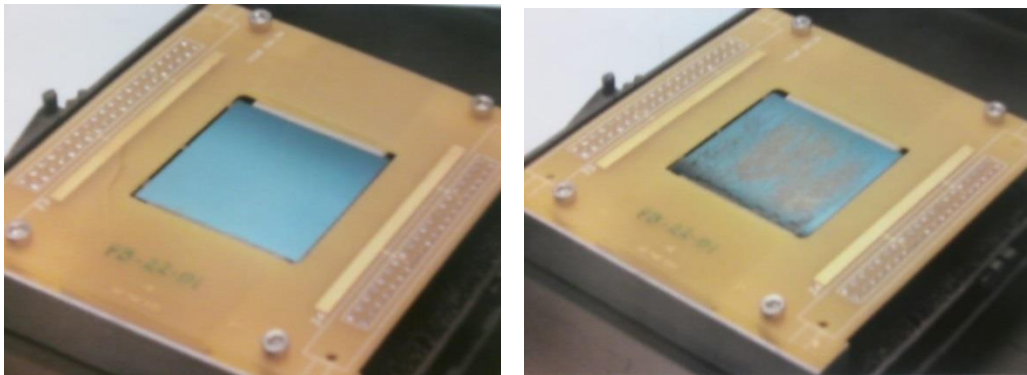


Figura 17: Sensor CCD dañado

Un experimento con el que actualmente se trabaja para realizar mejoras en DAMIC es el experimento llamado CONNIE. Fue creado para medir la dispersión coherente de neutrinos por núcleos, proceso físico predicho por el Modelo Estándar de las interacciones fundamentales pero que hasta ahora no ha sido observado debido a que es muy difícil su detección por que la señal generada es muy débil. Con los CCD, en principio, es posible distinguir este proceso, lo que se podría utilizar para tener información acerca del funcionamiento de un reactor o para aprender más sobre la naturaleza de los neutrinos.

El método de monitoreo desarrollado en esta tesis será probado en primera instancia en CONNIE detector de la misma naturaleza que DAMIC, ya que este detector se encuentra operando bajo las mismas condiciones de temperatura y presión, con la ventaja de estar acoplado para la realización de pruebas.

CONNIE será llevado posteriormente al reactor nuclear Angra en Rio de Janeiro, Brasil para la toma de datos.

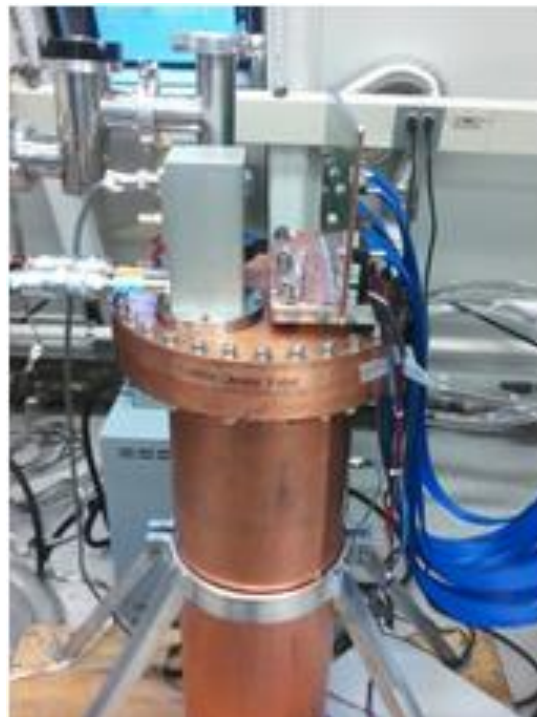


Figura 18: Detector CONNIE

4.1 Especificaciones y requerimientos

Especificaciones:

Para todo programa se requiere que existan una serie de requerimientos establecidos por el usuario pero a diferencia de estos, las especificaciones son las que hacen que un programa sea funcional, las 3 especificaciones básicas de un programa son:

1.- Entendible

- El sistema sea fácil de usar y de entender.

2.- Mantenable

- El sistema requiere poco esfuerzo en actividades de mantenimiento.

3.- Escalable

- El sistema puede ser modificado por otro programador, y hacerlo crecer de las maneras que sean necesarias para el mejoramiento del programa.

Requerimientos:

Cuando se planteó la idea del sistema de protección el usuario estableció una serie de requerimientos para la operación del experimento, mismos que listamos a continuación:

1. Caso A: Aumento en la presión en el sistema

En caso que la presión aumente sin control, se corre el riesgo de que se formen capas de hielo o agua sobre los sensores dañándolos irreparablemente, esto es debido a que la composición del aire contiene un porcentaje de vapor de agua (alrededor de 5%), por lo que se debe mantener la presión y la temperatura de manera que no se llegue al punto de formarse agua o hielo en el criostato, como se puede observar en el diagrama de fase del agua a continuación mostrado.

Debe mantenerse
debajo de la línea

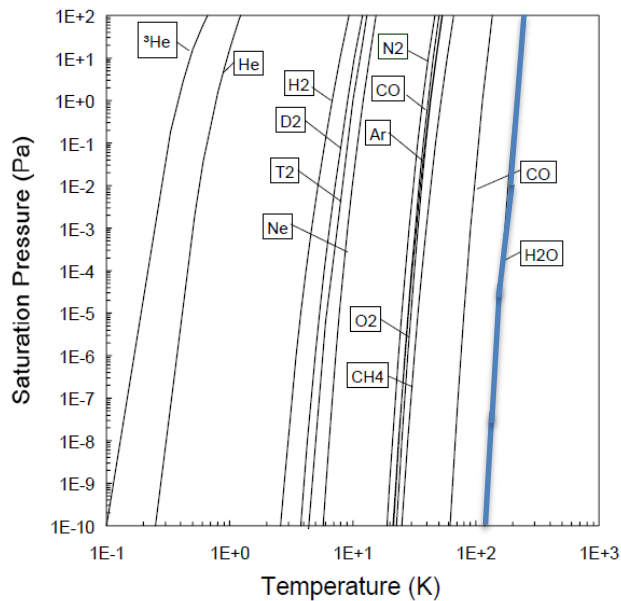


Fig. 1: Saturation curves of common gases

Figura 19: Diagrama de saturación del agua

El sistema, por lo tanto deberá protegerse a sí mismo si algo así llegara a suceder, apagando el crio refrigerador a fin de permitir que se desplace a la derecha el diagrama de fase, sin llegar al punto crítico. Así mismo, con el aumento de la temperatura, el sistema le hará saber al usuario que la presión ha fallado por lo que se procedió a tomar la acción necesaria, guardando los datos de presión, temperatura y tiempo para su posterior análisis.

2. Caso B: Aumento en la temperatura del sistema, teniendo 3 posibles causantes:

- El crio refrigerador no funciona.
- El sistema de registro de la temperatura no está funcionando.
- La electrónica interna de lectura de los CCDs está encendida mientras que el crio refrigerador está apagado (de manera intencional).

Para este caso, en que la presión se mantiene baja (1E-5 mbar) y la temperatura (a temperatura ambiente) se eleva, se corre el riesgo de dañar al equipo por quemaduras internas, ya que al no haber transferencia de calor por convección debido a las condiciones de vacío, además de que la conducción se lleva a niveles muy bajos de transferencia, el equipo no tendrá otra manera de disipar el calor más que incendiándose. También por expansión térmica el sensor CCD puede resultar fractura debido al cambio drástico en su temperatura.

En esta situación se debe alertar al usuario de lo sucedido, apagando completamente todos los componentes del sistema (crio refrigerador, bomba de vacío y lector de CCDs) guardando los datos de presión, temperatura y tiempo para su posterior análisis.

3. Caso C: En esta situación se creará un *interlock*, que aunque no se considera una falla como tal del sistema puede ser una falla del operador prendiendo el equipo de manera inadecuada, para el crio refrigerador, bloqueándolo en su funcionamiento hasta que no se alcance una presión de 10^{-3} mbar y de esta manera asegurar que, cuando se empiece a enfriar el sistema, las condiciones de vapor se encontrarán por debajo de la curva.
4. Caso D: En este caso se creará una señal de aviso al usuario de que el sistema está teniendo modificaciones en sus parámetros, si la temperatura cambia (1°C) el usuario estará notificado de ello para tomar las acciones pertinentes.

Además, en todo momento se desplegarán los valores de presión y temperatura del sistema, así como que tan alejados se encuentran de la “zona de peligro” o por arriba de la zona de cambio de fase.

4.2 Algoritmo de programación

El Lenguaje Unificado de Modelado (LUM o UML, por sus siglas en inglés, *Unified Modeling Language*) es un lenguaje gráfico para visualizar, especificar, construir y documentar un sistema. UML es un "lenguaje de modelado" que sirve para especificar, para describir métodos o procesos. Se utiliza para definir un sistema, para detallar los artefactos en el sistema y para documentar y construir. Para realizar la programación del funcionamiento del sistema es necesario saber los pasos que se deben de seguir para la toma de decisiones es por esta razón que se realizó un diagrama basado en UML para de esta manera proceder a desarrollarlo.

Existen diversos diagramas en UML, estos dependen de lo que se pretenda presentar ya sea en base a su estructura, comportamiento o interacción. Para este apartado se realizaron diagramas de secuencia ya que este tipo de diagramas muestra la interacción de un conjunto de objetos en una aplicación a través del tiempo modelándose para cada caso de uso.

El usuario anteriormente se comunicaba mediante dos programas básicos para prender, apagar y colocar el punto de referencia de la temperatura. Se tomó como base el programa de presión para

realizar los cambios necesarios y se decidió cambiar el de temperatura para hacerlo más ágil y más amigable.

Se desarrolló el siguiente diagrama de secuencia, este es un tipo de diagrama usado para modelar interacción entre objetos en un sistema según UML

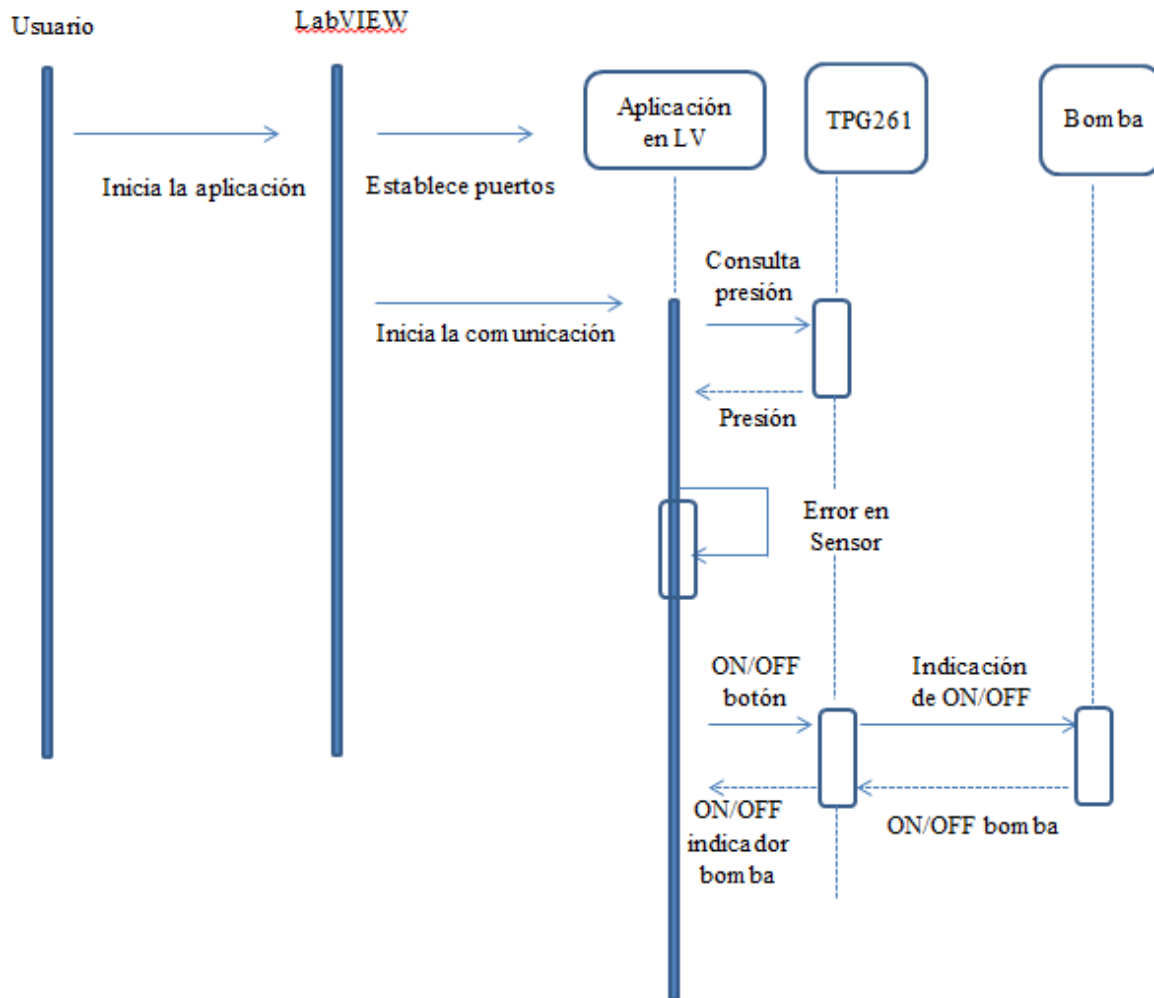
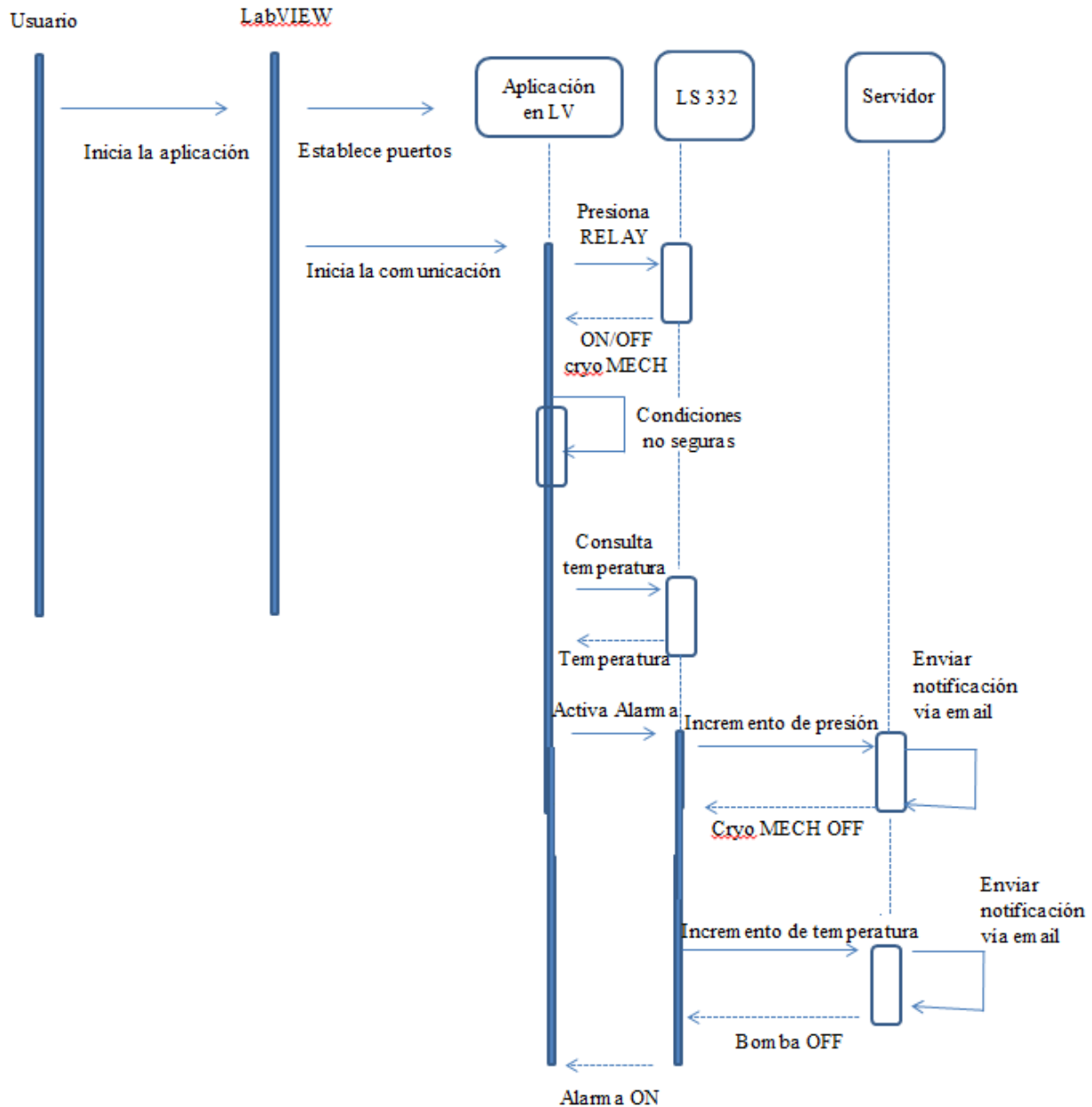


Figura 20: Diagrama de secuencia para la presión

De esta manera, se puede visualizar de manera general el funcionamiento del programa. Para cada una de las funciones internas se tiene una toma de decisiones similar a las presentadas anteriormente, cada una de las cuales será explicada con detalle en el apartado de desarrollo de interfaces para de esta manera visualizar y la programación realizada.

Para el programa de la temperatura se desarrolló el siguiente diagrama de secuencia, este es un tipo de diagrama usado para modelar interacción entre objetos en un sistema según UML.



El usuario iniciará el programa escogiendo los puertos correspondientes para la comunicación con la bomba, el TPG261 y el LakeShore 332. Una vez que estos se hayan comunicado, el programa leerá y desplegará la información de los parámetros de temperatura y presión, si existe algún problema con el sensor este mostrará un indicador de lo sucedido. Cuando el usuario requiera prender o apagar el relevador del LakeShore (LS 332) este verificará que las condiciones sean las

adecuadas (tiempo entre último encendido o apagado y presión) si no son seguras para el experimento, entonces no realizará la acción.

En el caso que requiera encender el sistema de alarmas, el usuario tomará esta decisión encendiendo el botón de alarmas, así si el sistema tiene alguna falla (incremento de temperatura o de presión) se tomará la acción requerida y se le notificará al usuario.

Capítulo 5

Desarrollo de interfaces

Este programa es realizado en su totalidad en LABVIEW® mediante programación en paralelo, esta es una técnica de programación en la que muchas instrucciones se ejecutan simultáneamente. Se basa en el principio de que los problemas grandes se pueden dividir en partes más pequeñas que pueden resolverse de forma concurrente ("en paralelo"). Existen varios tipos de programación paralela: paralelismo a nivel de bit, paralelismo a nivel de instrucción, paralelismo de datos y paralelismo de tareas. Este programa está realizado en base a paralelismo a nivel de instrucción por lo que se ejecuta todo el programa de manera simultánea esperando a que se ejecute una instrucción para realizarla y volver al programa.

Si se desea conocer los comandos que se utilizaron en la realización del programa y el desarrollo de cada una de las interfaces (presión y temperatura) y finalmente, se hablará de la comunicación TCP/IP como opción adicional para la comunicación del sistema con la computadora, se puede consultar esta información en los anexos.

5.1 Programación de las interfaces

Para la programación de las interfaces se realizaron dos programas, uno para visualizar la presión y otro para la temperatura, mediante comunicación serial. La comunicación serial es un protocolo muy común de transferencia de información entre dispositivos que se incluye de manera estándar en casi cualquier PC. La comunicación serial puede también ser utilizada para adquisición de datos si se usa en conjunto con un dispositivo remoto de muestreo.

Para realizar la comunicación se utilizan 3 líneas de transmisión: tierra (o referencia), transmitir y recibir, y el puerto serial envía y recibe bytes de información un bit a la vez. Las características más importantes de la comunicación serial son la velocidad de transmisión, que nos indica el número de bits por segundo que se transfieren, los bits de datos que se refiere a la cantidad de bits en la transmisión, siendo las más comunes los bits por paquete de 5, 7 y 8 bits, los bits de parada que sirven para indicar el fin de la comunicación por paquete de información transmitida (los valores típicos son 1, 1.5 o 2 bits) y finalmente, la paridad, que es una forma sencilla de verificar si hay

errores en la transmisión de los datos. Existen cuatro tipos de paridad: par, impar, marcada y espaciada. La opción de no usar paridad alguna también está disponible.

Para que dos puertos se puedan comunicar, es necesario que las características en ambos aparatos sean iguales.

- Programación de la interfaz “Presión”

El programa de presión despliega el valor de la presión dentro del criostato; debido a que la presión no es un parámetro que se pueda controlar, el programa sólo monitorea que la misma se encuentre bajo condiciones de operación normales y, en caso de que se produzca un evento inesperado, pueda proteger al detector. Además contiene un botón para encender y apagar la bomba y parámetros de interés para el usuario como, por ejemplo, la velocidad de rotación de la bomba.

Las librerías en LabVIEW® son conocidas a menudo como *toolkits*, éstas se encargan de establecer una interfaz entre el programador y el aparato con el que se desea comunicar de manera más eficiente. Debido a la popularidad que ha adquirido este software, diversas empresas han desarrollado *toolkits* como otra opción para la comunicación mediante puerto serial. Tanto la bomba como el crio refrigerador tienen integradas dichas librerías

Como se puede observar en la imagen siguiente *pfeiffer pump*, la marca comercial de la bomba, provee un VI para iniciar la comunicación con el aparato, en su interior podemos observar la programación de esta acción: para tener acceso al puerto serial se debe iniciar una sesión VISA, para después configurar las características de la comunicación con ayuda de un *Property Node*, de tal manera que concuerde el controlador de la bomba de vacío con la información de la computadora.

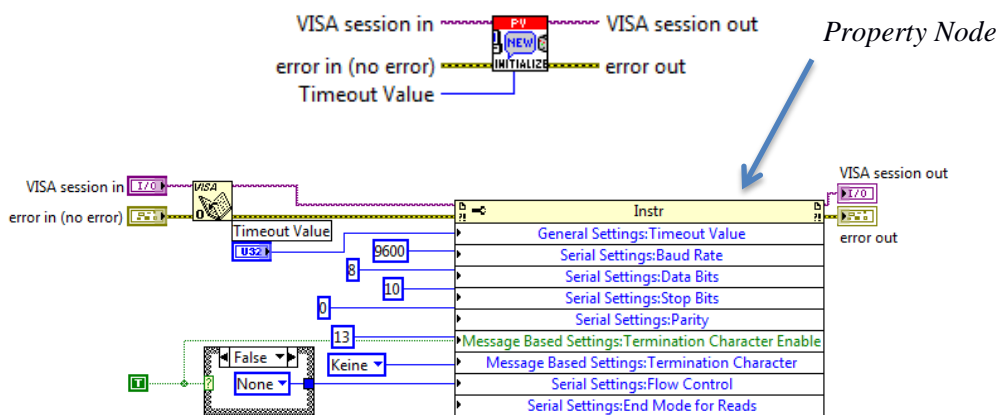


Figura 21: Programación comunicación Serial por VISA

Así queda establecida la manera en la que se realizará la comunicación entre los aparatos (velocidad, número de bits, etc.), lo cual se debe realizar a fin de que la comunicación sea ordenada y no se pierdan datos durante el proceso.

En resumen, los datos llegan mediante el VISA *session in*, se ordenan dentro de la librería, y salen por VISA *session out* ordenadamente, para así ser procesados dentro el programa como sea requerido.

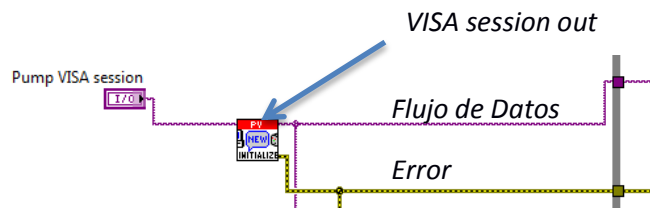


Figura 22: Flujo de comunicación

Debido a que no hay necesidad de estar configurando éstos parámetros continuamente, esta parte es la única que se deja fuera del ciclo *while*, todo lo que se programa a continuación se ejecuta dentro del ciclo para, de esta manera, hacer una lectura de datos continua.

Este programa despliega el valor de la presión (en mbar), el estado en que se encuentra el sensor (desconectado, fuera de rango, algún error no identificado, etc.), y una gráfica que genera la curva de la presión del agua (en un rango de temperatura de 100 a 300 K) junto con un punto que representa las condiciones actuales de presión y temperatura.

Para lograr lo antes indicado, se utilizó en el caso de la lectura de la presión y el estado del sensor, se utilizó las librerías de la bomba.

Éstas consisten básicamente en un VI llamado *core*, donde la información se procesa mediante una secuencia de pasos que entra en una estructura *stacked sequence* que funciona de la siguiente manera: primero verifica si debe leer o escribir el comando que se le manda (W/R en verde en la imagen), después pasa la información a la siguiente etapa de la secuencia, donde manda la información de cuantos bytes va a leer (por medio de un nodo de propiedad) para después escribir el comando enviado previamente, este comando es procesado por el controlador de la bomba para después regresar otro comando que será leído por LabVIEW® en la siguiente etapa de la estructura

de secuencia y se realiza un proceso interno por medio de compuertas lógicas para verificar que la información ha sido enviada y recibida adecuadamente.

Finalmente, se obtiene la información solicitada en formato *string* que se cambia a valor numérico para su despliegue.

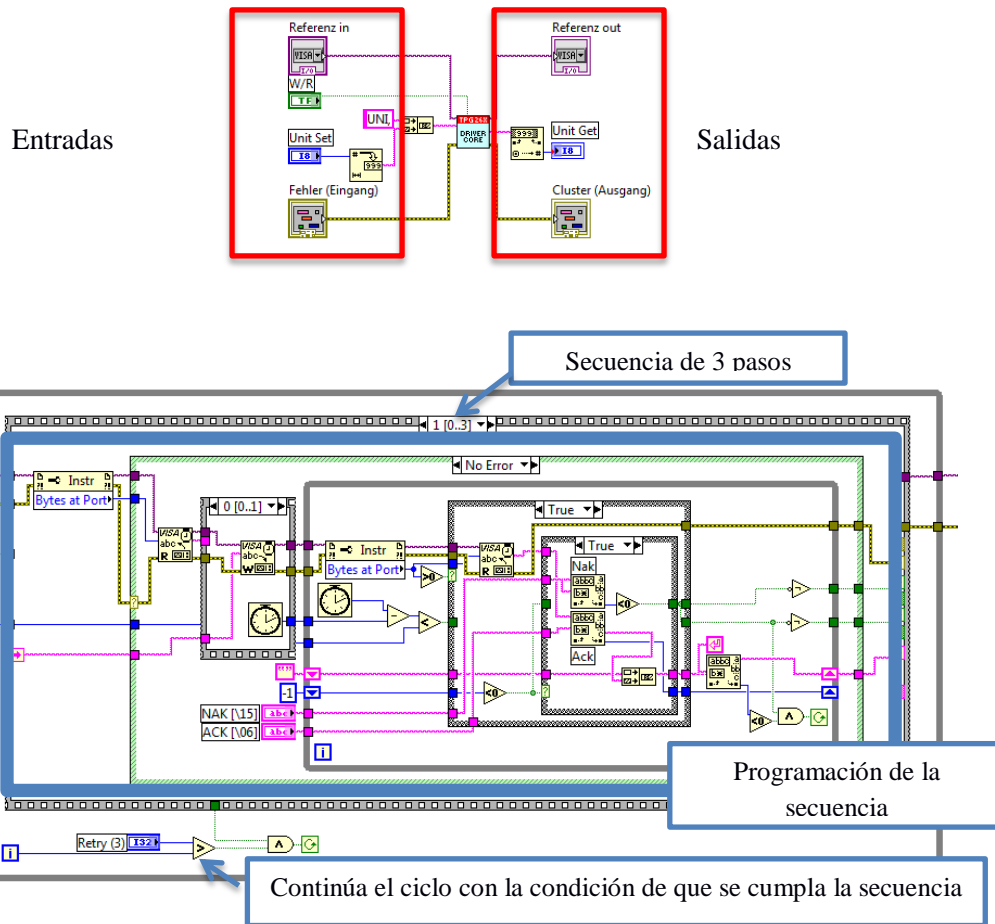


Figura 23: Lectura de comandos mediante LabVIEW®

Para obtener la lectura de la presión se configura el VI anterior (*core*) de la siguiente manera: se conecta la información proveniente de VISA, se selecciona el sensor que se leerá junto con el comando que leerá la bomba, en este caso será PR 1 (PR es el comando para la lectura de la presión) el cual debe convertirse en un formato *string* para que pueda leerse adecuadamente.

Las salidas serán la información configurada de VISA, el valor de la presión y el status del sensor (esta información es obtenida en una cadena de tipo *string* que es separada con la función *match pattern*, para su visualización por separado)

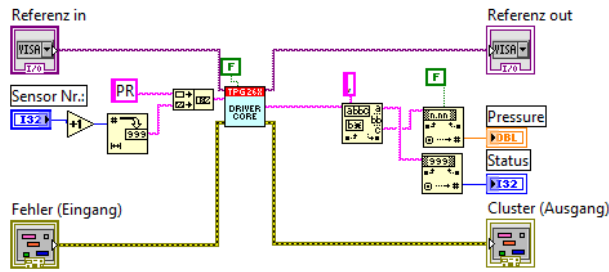


Figura 24: Entradas y salidas de comandos para bomba de presión

El comando enviado para la lectura de las unidades es “UNI” de manera que devuelve las unidades en las que se está desplegando el valor de presión, en este caso se utiliza de manera constante la unidad de presión mbar/bar, a petición del usuario.

La gráfica que se despliega es la de la presión del agua en función de la temperatura, ésta gráfica servirá de referencia para marcar un límite, punto a punto, en las condiciones de temperatura y presión dentro del criostato. Se toma la gráfica del agua ya que el aire está compuesto, en proporciones que pueden variar ligeramente, por nitrógeno (78%), oxígeno (21%), ozono, dióxido de carbono, hidrógeno y gases nobles, como kriptón y argón (1%), a temperatura de bulbo seco pero tomando en cuenta la humedad del ambiente, la composición de estos cambia, ya que el vapor del aire puede llegar a representar hasta un 5% del total del aire. Cuando el aire se encuentra a niveles tan bajos de presión y temperatura como lo es en el criostato, se corre el peligro de formar hielo en la superficie de los sensores, si la presión es elevada súbitamente.

En base a dos herramientas se decidió, junto con el usuario, que se generaría la gráfica para establecer el límite de las condiciones seguras del experimento, estas herramientas fueron: i) la ecuación de Antoine que se deriva de la relación de Clausius-Clapeyron y relaciona la presión con la temperatura añadiendo unos factores experimentales que dependen del fluido con el que se trabaje, y ésta ecuación cambia ligeramente dependiendo los rangos de temperatura; ii) la publicación llamada *Basics and applications of cryopumps* (Karlsruhe, 2007) en ella se habla acerca del proceso del crio bombeo y las características principales de los fenómenos que se observan en estas condiciones. A continuación se muestra la gráfica publicada acerca del comportamiento de diferentes gases (entre ellos el vapor de agua) a temperaturas criogénicas.

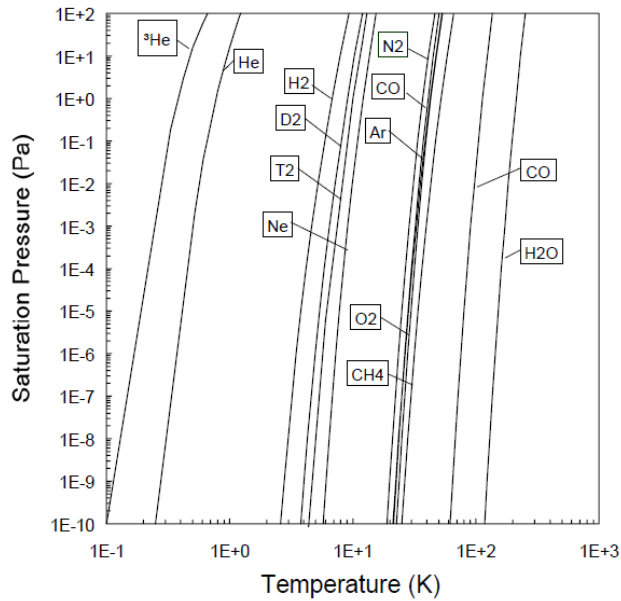


Fig. 1: Saturation curves of common gases

Figura 25: Curva de saturación de gases más comunes

En base a estas dos herramientas, se generó la gráfica de este programa.

La ecuación de Antoine usada es la siguiente:

$$P(t) = 50e^{\left(28.9074 - \frac{6143.7}{t}\right)} * 0.01 \quad (2)$$

El factor de 50 se obtuvo de manera experimental en el laboratorio llevando al sistema a su máximo nivel hasta ahora operado que es con una presión de 5.8×10^{-8} mbar y una temperatura de 129 k, donde se comprobó que continuaba tomando datos sin ningún problema y además esta gráfica se asemejaba con la presentada por F. Karlsruhe. Finalmente el 0.01 es para convertir de pascales a mbar.

La ecuación es graficada en LabVIEW® y en base a la gráfica resultante se toman las decisiones que dicen establecen si el sistema se encuentra en un rango seguro o no. Esto se programó de la siguiente manera:

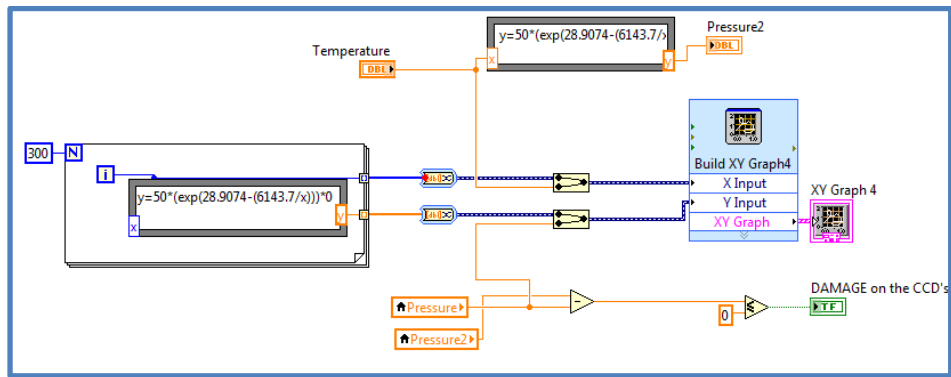


Figura 26: Programación de la gráfica del agua

Con ayuda de un FOR se grafica la fórmula donde la iteración i es igual al incremento de temperatura en un grado, empieza en cero y va incrementando de un grado en un grado hasta llegar a 300 K, por lo que la temperatura de 0 a 300 K pero para su despliegue se truncan los valores de 0 a 100 K. A continuación se grafica el punto donde se encuentran localizadas los parámetros leídos, estos dos valores se insertan a una gráfica de tipo XY, para lograrlo se utilizó la función *convert to dynamic data* y la función *merge signals*. De esta manera se grafican X y Y de manera separada y luego se unen en la entrada de la función gráfica para su lectura.

Finalmente, se decide si dicho punto ya cruzó la línea de la presión con ayuda de un operador lógico y una resta que decide si la presión ha sido superada. Si la resta es negativa o igual a cero es porque ya se cruzó el límite, de otra manera no ha sucedido.

En cuanto a la toma de decisiones para saber si se rebasó el límite para tomar acciones, se utilizó un conjunto de operadores lógicos y funciones de tipo *cases* donde si la presión es mayor que 1.8×10^{-8} mbar y la temperatura se encuentra arriba de los 250 K se procederá a apagar la bomba. Este es el caso en que se apagó el crio por alguna falla en la red eléctrica u otra razón y la bomba continúa encendida (ya que irá conectada al UPS).

El indicador “punto crítico” se enciende cuando los valores se encuentran muy cerca de la curva (a un 10% de pasarla) por lo que se procederá a emitir un reporte para que el usuario sepa que se corre el riesgo de que algo no esté funcionando adecuadamente.

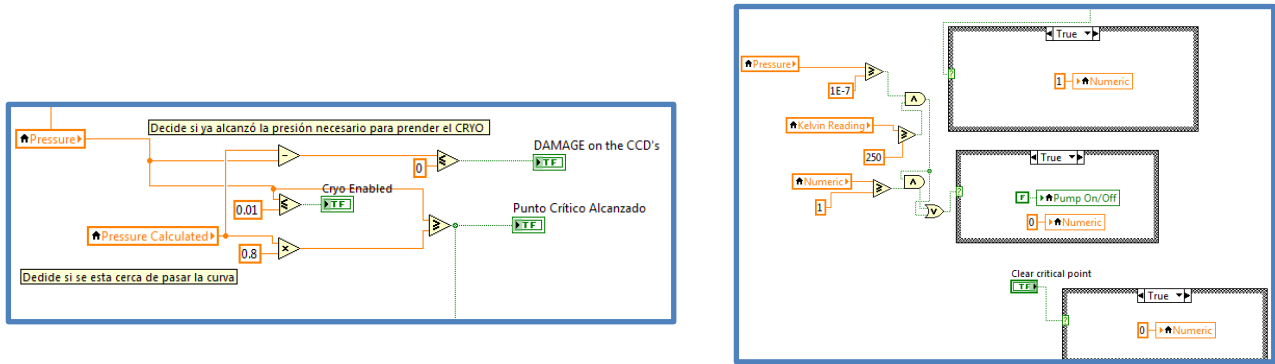


Figura 27: Toma de decisiones

Para encender o apagar la bomba se utiliza un *event structure*. Cuando el valor del botón cambia, pregunta si el valor del mismo es positivo (o sea que el botón ha sido encendido) y si es así, procede a encender la estación de bombeo, en caso contrario, la mantiene apagada.

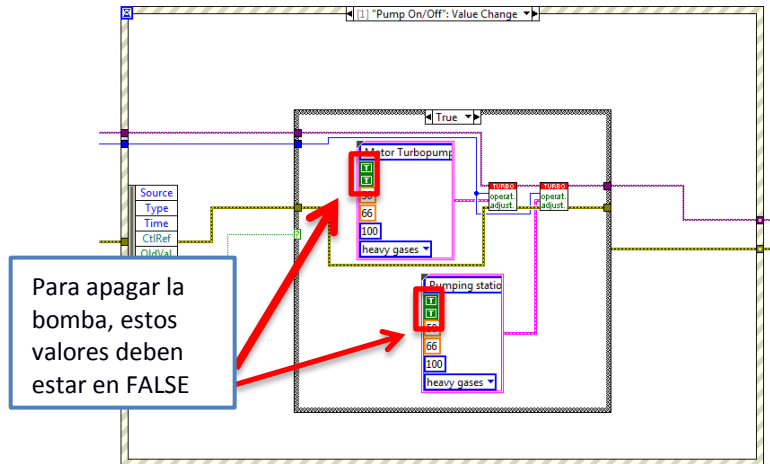


Figura 28: Encendido de la bomba

Para desplegar el valor de los parámetros de la bomba se manda a llamar la librería *PV general information*, la que una vez configurada, permite obtener información de hasta 21 parámetros para conocer el estado de funcionamiento de la bomba.

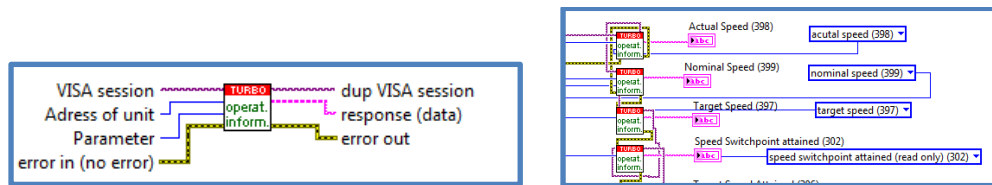



Figura 29: Información general de la bomba

Cuando el usuario finaliza la ejecución del programa presiona el botón STOP que finaliza el ciclo *while*, después se cierra la conexión con los puertos para su posterior uso.

- Programación de la interfaz “Temperatura”

El programa de temperatura despliega la temperatura del criostato en kelvin, botón para el calentador, botón para el criostato, información para establecer la temperatura deseada y las alarmas. El controlador de temperatura también posee librerías para su interface con LabVIEW® que funcionan de manera similar al de la presión, enviándole una serie de comandos al controlador con la información que es requerida.

Primero se inicia la comunicación serial mediante la correspondiente librería (), y se establecen los parámetros de la comunicación; este programa también contiene estructuras de tipo *while*, donde se llevan a cabo todos los procesos. Una vez que ya se realizó la configuración de parámetros se procede a programar todas las acciones que no irán dentro del ciclo *while* (las que no necesitan ejecutarse continuamente).

A diferencia del programa para la presión, en este caso se grafica la temperatura en función del tiempo (la hora en la que empieza a funcionar el programa); para lograrlo se colocaron las siguientes estructuras que permiten que esto suceda:

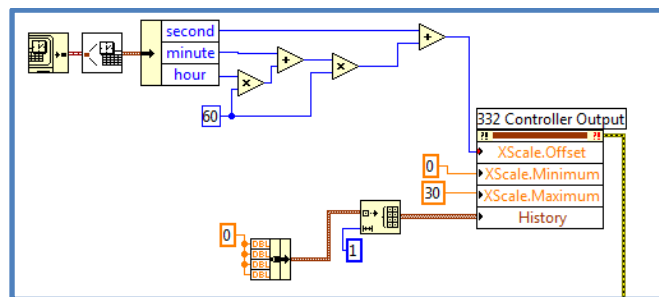




Figura 30: Programación de tiempo en gráfica

En el diagrama anterior con la función *get time and date*  se despliega la fecha y la hora con el formato HH:MM:SS.SSS dd/mm/yyyy, dentro del vi se separan los segundos, minutos y hora para su lectura, con la función *seconds to date/time*  después se selecciona que sólo se ocuparan los segundos, minutos y horas con ayuda del comando *unbundle my name*. Finalmente, estos se suman

y se agregan a la propiedad de nodo de la gráfica llamado *XScale.Offset* la cual graficará el tiempo a partir del instante en que se ha arranque el programa. Para controlar el intervalo de graficación de la temperatura se agrega 3 propiedades más de nodo, *XScale.Minimum* y *XScale.Maximum* que controlarán el intervalo de graficación de la temperatura.

La propiedad *History* le permitirá al usuario visualizar como ha cambiado la temperatura desde el inicio de los tiempos (o sea, desde que se empieza a correr el programa).

Posteriormente, se establecen todos los parámetros de inicio (acceso remoto, tipo de sensor, tipo de control) para tener una referencia de inicio.

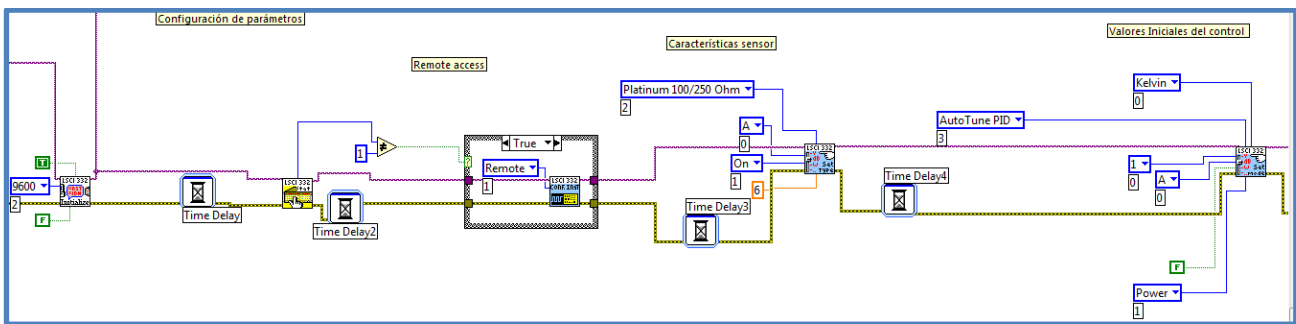



Figura 31: Establecimiento de parámetros para controlador de temperatura

Uno de los requerimientos de este sistema es que el botón del relevador se mantenga deshabilitado hasta que se encuentre en un valor determinado de presión; para lograrlo se les asigna un valor fuera del ciclo a algunos los parámetros y, de esta manera, se deshabilita el botón hasta que tenga la lectura de la presión del criostato. Es por esta razón que se le asigna un valor, igual a cero al crio refrigerador (es decir, se pone el indicador del crio como apagado), el relevador se mantiene en *false* (que es igual a mantenerlo en cero) y el botón del crio refrigerador se deshabilita.

Para activar el relevador, al entrar a la estructura *while* el programa lee el valor de la presión de manera que cambia el valor del indicador *Cryo Released* a verdadero si el valor de la presión es menor que 0.01 mbar, asegurando así que el usuario prenda el crio refrigerador sólo cuando la presión sea la adecuada.

Para cuidar que el refrigerador no sea prendido/apagado constantemente se bloquea el botón del crio cuando esto ha sucedido dejando pasar un intervalo de 670 segundos para desbloquearlo.

La función *elapsed time*  es la encargada de controlar este tiempo ya que se activa el crio una vez que los 670 segundos han pasado, además si algunas de las alarmas se activa apagará el crio por lo que tampoco le permitirá al usuario encenderlo hasta que el tiempo haya transcurrido y las condiciones sean seguras para operar.

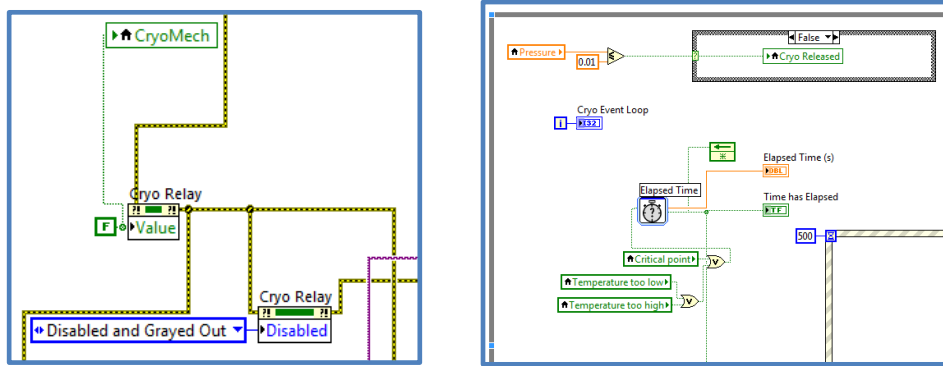


Figura 32: Programación del interlock

Una vez que las acciones anteriores hayan mandado la señal de que se puede activar el relevador, se manda esta señal a una estructura de evento, lo que hace que se habilite el botón del relevador.

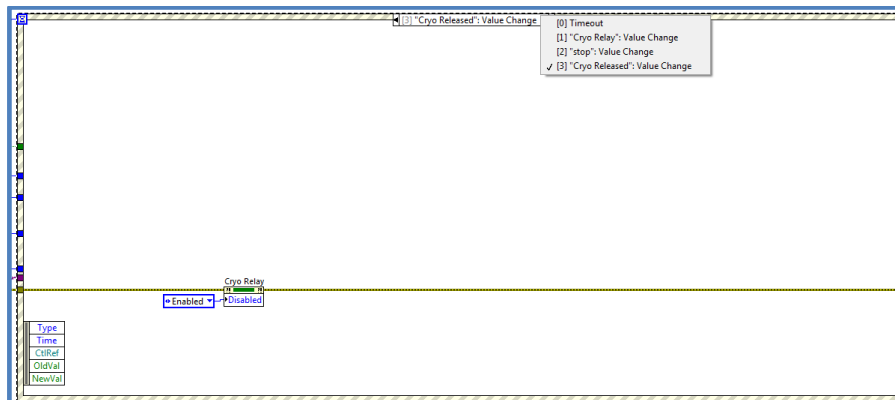


Figura 33: Liberación del botón interlock para encendido de bomba

Para encender el crio refrigerador, el programa está leyendo continuamente el valor del relevador (0= apagado, 1= prendido) y cuando éste cambia, primero lee el valor del botón, si es verdadero y el valor del tiempo *elapsed time* también lo es, entonces configura el relevador para encender el crio refrigerador.

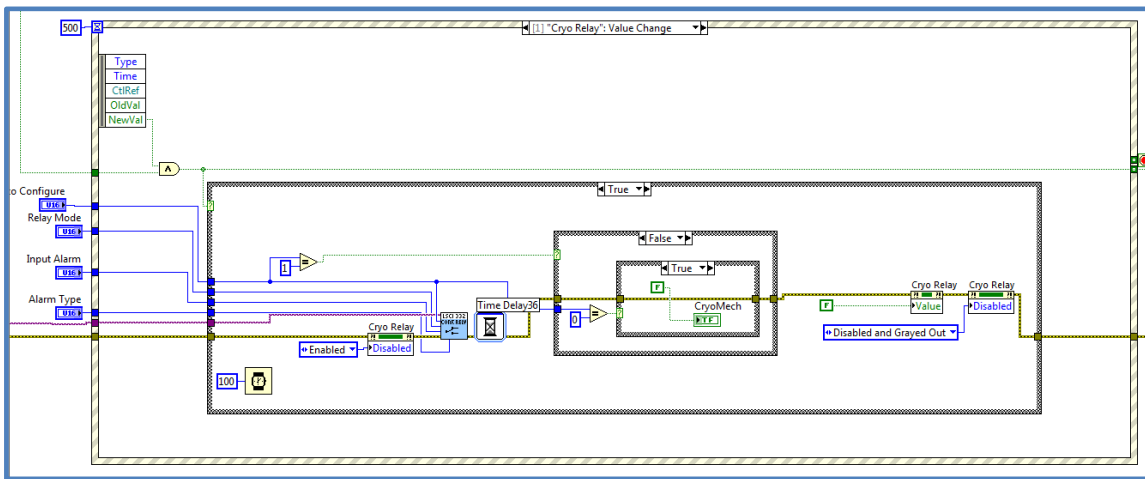


Figura 34: Programación del relevador del crio refrigerador

Posteriormente, el botón se deshabilita y el tiempo empieza a correr. Una vez que transcurrieron 15 minutos, el botón se habilita nuevamente.

Se creó otra estructura *while*, dentro de la cual hay una estructura de tipo evento, al igual que en el caso anterior, pero en este *case* se controlan los siguientes parámetros: las alarmas, el calentador, el tipo de control, el punto de referencia y el reseteo de las alarmas.

La programación de cada uno se explica a continuación:

1.- Alarmas

La programación de esta parte se divide en la alarma que se activa cuando la temperatura esta fuera de rango, otra notificación se activa cuando la temperatura es muy alta o muy baja, y finalmente cuando el punto crítico fue alcanzado y se protege contra daños al sensor.

Para decidir si la temperatura se encuentra fuera de rango se hizo una comparación entre el *setpoint* y la temperatura en el canal A (el usuario debe tener en cuenta que el sistema de alarmas esta hecho para funcionar con el canal A), cuando el *setpoint* está por arriba o por debajo de 1.2 grados se activará un indicador que le haga saber al usuario la situación, además de que generará un reporte con la información detallada de presión, temperatura y hora.

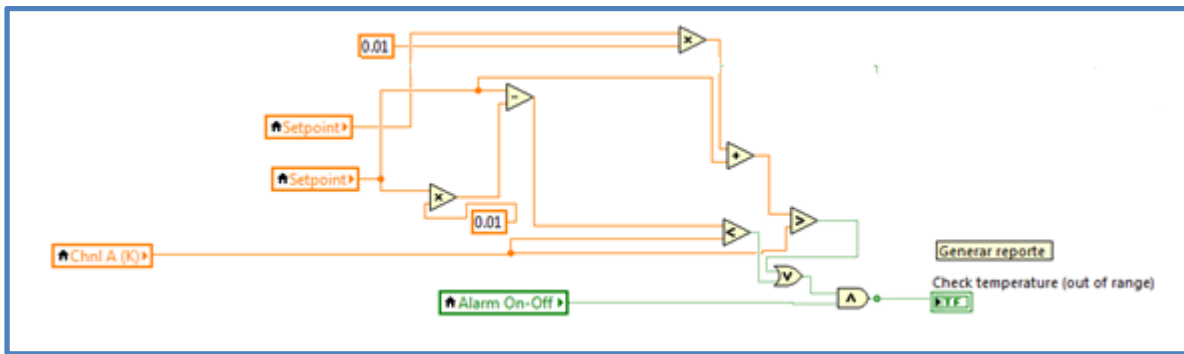


Figura 35: Programación Alarmas

Este reporte se genera con ayuda del explorador predeterminado que tenga el usuario, creando un archivo HTML, después escriben los datos del reporte para, finalmente, guardarlos en un archivo de nombre reporte.html, en la carpeta temporal del explorador. El reporte se abrirá automáticamente para que, en caso de que el usuario no se encuentre, pueda visualizarlo después. Se lleva un conteo del numero de reportes que se han generado, de modo que, si ya se generó uno, no se continúen generando otros reportes, puesto que, como se encuentra dentro de un ciclo *while* (para leer continuamente), si no se tiene control cuando se genera, el evento creará un reporte por cada vuelta.

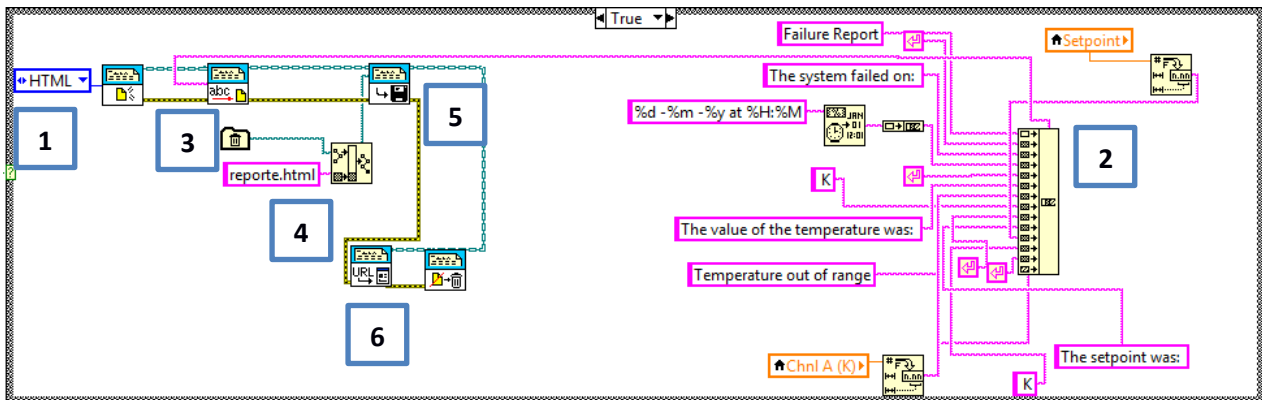


Figura 36: Generación de reporte de fallas

Para notificar que la temperatura es muy alta o muy baja (conforme a los límites fijados) se emplea un circuito lógico para la toma de decisiones.

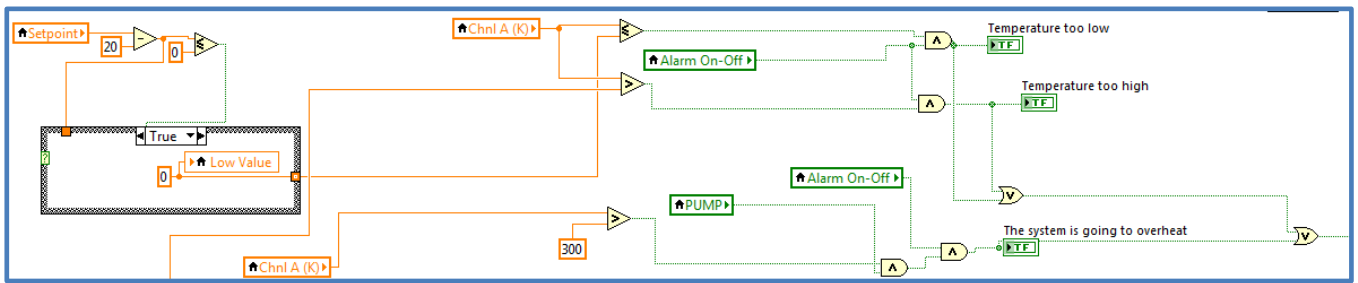


Figura 37: Programación de la lógica de Notificaciones

El punto más bajo establecido es 20 grados menos que el valor del *setpoint*, en la primera parte se cuida que, si por alguna razón, se lee un valor negativo de temperatura, este sea truncado a cero, estableciéndolo como nivel más bajo. Este se compara con el canal A y si está activada la opción del control del crio refrigerador con la alarma, entonces encenderá un indicador diciendo que la temperatura fue muy baja.

En cuanto al punto dónde se tiene el nivel más alto de temperatura el usuario será el responsable de establecer esta opción, se compara con la temperatura del canal A y de la misma manera decide si procede el indicador adecuado.

Si la temperatura se encuentra por arriba de los 250 K con la bomba encendida, se indicará que existe una posibilidad de que el sistema se sobrecaliente, ya que en condiciones de vacío no habrá manera de disipar el calor de la electrónica al exterior, por lo que procederá a apagar la bomba.

Las acciones a ejecutarse en cualquiera de los 3 casos antes mencionados se harán con ayuda de una estructura de caso y una estructura por secuencias, esto nos permitirá primero tomar acción y después reportar lo sucedido.

Cuando se genera un evento el programa despliega un mensaje haciendo saber al usuario que apagará el crio refrigerador debido la situación que ha sucedido, se apaga el crio, se genera el reporte y se guarda en un archivo de texto. Posteriormente, por correo electrónico se envía al usuario la notificación de que el sistema tuvo una falla y se tomaron las acciones necesarias.

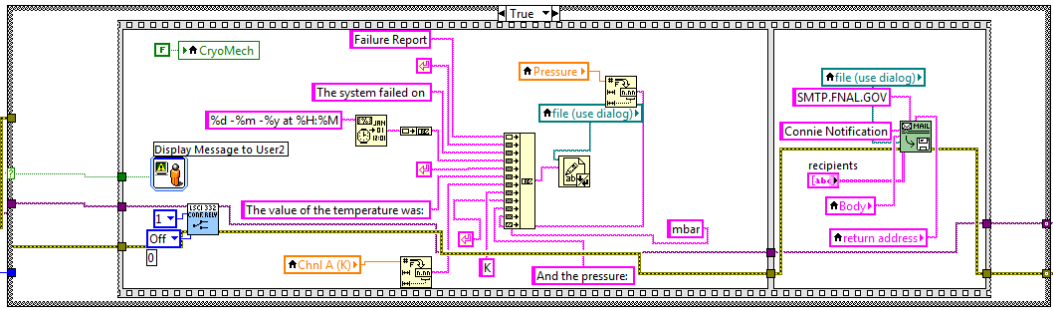


Figura 38: Programación del envío de notificaciones por correo

En caso de que el sistema se sobrecaliente también apagará el crio refrigerador (ya que evidentemente no está funcionando correctamente) y apagará la bomba de vacío, reportándole al usuario de la misma manera por correo electrónico.

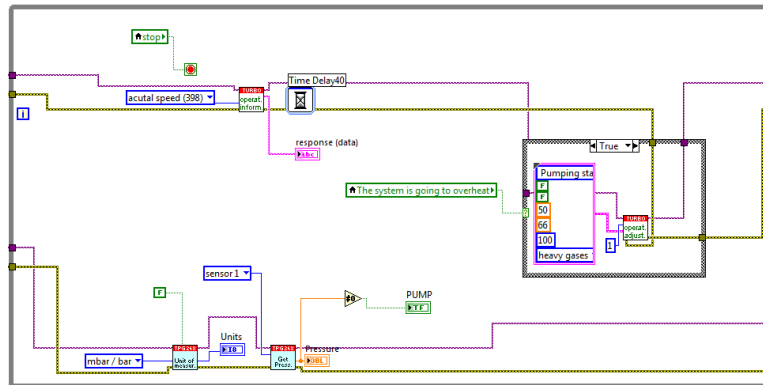


Figura 39: Programación del apagado de bomba en caso de emergencia

Cuando se llegue al punto crítico el programa generará un reporte para informarle al usuario vía correo electrónico y así pueda decidir las acciones que se deberán tomar.

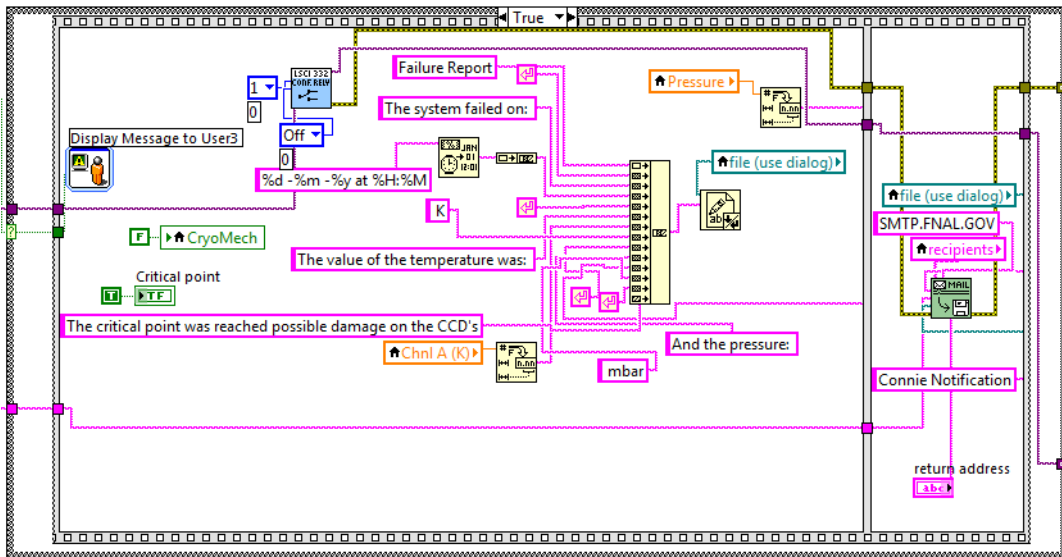


Figura 40: Notificación al correo electrónico

2.- El calentador y tipo de control.

Para establecer la potencia del calentador se emplea un *structure case* donde, con ayuda del manual del controlador de temperatura, se localizó el comando adecuado para introducir el valor. El comando es RANGE, se escribe junto con el valor de la potencia deseada con ayuda de la función *Format Value* y posteriormente se le da formato de string para ser escrito por VISA en el controlador.

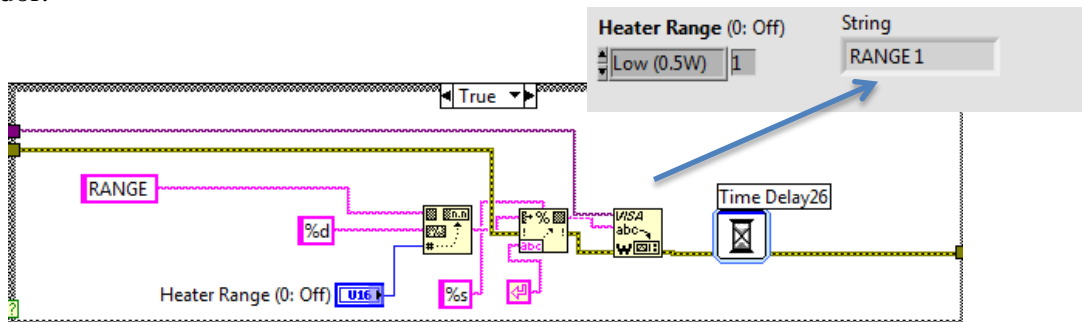


Figura 41: Configuración del Calentador

Para el establecer el tipo de control se utilizó la librería del controlador de temperatura que se basa en enviar el comando a VISA de manera similar al controlador, leyendo los parámetros necesarios para su operación.

3.- Punto de referencia

Para establecer el punto de referencia se realizaron algunos cambios para mejorar la configuración del mismo. Se tenía de manera permanente el tipo de control como *autotuning PID* y el rango del calentador en alto por lo que, si el usuario decidía cambiar esto en la parte del control no se lograría y se configuraría siempre de esta manera cuando se estableciera el punto de referencia. Se cambió por una variable local de los 2 parámetros de ésta manera, el usuario tendrá la certeza de que siempre se establecerán los valores como se deseen.

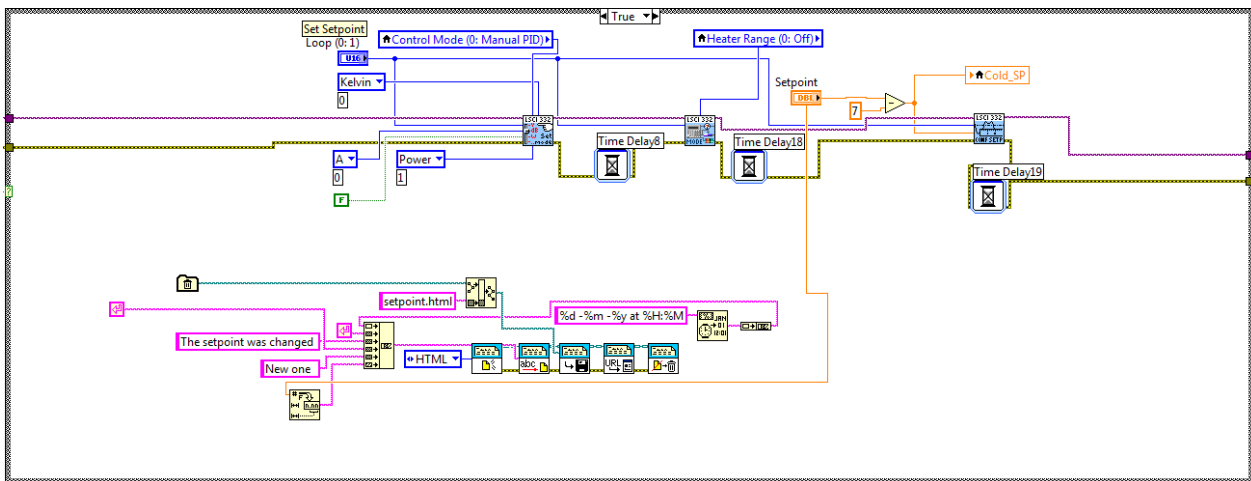


Figura 42: Punto de referencia

Se agregó también una notificación mediante un texto en HTML que le hace saber al usuario que el valor de referencia fue cambiado, la hora y el día. De esta manera, si existen cambios puede saber que fueron hechos intencionalmente por otro operador.

4.- Reseteo de alarmas

Por último, se tiene que para el reseteo de las alarmas se cargan todos los indicadores de las alarmas con ceros, así como también el valor de la alarma misma, así cuando se lea que el valor cambia, todo quede reestablecido.

La información leída entra a otra estructura *while* dónde se grafica la temperatura del criostato, se puede seleccionar el canal que se desea observar (canal A o B) y de esta manera la información se muestra más claramente.

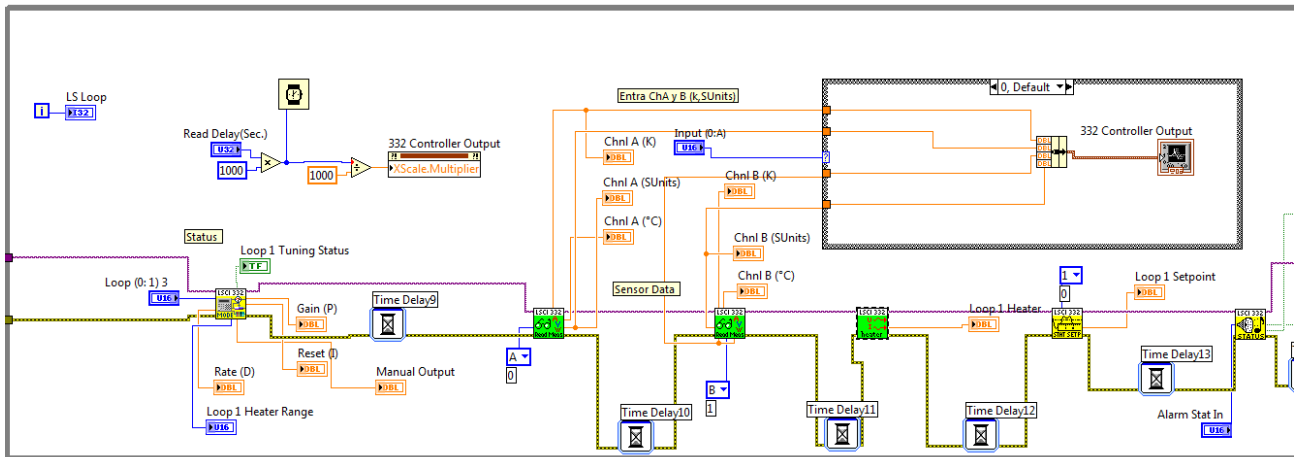


Figura 43: Generación de gráfica de temperatura

5.2 Comunicación TCP/IP con LabVIEW®

TCP/IP es un protocolo de internet (*Internet Protocol*), cuyo nombre se refiere al control de transmisión de datos (*Transmission Control Protocol*). El envío de datos desde un lugar a otro se realiza en una subdivisión de ellos en paquetes, cada uno de los cuales puede tomar diferentes rutas a través de la red para llegar a su destino. Así, puede ocurrir que estos paquetes lleguen en instantes diferentes, fuera de orden, o que no todos lleguen a su destino; sin embargo, TCP/IP soluciona estos problemas reordenando los paquetes o solicitando un reenvío de los datos en caso de pérdida de información, lo que le da confiabilidad y estabilidad a la comunicación.

La comunicación TCP/IP permite al usuario controlar algunos parámetros de manera remota mediante otra computadora cuando no sea posible estar presente en el lugar dónde se tiene la estación. Existen diversas razones por las que una comunicación remota es de vital importancia para los usuarios de CONNIE, una de ellas es el ruido generado por la válvula del crio refrigerador, lo que hace difícil la estancia por mucho tiempo en el lugar.

Otra de las razones son las colaboraciones que actualmente se encuentran trabajando con CONNIE desde otros países, por lo que tener una comunicación remota es de vital importancia.

Las opciones que nos brinda LabVIEW® para su comunicación es mediante los bloques TCP que se encuentran en *data communication >> protocols >> TCP* como se puede observar en el siguiente diagrama a continuación, se utiliza el bloque TCP Listen, éste escucha en la red a otras

computadoras que intentan conectarse al puerto especificado, que no debe estar siendo usado por otra aplicación del sistema.

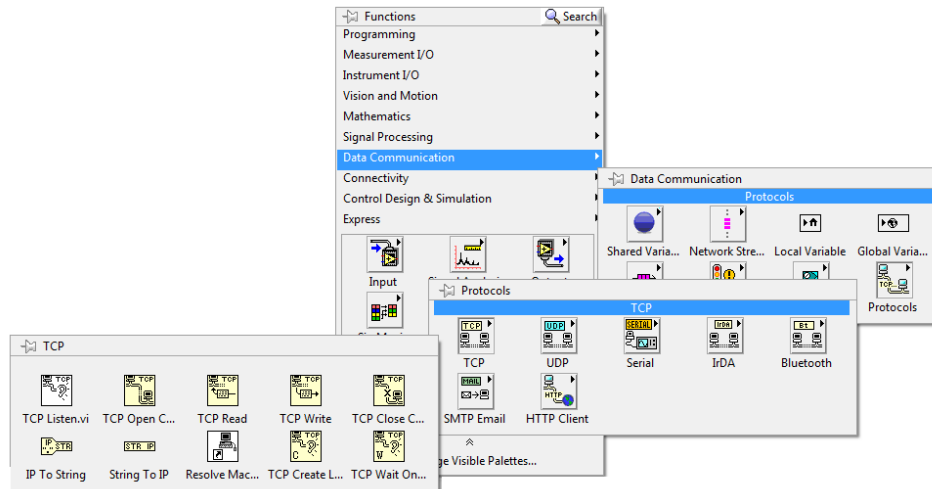


Figura 44: Comunicación TCP/IP en LabVIEW®

Cuando TCP/IP Listen detecta a otra computadora intentando conectarse al puerto establecido, crea una connection ID y un Error Signal en sus salidas, las cuales son usadas después por los otros bloques. Una vez que la connection ID está disponible el programa está en condiciones de enviar y recibir datos a través de la red, dando una conexión confiable entre las dos computadoras involucrados.

- Temperatura

Para el programa temperatura se establece el puerto 2055 para realizar la comunicación. Una vez que se encuentra conectado, lee los bytes que fueron enviados (está establecido que son 3 bytes los que leerá) y dependiendo de la palabra que escriba el usuario se procederá a tomar la acción necesaria.

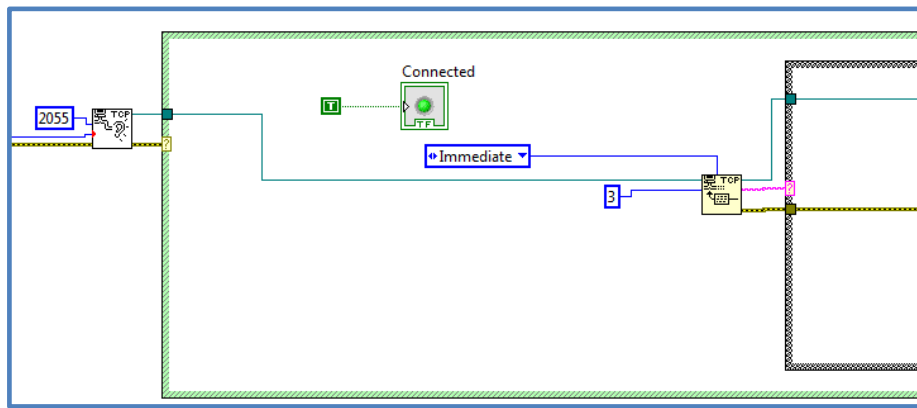


Figura 45: Comando escuchar en LabVIEW®

Si el usuario escribe “ala” entonces se configurará las alarmas como se explicó anteriormente para luego hacerle saber el estado de la configuración de las alarmas.

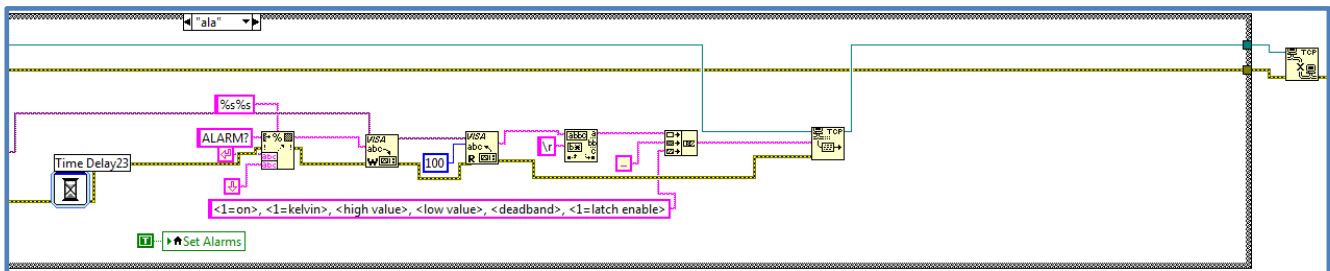
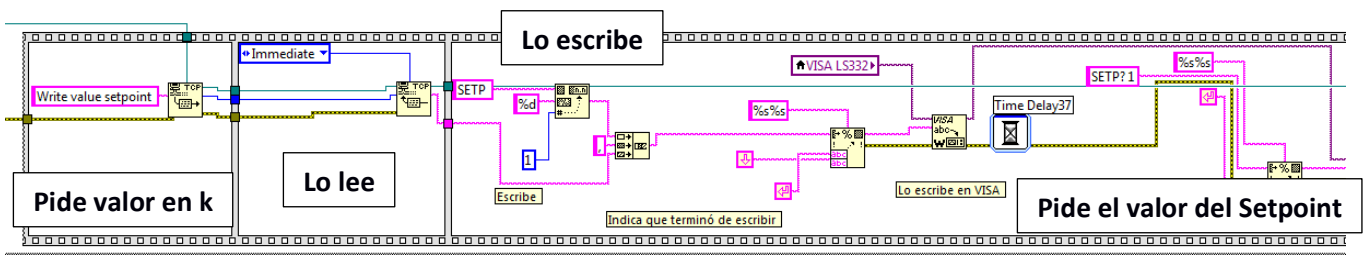


Figura 46: Configuración de alarmas en TCP/IP

Finalmente se cierra la conexión con TCP *close connection* y vuelve a esperar que se conecten al puesto establecido. Otro comando establecido es el comando “stp” que le servirá al usuario para establecer el punto de referencia. Una vez que el usuario escribe stp, se le pide que escriba el valor del *setpoint*, este valor es leído y escrito con ayuda de VISA para finalmente desplegarle al usuario el valor del *setpoint* que acaba de establecer.



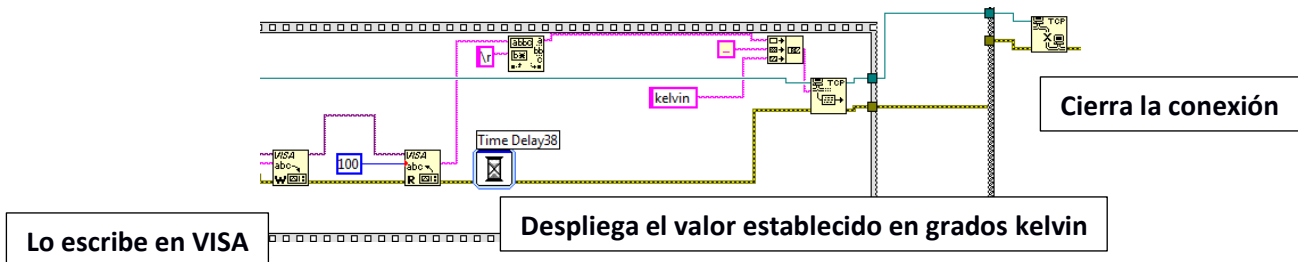


Figura 47: Punto de referencia en LabVIEW®

- Presión

El puerto establecido para los parámetros de la presión es el 2055. Los comandos de la misma manera son de 3 bytes y cuenta con un indicador que le hace saber al usuario que se ha conectado de manera exitosa. En el bloque que se muestra a continuación se tiene el comando “prs” que le indica al usuario la presión a la que se encuentra actualmente.

Se lee mediante el *toolkit* de la bomba y se le da formato con ayuda de la función *format string* escribiendo `%.3e`. Esto quiere decir lo siguiente “%” inicializa, “.” es la precisión, “3” es el número de dígitos significativos y finalmente “e” quiere decir que se trata de un número flotante.

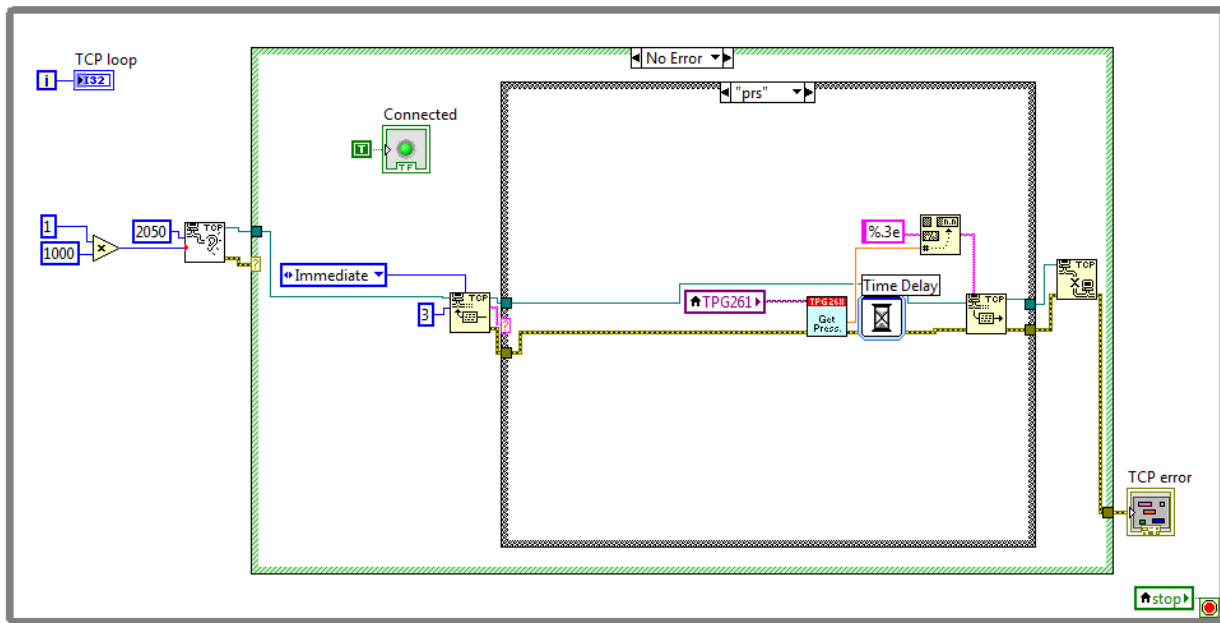


Figura 48: Lectura de Presión en TCP/IP

La lista de los comandos completos para la comunicación se desglosa al final de esta tesis en los resultados.

Capítulo 6

Pruebas y resultados

- **Temperatura**

Para el control de la temperatura se tiene el programa CONNIE-LS332-V2 que tiene como propósito controlar la temperatura en un ambiente seguro para los componentes involucrados. El inicio del programa se visualiza de esta manera dónde se pueden observar 2 diferentes partes, la conexión de puertos y los indicadores de conexión de la bomba y el crio refrigerador.

En cuanto a la selección de puertos los parámetros de comunicación están establecidos de la siguiente manera: Baud rate (9600), Data bits (8), stop bits (1), parity (none). El usuario puede revisar que estos parámetros coincidan con los de la computadora dónde se realizará la comunicación a través del administrador de dispositivos, en Windows se encuentra de la siguiente manera: Inicio -> Panel de control -> Sistemas y seguridad -> Sistema -> Administración de dispositivos.

En caso de que la bomba esté conectada se prenderá el foco desplegando la presión y de la misma manera, el crio refrigerador estará encendido cuando el usuario lo encienda a través del *relay*.

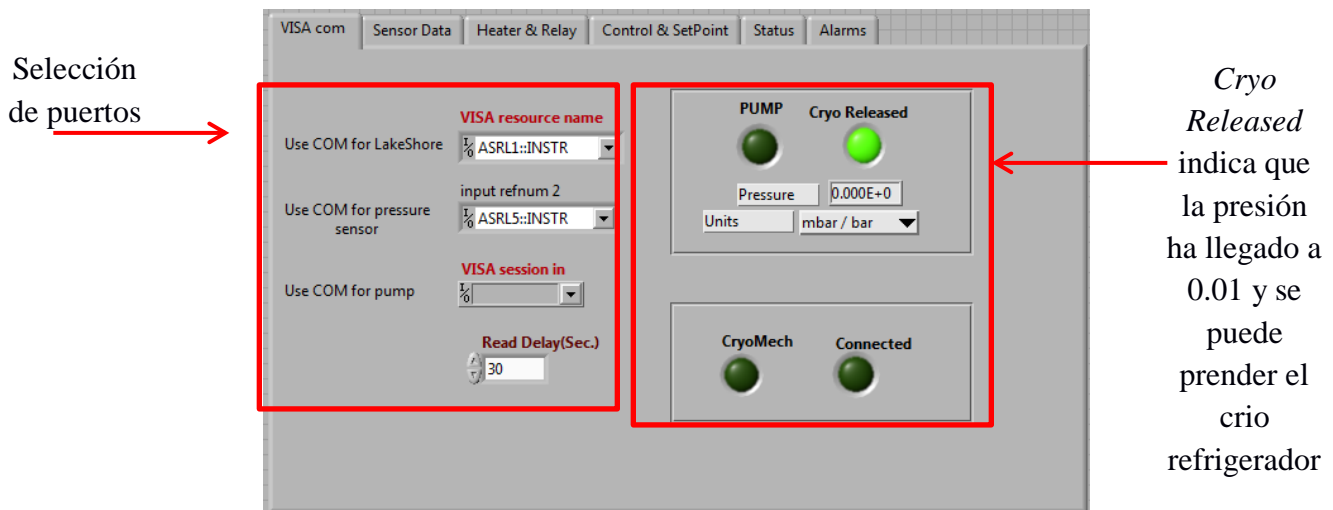


Figura49 Interfaz temperatura (Comunicacion VISA)

Para encender el crio refrigerador el usuario deberá seleccionar la pestaña *Heater & Relay*. En este apartado el usuario tomar en consideración 2 criterios: si la presión no es mayor a 0.01 mbar, entonces no podrá encender el crio refrigerador y por otro lado, si decide encender el crio refrigerador, entonces deberá esperar 15 minutos para poder apagarlo de nuevo; ambos factores se tienen pensados para cuidar de la seguridad de los componentes.

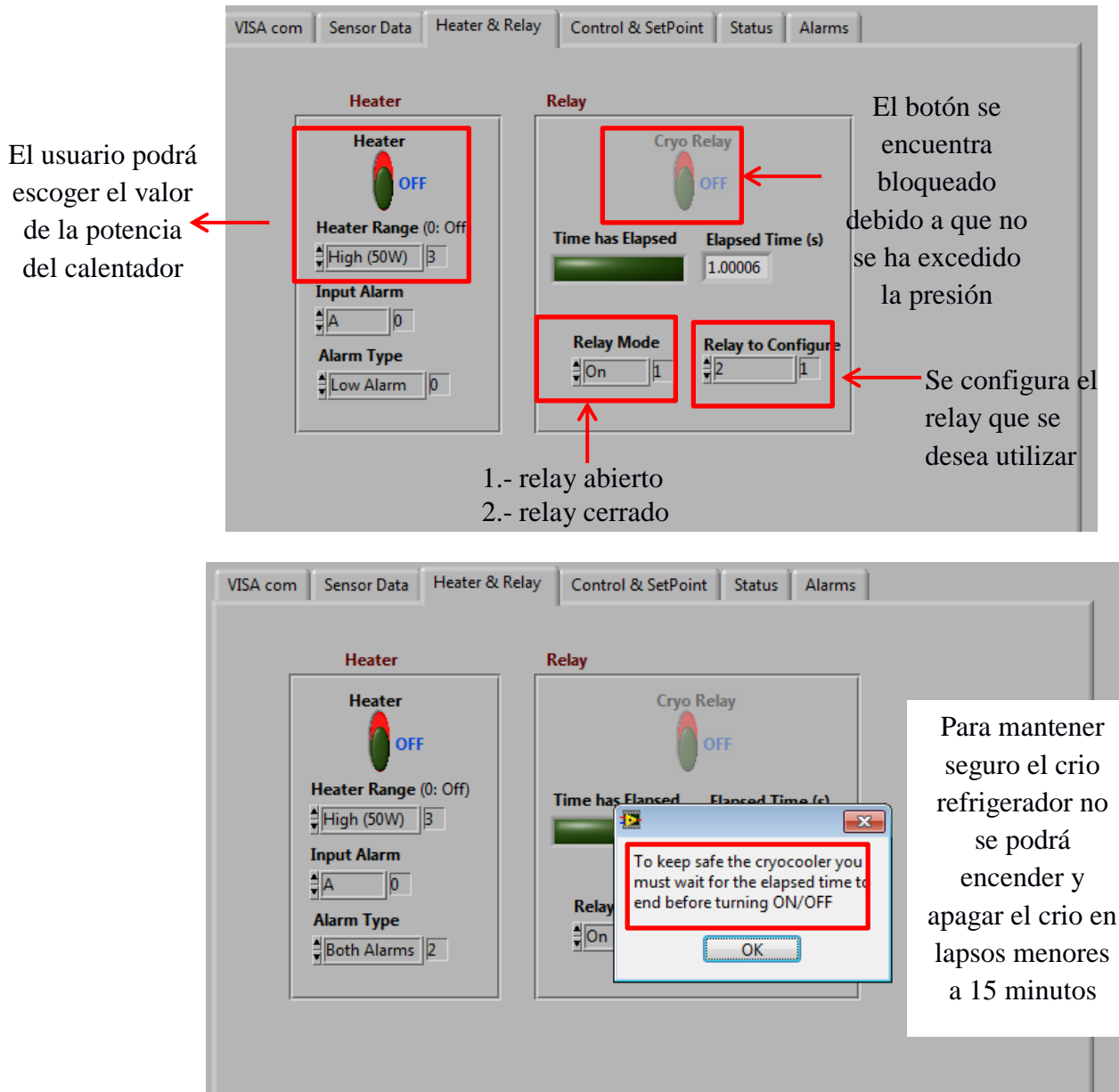


Figura 50 Interfaz Temperatura (Relevador y Calentador)

Para visualizar el valor de la temperatura se seleccionará la pestaña *sensor data*, en la cual el usuario podrá observar el valor de la temperatura en intervalos de 10 segundos a partir de la hora en la que se echó a andar el crio refrigerador. Se cuenta con entradas para 2 sensores, en cada una de las cuales se despliegan los valores del sensor en kelvin, celsius y unidades del sensor. El usuario tiene la opción de seleccionar que sensor desea visualizar en la gráfica (canal A, canal B o ambos).

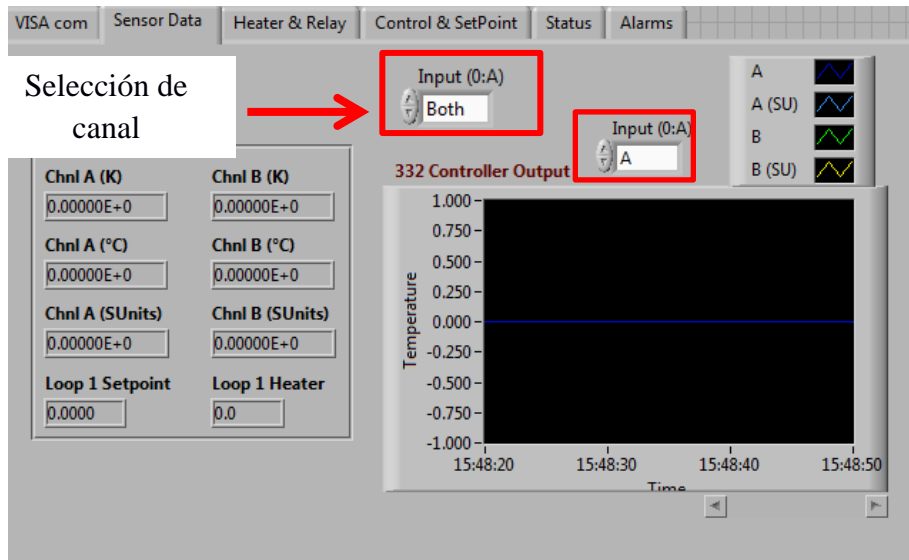


Figura51 Interfaz temperatura (Visualización de temperatura)

Para seleccionar el punto al que se quiere enfriar se selecciona la pestaña *control and setpoint*, donde fija la temperatura deseada y las unidades están fijas en kelvin. En esta misma pestaña el usuario configura el tipo de controlador a utilizar, puede elegir entre 6 diferentes tipos: *manual PID* (ingresando los valores de P, I, D), *Zone*, *Open Loop*, *AutoTune P*, *AutoTune PI*, *AutoTune PID*.

Los controladores PID son los que más se utilizan en la industria, su estructura se basa en tres acciones: proporcional (P), integral (I) y derivativa (D), a continuación se describe un poco acerca de cada uno de ellos.

- **Proporcional (P) acción de control proporcional:** da una salida del controlador que es proporcional al error, es decir:

$$u(t) = KP e(t) \quad (3)$$

Descrita desde su función transferencia es igual a:

$$C_p(s) = K_p \quad (4)$$

Donde K_p es una ganancia proporcional ajustable. Un controlador proporcional genera una acción de control correctivo proporcional al error, puede controlar cualquier planta estable, pero posee un desempeño limitado y error en régimen permanente (denominado off-set).

- **Integral (I) acción de control integral:** da una salida del controlador que es proporcional al error acumulado, es decir:

$$u(t) = k_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (5)$$

Lo que implica que es un modo de controlar más lento, descrita desde su función de transferencia queda:

$$c_i(s) = \frac{k_i}{s} \quad (6)$$

La señal de control $u(t)$ tiene un valor diferente de cero cuando la señal de error $e(t)$ es cero. Un controlador integral genera una corrección proporcional a la integral del error, por lo que se asegura que dada una referencia constante, o perturbaciones, el error en régimen permanente es cero.

- **PI acción de control proporcional-integral:** se define mediante la ecuación 7

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{k_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (7)$$

Por lo tanto la respuesta de un regulador PI será la suma de las respuestas debidas a un control proporcional P, que será instantánea a detección de la señal de error, y con un cierto retardo entrará en acción el control integral I, que será el encargado de anular totalmente la señal de error.

- **PD: acción de control proporcional-derivativa:** se define mediante la siguiente ecuación

$$u(t) = k_p e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

Donde T_d es una constante denominada tiempo derivativo. Esta acción tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque tiene la desventaja que amplifica las

señales de ruido y puede provocar saturación en el actuador. La acción de control derivativa nunca se utiliza por sí sola, debido a que solo es eficaz durante periodos transitorios.

La función transferencia de un controlador PD resulta como:

$$c_{PID}(s) = k_p + k_p T_d s \quad (9)$$

Este tipo de controlador permite una respuesta a la velocidad del cambio del error y produce una corrección significativa antes de que la magnitud del error se vuelva muy grande, aunque pierde precisión en la salida (durante el tiempo de funcionamiento del control derivativo).

El regulador derivativo no se emplea aisladamente, ya que para señales lentas, el error producido en la salida en régimen permanente sería muy grande y en caso de que la señal de mando deja de actuar durante un tiempo largo, la salida tendería a cero, con lo que no se realizaría ninguna acción de control.

- **PID acción de control proporcional-integral-derivativa:** esta acción combinada reúne las ventajas de cada una de las tres acciones de control individuales. La ecuación de un controlador con esta acción combinada se obtiene mediante:

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (10)$$

Su función de transferencia resulta de la siguiente manera:

$$c_{PID}(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (11)$$

El procedimiento de aplicar el método de auto ajuste (*autotuning*) consiste en el muestreo de la respuesta de un proceso a una determinada señal de entrada, después se procesan los datos muestreados para la estimación de los valores característicos del proceso para así finalmente realizar el cálculo de los valores óptimos de los parámetros de control PID.

Por lo que, en la programación, se le debe asignar un tiempo de espera, en lo que es sistema hace este muestreo de datos y el cálculo de los valores del controlador. La imagen siguiente muestra la interfaz que tiene el usuario para seleccionar el tipo de control que más se adecúe al sistema, en el caso de DAMIC y CONNIE se utiliza un control por *AutoTune PID*

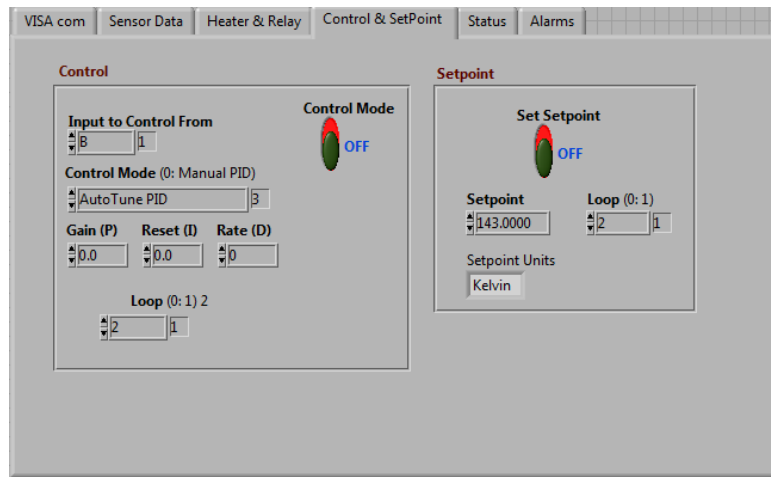


Figura52 Interfaz temperatura (Tipo de control)

Las diferencias entre *loop* 1 y 2 del control y el *setpoint* se ilustran en la tabla 1 mostrada a continuación.

Tabla 3: Comparación entre los lazos de control 1 y 2.

Característica	Lazo 1	Lazo 2
Salida de control	Salida calentador	Salida analógica
Máxima potencia de salida	50 W	10 W
Tipo de salida	Corriente	Voltaje
Múltiples rangos de salida	Si	No
Control PID de lazo cerrado	Si	Si
Autotune	Si	Si
Zone tuning	Si	Si
Aumento gradual	Si	Si
Control lazo abierto	Si	Si
Visualización en corriente o potencia	Si	No
Limite el setpoint	Si	Si
Detección de fallas	Si	No
Operación bipolar	No	Si

En cuanto a la activación de las alarmas el usuario tiene dos opciones de configuración:

- Activar un sensor en el Lake Shore que emita un sonido cuando la temperatura ha sido rebasada tanto por arriba como por abajo. En este caso, se debe de ir a la pestaña de *heater & relay*.

- Activar el relay en modo *alarms* y en *alarm type* seleccionando el tipo de alarma que se desea “alto, bajo o ambas”.

Nota: El programa carga los valores de las alarmas con la activación del *relay* por lo que se deben cargar antes de que el crio sea activado para su correcta activación.

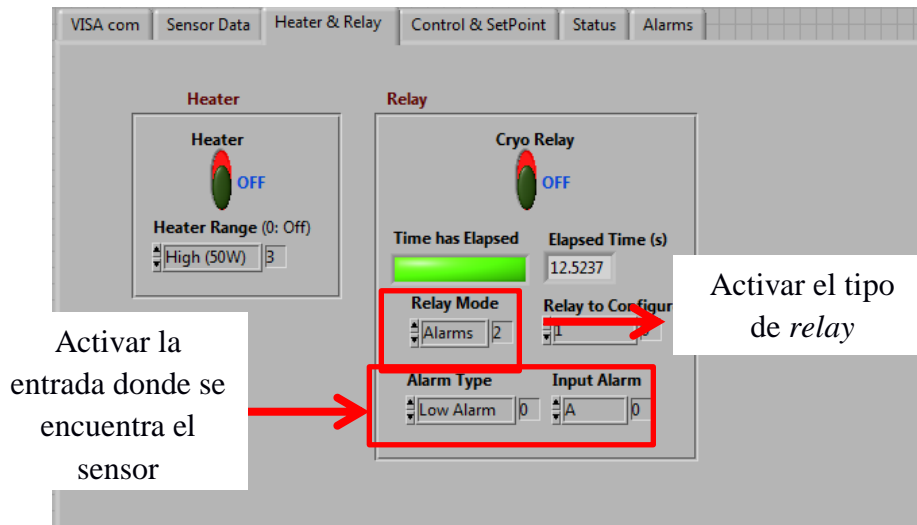
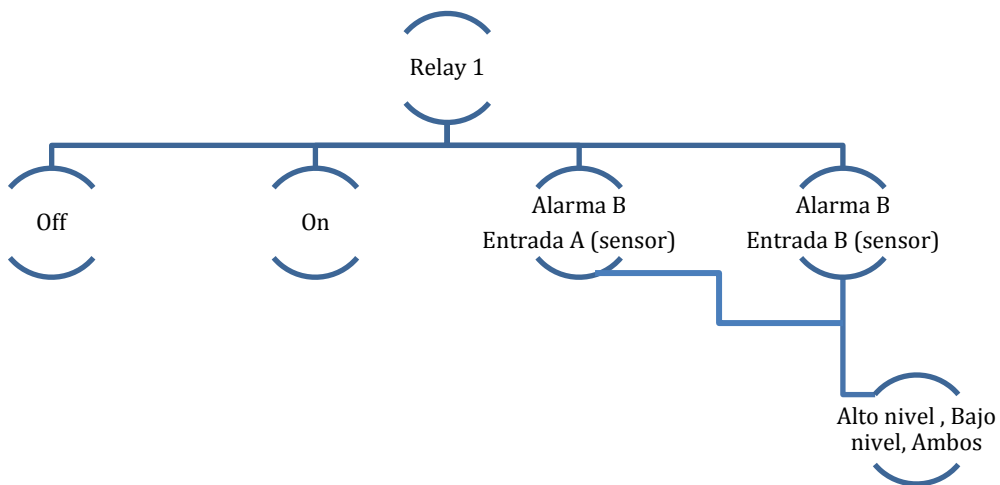


Figura53 Interfaz temperatura (Configuración relevador)

El *relay* quedará configurado de la siguiente manera:



El programa puede ser usado tanto en dos sistemas operativos, Windows y Linux, y debido a que la programación para cada uno de ellos varía ligeramente se explica a continuación la manera en la que se configuran las alarmas dependiendo el sistema en el que se instale el programa.

- Windows

Si se desea activar una alarma después de que se prendió el crio refrigerador o se quiere activar una notificación a correo electrónico se debe de ir a la pestaña de alarmas.

En este apartado se debe configurar lo siguiente:

- 1.- Crear un archivo .txt y selecciona su ubicación en la pestaña indicada.
- 2.- Escribir el correo al que se le hará llegar la notificación.
- 3.- Establecer la entrada a la cual se le establecerá la alarma (dejar unidades en kelvin), fijando el parámetro de alto, para este programa el valor más bajo se establece automáticamente (20 grados abajo del *setpoint*).
- 4.- Poner la alarma en ON.
- 5.- Presionar el botón *Set Alarms*.

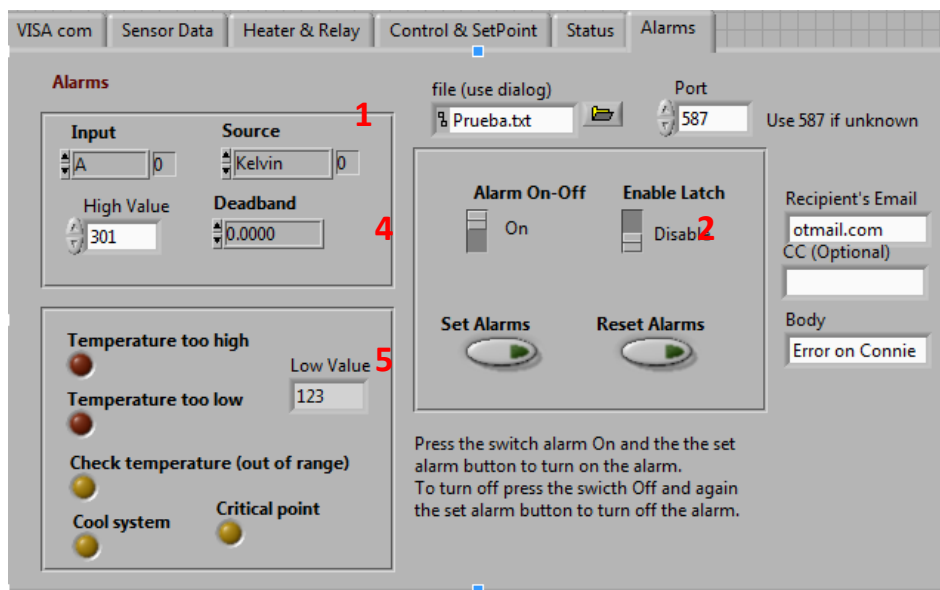


Figura 54 Alarmas

Para apagar las alarmas colocar en OFF y presionar *Set Alarms* o presionar botón *Reset Alarms*.

La diferencia entre una alarma con *latch* activado es que, una vez que se rebasa el límite establecido seguirá sonando, aunque el límite haya regresado al estado por debajo del límite hasta que un

operador intervenga y presione el botón de alarma de nuevo. Cuando esta función está desactivada la alarma sonará y se apagará si regresa a su estado seguro.

El *deadband* sirve para establecer un factor de seguridad dónde la alarma sonará unos grados antes de que se llegue al límite si así lo desea el usuario.

Aparecerá una notificación de este tipo en la pantalla y se apagará el sistema.

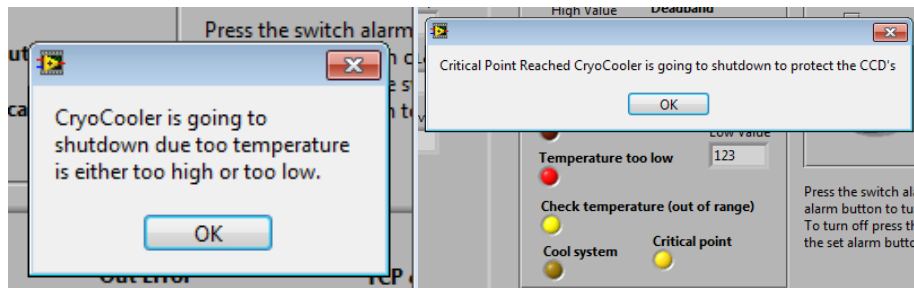


Figura 55: Notificaciones

Al correo electrónico le llegará un mensaje con el nombre de CONNIE detector, asunto *Connie notification*, mensaje “*error on Connie*”, y un archivo adjunto con información más detallada.

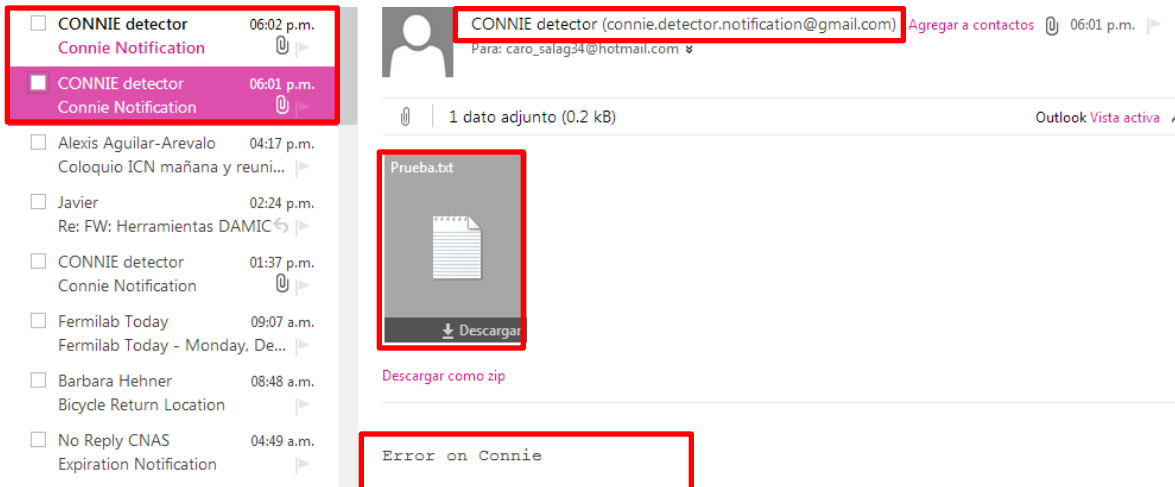


Figura 56: Correo de notificación

El archivo .txt contiene la siguiente información:

Failure Report

The system failed on: 02 -12 -13 at 18:00

The value of the temperature was: 0 K

And the pressure: 0 mbar

The critical point was reached possible damage on the CCD's

- Linux

Para este caso, la información que reciba el usuario será a través de un servidor SMTP (*Simple Mail Transfer Protocol*). Se deberá escribir las personas que recibirán el correo electrónico en la pestaña *recipients* y en el apartado de *return address* la dirección del remitente. Debido que el servidor en Fermilab no requiere contraseña basta con escribir la dirección del remitente (p.e. `smtp.ejemplo.fnal.gov`)

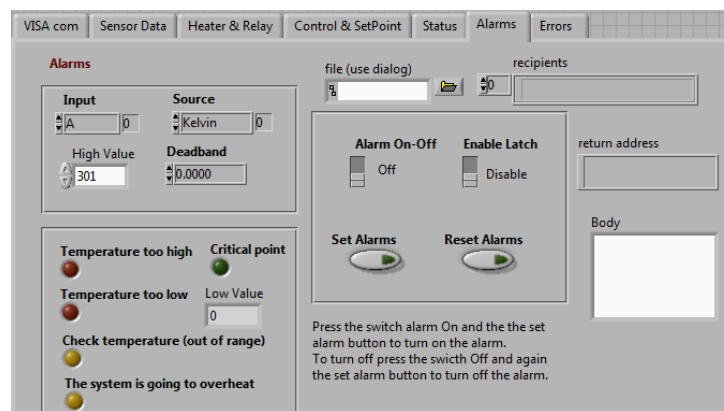
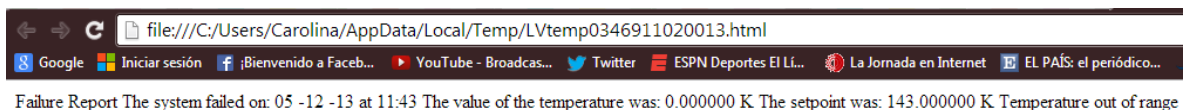


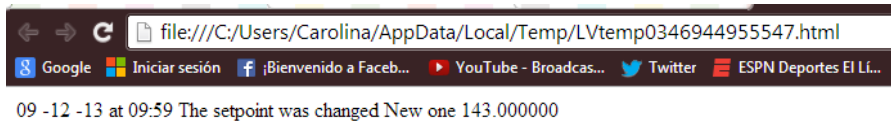
Figura 57: Correo en Linux

El usuario recibirá la misma información que la mostrada anteriormente para el caso de Windows.

Otro reporte que se generará, pero que no será enviado al usuario sino almacenado en los archivos temporales de la computadora, es cuando el valor de la temperatura esté fuera de rango por alguna razón. Entonces el usuario podrá visualizar este error de la siguiente manera:



En ocasiones el valor del *setpoint* cambia sin que el usuario pueda saberlo, debido a que alguien más hizo el cambio o hubo un error dentro del controlador que pudo haber movido este valor; es por esta razón que cada vez que se cambia el valor del setpoint se genera un archivo temporal que despliega esta información en un archivo de tipo html, como se muestra a continuación:



El archivo entonces puede visualizarse en la carpeta temporal cada vez que sea necesario y además se abrirá automáticamente en el navegador cuando éste se genere.

Finalmente la pestaña status contiene información general del sistema.

- **Presión**

Al igual que en el programa de temperatura las funciones de la presión son desplegadas en forma de pestañas. La primera pestaña nos muestra nuevamente las conexiones por puerto serie con las mismas características que las anteriores (Baud rate (9600), Data bits (8), stop bits (1), parity (none))

En la primera pestaña se muestran los puertos y el botón para encender la bomba, además de un indicador de que se puede encender el crio refrigerador.

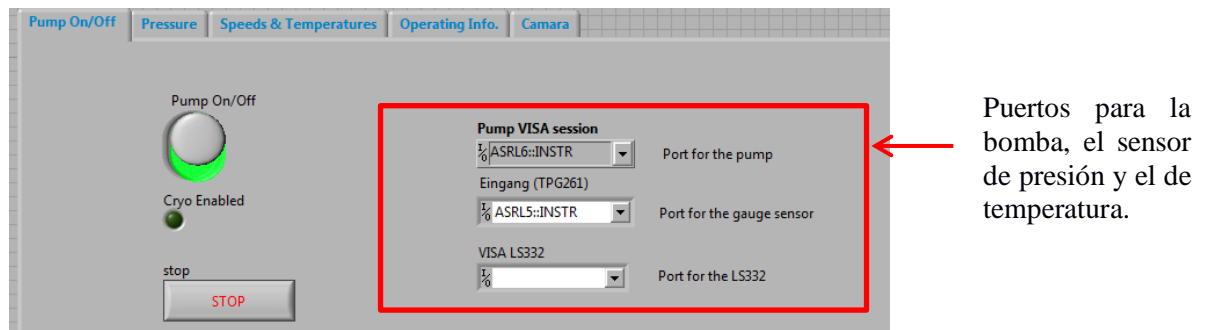


Figura 58: Interfaz Presión

En la segunda pestaña se puede visualizar la presión, una imagen que muestra la presión (en mbar, torr y pascal), el status del sensor, si se está conectado por comunicación TCP/IP, indicadores de seguridad y una gráfica dónde el usuario puede visualizar en que parte de la curva, se encuentra la temperatura y la presión, el experimento.

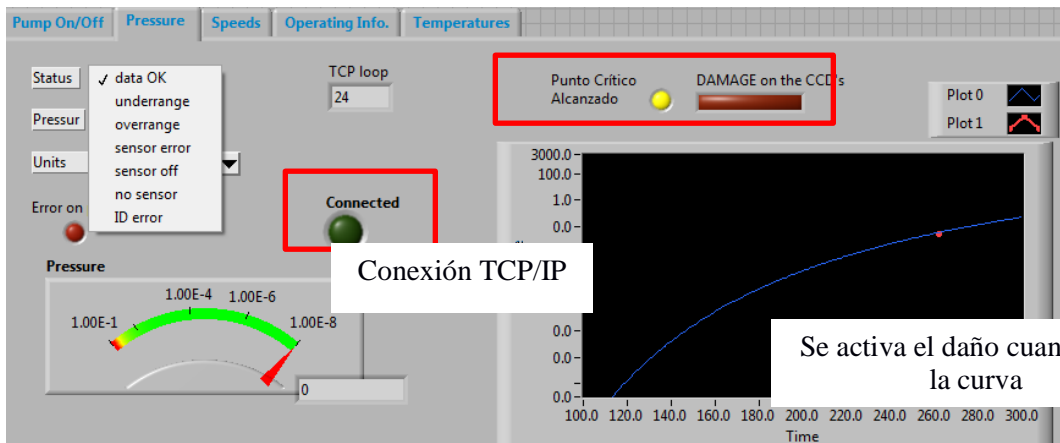


Figura59 Interfaz presión (Visualización de Curva)

Por último se tienen 3 pestañas con información útil para el usuario.

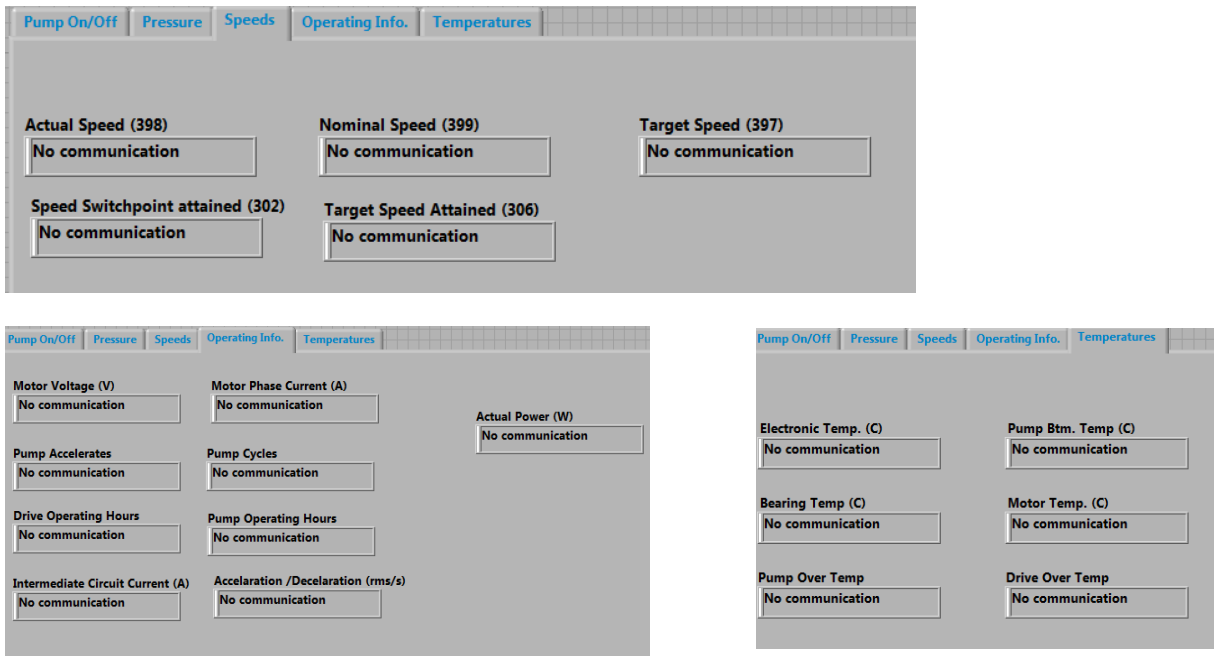


Figura 60: Interfaz presión (información bomba)

- **Comunicación TCP/IP**

Se agregaron dos nuevos comandos para la comunicación con el crio refrigerador y uno a la bomba, esto se realiza mediante el programa NETCAT en Linux.

- **ala:** configura las alarmas en alto (300K) y en bajo (130K)

- **stp**: configura el setpoint en el loop 1 y le pide al usuario que escriba después el valor del *setpoint* ex. (“stp” >> “write value of setpoint” >> “173”)
- **st?**: Devuelve el valor del *setpoint* establecido
- **prs**: despliega el valor de la presión en mbar

La lista de comandos completa se muestra a continuación:

Puerto 2055

“on” Prende el crio refrigerador

“off” Apaga el crio refrigerador

“rtd” Muestra la temperatura en kelvin, celsius, y unidades del sensor (ohms)

“rly” Muestra el estado del *relay* (apagado = 0 y prendido =1)

“ht?” Muestra el estado del calentador (apagado = 0, 0.5 W= 1, 5 W = 2 y 50 W = 3)

“ht1” Prende el calentador a 50 W

“ht0” Apaga el calentador

“stp” Establece el valor del *setpoint*

“st?” Devuelve el valor del *setpoint*

“ala” configura las alarmas en alto (300K) y en bajo (130K)

Puerto 2050

“Pon” prende la bomba

“sdp” devuelve la velocidad de la bomba en rpm

“prs” regresa el valor de la presión en mbar

“pof” apaga la bomba

Ejemplo de comandos usados comunicando a través de NETCAT:

Echo prs | nc localhost 2050

Echo stp; sleep 2 | nc localhost 2060

Capítulo 7

Conclusiones y recomendaciones

Este trabajo de tesis realizó importantes aportaciones al experimento DAMIC, se desarrolló una herramienta que garantiza la protección del sistema así como el monitoreo constante del mismo. En sistemas criogénicos como DAMIC o CONNIE es de vital importancia mantener las condiciones de temperatura y presión en un rango determinado debido a la alta sensibilidad de los sensores CCDs.

Antes de este trabajo de tesis, existía un monitoreo muy básico de los parámetros del experimento y no existía ninguna herramienta que garantizara la seguridad del mismo, por lo que si existía alguna falla, los sensores CCDs resultaban dañados y se tenían pérdidas de tiempo del orden de 2 semanas para arrancar el experimento nuevamente.

El programa realizado es planeado en primera instancia para el experimento DAMIC instalado en el laboratorio SNOLAB pero debido a que CONNIE se encuentra actualmente en el laboratorio Fermilab y a las similitudes que tiene con DAMIC (ambos son experimentos basados en la misma tecnología en condiciones de vacío y baja temperatura) este programa fue probado en él. Posteriormente este programa será instalado en el Instituto de Ciencias Nucleares para el experimento DAMIC 400.

Para la realización de pruebas, el programa fue probado en una computadora con Windows instalado y con la bomba de presión conectada únicamente para corroborar que todo estuviera funcionando adecuadamente. Es importante destacar que para la comunicación serial se debe tener instalado NI MAX ya que es el responsable de listar, configurar y probar el software y hardware que será utilizado en la instrumentación virtual tanto los comunicados serialmente como a los sistemas remotos.

Una vez terminada la programación del sistema, se instaló en una computadora con Linux para hacer pruebas y generar el ejecutable. Dado el sistema mostró muchas incompatibilidades, se tuvo

que reprogramar y ajustar al nuevo sistema operativo, es por eso que es muy recomendable crear el programa en el sistema operativo donde se realizará la instalación y operación del programa.

De otra manera, siempre deberá tenerse en mente que se usará en otro sistema operativo y revisar continuamente si se genera alguna incompatibilidad para poder evitarla.

Es importante que, para sistemas que ya están funcionando cotidianamente, el programa desarrollado se pruebe de manera independiente antes de ser instalado, ya que si existe algún inconveniente y se modifica la operación del sistema, entonces generará retrasos en la operación.

Después de haber sido probado independientemente, se procedió a instalarlo en CONNIE. Las pruebas realizadas resultaron exitosas ya que no arrojó ningún error, se desplegaron los valores de los parámetros, la gráfica y, aunque nunca se tuvo el caso de que se detonara, la alarma ésta se mantuvo activa y funcionando.

Se elaboró un manual para que el usuario sepa cómo funciona el sistema y la manera en la que debe ser operado para su correcto funcionamiento, además se creó un ejecutable para correr la aplicación sin que existan problemas al ejecutar el programa (por la versión que se utilice). También se tiene la opción de abrir el programa directamente en caso de que requiera hacer alguna modificación a la programación.

El sistema funciona adecuadamente dentro de las especificaciones realizadas. En cuanto a la protección del sistema por pérdida de la potencia eléctrica se instaló un APC conectado a la bomba y otro a la computadora, ya que el laboratorio Fermilab (donde se hicieron las pruebas) cuenta con estos equipos disponibles.

El modelo instalado fue el APC Smart-UPS 3000VA LCD RM 2U 120V US que se comunica mediante cable RS232 o por conexión USB. Este sistema tiene una potencia de 2700 watts y, además de servir como un sistema de respaldo energético, corrige los picos de voltaje cuando no está siendo usada la batería. Combinado con el programa de LabVIEW® provee una protección integral ya que, en caso de que exista un corte en el suministro eléctrico, el crio refrigerador se apagará y la bomba se mantendrá encendida hasta que se alcance una temperatura por arriba de 250 K. De ésta manera, se garantiza que nunca se rebasen los límites de operación segura (para que no se sobrecaliente el sistema ni se corra el riesgo de formación de hielo) y cuando la energía sea restablecida se puedan reanudar las operaciones de manera normal.

Las cargas reactivas son producto del magnetismo, toman corriente que está a 90° fuera de fase con respecto al voltaje y la energía eléctrica no se consume en ellas, se almacenan temporalmente en forma de un campo magnético durante un determinado periodo de tiempo ($1/4$ de un ciclo) para después fluir de nuevo a la fuente. Esta corriente reactiva se encuentra presente en la bomba de vacío ya que esta opera mediante un inductor, y representa una carga adicional de corriente para el consumo de la batería, por lo que debe ser tomada en cuenta para el cálculo del tiempo en el que operará la bomba con la batería del UPS.

Por el tipo de bomba que se tiene operando es importante considerar tres veces más el consumo que está indicado por el fabricante (230W), además de considerar entre un 10 y 20% adicional por las cargas reactivas lo cual da un total de entre 759 y 828W. Finalmente, el tiempo en que la bomba se mantendría encendida antes de apagarse por completo es de 25 a 30 minutos, según la tabla del proveedor, tiempo ideal para permitir el correcto apagado del sistema en caso que la energía no sea reestablecida.

Es recomendable generar una tabla de funcionamiento del crio refrigerador para saber a detalle cuanto tiempo se necesita para que alcance una temperatura segura y, en base a esto, decidir si es necesario adquirir una batería extra para alargar el tiempo de operación de la bomba.

Como se mencionó anteriormente, se encuentra siendo operado diariamente tanto por el equipo en Fermilab como remotamente por el equipo en Brasil, por lo que no se ha tenido oportunidad de hacer esta caracterización.

Otra de las mejoras que se le puede hacer al sistema es crear una interfaz para comunicación serial del UPS con la computadora, de tal forma que el operador pueda visualizar si se activó el uso de la batería, la carga, detección de cambio de batería, etc.

Finalmente se concluye que el sistema de protección y monitoreo funciona adecuadamente y tiene posibilidades de mejorarse a futuro. El experimento DAMIC, por otra parte se encuentra en una etapa de mejoras, aún queda un gran camino por recorrer para comprender la manera en la que se pueden operar las CCDs con el mínimo ruido posible pero en base a las experiencias y los resultados obtenidos en cada etapa, el experimento se encuentra cada vez más cerca de la detección de partículas de materia oscura, lo que nos ayudará a comprender más acerca de nuestro universo.

Bibliografía

- AB, N. M. (2013). *The Nobel Foundation*. Recuperado el 22 de 04 de 2014, de The Nobel Prize in Physics 2009: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2009/
- Collaboration, X. (17 de 02 de 2011). *Xenon*. Recuperado el 20 de 04 de 2014, de http://xenon.astro.columbia.edu/XENON100_Experiment/
- CRYOMECH. (2012). *Cryomech*. Recuperado el 22 de 04 de 2014, de <http://www.cryomech.com/products/cryorefrigerators/gifford/al63/>
- Duncan, F. (21 de 08 de 2013). *SNOLAB*. Recuperado el 27 de 04 de 2014, de Future projects workshop: http://www.snolab.ca/sites/default/files/Duncan_SNOLAB.pdf
- Fernández, A. (2006). *Relación Señal-Ruido en Astrofotografía Digital de Cielo Profundo*. Recuperado el 26 de 09 de 2013, de AstroSurf: http://www.astrosurf.com/afernandez/equipment/ccd/snr_v100_web.htm
- Hamuy, M. (04 de 10 de 2011). *Real Academia de Ciencias de Suecia*. Recuperado el 20 de 04 de 2014, de Class of Physics: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2011/advanced-physicsprize2011.pdf
- J. Barreto, J. E. (2012). Direct Search for Low Mass Dark Matter Particles with CCDs. *Fermi National Accelerator Laboratory* .
- Janesick, J. R. (2001). *Scientific Charge-Coupled Devices*. Washington, USA: SPIE.
- Karlsruhe, F. (2007). Basics and applications of cryopumps. *CERN*, 34.
- Lakeshore. (2013). *Lakeshore*. Recuperado el 22 de 04 de 2014, de http://www.lakeshore.com/ObsoleteAndResearchDocs/332_Manual.pdf
- López, C. M. (11 de 03 de 2009). *Universidad Autónoma de Madrid*. Recuperado el 18 de 04 de 2014, de UAM/CSIC: <http://projects.ift.uam-csic.es/outreach/images/articles/CarlosMunoz-ComposicionUniverso.pdf>
- Matos, T. (2009). *IAC*. Recuperado el 14 de 04 de 2014, de Cinvestav: http://www.iac.edu.mx/IACfiles/NoExpertos/De_que_hecho.pdf
- Memorandum, F. (15 de 12 de 2008). *Fermilab*. Recuperado el 26 de 04 de 2014, de http://www-ppd.fnal.gov/ftbf/TSW/PDF/T987_mou.pdf
- NASA. (12 de 01 de 2012). Recuperado el 20 de 04 de 2014, de Kerchak: <http://kerchak.com/wp-content/uploads/2012/01/lente-gravitacional-NASA.jpg>
- Nieves, J. M. (04 de 11 de 2013). Buscan materia oscura en una antigua mina de oro . *ABC*, págs. <http://www.abc.es/ciencia/20131104/abci-buscan-materia-oscura-antigua-201311041008.html>.

- OBSERVATORY, S. A. (2011). *DS9*. Recuperado el 22 de 04 de 2014, de <http://ds9.si.edu/site/Home.html>
- Pfeiffer Vacuum. (2013). Recuperado el 26 de 04 de 2014, de http://www.idealvac.com/files/brochures/Pfeiffer_Single_Gauge_TPG261.pdf
- R. Agnese, Z. A. (2013). Dark Matter Search Results Using the Silicon Detectors of CDMS II. *arXiv:1304.4279v2*, 1-5.
- R. Bernabei, P. B. (2013). Dark Matter investigation by DAMA at Gran Sasso. *International Journal of Modern Physics*, 71.
- Rodríguez, L. F. (2011). *Un Universo en Expansión*. México D.F.: Fondo de Cultura Económica .
- Rogerson, J. (14 de 08 de 2013). *York Universe*. Recuperado el 19 de 04 de 2014, de <http://yorkuniverse.com/2013/08/bullet-cluster-evidence-for-dark-matter/>
- Santos, M. (28 de 02 de 2012). *The Dark Energy Survey* . Recuperado el 19 de 04 de 2014, de https://www.darkenergysurvey.org/es/science/weaklens_es.shtml
- Science, S. B. (20 de 02 de 2014). *LUX confirms it has not found dark matter*. Recuperado el 21 de 04 de 2014, de http://www.science20.com/news_articles/lux_confirms_it_has_not_found_dark_matter-130156
- Tiffengerg, J. (2013). DAMIC: a novel dark matter experiment. *The astroparticle physics conference* (pág. 4). Rio de Janiero: 33rd International Cosmic Ray Conference.
- Vacuum, P. (2012). *Pfeiffer Vacuum*. Recuperado el 26 de 04 de 2014, de <http://www.pfeiffer-vacuum.com/products/pumping-stations/turbo-pumping-stations/hicube-eco/onlinecatalog.action?detailPdold=5164>
- Yu, C.-C. (2006). *Autotuning of PID controllers*. Taiwan: Springer-Verlag London.

Anexos

Funcionamiento de los comandos utilizados de LabVIEW®

Dentro de las estructuras básicas de programación se utilizaron diversas funciones, LabVIEW® posee un inmenso número para realizar la programación, por lo que sería imposible nombrarlas a todas. Las más utilizadas en este programa serán las que se explican a continuación.

LabVIEW®, como ya se dijo, es un lenguaje gráfico, por lo que los comandos que se utilizan en él son representados mediante imágenes. En programación existe una función ampliamente utilizada llamada “while” y en LabVIEW® se representa como en la figura 20:

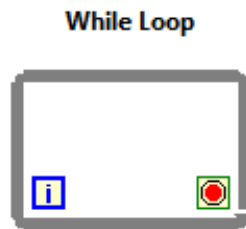


Figura 61: While loop

Se tiene que todo lo que se coloque dentro de este ciclo o *loop* se realizará cíclicamente hasta que la condición lo termine; la condición está determinada por el botón rojo de la esquina y es un valor de tipo booleano. Está configurado para que el ciclo pare si la condición se cumple (●) o bien que pare “mientras no se cumpla”. (⊖)

Otra función muy utilizada en la programación fue *Event Structure* esta función le permite al usuario crear casos según condiciones particulares.

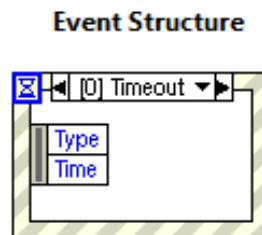


Figura 62: Event Structure

Estas condiciones son definidas por el programador editando cada uno de los casos, haciendo clic derecho sobre la ventana y seleccionando editar caso.

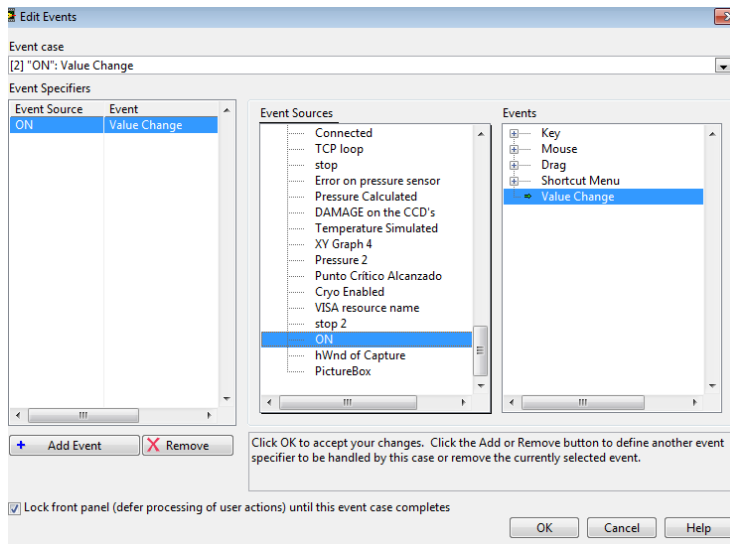


Figura 63: Edit Events

Se despliegan así las fuentes que se pueden tomar como bases para el evento y el tipo de evento; por ejemplo, para la imagen de arriba se tiene que si el valor booleano del botón *ON* cambia entonces ejecuta el evento al interior.

La estructura *Case Structure* sirve como un *if* en la programación, si la condición de fuera es cierta entonces procederá a determinada acción, de otra manera no lo hará; acepta valores de tipo *boolean*, *string*, *enumerated* e *integer*, Las similitudes de esta estructura con la anterior son varias y dependerá del programador el uso que se le dé.

La estructura *Flat Sequence* consiste en un arreglo de uno o más paneles que se van ejecutando uno a uno pudiendo conectar así datos en una secuencia ordenada. Finalmente, otra de las estructuras utilizadas en este programa es el *For Loop* que, como su nombre lo indica, ejecuta una acción por un determinado número de eventos.

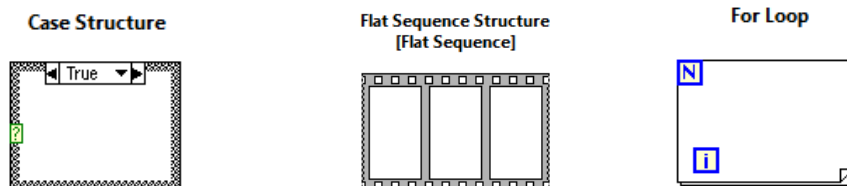


Figura 64: Estructuras LabVIEW®

Dentro de la opción *programming* podemos encontrar todas estas estructuras. Otra función muy útil que podemos encontrar dentro de ella es la llamada variable local, la cual nos ayuda a obtener el valor de determinado parámetro sin necesidad de cablearlo por todo el programa, difiere de la variable global en que se puede utilizar en otros programas leyéndose como un sub vi. Esta función, aunque resulta muy útil tiene la desventaja de que, al ir de un vi principal a un sub vi y luego al nuevo vi, su lectura se torna más lenta y no es en tiempo real.

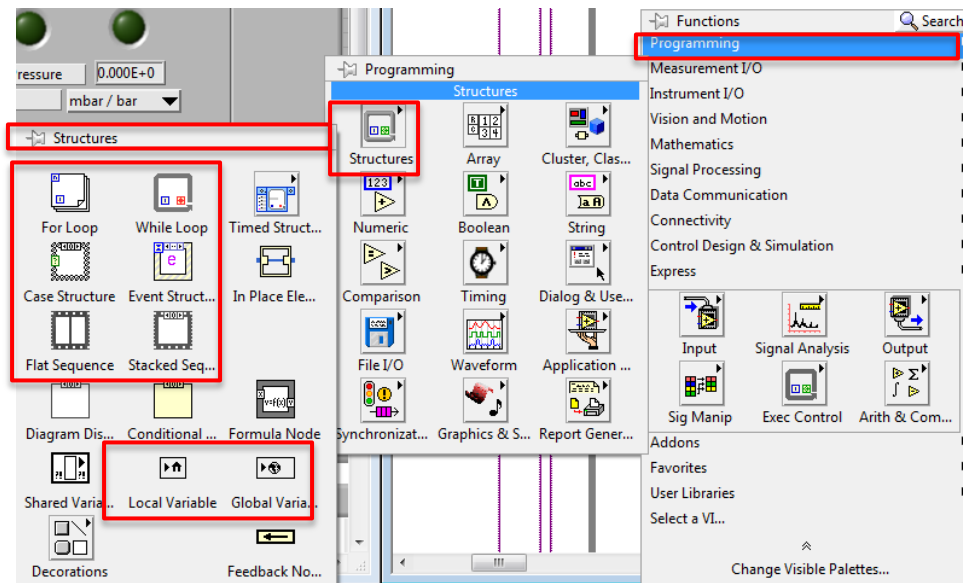


Figura 65: Localización de las Estructuras en LabVIEW®

Dentro del mismo *programming* tenemos funciones que nos ayudan a realizar operaciones algebraicas, booleanas y de comparación además de la creación de *clusters* y arreglos para el manejo de la información.

Otra función ampliamente utilizada y de mucha ayuda es la creación de un *property node*, o propiedad de nodo, que crea una determinada función para algún control, botón, indicador o hasta una gráfica que puede ser manipulada mediante el programa. Las propiedades dependen de cada nodo (ya sea indicador, control, etc.) y se despliegan haciendo clic derecho sobre el objeto al que se le quiere crear la propiedad en el diagrama de bloque y selecciona *create >> property node >>* y la función deseada.

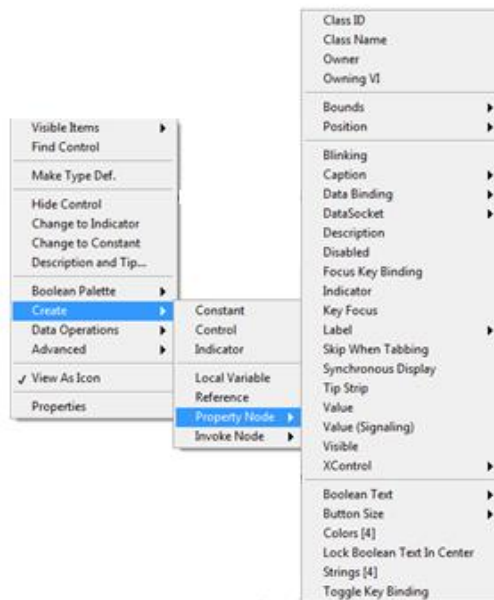


Figura 66: Property Node

De manera general, se tiene que estos fueron las bases sobre las cuales se realizó la programación de las interfaces, a continuación se presenta una explicación más detallada acerca de la programación y cada uno de los componentes usados.