



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
Instituto de Geofísica: Departamento
de Ciencias Espaciales

Diseño e implementación de un sistema de
adquisición de datos para el Observatorio
de Rayos Cósmicos de Ciudad Universitaria

TESIS PROFESIONAL

Para obtener el grado de:

INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

PRESENTAN:

ROCÍO GARCÍA GÍNEZ

MARCOS ALFONSO ANZORENA MÉNDEZ

DIRIGIDA POR:

Dr. José Francisco Valdés-Galicia

M.I. Ricardo Mota Marzano

Ciudad Universitaria

2011





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 pesar de todo, tú siempre has estado conmigo;
Me tomaste de la mano derecha.
Me has guiado según tu consejo,
Y después me recibirás en gloria.*

*¿A quién tengo yo en los cielos sino a ti?
Y fuera de ti nada deseo en la tierra.
Mi carne y mi corazón desfallecen;
Mas la roca de mi corazón y mi porción
es Dios para siempre.*

*En cuanto a mí, el acercarme a Dios es el bien;
He puesto en Jehová el Señor mi esperanza,
Para contar todas tus obras.*

Fragmento: *Salmo 73*

Agradecimientos

Primeramente y de manera muy especial, al Dr. José Francisco Valdés-Galicia por su: dirección, apoyo, consejo y enseñanzas. Gracias por abrirnos las puertas y permitirnos trabajar con usted.

Al M.I. Ricardo Mota Marzano; por su amistad y apoyo en el desarrollo de este trabajo. Gracias por sus enseñanzas, su tiempo y paciencia.

Al Ing. Octavio Musalem; por compartir su experiencia y conocimiento, por brindarnos su amistad. Gracias por su interés en nuestro desarrollo como personas y profesionistas.

A nuestros compañeros del grupo de Rayos Cósmicos: Fis. Alejandro Hurtado, Dr. Luis Xavier González, Fis. Ernesto Ortíz y M.C. Jesús Alvarez. Gracias por su amistad y colaboración.

Al Ing. Miguel Angel García Palacios, por la asesoría que nos brindó en el desarrollo de este trabajo.

A los miembros del jurado: M.I. Luis Arturo Haro Ruíz, Ing. Gloria Mata Hernández y Dr. Pablo Pérez Alcázar. Gracias por los comentarios y aportaciones a esta tesis.

Finalmente, queremos agradecer a todas aquellas personas, que aunque no aparecen en esta lista, sin su colaboración no hubiera sido posible culminar este trabajo. Gracias.

Dedicatoría

Con todo mi amor y gratitud a mis queridos padres; por darme el tesoro más grande en vaso de barro.

A mis amadas hermanas y hermanos; por la alegría tan grande de compartir el mismo *Camino*.

A mi amigo y amado; porque es para mi un manojito de mirra.

Rocío

Tengo mucho que agradecer. En primer lugar a mis padres, por todo su amor, paciencia y cuidados. Por permitirme seguir mis sueños y darme las herramientas para alcanzarlos. Este trabajo también es de ustedes.

Agradezco a mi padre por ser un gran ejemplo para mi, porque tu esfuerzo y trabajo no han sido en vano. A mi madre por escucharme, consolarme y aconsejarme. A mis hermanos y hermanas porque han sido mis amigos y compañeros desde la infancia, son parte de mi. A mis pequeños, por sus sonrisas. A todos los amo.

A mi amigo Isaac, por todos estos años de amistad sincera y *preparatoriana*.

A *Rocí*, mi amada, porque desde que llegaste a mi vida nada es igual.

Marcos

Índice general

Introducción	VI
1. Mensajeros de las estrellas	2
1.1. Los Rayos Cósmicos	4
1.1.1. Radiación cósmica primaria y secundaria	5
1.1.2. Efectos atmosféricos sobre la RC secundaria	7
2. Detección de rayos cósmicos . . .	10
2.1. Rescatando rayos cósmicos	10
2.2. El Super Monitor de Neutrones	15
2.3. El observatorio de Rayos Cósmicos	17
3. Adquisición de datos: un acercamiento a los rayos cósmicos	24
3.1. ¿Qué es un sistema de adquisición de datos?	25
3.1.1. Partes que componen un SDAQ convencional	25
3.2. Sistemas de adquisición de datos para RC	27

3.3. Tecnologías para...	30
3.3.1. SDAQ's basados en instrumentos modulares	30
3.3.2. Sistemas de aplicación específica	33
4. El nuevo sistema ...	39
4.1. ¿Qué camino tomar?	41
4.2. Concepción del sistema	42
4.3. Módulo de comunicación I^2C	44
4.3.1. ¿Qué es el bus I^2C ?	44
4.3.2. Protocolo de comunicación I^2C	46
4.3.3. Descripción del módulo I^2C	47
4.4. Módulo de canal de neutrones	51
4.5. Módulo de presión	53
4.6. Módulo de amplificación, discriminación y cambio de nivel	56
4.7. Módulo software de adquisición	57
4.8. Interconexión del sistema	61
5. Pruebas, resultados y conclusiones	65
5.1. Depuración del sistema	66
5.2. Resultados	72
5.3. Conclusiones	78
5.3.1. ¿Qué falta por hacer?	79
Apéndice A	81

Introducción

Desde tiempos remotos el Universo ha capturado la atención de la humanidad. Para algunos fuente de conocimiento, para otros fuente de inspiración. Sin importar el caso, el hombre ha observado el cielo, ya sea con sus ojos o a través de instrumentos, y con su imaginación y entendimiento ha descrito la parte observable del espacio-tiempo.

De galaxias a planetas; de supernovas a estrellas; de neutrones, protones, fotones y electrones nuestro Universo está compuesto, para observarlo vemos sus destellos. De entre estas luces, la que más brilla es la del Sol, que además hace posible la vida en nuestra planeta. Del Sol llegan a la Tierra *los mensajeros de las estrellas*: los rayos cósmicos.

En palabras del Dr. José Francisco Váldez-Galicia los rayos cósmicos son: subatómicos visitantes del espacio exterior. Partículas que al entrar en nuestra atmósfera chocan con los núcleos de los elementos químicos que la componen. En este choque se producen nuevas partículas y los choques siguen durante varios kilómetros hasta que alcanzan la superficie terrestre. La cantidad de partículas que entran a la Tierra es modulada por el campo magnético de la tierra y sus interacciones con la heliósfera. El conteo de partículas, que entran en una determinada dirección, nos permite estudiar de forma indirecta la actividad solar.

En la ciudad de México, el Observatorio de rayos cósmicos «Javier A. Otaola» del Instituto de Geofísica de la UNAM, tiene por objetivo descifrar los mensajes que porta la radiación cósmica acerca del Sol y el medio interplanetario.

El Observatorio forma parte de una red internacional de más de cincuenta distribuidos en todo el mundo. Para cumplir su objetivo, estos observatorios cuentan con detectores de partículas, los cuales convierten la energía de las partículas en pulsos eléctricos que posteriormente son registrados. Luego enton-

ces, la intensidad de la radiación cósmica, en la localidad del observatorio, puede ser estimada a través del conteo de los pulsos generados por los detectores.

El presente trabajo lleva por nombre «Diseño e implementación de sistema de adquisición de datos para el Observatorio de Rayos Cósmicos de Ciudad Universitaria »y tiene como objetivo principal diseñar un sistema de adquisición de datos para el Super Monitor de Neutrones NM64 que se encuentra trabajando actualmente y posteriormente implementar el diseño para sustituir al sistema actual.

El sistema de adquisición de datos del Observatorio de Rayos Cósmicos de Ciudad Universitaria tiene más de veinte años en operación, actualmente presenta algunos problemas en su funcionamiento. Debido a que trabaja de forma continua, no es posible realizar operaciones de mantenimiento con frecuencia. El diseño del sistema actual está basado en tecnología TTL de bajo consumo — *Transistor-Transistor Logic*— de principios de los años ochenta, lo cual lo hace un sistema grande y complejo. Muchos de los circuitos integrados que se ocuparon para su construcción ya no se encuentran disponibles comercialmente. Por estas razones se tiene la necesidad de reemplazarlo por un equipo de tecnología moderna que cubra las necesidades que tiene el observatorio.

Durante el desarrollo de esta tesis profundizaremos en los temas antes mencionados y desglosaremos el trabajo del diseño, pruebas y puesta en funcionamiento del sistema. El trabajo consta de cinco capítulos titulados: *Mensajeros de las Estrellas, Detección de rayos cósmicos y el Observatorio de RC en Ciudad Universitaria, Adquisición de datos: un acercamiento a los rayos cósmicos, El nuevo sistema de adquisición de datos del Observatorio de Rayos Cósmicos y Pruebas, resultados y conclusiones.*



Victor F. Hess a punto de realizar un viaje en globo.

«Nuestro universo conserva las huellas de su juventud y tenemos la esperanza de reconstruir su historia. Los documentos de los que disponemos no están enterrados entre montones de ladrillos babilonios; nuestra biblioteca no corre el riesgo de ser destruida en algún incendio. Es en el espacio vacío donde se conserva [...] la radiación ultra-penetrante: los rayos cósmicos. ¿Podemos datarlos? ¿Podemos leerlos? ».

Eduardo Rianza

Mensajeros de las estrellas

«The results of my observations are best explained by the assumption that a radiation of very great penetrating power enter our atmosphere from above.»[1]

El 7 de Agosto de 1912, el físico austriaco Victor Francis Hess emprendió un vuelo en globo. Su objetivo, estudiar el comportamiento de la electricidad atmosférica. El experimento era sencillo, con ayuda de un navegante y un meteorólogo, tomó consigo tres electros copios y juntos realizaron una serie de viajes para determinar la naturaleza de la electricidad en el aire. Mientras sus ayudantes medían la temperatura y la altura, Hess registraba lo que observaba en los electros copios. Durante varias horas realizaron mediciones a diferentes alturas, sin imaginarse, que los resultados de sus observaciones serían el comienzo de un nuevo paradigma en la ciencia: «... una nueva perspectiva científica cuyos efectos se han hecho sentir en el pensamiento y la vida de la humanidad »[2]. Tres meses después, Hess presentaría su trabajo ante la comunidad científica y veinticuatro años más tarde, recibiría el premio Nobel de Física por su hallazgo: el descubrimiento de los rayos cósmicos. Pero, ¿cuál fue la motivación que llevo a Hess a realizar dicho experimento?.

Desde mucho tiempo atrás los físicos notaron que un cuerpo cargado, expuesto a la intemperie, no mantiene su carga de forma indefinida. No obstante, las causas que provocan el fenómeno eran desconocidas y atrajeron a muchos a buscar una explicación. Entre estos, Charles du Fay fué el primero en descubrir que el aire era capaz de conducir la electricidad, lo cual implicaba la existencia de partículas eléctricas libres en el gas.

Para fines del siglo XIX se conocía lo suficiente acerca de la estructura de la materia como para hacer las primeras hipótesis. Se sabía que la materia estaba

compuesta por átomos y que estos tenían carga neutra. También se sabía que la carga eléctrica era de naturaleza cuantizable. Finalmente esto llevó a algunos físicos como Franz Exner a utilizar electroscopios para estudiar la electricidad atmosférica. Los experimentos consistían en observar la descarga del electroscopio al interactuar con el medio ambiente.

La descarga del electroscopio se debe a la ionización del gas alrededor de sus láminas. Si las láminas del electroscopio están cargadas de forma positiva, y existen moléculas de gas ionizadas alrededor de ellas, la interacción de los iones negativos del gas y las láminas eventualmente neutraliza la carga del electroscopio (Fig. 1.1). Sin embargo, aunque esto explica la descarga del electroscopio, surge la pregunta ¿A qué se debe la ionización del gas?.

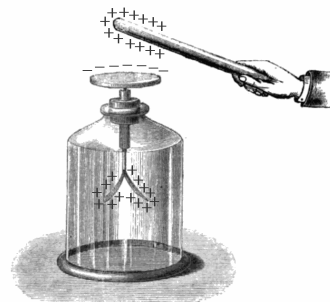


Figura 1.1: *Diagrama del funcionamiento de un electroscopio*

En 1895 Wilhem Conrad Röntgen descubrió los rayos X y pudo observar que un electroscopio, expuesto a este tipo de radiación, se descarga inmediatamente. Años más tarde, científicos como, Henri Becquerel, Pierre Curie y Marie Curie, realizaron los primeros experimentos con materiales radioactivos. Sus resultados sentaron las bases necesarias para explicar el fenómeno de la descarga del electroscopio[3].

En vista de estos descubrimientos, muchos científicos de la época se inclinaron por la idea de que la ionización del aire se debía a la acción de algún tipo de radiación débil. Se creía que dicha radiación provenía de algunos elementos de la corteza terrestre y/o impurezas en los materiales con los que se construían los electroscopios. Aunque la segunda hipótesis resultó ser cierta, con el tiempo se lograron fabricar electroscopios de mejores materiales y con un mayor grado de pureza. La contaminación radioactiva del instrumento, no podía ser completamente responsable del efecto.

En conclusión: «Si la radiación responsable de la descarga de los electroscopios provenía del suelo, ésta debería ser más fuerte cerca de la superficie y progresivamente más débil a medida que se incrementara en altitud »[2]. Esta fue la motivación que llevó a Hess a realizar sus experimentos el 7 de agosto de 1912. Él observó que a los 500m de altura la ionización era dos veces menor con respecto a la superficie, a los 1500m la ionización era igual, a los 1800m existía un incremento y a los 5000m llegaba a ser dieciséis veces mayor. Hess aseguró que la explicación a esto era una radiación penetrante de origen extraterrestre.

No conforme, Robert Andrews Millikan emprendió una serie de nuevos experimentos para comprobar si los resultados de Hess eran ciertos. Finalmente,

los experimentos en los lagos Muir y Arrowhead, convencieron a Millikan y a la comunidad cient3fica del origen extraterrestre de la hasta entonces llamada *Ultragammastrahlung*. Ser3a Millikan el que usar3a por primera vez el t3rmino **Rayos C3smicos**.

1.1. Los Rayos C3smicos

Los rayos c3smicos son part3culas subat3micas que provienen del espacio exterior y llegan a la tierra de todas direcciones. Se componen principalmente de *protones* y aunque no se sabe con exactitud el origen de estas part3culas, se han identificado algunas posibles fuentes.

El Sol, como otras estrellas, sintetiza n3cleos de elementos pesados a partir de elementos m3s ligeros, como el Hidr3geno. El 90% de la composici3n del Sol es Hidr3geno y a partir de 3ste se produce Helio mediante fusi3n nuclear. Las reacciones nucleares en el Sol liberan una gran cantidad de energ3a, que es responsable de las altas temperaturas en la atm3sfera solar.

En la *atm3sfera solar* —capas externas del Sol cuya radiaci3n es observable— se presenta una serie de perturbaciones, a las que se les nombra regiones activas, las cuales estan estrechamente relacionadas con el *ciclo solar* —fluctuaciones en la cantidad de energ3a emitida por el Sol. Tiene efectos visibles como las manchas solares.

El ciclo solar dura aproximadamente once a3os y durante este periodo la actividad solar se manifiesta a diferentes amplitudes, es decir, se incrementa r3pidamente al iniciar el periodo hasta llegar a un m3ximo y decae lentamente hasta concluir el ciclo solar. Adem3s los ciclos entre s3 son diferentes.

Las r3fagas son explosiones de *gas cromosf3rico* —capa delgada de la atm3sfera solar por encima de la fotosfera y por debajo de la corona. Se compone principalmente del Hidr3geno y Helio—, es quiz3s el fen3meno mas sorprendente que se presenta durante la actividad solar (Fig. 1.2). Pueden tener una duraci3n de m3s de una hora y la cantidad de energ3a emitida en ese lapso de tiempo es incre3blemente grande.

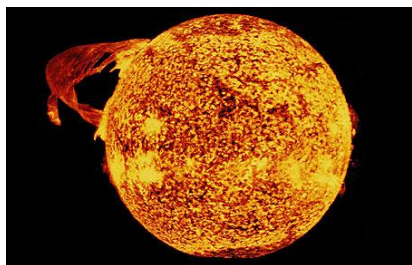


Figura 1.2: R3faga solar

Los rayos c3smicos solares son part3culas de alta energ3a emitidas durante una r3faga. Se componen principalmente de *protones* y part3culas alfa —n3cleos de Helio—; tienen energ3as superiores a los *MeV* —energ3a que toma un *electr3n* cuando es acelerado por una diferencia de potencial de 1V—, y son clasificados

dentro de los rayos c3smicos locales por ser originados dentro de nuestro Sistema Solar.

La radiaci3n c3smica que se genera m3s all3 de nuestro Sistema Solar recibe el nombre de radiaci3n c3smica gal3ctica. Una fuente viable de este tipo de radiaci3n son las supernovas —explosi3n estelar muy energ3tica que es extremadamente luminosa y produce radiaci3n.

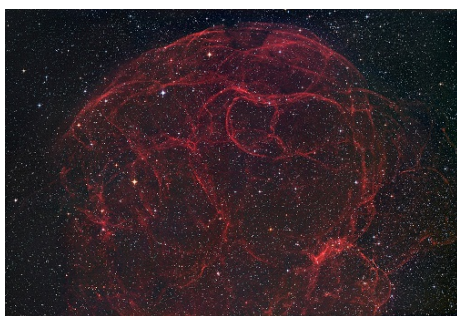


Figura 1.3: Los restos de la supernova *Siemis 147*, a unos 3000 a3os-luz de distancia. La explosi3n de la extinta estrella sucedi3 hace unos 100,000 a3os.

El *remanente de supernova* —estructura nebulosa que resulta de la gigantesca explosi3n de una estrella— acelera n3cleos de 3tomos a energ3as muy grandes (Fig. 1.3).

En casi todos los remanentes de supernova, los astr3nomos han detectado radiaci3n emitida por *electrones* energ3ticos atrapados por un campo magn3tico[4].

El material lanzado, a altas velocidades por la explosi3n estelar, contiene *electrones* que ya sea de forma directa o indirecta contribuyen a la radiaci3n c3smica gal3ctica.

1.1.1. Radiaci3n c3smica primaria y secundaria

Se le denomina radiaci3n c3smica primaria —RC primaria— al conjunto de part3culas que llegan al tope de la atm3sfera terrestre. Despu3s del Hidr3geno, el Helio es el elemento m3s abundante en la RC primaria. Los n3cleos de Helio son aproximadamente diez veces menos abundantes que los de Hidr3geno. La RC primaria tambi3n contiene un peque3o porcentaje de *electrones* y otras part3culas neutras como: *rayos γ* , *neutrones* y *neutrinos*[4].

Al estar compuesta en su mayor3a por part3culas cargadas, la intensidad de la RC primaria se ve afectada por la interacci3n con el medio interplanetario. Durante su camino hacia la Tierra, los rayos c3smicos cruzan diversos campos magn3ticos que pueden acelerarlos o desviarlos de su trayectoria.

La interacci3n entre los campos magn3ticos de los planetas y la heliosfera, regi3n espacial que se encuentra bajo la influencia del viento solar, producen variaciones en la intensidad de la radiaci3n c3smica. El viento solar es un plasma que ocupa el medio interplanetario, el cual proviene de la expansi3n de la atm3sfera solar y arrastra consigo el campo magn3tico del Sol. Este plasma consiste principalmente de *protones* y *electrones* libres, que le dan la propiedad de conductividad el3ctrica.

En conclusi3n: «El espacio interplanetario no es un espacio vaci3o por el cual las part3culas de rayos c3smicos puede propagarse libremente, el viento solar empuja a estas part3culas hacia afuera del Sistema Solar, mientras la presencia del campo magn3tico las guia hacia adentro »[2].

La radiaci3n c3smica secundaria se produce cuando la RC primaria penetra en la atm3sfera terrestre y choca con las mol3culas de aire, ya sea con la estructura electr3nica del 3tomo, o con el mismo n3cleo. En el proceso de colisi3n la RC primaria cede su energ3a para producir nuevas part3culas que se clasifican en tres componentes: componente nucle3nica, componente mu3nica y componente electromagn3tica (Fig. 1.4).

La componente nucle3nica se origina a partir de part3culas primarias de baja energ3a que producen *neutrones* y *protones* al desintegrar 3tomos atm3sfericos.

En el caso de las part3culas de mayor energ3a al colisionar con la atm3sfera, adem3s de producir nucleones, ocupan su energ3a para generar nuevas part3culas y proveerles de energ3a cin3tica. Son estas nuevas part3culas, los *piones*(π) y los *kaones*(κ).

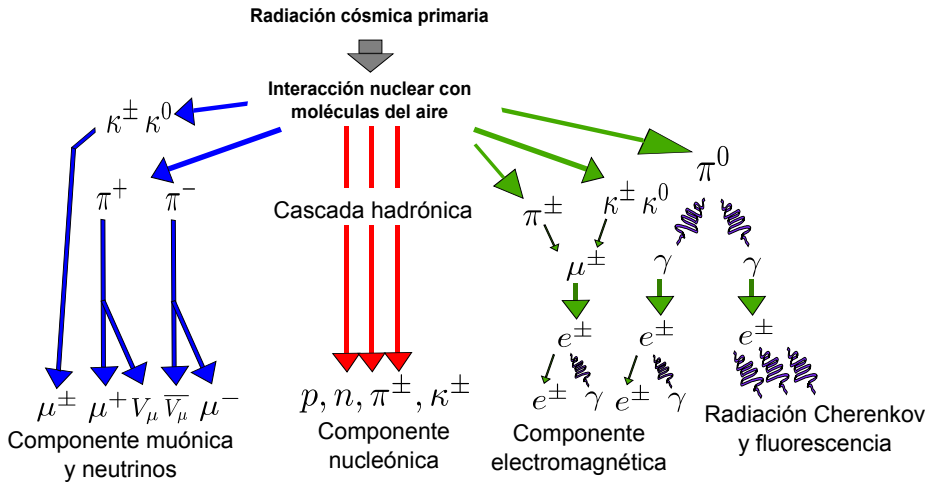


Figura 1.4: Part3culas secundarias generadas a trav3s de colisiones en la atm3sfera. Componente mu3nica, nucle3nica y electromagn3tica.

Los *piones*, al ser part3culas inestables, decaen en *muones*(μ) que forman la componente mu3nica dura de la RC secundaria. Al igual que los *piones*, los *muones* son inestables y no tienen interacci3n nuclear fuerte, por lo que los *muones* decaen en *positrones* (e^+), *electrones* (e^-) y μ^- *neutrino* (ν_μ).

Los *muones* producto de part3culas de muy alta energ3a son capaces de llegar a la superficie de la Tierra, gracias a que su velocidad es muy cercana a la de la luz. Por efecto de la velocidad relativista de estas part3culas, el tiempo que

transcurre en la superficie Terrestre es mucho mayor a su vida media. Este fen3meno se describe por medio de la transformaci3n de Lorentz y es lo que permite detectar estas part3culas en la superficie Terrestre.

1.1.2. Efectos atmosf3ricos sobre la RC secundaria

Las tres componentes de la RC secundaria se ven afectadas por las condiciones atmosf3ricas. En el presente trabajo s3lo consideraremos los efectos debidos a variaciones de la presi3n atmosf3rica y la temperatura. Sin embargo, existen otros efectos que la alteran, como son: el efecto altitudinal, la humedad, el viento y la gravedad.

Los efectos de la presi3n atmosf3rica y la temperatura sobre la RC secundaria son negativos y estan estrechamente relacionados[5]. Ambos efectos se presentan de forma periodica durante el d3a.

La intensidad de la radiaci3n c3smica secundaria es directamente proporcional a la cantidad de masa de aire atravesada por la RC secundaria. Al incrementarse la presi3n atmosf3rica, la densidad del aire aumenta, provocando que un mayor n3mero de part3culas sean absorbidas en la atm3sfera. Otro efecto secundario es el decaimiento a mayor altitud de *piones* y *muones*[5].

Al igual que los cambios en la presi3n atmosf3rica, los cambios en la temperatura provocan la expansi3n o compresi3n del aire. Si la temperatura aumenta las part3culas secundarias seran generadas a mayor altura, ocasionando una disminuci3n en la intensidad de la radiaci3n.

Referencias

- [1] Victor Francis Hess. Über beobachtungen der durchdringenden strahlung bei sieben freiballonfarhrt. *Physikalische Zeitschrift*, 13:1084–1091, 1912.
- [2] Javier A. Otaola y José F. Valdés-Galicia. *Rayos cósmicos: mensajeros de las estrellas*. Fondo de cultura económica, México, 1992.
- [3] Bruno B. Rossi. *Cosmic Rays*. McGraw Hill, Nueva York, EU, 1964.
- [4] Michael W. Friedlander. *Cosmic Rays*. Harvard University Press, Boston, EU, 1989.
- [5] Jesús Alvarez Castillo. Efectos de las tormentas eléctricas en los rayos cósmicos detectados en la superficie terrestre. Tesis de Maestría, Instituto de Geofísica UNAM, 2008.



Construcción del antiguo observatorio de Rayos C3smicos de Ciudad Universitaria.

«The subject [of cosmic rays] is unique in modern physics for the minuteness of the phenomena, the delicacy of the observations, the adventurous excursions of the observers, the subtlety of the analysis, and the grandeur of the inferences ».

Karl K. Darrow

Detección de rayos cósmicos y el Observatorio de RC en Ciudad Universitaria

El Observatorio de rayos cósmicos ubicado en Ciudad Universitaria forma parte de una red de más de cincuenta observatorios distribuidos en todo el mundo. Dependiendo del lugar donde se encuentren los detectores, la intensidad y cantidad de energía de la radiación cósmica detectada será afectada por el campo magnético de la Tierra. Detectores localizados a bajas latitudes registran un menor número de partículas, mientras que detectores localizados cerca de los polos magnéticos de la Tierra registran una mayor cantidad. A este efecto se le conoce como *efecto latitudinal*. La cantidad y distribución de observatorios de RC, nos ayuda a mapear la llegada de la radiación cósmica a nuestro planeta[1].

Los métodos que se utilizan para la detección de rayos cósmicos son diversos y con ayuda de tecnologías modernas se ha logrado decifrar la información que estos *mensajeros* nos traen desde el universo. Sin embargo, no siempre ha sido así. Las técnicas empleadas para determinar la magnitud y naturaleza de este fenómeno han tenido que cruzar un largo camino, y una serie de mejoras tras fuertes dificultades en la historia.

El presente capítulo está dedicado al estudio de los detectores de radiación cósmica; su historia y evolución, así como la contribución que ha hecho la Universidad Nacional Autónoma de México.

2.1. Rescatando rayos cósmicos

Se requiere un flujo de 10^{19} *electrones* por segundo para producir una corriente de 1A de intensidad. Un tostador eléctrico convencional requiere de 10A para su funcionamiento. En contraste, el arribo de una partícula de RC por

segundo constituye una corriente de $10^{-19} A$. En otras palabras, no es fácil medir la masa, carga y velocidad de una partícula que pesa menos de $1,67 \times 10^{-27} kg$. Luego entonces, ¿cómo puede una partícula de tan pequeñas dimensiones ser detectada?

Una partícula cargada se puede detectar a través de la ionización que produce. Como se explicó en el capítulo anterior, los RC colisionan con núcleos de átomos atmosféricos produciendo iones. La ionización que una partícula produce, depende de la razón Z^2/v^2 [2], donde Z representa la carga eléctrica de la partícula y v su velocidad. Esta razón nos indica que partículas con menor velocidad provocan mayor ionización, debido a que su campo eléctrico tiene mayor tiempo para interactuar con el medio, lo que no sucede con aquellas de mayor velocidad.

Los RC poseen energía cinética que es la fuente de la energía que se ocupa para la ionización. Durante la trayectoria de una partícula, ésta cede energía al chocar con la estructura atómica de la materia. Finalmente, cuando toda su energía cinética ha sido transferida, la partícula queda en reposo. A la distancia que la partícula recorrió antes de detenerse, se le nombra *rango*.

Si podemos medir la energía cinética de la partícula a través del *rango* y su velocidad mediante el nivel de ionización producido, entonces podemos conocer la carga y la masa de dicha partícula. Con base en esto, se busca que un detector de RC nos brinde la información necesaria para poder caracterizar la radiación cósmica.

Los detectores de partículas se pueden clasificar en dos grupos dependiendo de la información que nos brinden. El primer grupo de detectores se caracteriza por mostrar la *traza* de la trayectoria de la partícula; permitiendo medir el rango de forma directa y registrar el nivel de ionización.

El segundo tipo de detectores tan solo mide el nivel de ionización. Si se desea conocer la traza de la partícula es posible utilizar más de un detector y *registrar* el paso de la partícula a través de ellos.

Uno de los primeros instrumentos que se utilizó para el estudio de la radiación cósmica fue el *electroscopio*. Este instrumento nos ofrece una medida del flujo total de RC y fue ampliamente utilizado para determinar las variaciones de la intensidad de RC a diferentes alturas.

Un electroscopio común se compone de dos placas de oro suspendidas sobre una barra metálica y contenidas en un recipiente de vidrio sellado herméticamente. La parte superior de la barra se encuentra fuera del recipiente y al entrar en contacto con un material cargado las láminas de oro se repelen. Tras retirar el material cargado, el electroscopio pierde su carga gradualmente y las láminas terminan en su posición inicial. Este efecto se presenta sin importar el gas con el que este lleno el recipiente. Hasta la década de los treinta personajes

como Arthur Compton y Robert Millikan utilizaron esta herramienta en sus investigaciones.

Arthur Compton, años más tarde, ocupó la *cámara de ionización* para medir las variaciones de la intensidad de RC a diferentes latitudes (Fig. 2.1). La *cámara de ionización* es un instrumento que, al igual que el electroscopio, sólo nos permite medir el flujo total de RC. Está conformada por un contenedor esférico, lleno de Argón, y blindado con placas de Bronce para evitar la contaminación por radioactividad local. En la parte interior de la cámara se encuentra un electrodo conectado a una fuente de alto voltaje (Fig. 2.2). Cuando una partícula penetra el blindaje, ioniza el gas y los iones positivos y negativos son acelerados, por el alto voltaje, hacia el contenedor y el electrodo, respectivamente. Como consecuencia de esto se produce una pequeña corriente eléctrica que puede ser medida por medio de un amperímetro.



Figura 2.1: Dr. Arthur Compton abordo del HMS Aorangi, el cual llevaría los instrumentos de Compton de las costas de Canadá hasta Australia para medir las variaciones de RC.

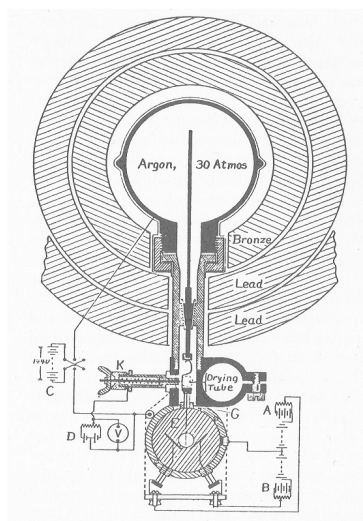


Figura 2.2: Cámara de ionización.

(Fig. 2.3).

Al instrumento que desarrolló Geiger, se le llama “contador” debido a que cada partícula que pasa por él produce un pulso idéntico, permitiendo contar las partículas pero sin decirnos nada sobre su energía.

En 1911 Hans Geiger inventó un instrumento contador de partículas: *Contador Geiger*. Dicho contador está constituido por un alambre delgado que cruza un cilindro de metal y está aislado de tal manera que no toca al cilindro. Entre el tubo y el alambre se conecta una batería de muy alto voltaje. El principio de funcionamiento es muy similar al dispositivo que ocupó Compton; no obstante, el voltaje que se ocupa para polarizar el tubo es mucho más grande que el de una cámara de ionización[3]. Esto provoca que en el circuito, que se forma entre el alambre, el gas y el cilindro, circule una pequeña corriente y al colisionar una partícula dentro de él se produce un pulso eléctrico. A este régimen de operación se le conoce como *saturación*

Los *contadores proporcionales* son contadores Geiger que no operan en su punto de saturación, es decir, trabajan a voltajes menores de aproximadamente 1200V[3]. Esto permite conocer la energía de la partícula, porque al no llegar a la saturación, las partículas que llegan a ionizar el gas producen un pulso cuya amplitud y ancho dependen de su energía y del tiempo de relajación del gas.

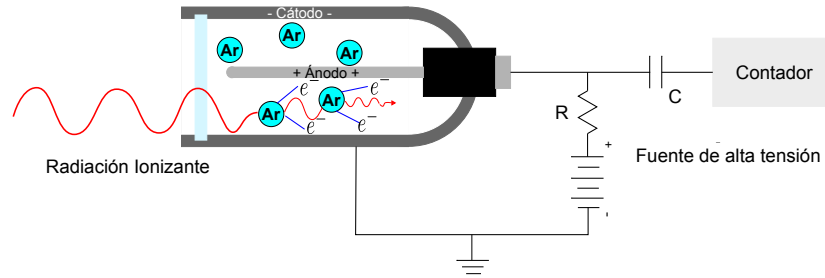


Figura 2.3: Diagrama del funcionamiento de un contador Geiger.

De forma general podemos concebir la cámara de ionización, el contador Geiger y el contador proporcional, como *tubos de descarga* polarizados a diferentes niveles de voltaje. En la figura 2.4 se muestran las regiones de operación del *tubo de descarga* con respecto a su voltaje de alimentación. La región A es el punto de operación de la cámara de ionización. En la región B operan los contadores proporcionales. Finalmente en la región C trabajan los contadores Geiger.

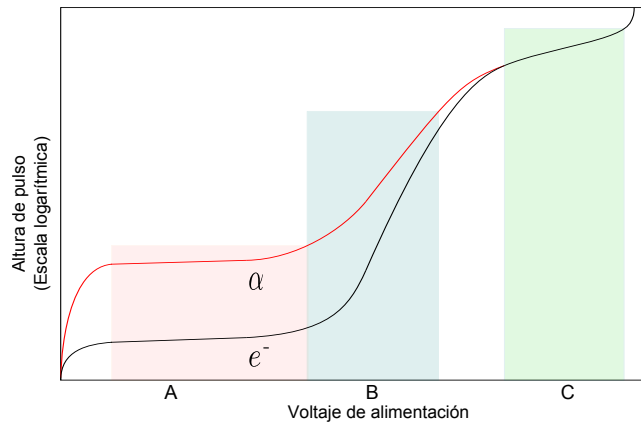


Figura 2.4: Magnitud del pulso de salida de un tubo de descarga como función del voltaje de alimentación. La curva roja muestra la respuesta a una partícula α mientras que la curva negra muestra la respuesta a un e^- .

Uno de los primeros detectores capaz de trazar la trayectoria de una partícula recibió el nombre de *cámara de niebla* y fue inventado por Charles Thomson Wilson (Fig. 2.5). En su forma más sencilla, una cámara de niebla es un recipiente que contiene vapor de agua saturado a bajas temperaturas. Cuando

una partícula cargada interacciona con el vapor, lo ioniza. Los iones resultantes actúan como núcleos de condensación alrededor de los cuales se forman gotas de agua. Al paso de la partícula se va produciendo su traza. Esta traza tiene una forma distintiva, es decir, la traza de una partícula α es ancha y recta, mientras que la de un *electrón* es más fina. La implementación de esta tecnología trajo consigo el descubrimiento del *positrón* (e^+) y del *muon* (μ).

Como las cámaras de niebla se disparaban de forma aleatoria, era muy difícil tener trazas de rayos cósmicos. Fue Bruno Rossi el que desarrolló una técnica para mejorar la sensibilidad de un telescopio RC. Usando dos contadores Geiger en fila, es posible generar una señal de *coincidencia* cuando una partícula pasa por ambos detectores. Si se sabe que las partículas de RC provienen de una dirección, la señal de coincidencia nos permite descartar contar partículas con trayectorias no permitidas. Años después la cámara de niebla se usaría en conjunto con los contadores Geiger para mejorar la técnica.



Figura 2.5: Cámara de niebla de Wilson en el museo del Laboratorio Cavendish, en la universidad de Cambridge.

El primer registro de trazas de rayos cósmicos primarios se hizo por medio del llamado *método fotográfico*[2]. Cuando la luz cae en una emulsión fotográfica produce una reacción química que se muestra después de un tratamiento conocido como revelado. Al incidir una partícula cargada en la emulsión se produce un cambio similar, y su traza se observa después del revelado. El ancho de la traza es directamente proporcional al nivel de ionización que la partícula produce. Las partículas masivas y con mayor velocidad producen trazas gruesas y de trayectoria recta (Fig. 2.6(a)). Partículas de menor masa y menor velocidad producen trazas más angostas y trayectorias dispersas (Fig. 2.6(b)).

Las emulsiones fotográficas fueron utilizadas en experimentos de alta montaña, en los Pirineos y en la cordillera de los Andes. En 1950, Cecil Powell aplicando el método fotográfico probó la existencia del *pion*.

Con el advenimiento de la Segunda Guerra Mundial y la revolución electrónica, se crearon nuevos sistemas de detección capaces de medir la cantidad de energía de una partícula y con un tiempo de respuesta mucho menor.

Los *centelladores* están formados por un material que al ser impactado por una partícula cargada emiten luz. Disponiendo de un elemento transductor, tal como un tubo fotomultiplicador —PMT por sus siglas en inglés—, cada una de estas emisiones de luz puede ser detectada y transformada en una señal eléctrica[4].

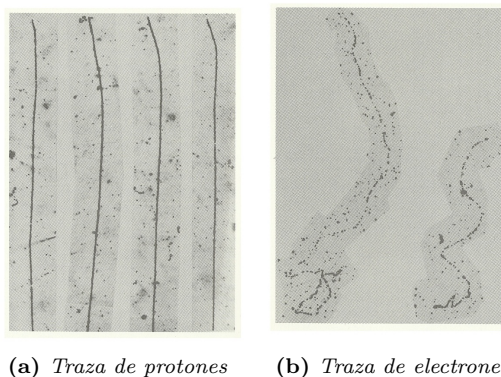


Figura 2.6: Trazas de partículas obtenidas por medio de emulsiones fotográficas.

Por otro lado, los *contadores Cherenkov* se utilizan para detectar partículas de muy alta velocidad. Estas partículas al pasar a un medio donde su velocidad supera la velocidad de la luz, emiten radiación electromagnética que puede ser detectada por tubos fotomultiplicadores.

Hasta aquí se ha dado un panorama general del avance de los equipos para la detección de rayos cósmicos, sin embargo, es materia del presente trabajo hacer alusión al *Super Monitor de Neutrones*.

2.2. El Super Monitor de Neutrones

Entre 1948 y 1950 John Alexander Simpson de la Universidad de Chicago diseñó el monitor de neutrones IGY —International Geophysical Year—. Este detector fue estandarizado en el año Geofísico Internacional —1957— para medir las variaciones de intensidad de radiación cósmica cerca de la tierra. Se colocaron más de una docena en distintas localidades del mundo, entre ellas: Colorado, Perú, México, Sacramento y Chicago. Uno de los monitores de neutrones IGY más destacados fue el de Climax, Colorado. Instalado en 1950, tiene más de 60 años operando en forma continua, lo que lo hace el detector de neutrones más antiguo del mundo.

El monitor IGY usa contadores proporcionales, de 86cm de largo y 4cm de diámetro, y puede producir una razón de conteo de hasta 25000 cuentas por hora[5].

En 1964 Hugh Carmichael diseñó el Super Monitor de Neutrones NM64 y fue el detector de rayos cósmicos estándar en el congreso International Quiet Sun Year —IQSY—. En comparación con el detector IGY, el Super Monitor es de dimensiones mayores y tiene una resolución de hasta 750000 cuentas por

hora.

El NM64 se compone de cuatro partes fundamentales: *productor*, *moderador*, *reflector* y *contador proporcional* (Fig 2.7).

Los neutrones que se detectan en el monitor son producidos localmente por anillos de plomo que cubren a los contadores proporcionales[5]. La producción de neutrones es función de la densidad atómica del anillo y de la desintegración nuclear —reacción nuclear que ocurre cuando un núcleo pesado se divide en dos o más núcleos pequeños—. Se ocupa plomo como *productor* debido a que su producción es ocho veces mayor que si se ocupará carbón.

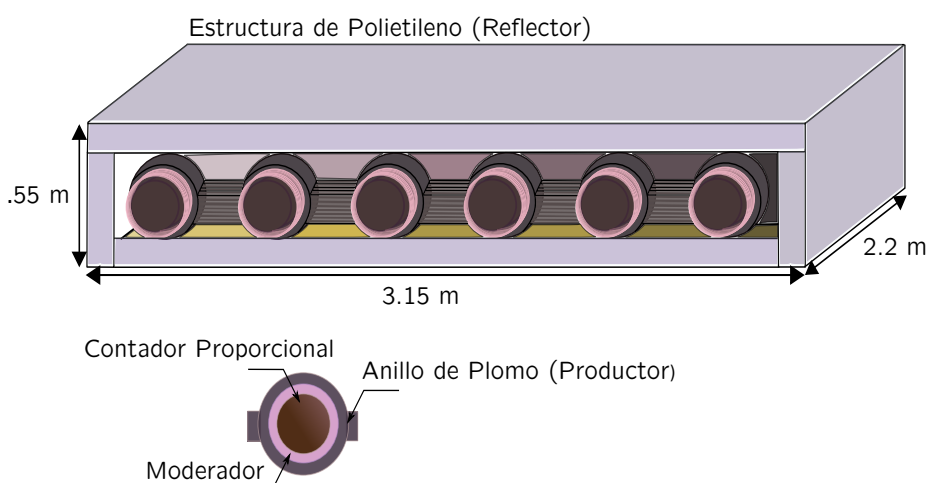


Figura 2.7: Esquema del monitor de Neutrones 6-NM64

El *moderador*, en el caso del NM64, es una capa de polietileno que rodea a los contadores proporcionales. El objetivo de éste es disminuir la velocidad de los neutrones incidentes en los contadores y así poder aumentar la probabilidad de que éstos sean detectados.

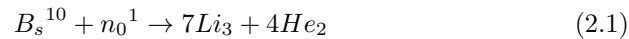
Los materiales utilizados como moderador deben tener una masa atómica baja, lo cual se consigue a través de compuestos que contienen hidrógeno, como la parafina, agua o polietileno.

Alrededor del moderador, los contadores proporcionales y el productor, se pone un armazón de polietileno que sirve como *reflector*. Esta capa de polietileno impide que los neutrones creados en el productor escapen y que los neutrones de baja energía producidos en el exterior del monitor afecten la respuesta del mismo.

El principio de funcionamiento del Super Monitor de Neutrones se basa en una reacción química que se produce dentro de los contadores proporcionales.

En el interior de cada contador se encuentra BF_3 gaseoso enriquecido al 96 % con B^{10} a una presi3n de 0,27bar.

Los neutrones al llegar al interior del tubo producen una reacci3n qu3mica exot3rmica con el Boro, cuyo resultado son n3cleos de *Litio* y *Helio* (Ec. (2.1)). Las part3culas de Helio son recolectadas en el c3todo del cilindro y provocan una corriente el3ctrica que puede ser detectada.



En un 94 % de las reacciones que se llevan a cabo dentro del contador los productos tienen una energ3a de 2,3MeV y en el resto de ellas de 2,78MeV. Aun cuando en el 77 % de los casos, el total de part3culas producidas son originadas por neutrones, existen otras part3culas que al arribar al tope del detector producen pulsos adicionales. El 15 % de los pulsos totales es producido por protones, el 7 % por muones y el 1 % por piones y otras part3culas inestables[6].

El monitor cuenta con tres unidades el3ctricamente independientes y cada unidad puede estar formada por 1, 2, 3 o 6 contadores de BF_3 . De acuerdo a esto, un monitor se identifica con el n3mero total de contadores, es decir; un monitor con un s3lo contador por secci3n es llamada 3 – NM64, uno con dos contadores por secci3n 6 – NM64, uno con tres contadores por secci3n 9 – NM64 y uno con seis 18 – NM64.

La mayor parte de las cuentas, en el monitor, se debe a radiaci3n c3smica, N_{cr} , pero existe una peque1a tasa de cuentas, N_f , que es producida por interferencias el3ctricas. La N_f debe ser constante si los contadores funcionan adecuadamente.

N_f representa alrededor del 1 % del total de las cuentas en un monitor de gran altura —2400m al nivel del mar— y menor al 1 % a nivel del mar. Si el monitor se encuentra cerca del ecuador Terrestre, la N_f se incrementa hasta 1,8 % [7].

2.3. El observatorio de Rayos C3smicos

El Insituto Carnegie en 1946 instal3 en la Ciudad de M3xico una c3mara de ionizaci3n, la cual ser3a el primer detector de radiaci3n c3smica operando en forma continua en nuestro pais.

Ocho a1os m3s tarde la Universidad de Chicago, con motivo del A1o Geof3sico Internacional, don3 un monitor IGY y fue instalado en el *Pabell3n de Rayos C3smicos* en Ciudad Universitaria. A cargo de este proyecto se encontraba Oscar Troncoso en colaboraci3n con la Dr. Ruth Gall —de nacionalidad Polaca

y naturalizada mexicana, qui3n fund3 el departamento del Espacio Exterior en el Instituto de Geof3sica de la UNAM.



Figura 2.8: Estaci3n de rayos c3smicos Javier Alejandro Otaola Lizarzaburu.

En 1964, con equipo donado por el Dr. John Bland de la Universidad de Calgary, el Instituto de Geof3sica comenz3 la instalaci3n de un monitor de neutrones NM64 en las afueras de Ciudad Universitaria (Fig. 2.8 y 2.9). Este nuevo monitor trabajar3 en conjunto con el monitor IGY hasta principios de 1975.

Para 1970 los encargados de ambas estaciones de rayos c3smicos eran los f3sicos; Oscar Troncoso, Gerardo Centeno y Alejandro Hurtado.

El monitor IGY utilizaba un sistema de adquisici3n de datos basado en un contador mec3nico. Una c3mara cinematogr3fica tomaba pel3cula del registro del contador cada 15 minutos. Los datos contenidos en esta pel3cula, eran posteriormente procesados por los encargados de la estaci3n.

En 1975 el monitor IGY fue desmantelado y el Pabell3n de Rayos C3smicos paso a ser propiedad de la Facultad de Odontolog3a de la UNAM. Actualmente el monitor IGY se encuentra en exhibici3n en el museo de Geof3sica de la Ciudad de M3xico en Tacubaya.

Desde su instalaci3n, el monitor NM64 recogi3 datos en forma similar al monitor IGY pero con un tiempo de acumulaci3n de 5min. Sin embargo, la operaci3n del monitor no era la adecuada debido a errores en su construcci3n.



Figura 2.9: Monitor 6NM64 instalado en el observatorio de CU.

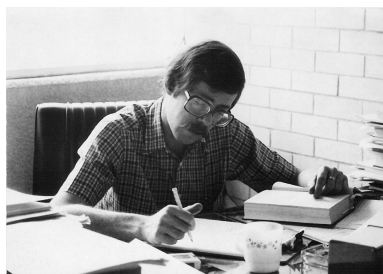


Figura 2.10: *Dr. Javier Alejandro Otaola Lizarzaburu*

A principios de 1976 el Dr. Javier Alejandro Otaola Lizarzaburu (Fig. 2.10) se hace cargo del observatorio, tras un estudio de la calidad de los datos del monitor, decide desmantelar el NM64 y comenzar su reconstrucción hacia el año de 1982.

Los siguientes siete años el observatorio de Rayos Cósmicos entra en una etapa de modernización y mantenimiento, y con la colaboración del Ing. Octavio Musalem Clemente se desarrolla un sistema de adquisición de datos basado en tecnología digital (Fig. 2.11 y 2.12).

Dentro del proceso de modernización se reconstruyen los anillos de plomo del detector, las placas de polietileno y los datos pasan a almacenarse en cintas magnéticas. Años más tarde, con la participación del Físico Alejandro Hurtado, se logra almacenar los datos en una PC.

Para 1989, el Dr. Javier Alejandro Otaola Lizarzaburu determina que el funcionamiento del monitor es correcto y en 1990 se publican por primera vez los datos obtenidos en el monitor.



Figura 2.11: *Ing. Octavio Musalem trabajando en la construcción del nuevo sistema de adquisición de datos.*

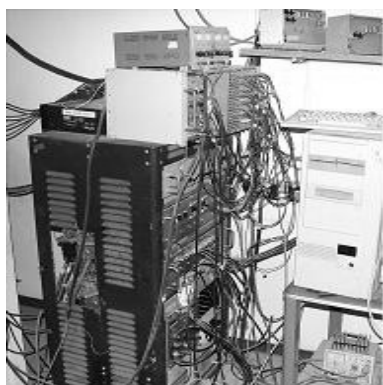


Figura 2.12: *Sistema de adquisición de datos diseñado por el Ing. Octavio Musalem.*

Hacia el año 1995 el Dr. Javier Alejandro Otaola Lizarzaburu fallece y se hace cargo del observatorio el Dr. José Francisco Valdés-Galicia, que había sido alumno suyo años atrás.

Con la dirección del Dr. José Francisco Valdés-Galicia se instaló un telescopio de muones en el observatorio de Rayos Cósmicos —a partir del año 2008 se encuentra trabajando en forma continua— y en el año 2003 se comenzó la instalación de un telescopio de *neutrones solares* en Sierra Negra, Puebla.

Finalmente, el trabajo realizado en el observatorio ha contribuido de manera considerable a la investigación de los rayos cósmicos. Durante los últimos 21 años, el monitor ha sido testigo fiel de

la actividad solar y ha esclarecido los misterios de un Sol activo y un Universo en movimiento.

Algunas de las aportaciones del observatorio a la comunidad cient3fica son:

- Detecci3n de protones solares de hasta 15GeV el 29 de septiembre de 1989. Fue el evento solar m1s grande que se ha podido detectar en los 3ltimos a1os.
- Detecci3n del evento de neutrones solares del 24 de mayo de 1990[8]. Este hallazgo fue crucial para establecer definitivamente la posibilidad de detectar neutrones solares en la superficie terrestre.
- Hallazgo de una variaci3n de 115 d3as en el ciclo solar[5].
- An1lisis de los efectos de campos el3ctricos atmosf3ricos en los rayos c3smicos detectados en la superficie[9].
- En 1995 investigadores de la Universidad de Roma utilizaron los datos del monitor de M3xico para calibrar los detectores utilizados en un recorrido latitudinal[10] [11].

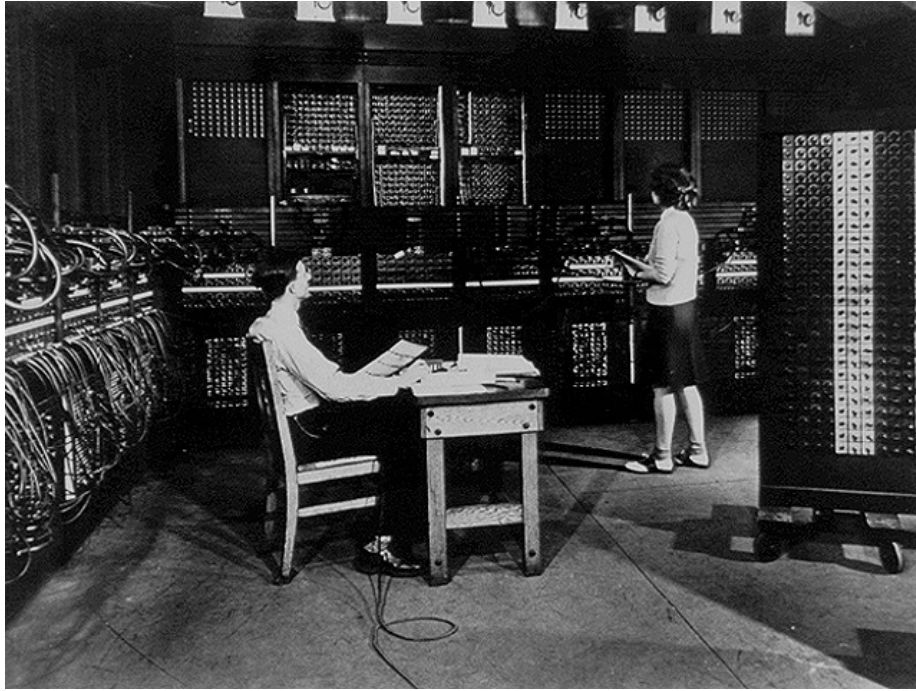
Adem1s de estas aportaciones, con datos del observatorio se han producido: una tesis de doctorado, tres tesis de maestr3a y dos de licenciatura. Actualmente se estan realizando m1s trabajos de investigaci3n.

El monitor se encuentra en una localidad de $19,33^\circ$ latitud, $99,18^\circ$ de longitud y 2274m sobre el nivel del mar, detectando part3culas con una rigidez umbral de $8,23\text{GV}$ y trabajando las 24hrs del d3a, los 365 d3as del a1o. Sus datos pueden consultarse en tiempo real por internet —<http://132.248.105.25>— y es considerado uno de los detectores de neutrones m1s estables del mundo.

Referencias

- [1] Javier A. Otaola y José F. Valdés-Galicia. *Rayos cósmicos: mensajeros de las estrellas*. Fondo de cultura económica, México, 1992.
- [2] Michael W. Friedlander. *Cosmic Rays*. Harvard University Press, Boston, EU, 1989.
- [3] Raghbir S. Khandpur. *Handbook of modern analytical instruments*. Tab Books, Blue Ridge Summit, 1981.
- [4] Jesús Alvarez Castillo. Efectos de las tormentas eléctricas en los rayos cósmicos detectados en la superficie terrestre. Master's thesis, Instituto de Geofísica UNAM, 2008.
- [5] Rogelio A. Caballero López. *Estudio de las fluctuaciones de la radiación cósmica detectadas en la superficie terrestre durante los ciclos solares 22 y 23*. PhD thesis, Instituto de Geofísica UNAM, 2001.
- [6] E. B. Hughes y P. L. Marsden. Response of a standard igy neutron monitor. *Journal of Geophysical Research*, 71:1435–1444, 1966.
- [7] H. Carmichael y M. Bercovitch. Analysis of iqsy cosmic-ray survey measurements. *Canadian Journal of Physics*, 47:2073–2093, 1966.
- [8] C. R. Barrat H. Debrunner, J. A. Lockwood *et al.* Energetic neutrons, protons and γ rays during the 1990 may 24 solar cosmic-ray event. *The astrophysical journal*, 479:997–1011, 1997.
- [9] Luis X. González Méndez. Efectos de los campos eléctricos atmosféricos en los rayos cósmicos detectados en la superficie terrestre. Master's thesis, Instituto de Geofísica UNAM, 2003.

- [10] L. I. Dorman N. Lucci, G. Villoresi and M. Parisi. Cosmic-ray survey to antarctica and coupling functions for neutron component near solar minimum (1996-1997) 2. meteorological effects and correction of survey data. *Proceedings ICRC, 1997 Salt Lake City*, 7:321, 1997.
- [11] L. I. Dorman N. Lucci, G. Villoresi and M. Parisi. Determination of neutron monitor barometric effect on the base of the altitude cosmic-ray intensity dependence as measured by the israelo-italian mobile laboratory. *Proceedings ICRC, 1997 Salt Lake City*, 7:371, 1997.



ENIAC I fue una de las primeras computadoras utilizadas en el estudio de Rayos C3smicos.

«When you can measure what you are speaking about, and can express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind . . . ».

William Thomson, 1st Baron Kelvin

Adquisición de datos: un acercamiento a los rayos cósmicos

En los capítulos anteriores se mostró un panorama general de la naturaleza de la radiación cósmica y la relevancia de su estudio. También se detallaron las técnicas que se emplean para la detección de este fenómeno y, de particular importancia para este trabajo, el *Super Monitor de Neutrones NM64*. Sin embargo, el objetivo de este trabajo es el *diseño e implementación de un nuevo sistema de adquisición de datos para el Observatorio de Ciudad Universitaria*.

El sistema de adquisición de datos del Observatorio de Rayos Cósmicos de Ciudad Universitaria tiene más de veinte años en operación y actualmente presenta algunos problemas en su funcionamiento. Debido a que trabaja de forma continua, no es posible realizar operaciones de mantenimiento con frecuencia. El diseño del sistema actual está basado en tecnología TTL de bajo consumo —*Transistor-Transistor Logic*— de principios de los años ochenta, lo cual lo hace un sistema grande y complejo. Muchos de los circuitos integrados que se ocuparon para su construcción ya no se encuentran disponibles comercialmente.

Para llevar a cabo nuestro objetivo, comenzaremos por definir que es un sistema de adquisición de datos, de manera más precisa, su constitución y utilidad. En este punto, se enfatiza la diferencia entre un sistema de adquisición de datos para la detección de radiación cósmica y un sistema convencional. Una vez visto lo anterior, investigaremos los recursos con los que contamos para el diseño y construcción.

3.1. ¿Qué es un sistema de adquisición de datos?

No siempre es posible recoger información de los fenómenos naturales de manera directa, por lo que se necesitan sensores que nos den información que se pueda leer y analizar. Para muchos de estos fenómenos se requiere de un registro confiable de su comportamiento, pues es fundamental conocer su evolución temporal. Esto justifica la necesidad de la *adquisición de datos*.

Existen diversas definiciones de lo que es un sistema de adquisición de datos —SDAQ. En forma general un SDAQ es cualquier sistema automático capaz de procesar la información proveniente de un sensor, o conjunto de ellos, y registrarla en algún tipo de memoria permanente. En la actualidad los tipos de memoria permanente más utilizados son los digitales.

3.1.1. Partes que componen un SDAQ convencional

En los sistemas de adquisición de datos convencionales se realizan tres procesos básicos; *acondicionamiento*, *conversión analógica-digital* —ADC— y *almacenamiento*. Para efectuar estas tareas, un SDAQ cuenta con otros elementos que intervienen en la comunicación entre dispositivos y el control de la adquisición. A dichos elementos nos referiremos como *bus de datos* y *software de adquisición*, respectivamente.

Acondicionamiento

El propósito del acondicionamiento es tomar la salida de un sensor y convertirla en una señal utilizable para las siguientes etapas del procesamiento. Normalmente consiste de circuitos electrónicos que realizan una o más de las siguientes funciones: amplificación, cambio de nivel, filtrado y acoplamiento de impedancias. Además, en algunos circuitos, el acondicionamiento de la señal nos brinda aislamiento entre el sensor y el resto del sistema.

Conversión Analógica-Digital

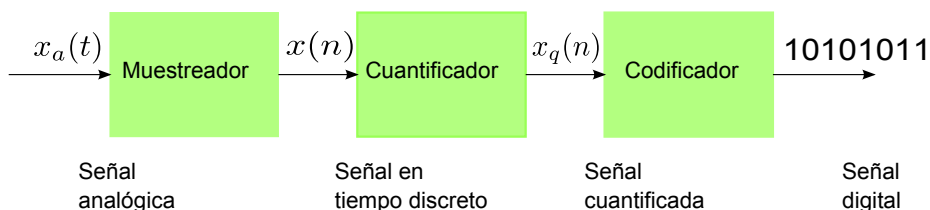


Figura 3.1: Esquema de un convertidor Analógico-Digital

La conversión analógica-digital consiste en realizar de forma periódica mediciones de la amplitud de una señal —muestreo—, redondear sus valores a

un conjunto finito de niveles preestablecidos de tensión —cuantificación— y registrarlos como números, mediante la asignación de algún tipo de código —codificación—(Fig. 3.1).

El proceso ADC, en la mayoría de los casos, es fundamental si se desea almacenar la información en algún tipo de memoria digital. Para el caso de SDAQ's de radiación cósmica, este proceso no es necesario y en secciones siguientes se explicará porque.

Almacenamiento

El almacenamiento de datos es el registro de la información, proveniente de un sensor, en una memoria permanente. La importancia de este proceso es hacer posible el objetivo principal de un SDAQ, es decir, estudiar la evolución temporal de algún fenómeno físico. Luego entonces, sí contamos con el almacenamiento de dichos datos en un dispositivo y podemos acceder a ellos, logramos tener una herramienta importante para la investigación de cualquier evento.

La capacidad y tipo del dispositivo de almacenamiento, depende principalmente de la cantidad de información que se requiere analizar y del tiempo de respuesta del dispositivo. El tiempo de respuesta, lo definimos como el tiempo que el dispositivo tarda en guardar cierta cantidad de datos.

Bus de datos

La comunicación entre los elementos que componen al sistema de adquisición, se lleva a cabo por medio de un *bus de datos*.

Se le denomina comunmente bus de datos al conjunto de cables que transfiere información entre un número de dispositivos. El uso de un bus en un sistema pone limitaciones en su desempeño debido a sus características. Entre estas características están la capacidad de información que puede transferir el bus y la distancia máxima entre los elementos que se quiere comunicar.

Cuando se requiere comunicar dispositivos a una mayor distancia, se prefiere el uso de un bus serial. En un bus de datos serial, la información se transfiere por un solo cable; el inconveniente de ocupar una comunicación serial es su baja capacidad para transmitir información.

No obstante, si se necesita una mayor capacidad de transmisión; se puede utilizar un bus paralelo. En un bus paralelo, la información se transmite por un número mayor de cables. Con el inconveniente de que a grandes distancias, esta configuración se vuelve poco práctica.

Software de adquisición

Actualmente muchos sistemas de adquisición de datos cuentan con comunicación directa a una computadora personal —PC. La computadora personal facilita el almacenamiento y procesamiento de la información. Para que esta tarea se realice de forma satisfactoria, el SDAQ debe de contar con software apropiado que permita su comunicación y control. El software que se utiliza depende de la aplicación, ya que cada adquirente puede realizar diferentes tipos de tareas.

Normalmente existen dos niveles de software. En primera instancia se tiene un controlador o software de bajo nivel que comunica al SDAQ con la PC. El controlador permite que el sistema operativo de la PC reconozca el dispositivo que se conecta, brinda funciones básicas de comunicación; por su parte la computadora asigna una dirección al dispositivo y recursos de memoria. El tipo de controlador depende del bus de datos que exista entre la computadora y el sistema de adquisición.

Por otra parte, existe un lenguaje de alto nivel encargado de gestionar las demás rutinas que se envían al sistema. Las rutinas básicas de las que se encarga este tipo de software están directamente relacionadas con la operación del sistema. Ejemplos de rutinas básicas son: encender, apagar, iniciar, detener y reiniciar. Dentro del mismo software se puede programar una interfaz gráfica que ayude a visualizar los datos, de tal manera que la operación del sistema y el acceso a la información sea más simple[1].

3.2. Sistemas de adquisición de datos para RC

Un sistema de adquisición de datos es una parte importante en cualquier sistema de detección de radiación cósmica. La acumulación de datos nos permite estudiar la variación del flujo de partículas energéticas en el tiempo.

El diseño de cualquier SDAQ, en gran medida, depende de su aplicación. La naturaleza discreta del fenómeno de radiación cósmica hace que los SDAQ's utilizados para este estudio, se diferencien de muchos sistemas convencionales.

El conteo de pulsos es la operación más utilizada en la investigación de RC. En un monitor de neutrones, cada partícula que arriba a los detectores produce un pulso cuya magnitud es proporcional a la energía liberada por la reacción nuclear que se lleva a cabo dentro de los detectores. Luego entonces, la intensidad de la radiación cósmica, en la localidad del detector, puede ser estimada a través del conteo de los pulsos generados por los contadores proporcionales. Un diagrama básico de un sistema que puede ser utilizado para realizar estas tareas se presenta en la figura 3.2.

Antes de realizar cualquier operación con la señal proveniente de los detecto-

res, es necesario pasar dichas señales por una etapa de acondicionamiento, como ya se explicó en puntos anteriores.

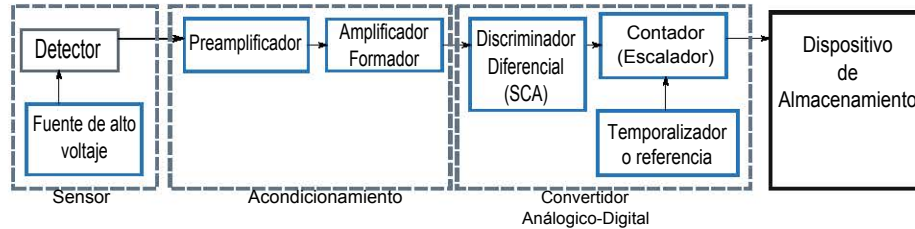


Figura 3.2: Sistema de adquisición de datos para RC.

La primera etapa de acondicionamiento es la preamplificación. Un preamplificador es un amplificador cuyo principal objetivo es acoplar la señal de salida del detector al resto del sistema. Ya que los detectores normalmente no entregan una señal con suficiente potencia, el preamplificador debe de ser capaz de dar la potencia necesaria a la señal para que esta pueda ser transmitida al resto del equipo de adquisición[2].

Desde del punto de vista de la Razón Señal-Ruido —SNR es una medida utilizada para cuantificar la contaminación de una señal por ruido—, siempre es preferible minimizar la carga capacitiva a la salida del preamplificador, debido a que cualquier carga capacitiva conectada a la salida del preamplificador provoca atenuación en las señales. Evitar cables de conexión largos entre el detector y el preamplificador ayuda a maximizar la razón señal-ruido.

Convencionalmente, un preamplificador no debe alterar la forma del pulso, es decir, debe mantener la información contenida en la amplitud, forma y duración de éste. A la salida del preamplificador debe haber un pulso de mayor amplitud, pero que tiene los mismos tiempos de levantamiento y caída. Por esta razón se debe buscar que la impedancia de salida del preamplificador sea mínima, ya que cualquier impedancia en conjunto con la de los cables puede producir atenuación o distorsión en la señal.[3]

La siguiente etapa de acondicionamiento es la amplificación-formación, la cual se realiza después de que la señal ha sido transmitida por medio del cable. El objetivo de esta etapa es conformar al pulso y darle amplitud. La señal saliente del preamplificador es un pulso muy angosto que tiene tiempos de levantamiento y caída muy pequeños; no es útil para extraer la información de la energía de la partícula contenida en la altura del pulso.

Para poder medir la altura del pulso con precisión, es necesario incrementar los tiempos de levantamiento y caída del pulso (Fig. 3.3). Esto se logra haciendo pasar los pulsos a través de filtros pasa-bajas[3].

Una vez que se logra tener una mejor resolución en la amplitud, en caso de requerirse mediciones con mucha exactitud, es necesario mejorar la SNR de la señal. Si este es el caso, se prefiere aumentar la duración de los pulsos en vez de incrementar su amplitud, debido a los problemas de distorsión que esto puede ocasionar.

Con objeto de contar los pulsos de manera confiable, deben ser convertidos a pulsos lógicos. Un discriminador es la unidad más sencilla que puede realizar esta operación y consiste principalmente de un dispositivo que produce una señal de niveles lógicos. Estos niveles se producen, si y sólo si, la amplitud de dicha señal se encuentra dentro de una ventana de referencia. A este tipo de discriminador se le denomina discriminador diferencial o analizador de un solo canal —SCA.

Dentro de los niveles lógicos de voltaje que se ocupan en los sistemas de detección de radiación cósmica se encuentran, los estándares: NIM, TTL y ECL.

- El estándar NIM —Nuclear Instrumentation Modules— establece un nivel lógico bajo definido por $100mV$ y un nivel lógico alto definido entre $-600mV$ y $-1,6V$.
- El estándar TTL —Transistor-Transistor Logic— es el estándar lógico más utilizado. En contraste con el NIM, el estándar TTL esta definido sólo en términos de voltaje: un voltaje de $0V$ a $0,8V$ corresponde a un nivel lógico bajo, mientras que un nivel de voltaje entre $2V$ y $5V$ corresponde a un nivel lógico alto.
- El estándar ECL —Emitter Coupled Logic— define sus valores de $-1,6V$ a $-1,4V$ para el nivel lógico bajo y de $-1,2V$ a $0V$ para el nivel lógico alto.

Los umbrales para la ventana de referencia se establecen con base en el rango de energías de RC que se desea estudiar. Se debe recordar que los contadores proporcionales pueden ser activados por interferencias eléctricas y otras partículas de baja energía. El uso de un discriminador nos garantiza que los pulsos contados son consecuencia de la radiación cósmica.

Como paso final en un sistema de conteo, los pulsos lógicos deben ser acumulados y el número de ellos registrado por un periodo finito de tiempo[3]. En los sistemas de conteo de pulsos aplicados a RC, los dispositivos que realizan esta tarea comúnmente se denominan *escaladores*, por razones históricas. Actualmente es más común referirse a este tipo de dispositivos como *contadores*.

Los contadores pueden ser operados en dos modos: por tiempo fijo y por cuentas fijas. En el modo de tiempo fijo, el periodo de conteo es controlado por

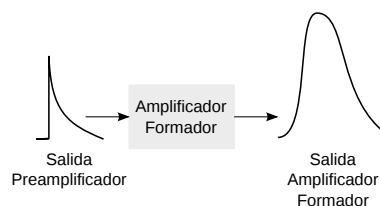


Figura 3.3: Principio básico de funcionamiento de un amplificador-formador.

un temporizador externo, el cual indica cuando se requiere almacenar las cuentas registradas y reiniciar los contadores.

En el modo de cuenta fija, los contadores acumulan cuentas hasta que se alcance un máximo preestablecido. En este punto, el periodo de conteo finaliza y se reinician los contadores.

Finalmente la salida del contador es enviada a un tipo de memoria permanente para su posterior análisis y almacenamiento. Actualmente el método de almacenamiento más confiable es a través de una computadora personal.

Estos son los elementos esenciales que componen un sistema de adquisición de datos para RC. En la siguiente sección se discutirá sobre los recursos disponibles para la implementación de un sistema capaz de realizar las funciones aquí mencionadas.

3.3. Tecnologías para la implementación de SDAQ's para RC

Esencialmente existen tres formas en las que se puede diseñar un sistema de adquisición de datos para RC: utilizando *instrumentos modulares*, diseñando sistemas de aplicación específica y por último, se encuentra la posibilidad de, construir un sistema híbrido, en el cual se combinan los sistemas modulares y algunos dispositivos de aplicación específica.

La revisión aquí presente, solo contempla las dos primeras opciones.

3.3.1. SDAQ's basados en instrumentos modulares

Los instrumentos modulares son muy populares en los ámbitos industriales y científicos, por su fácil aplicación. La idea básica es construir un sistema de adquisición de datos completo conectando módulos individuales. La ventaja más clara de este tipo de sistemas es su costo reducido y el poco tiempo que requieren en su diseño e implementación. La principal desventaja radica en las restricciones impuestas por el fabricante en las especificaciones del producto y la dependencia que se genera en el usuario al ajustar sus necesidades a la oferta del fabricante.

Entre los instrumentos modulares más comúnmente utilizados para la detección de RC se encuentran: NIM, CAMAC y VME.

El estándar NIM

El estándar NIM —Nuclear Instrumentation Modules— se desarrolló en 1964 con la idea de introducir al mercado módulos reemplazables que pudieran ser

utilizados en forma conjunta para realizar las tareas de adquisición de datos.

Un sistema NIM consiste de dos partes principales; el NIM *crate* (Fig. 3.4(a)) y los módulos NIM (Fig. 3.4(b)). El NIM *crate* es un chasis voluminoso en el cual se pueden conectar los módulos NIM y proveerlos de alimentación eléctrica[2]. Además, el NIM *crate* proporciona un bus de datos que permite la comunicación entre los módulos, aunque la comunicación que se logra es muy limitada — sólo tiene líneas para habilitar y reestablecer los módulos. Los módulos NIM se conectan al bus de datos mediante conectores especiales llamados *conectores NIM*.

En total se pueden conectar hasta 12 módulos NIM al NIM *crate* que en conjunto pueden consumir hasta un máximo de 1900W.

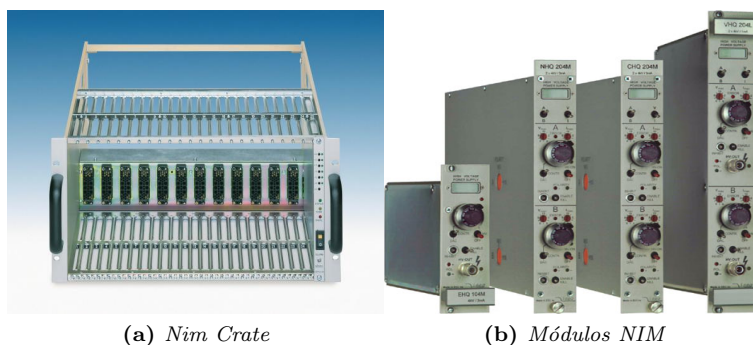


Figura 3.4: Partes que integran un sistema NIM.

El estándar NIM no se adapta a situaciones en las que se requiere procesar grandes cantidades de datos digitales, debido a que el NIM *crate* está limitado en la cantidad de módulos NIM que puede soportar. Asimismo, una de las deficiencias del estándar NIM es no contar con una conexión directa a la PC. Estas consideraciones han llevado a la implementación de una interfaz estándar entre SDAQ's y PC's y el desarrollo del estándar CAMAC.

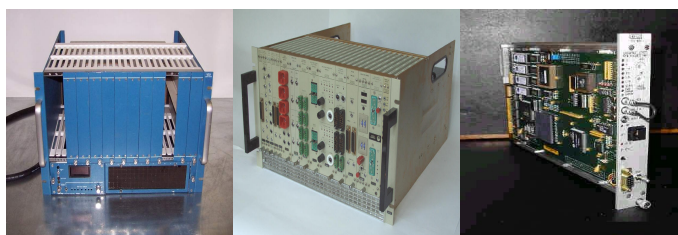
El estándar CAMAC

El estándar CAMAC —Computer Automated Measurement and Control— fue desarrollado en 1969. Cuenta con una arquitectura mucho más versátil que la NIM pero mucho más complicada en su implementación. El estándar CAMAC cuenta con una interfaz directa a la PC y con ella se pueden dar comandos a cada uno de los módulos.

Los módulos CAMAC se conectan a un CAMAC *crate* (Fig. 3.5(a)); el cual puede alojar hasta 24 módulos CAMAC (Fig. 3.5(b)). Una parte fundamental del sistema CAMAC es el módulo denominado *crate controller* (Fig. 3.5(c)).

El *crate controller* es una parte integral del sistema ya que es el encargado de controlar la adquisición y el envío de datos a la computadora. No puede ser reemplazado por ningún otro módulo[2].

El estándar CAMAC maneja un tamaño de palabra de 24bits y puede transmitir una tasa de 3MB/s .



(a) CAMAC Crate (b) DAQ CAMAC (c) Crate controller

Figura 3.5: Partes que integran un sistema CAMAC.

El bus de datos del CAMAC *crate* consiste en líneas: de control, datos, direcciones y que pueden suministrar alimentación al resto de los módulos. La potencia total del sistema no debe sobrepasar los 200W .

CAMAC utiliza el estándar lógico TTL, pero con la convención de niveles altos y bajos invertida, es decir, un nivel de tensión alto corresponde a un nivel lógico bajo y viceversa.

El estándar VME

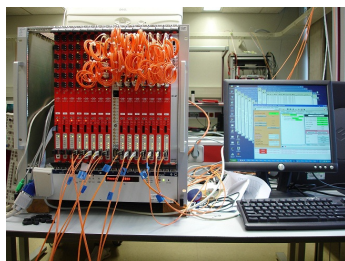


Figura 3.6: Sistema de adquisición de datos basado en VME.

En 1981 Motorola y otras compañías elaboraron el estándar VME —VERSAmodule Eurocard. La motivación principal detrás de la creación de VME era introducir en la instrumentación modular el concepto de alta densidad de computo[2].

El estándar VME maneja un tamaño de palabra de 32bits y cuenta con un modo de direccionamiento de 64bits . También cuenta con conexiones que pueden ser definidas por el usuario y un mejor esquema de tierras. Puede transferir datos a una tasa de 80MB/s .

Un VME *crate* tiene espacio para 20 módulos individuales y un *crate manager* que cumple con las funciones del *crate controller* CAMAC. En conjunto el sistema puede consumir hasta 200W . En la figura 3.6 se muestra un ejemplo de un sistema VME completo.

El bus de datos que utiliza VME cuenta con líneas para: alimentación eléctrica, datos, direcciones e interrupciones.

VME cumple con las especificaciones del estándar TTL y puede aceptar otros tipos de señales lógicas mediante el uso de módulos especiales que se integran al sistema.

3.3.2. Sistemas de aplicación específica

A principios de la década de los ochenta los avances en las tecnologías de fabricación de circuitos integrados llevaron al desarrollo de los circuitos integrados de aplicación específica —ASIC. Microcircuitos que podían realizar las funciones básicas de amplificación, comparación de voltaje, codificación y almacenamiento de información fueron combinados en ASIC's para realizar las funciones de preamplificación, discriminación y conteo, entre otras. Esto permitió la introducción de un nuevo modelo en la instrumentación nuclear y la creación de nuevos sistemas de detección de radiación con una mayor complejidad.

No obstante, el diseño de sistemas basados en ASIC's implica una gran inversión, ya que requieren de un enorme tiempo en su elaboración y un proceso de fabricación muy costoso. Por estas razones, el uso de ASIC's en sistemas de detección de RC, se limita a proyectos de gran magnitud.

Para sistemas de pequeña a mediana escala, el diseño de *sistemas embebidos*, basados en microcontroladores —MCU— o dispositivos lógicos programables —PLD— es una buena opción. Algunos autores definen sistema embebido como; un sistema que contiene software y hardware, que está diseñado para realizar una aplicación específica. Sin embargo, una definición más general sería la siguiente: un sistema embebido es un dispositivo, instrumento o sistema, que está construido para realizar una o más tareas específicas sin requerir elementos adicionales a los dispuestos en él. Los sistemas embebidos tienen la ventaja de consumir menos potencia que los sistemas digitales basados en componentes discretos, también ocupan un menor espacio, lo cual facilita su construcción.

Un microcontrolador (Fig. 3.7) es un circuito integrado que incluye en su interior las tres unidades fundamentales que componen una computadora: unidad central de procesamiento, memoria y unidades de E/S[4].

Los microcontroladores son utilizados en el desarrollo de sistemas embebidos debido a su flexibilidad en la programación, tamaño reducido y menor costo —en comparación con elementos discretos. El tamaño de la unidad central de procesamiento, la cantidad de memoria y los periféricos incluidos dependen de la aplicación.

En lo que respecta a la flexibilidad de programación, se han desarrollado diversos tipos de lenguajes de programación para microcontroladores. Los más

utilizados son: ensamblador, BASIC y C[5].

Para desarrollar un sistema embebido basado en MCU se debe elegir un MCU tomando en cuenta los siguientes criterios:

- Tamaño y tipo de memoria.
- Número de líneas de E/S.
- Módulos de control de periféricos.

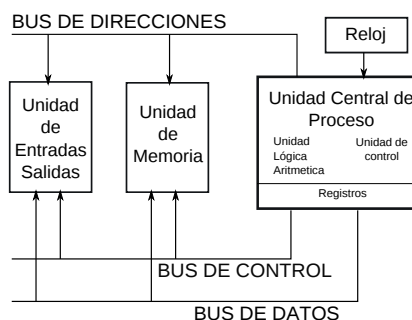


Figura 3.7: Arquitectura básica de un microcontrolador.

Tras la elección del microcontrolador, es necesario desarrollar la descripción detallada del funcionamiento del sistema, utilizando diagramas de flujo, y seleccionar un lenguaje de programación. Una vez que se tiene el diagrama de flujo, se debe transcribir el código utilizando el lenguaje escogido.

Debido a que la adquisición de datos de RC requiere procesar un gran número de señales en forma simultánea, los sistemas embebidos basados únicamente en microcontroladores resultan ser ineficientes y poco prácticos. En este campo de estudio, es más común encontrar sistemas embebidos que empleen un conjunto de microcontroladores de bajo costo o una combinación entre microcontroladores y dispositivos lógicos programables[6] [7].

Un dispositivo lógico programable es un circuito integrado de uso general que sirve para implementar sistemas digitales. Un PLD es un dispositivo que contiene una cierta cantidad de arquitecturas lógicas genéricas —básicamente compuertas lógicas y flip-flops— que se pueden configurar —interconectar— para establecer en su interior diversas arquitecturas más complejas y con independencia de operación —procesos concurrentes.

Dentro de este tipo de dispositivos existen diversas familias. Cada familia tiene su propia arquitectura interna y son de diversa capacidad.

Hace aproximadamente tres décadas la principal limitante de los PLD's se encontraba en su limitada capacidad para sintetizar funciones lógicas. Hoy en día, debido a los avances en el diseño y construcción de circuitos integrados, se cuenta con dispositivos de muy alta escala de integración. Esta tecnología permite el diseño de sistemas digitales complejos.

Un FPGA —Field-Programmable Gate Array— es un dispositivo lógico programable —PLD—, con alta escala de integración, que permite reproducir desde funciones tan sencillas como las llevadas a cabo por una compuerta lógica, o un sistema combinacional, hasta complejos sistemas en un chip, como lo pueden ser sistemas de computo de alto desempeño, procesamiento digital de señales e imágenes médicas, entre otros.

La arquitectura básica de un FPGA se compone de los siguientes elementos: bloques lógicos —un bloque lógico permite sintetizar funciones lógicas—, bloques de E/S y canales de enrutamiento.

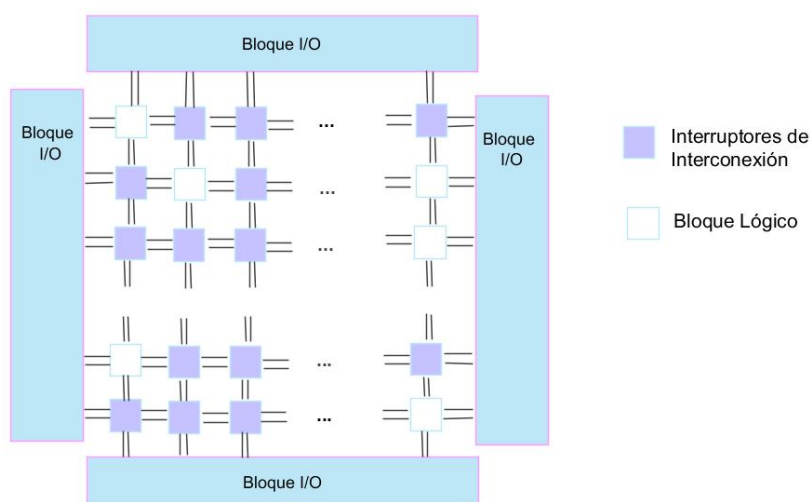


Figura 3.8: *Arquitectura de un FPGA.*

Para diseñar sistemas embebidos basados en FPGA's, se requiere definir la función lógica que realiza cada uno de los bloques lógicos, seleccionar el modo de trabajo de cada bloque de E/S e interconectarlos.

Se cuenta con la ayuda de entornos de desarrollo especializados para el diseño de sistemas en FPGA's. La forma de diseño más común es mediante el uso de un lenguaje de descripción de hardware o HDL —Hardware Description Language. Se puede definir un HDL como un lenguaje que permite la descripción formal y diseño de un circuito electrónico. Puede describir la operación del circuito, su organización y verificar su comportamiento por medio de simulaciones numéricas. Algunos ejemplos de HDL's son: VHDL, Verilog y System C.

Dentro de las grandes ventajas que ofrecen los PLD's se encuentra su capacidad de realizar procesos de manera concurrente e independiente. Un sistema diseñado en un PLD tiene la posibilidad de efectuar varios procesos al mismo tiempo. En un problema en donde se requiera el manejo de múltiples entra-

das y salidas, y un gran número de operaciones independientes se prefiere la utilización de PLD's.

Otro factor importante para la elección de los dispositivos lógicos programables son las ventajas de trabajar con un HDL. Los HDL's son lenguajes que son independientes de la plataforma de desarrollo y del tipo de dispositivo que se elija, a diferencia de los microcontroladores. La elección de un HDL para el desarrollo de cualquier proyecto, brinda la posibilidad de realizar modificaciones en un futuro sin estar limitados por la plataforma de desarrollo o el tipo de dispositivo que se utilice.

Por el otro lado, el diseño con PLD's suele ser más demandante en términos de tiempo ya que se requiere un mayor tiempo de diseño, programación, simulación, prueba y depuración. En conjunto con esto, los altos precios de este tipo de tecnología hacen que este tipo de soluciones sean más costosas que su contraparte en MCU's.

Actualmente la tecnología de PLD's es muy empleada para los sistemas de adquisición de datos para radiación cósmica. Ejemplos de esto son el sistema de adquisición de datos ocupado en HAWC —High Altitude Water Cherenkov—[8] y el SDAQ del arreglo de Telescopios de la Universidad de Tokyo Japón[9], entre otros.

Referencias

- [1] Carlos Chicala. *Adquisición de datos - Medir para conocer y controlar*. Soluciones en control S.R.L., Buenos Aires, Argentina, 2004.
- [2] Syed Naeem Ahmed. *Physics and engineering of radiation detection*. Elsevier, Reino Unido, 2007.
- [3] Glenn F. Knoll. *Radiation detection and measurement*. John Wiley and sons, Inc., Nueva York, EU, 2000.
- [4] Christian Tavarnier. *Les microcontrôleurs 4 et 8 bits*. DUNOD, Francia, 1995.
- [5] Eugenio Martín Cuenca y José María Angulo Usategui. *Microcontroladores PIC*. Paraninfo, España, 1998.
- [6] Saito Katsuhiko. 8+8n channels monitoring system with pic microcontrollers on scintillation counters for cosmic ray observation. *Research Reports Ashikaga Institute of Technology*, 36:53–60, 2003.
- [7] S. Hansen *et al.* Low-cost data acquisition card for school-network cosmic ray detectors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 51:926–930, 2004.
- [8] L. Villaseñor *et al.* Measurement of the response of water cherenkov detectors to secondary cosmic-ray particles in the hawc engineering array using a fast custom-made daq system. *Proceedings ICRC, LODZ 2009*, 31, 2009.
- [9] A. Taketa *et al.* The trigger and daq system of the surface detector array of the telescope array experiment. *Proceedings ICRC, LODZ 2009*, 31, 2009.

*Yo no sabía que decir, mi boca
no sabía
nombrar,
mis ojos eran ciegos,
y algo golpeaba en mi alma,
fiebre o alas perdidas,
y me fui haciendo solo,
descifrando
aquella quemadura,
y escribí la primera línea vaga,
vaga, sin cuerpo, pura
tontería,
pura sabiduría
del que no sabe nada,
y vi de pronto
el cielo
desgranado
y abierto,
planetas,
plantaciones palpitantes,
la sombra perforada,
acribillada
por flechas, fuego y flores,
la noche arrolladora, el universo.*

Fragmento: *La poesía*
Pablo Neruda

El nuevo sistema de adquisición de datos del Observatorio de Rayos Cósmicos

Hasta el momento hemos analizado las particularidades que un sistema de adquisición de datos para RC presenta. El siguiente paso es planear y proyectar el diseño del nuevo adquirente de datos. Comenzaremos por mencionar los requerimientos técnicos del proyecto y las necesidades que este debe de cubrir.

En el caso del observatorio de rayos cósmicos de Ciudad Universitaria, el siguiente diagrama ilustra la distribución de los elementos que componen al SDAQ (Fig. 4.1).

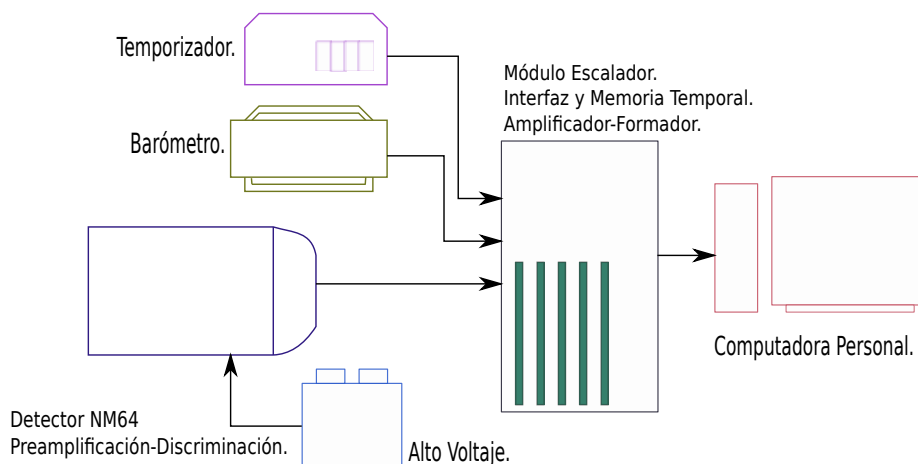


Figura 4.1: Sistema de adquisición del observatorio de RC en CU.

Se puede observar que el sistema, cumple con las características mencionadas

en la sección 3.2. Es importante notar que la función de almacenamiento de datos se lleva a cabo por medio de una PC y el modo de operación del sistema es en tiempo fijo, es decir, existe un módulo temporizador que lleva el control del tiempo de adquisición. Por medio de este tiempo se establecen los periodos de conteo y almacenamiento del SDAQ.

El nuevo sistema de adquisición debe cumplir con el mismo principio de funcionamiento. En el diseño no se considera, por el momento, la modernización de la etapa de preamplificación y discriminación ya que su funcionamiento es correcto.

El requerimiento más importante del diseño es fundamentar el proyecto sobre tecnología moderna. La principal razón tras esta idea es garantizar un mejor desempeño y prolongar su vida útil.

Igualmente, para prologar la vida útil del equipo y con vista hacia los nuevos retos que se presenten en el observatorio, se explorará la posibilidad de crear un instrumento que facilite su reproducción y rediseño.

De los elementos que componen el sistema, el temporizador es uno de los más importantes y requiere un cuidado especial en su diseño. En el observatorio de rayos cósmicos en CU, la tarea de temporización se realiza mediante un oscilador electrónico y un contador digital. Tal circuito presenta el inconveniente de tener desviaciones en su frecuencia de operación y por lo mismo, variaciones en el tiempo de adquisición. Estas variaciones provocan que los datos de fecha y hora sean incorrectos. En consecuencia, se tiene la necesidad de ajustar periódicamente la frecuencia del temporizador y los datos de hora y fecha. La meta en el nuevo adquisidor, es lograr que el ajuste se realice de forma automática. Con esto se logrará una mejor autonomía, lo cual es deseable pues el sistema debe trabajar las 24hrs del día, los 365 días del año.

Hasta ahora, no se ha explicado la utilidad de contar con un sensor de presión en el sistema —Fig 4.1. La importancia de este módulo reside en la influencia directa que ejerce la presión atmosférica sobre la radiación cósmica —Sección 1.1.2. Sí al mismo tiempo que obtenemos los datos de radiación, sensamos la presión, podemos realizar el ajuste correspondiente en las cuentas, para alcanzar un estimado de la intensidad de la radiación cósmica sin el efecto atmosférico. El observatorio de rayos cósmicos en CU cuenta con un barómetro digital para realizar este trabajo. Dicho instrumento es confiable por lo que se buscará seguir obteniendo datos de él.

Contar con un mejor estimado pone al observatorio a la vanguardia y nos brinda información confiable. Una de las desventajas del NM64 es el *tiempo muerto* que se genera tras el arribo de una partícula. Durante este tiempo, el detector es incapaz de producir un nuevo pulso si se presenta otra partícula. Como consecuencia, sólo se genera un pulso de mayor duración. A este fenómeno se le conoce como *multiplicidad del detector* y se relaciona directamente con el

tiempo de relajación que sufre el gas tras ser ionizado. El nuevo adquisidor de datos contempla superar este obstáculo distinguiendo entre los pulsos de duración normal y aquellos que sobrepasan un umbral temporal.

Finalmente, en el nuevo diseño, la PC no sólo sirve como medio de almacenamiento, sino que realiza otras funciones. Entre estas funciones la más importante es el control de la adquisición de datos. El control de la adquisición consiste en una serie de instrucciones que permiten: iniciar la adquisición, detener la adquisición, transferir la información, cambiar el tiempo de adquisición y reestablecer las condiciones iniciales del sistema. En el caso de realizar pruebas o diagnósticos, una herramienta de diagnóstico muy útil es la generación de gráficas y despliegue de información. El uso de la PC facilita al usuario estas operaciones.

La exposición previa tiene la intención de plantear el problema a resolver y encaminarnos hacia la toma de decisiones. Se han expresado los requerimientos y necesidades del observatorio, así como los recursos con los que se cuenta. Es momento de plantear la pregunta; ¿qué camino tomar?.

4.1. ¿Qué camino tomar?

Sí comparamos las características que nos ofrecen los instrumentos modulares y los sistemas de aplicación específica, son claras las ventajas que nos proporciona el diseño a la medida.

La ventaja mas evidente del diseño a la medida, se encuentra en los productos que se obtienen durante el desarrollo del proyecto. Además de contar con un equipo que satisface nuestras necesidades, en el proceso de diseño se generan diagramas eléctricos, documentación y software. Dicha información es valiosa, debido a que facilita la comprensión del funcionamiento del sistema y proporciona material necesario para su mantenimiento, producción y rediseño.

En el caso de que el diseño se hiciera con algún sistema comercial no se contaría con estos beneficios. Por otro lado, sería necesario ajustar el equipo a nuestras necesidades debido a que ningún sistema cumple al cien por ciento los requerimientos expuestos.

De los sistemas de aplicación específica sólo se encuentra a nuestro alcance el desarrollo de sistemas embebidos basados en microcontroladores —MCU— o dispositivos lógicos programables —PLD— ya que los sistemas basados en ASIC's son demasiado costosos.

Un sistema embebido, desarrollado bajo cualquiera de estas tecnologías, puede cumplir con las necesidades del observatorio. Sin embargo, se prefiere el desarrollo de sistemas embebidos basados en PLD's por las siguientes razones:

Procesos simultáneos e independientes. Esta característica puede ser explotada de manera muy eficiente en el diseño del sistema. Como se explicó con anterioridad, el monitor NM64 está compuesto de contadores proporcionales y cada uno de ellos entrega un tren de pulsos. El procesamiento de la información de cada uno de estos contadores se realiza de manera simultánea e independiente.

Facilidad en el rediseño del sistema. La elección del tipo de dispositivo depende en gran parte de su capacidad de sintetizar funciones lógicas — número de celdas lógicas. Sí se requiere agregar un mayor número de módulos al sistema, es decir, otros procesos que trabajen de forma independiente, únicamente se demandaría un dispositivo de mayor capacidad.

Independencia entre el tipo de dispositivo y HDL's. Como ventaja extra hacia el futuro del sistema, se tiene la flexibilidad que nos brindan los HDL's con respecto a la elección de la plataforma de desarrollo y tipo de dispositivo —Veáse Sección 3.3.2.

Por último, debemos enfatizar la capacidad de los PLD's para realizar diseños cien por ciento a la medida.

4.2. Concepción del sistema

Para comenzar el diseño, se requiere tener un panorama general del funcionamiento de nuestro sistema. Podemos visualizar nuestro sistema como una *caja negra*, cuyo contenido es desconocido. Se distinguen dos tipos de señales: aquellas que se desean procesar —señales de entrada— y aquellas señales que son resultado del procesamiento —señales de salida.

El primer grupo comprende la señal proveniente del monitor NM64 —el funcionamiento de este detector fue detallado en el capítulo dos— y la señal proveniente del sensor de presión Meteolabor AG GB1.

Consideraremos dos señales más, la señal de tiempo y la señal de usuario. La primera servirá para llevar el control del tiempo de adquisición, el periodo de tiempo durante el cual se acumulan los datos antes de almacenarlos y reiniciar el proceso. La señal usuario es el conjunto de instrucciones que da dirección al sistema sobre las tareas a realizar.

Como resultado del procesamiento se espera obtener: número de partículas que atraviesan el detector por unidad de tiempo —cuentas sencillas—, estimado del número de partículas que no se logra contar debido a la multiplicidad del detector o *cuentas múltiples* —este punto se retomará más adelante—, datos de

presión atmosférica, fecha, hora y gráficas con el despliegue de información que permitan diagnosticar el funcionamiento del detector de neutrones.

El siguiente paso del diseño fue determinar los módulos que constituyen nuestra *caja negra*. El funcionamiento de cada uno de estos subsistemas será descrito por medio de sus entradas y salidas (Fig. 4.2).

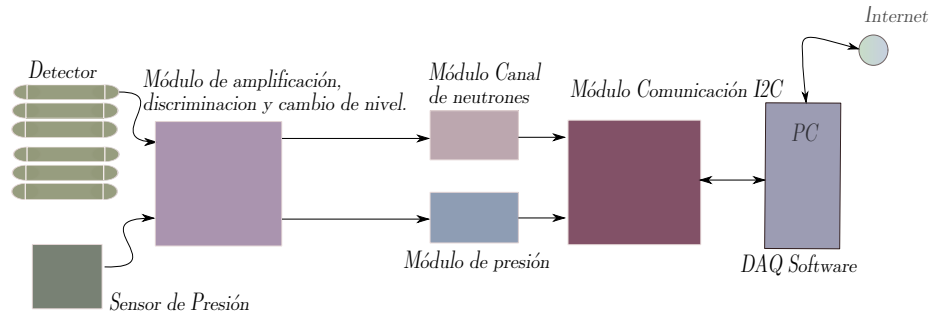


Figura 4.2: Módulos que componen al nuevo sistema de adquisición de datos.

Un módulo será el encargado de procesar la señal del detector y producir la información de cuentas múltiples y cuentas sencillas, dicho módulo tiene por nombre, módulo de *canal de neutrones*.

Otra parte del sistema lleva por nombre *módulo de presión*. Este módulo recibe la señal del sensor Meteolabor AG GB1 y como resultado del procesamiento se obtienen los datos de presión atmosférica.

El módulo de *canal de neutrones* no puede trabajar directamente con la señal proveniente del monitor NM64 ya que esta señal, además de ser de bajo nivel, contiene ruido eléctrico y otras interferencias. Por esta razón, previo al conteo de pulsos, es necesario agregar una etapa de acondicionamiento.

De la misma forma se requiere acondicionar la señal del sensor de presión para poder trabajar con ella.

Al módulo que nos proporciona la conexión entre el sensor de presión y el módulo de presión, el NM64 y el módulo *canal de neutrones*, se le denomina *módulo de amplificación, discriminación y cambio de nivel*.

Es importante recordar que los datos deben ser almacenados de forma periódica. Como se mencionó anteriormente, se utilizará una PC como medio de almacenamiento, control del sistema y despliegue de información. De esta manera, es necesario contar con un módulo que facilite la comunicación entre la PC y el resto del sistema —*módulo de comunicación I²C*. La entrada al módulo es la información de cuentas múltiples, cuentas sencillas y datos de presión atmosférica. A la salida se tiene una trama de datos que pueden ser procesada por la computadora.

Para que la PC ejecute las funciones mencionadas, se necesita de un software especializado, al que nos referiremos como *módulo de software de adquisición*. Como entrada de este módulo se tiene: la señal de tiempo, la cual se obtiene de un servidor; la señal de usuario y la trama de datos. Como salida se tiene: señales de control, gráficas con despliegue de información y datos de fecha y hora.

Los módulos que se encargan de procesar las señales provenientes del monitor NM64, el sensor Meteolabor AG GB1 y el módulo de comunicación I^2C , se sintetizarán a través del dispositivo lógico programable.

Por esta razón, el diseño del módulo *canal de neutrones* se hará considerando una sola entrada, es decir, solo se tomará en cuenta la señal de un contador proporcional. Al final, aprovechando las propiedades de los PLD's, se replicará este módulo para cubrir la cantidad de contadores necesaria.

Una vez precisados los requerimientos del diseño, las necesidades a cubrir y haber delineado la concepción del proyecto, continuaremos con la exposición del diseño de cada uno de los módulos y su interconexión. El funcionamiento del sistema, pruebas y resultados será motivo del capítulo final de esta tesis.

4.3. Módulo de comunicación I^2C

Retomando lo expuesto en la sección anterior, el objetivo principal del módulo de comunicación I^2C es facultar al sistema de adquisición de datos con una interfaz de comunicación. Tal interfaz comunica dispositivos periféricos con una computadora personal.

Previo a la descripción de este módulo, profundizaremos en el protocolo de comunicación I^2C , protocolo sobre el cual basamos nuestro diseño.

4.3.1. ¿Qué es el bus I^2C ?

El bus *Inter-Integrated Circuit* — I^2C — es un bus de comunicaciones serie que permite la comunicación entre diversos dispositivos conectados al bus y que normalmente se encuentran en la misma placa de circuito. Actualmente es una de las interfaces de comunicación serie más utilizadas y ha sido integrada en más de mil circuitos integrados diferentes. Entre sus aplicaciones se encuentran: lectura de sensores de diagnóstico dentro de una PC, lectura de relojes en tiempo real, encendido y apagado de fuentes de voltaje de un sistema, entre otras.

El estándar fue desarrollado por Phillips a finales de los años 80's y cuenta con las siguientes características:

Interfaz de comunicación serie. El I^2C utiliza dos líneas de comunicación: *SCL* y *SDA*. La línea *SCL* proporciona un reloj de referencia para la

transferencia de datos. La línea *SDA* asegura que los datos serie estén sincronizados con los cambios de la señal de reloj.

Protocolo de comunicación sincrona. La transferencia de datos siempre es iniciada por un dispositivo que denominaremos *maestro*. Por medio de una señal de reloj, que genera el maestro, se sincroniza la transferencia de información.

Cumple con el modelo maestro-esclavo. El dispositivo maestro controla la señal de reloj e inicia y finaliza la comunicación. Esta señal dicta los tiempos de transmisión en el bus. Los esclavos no tienen control alguno sobre la comunicación.

Transferencia de datos bidireccional. La información en el bus puede fluir en cualquier dirección: de maestro a esclavo o de esclavo a maestro.

Por otra parte, el bus soporta velocidades de transmisión de 100kbits/s en el modo estándar y hasta 400kbits/s en modo rápido. El bus I^2C puede acceder hasta 128 dispositivos conectados a él.

Existen varias razones que hacen al bus I^2C idóneo para nuestro proyecto. La principal razón yace en su estructura sencilla, que requiere de pocos elementos. Esto implica que su síntesis en un PLD es factible.

Otra ventaja se encuentra en la gran cantidad de dispositivos que incluyen una interfaz I^2C y su facilidad para ser interconectados al bus. Dentro de estos dispositivos se encuentran: sensores de presión, temperatura, de campo magnético y relojes en tiempo real. Estos módulos bien podrían ser útiles en un futuro.

Dentro de los inconvenientes que presenta el bus se encuentran su baja velocidad de transmisión y corta distancia de interconexión. Para nuestro diseño ninguno de estos presenta una limitante.

4.3.2. Protocolo de comunicación I²C

Las líneas *SDA* y *SCL* se conectan a un voltaje positivo por medio de una resistencia de *pull-up* (Fig. 4.3). Esta resistencia es necesaria ya que los dispositivos que se conectan al bus son de *Open Drain*. Esto quiere decir que a su salida tienen un transistor de efecto de campo sin polarización. Este transistor se comporta como un interruptor; cuando el dispositivo quiere enviar un *uno lógico*, el transistor se conecta en alta impedancia; cuando el dispositivo quiere enviar un *cerro lógico*, el transistor se conecta a 0V.

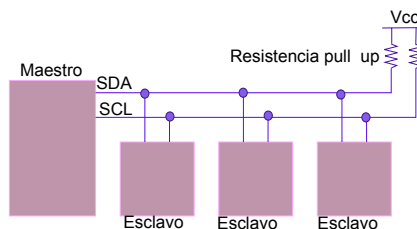


Figura 4.3: Conexión de dispositivos al bus.

Esta consideración es importante si se desea diseñar un dispositivo que se conecte al bus.

El protocolo de comunicación I²C (Fig. 4.4) se expone en los siguientes pasos:

1. Antes de la transmisión, la línea *SCL* y *SDA* se encuentran en nivel alto. Sí el maestro desea iniciar la transferencia, genera una condición de *START*. Esta condición se define como la transición de nivel alto a nivel bajo de la línea *SDA*, mientras la línea *SCL* permanece en alto.
2. EL maestro genera nueve pulsos de reloj en la línea *SCL*. En los primeros siete pulsos, en la línea *SDA* se encuentra la dirección del esclavo con el que se desea establecer la comunicación. Cada esclavo tiene una dirección única en el bus. El octavo bit indica al esclavo qué operación desea realizar el maestro. Sí el valor de *SDA* es bajo, el maestro desea escribir en el esclavo; sí el valor es alto el maestro desea leer datos del esclavo.
3. Si la dirección enviada por el maestro es reconocida por algún esclavo conectado al bus, éste pone en nivel bajo la línea *SDA*. Esto sucede durante el noveno pulso generado por el maestro y se conoce como *ACKNOWLEDGE* —*ACK*. En caso de que el maestro no reciba el *ACK* por parte de un esclavo, la comunicación finaliza.
4. Después de que el maestro recibe el *ACK*, la comunicación puede seguir dos caminos distintos:
 - Sí el maestro va a escribir en el esclavo, genera los pulsos necesarios para transmitir los datos a grabar, en paquetes de *8bits*. Al finalizar cada paquete el maestro genera un pulso de reloj extra para que el esclavo conteste con un *ACK*.

- Sí el maestro va a leer datos del esclavo, genera los pulsos necesarios para que el esclavo envíe la información que el maestro está esperando. Tras cada *byte* recibido, el maestro genera un pulso de reloj extra y le informa al esclavo que recibió el dato.
5. Para finalizar la transmisión, el maestro genera la condición de *STOP*. Esta condición se define como la transición de nivel bajo a nivel alto en *SDA* mientras *SCL* está en nivel alto. La condición de *STOP* también se genera cuando el maestro no recibe *ACK* de ningún esclavo.

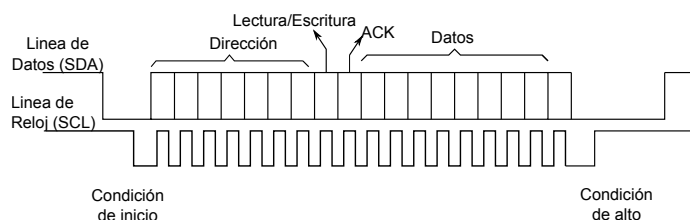


Figura 4.4: Protocolo de comunicación I²C

Sólo el maestro puede generar las condiciones de *START* y *STOP* en el bus. Solamente en estas condiciones se permite un cambio de *SDA* mientras *SCL* está en alto. En cualquier otro caso *SDA* debe mantener un valor constante cuando *SCL* esté en nivel alto.

4.3.3. Descripción del módulo I²C

En todo esquema de comunicación I²C, lo primero es definir el dispositivo maestro y los dispositivos esclavos. En el caso de nuestro proyecto la PC ocupará el lugar del maestro y el resto del sistema —Módulo *canal de neutrones* y Módulo de *presión*— figura como esclavo.

La elección del maestro, conviene al proceso de adquisición de datos debido a que la PC lleva el control del tiempo de adquisición y recibe las instrucciones por parte del usuario.

En conclusión, la descripción del módulo de comunicación I²C en el PLD corresponde a la configuración del esclavo. La especificación del maestro en la PC se reanudará en una sección posterior.

El módulo de comunicación I²C se compone de tres subsistemas: *startstop*, *asmi2c* y *control* (Fig. 4.5). Estos elementos trabajando en conjunto tienen como tarea responder con *ACK* cuando el maestro invoque al esclavo a través de su dirección, recibir las instrucciones por parte del maestro y decodificarlas, y por último enviar la información requerida por el maestro.

La unidad *startstop* tiene la función de generar una señal *busy* que indique

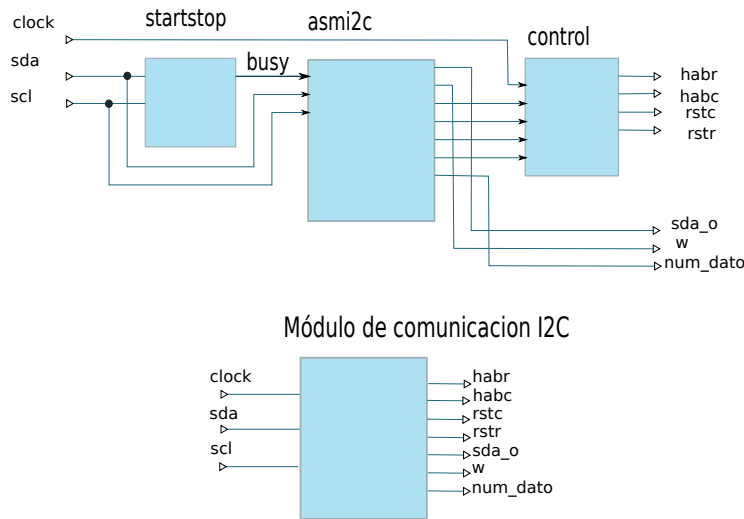


Figura 4.5: Diagrama del módulo de comunicación I²C.

al resto del módulo cuando el maestro está ocupando el bus para transmitir. El valor de esta señal es alto cuando el bus está libre y bajo cuando el bus está ocupado.

El modo de operación de este módulo se describe de mejor manera por la siguiente figura:

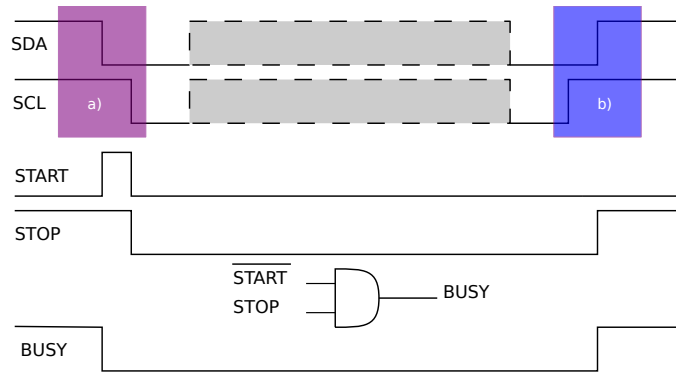


Figura 4.6: Principio de funcionamiento del circuito startstop. a) Se detecta la condición de START con el flanco de bajada de SDA, mientras SCL se encuentra en alto. b) Se detecta la condición de STOP con el flanco de subida de SDA, mientras SCL se encuentra en alto.

El siguiente elemento es el *asmi2c*, el cual está compuesto de una máquina de estados y un contador. Con ayuda de las señales *busy*, *SDA* y *SCL*, la máquina de estados se encarga de reconocer la dirección que envía el maestro e indentificar

las operaciones que el maestro desea hacer con el esclavo.

Sí la operación es de escritura, la máquina de estados recibe la instrucción y la traduce al resto del sistema. Son tres las instrucciones que se pueden recibir: *reestablecer*, *iniciar adquisición* y *copiar datos*. Para cada operación se genera una señal *a*, *b* o *c*, respectivamente. Estas señales entran al módulo de control.

En caso de tener una operación de lectura, la máquina de estados controla el envío de datos por parte del esclavo. Para enviar los datos es necesario convertirlos de paralelo a serie. Esta tarea se realiza con ayuda del contador y un multiplexor externo al módulo. El contador trabaja con la señal de *SCL* y sólo se habilita cuando la máquina de estados lo permite. El multiplexor tiene conectado a su línea de selección la salida del contador, lo que le permite poner los datos en el bus de manera ordenada.

El algoritmo que sigue la máquina de estados es el siguiente (Fig. 4.7):

1. Recibir dirección y enviar *ACK* cuando la dirección corresponde a la del esclavo. En caso contrario se espera el fin de la transmisión.
2. Sí la dirección fue correcta, identifica la tarea a realizar. Se tienen dos opciones; leer datos o escritura de datos.
 - a) En caso de que la operación sea leer datos, se habilita el contador y el módulo que se encarga de colocar los datos en el bus. La habilitación permanece hasta que el envío de datos se completa.
 - b) En caso que la operación sea escritura de datos, espera hasta recibir la instrucción e identifica:
 - Reestablecer. Sí la operación es *reestablecer* genera la señal *a*.
 - Iniciar. Sí la operación es *iniciar adquisición* genera la señal *b*.
 - Copiar. Sí la operación es *copiar datos* genera la señal *c*.
3. Tras concluir alguno de los pasos anteriores se espera a que se indique el fin de la transmisión.

Finalmente, el módulo *control* traduce las señales *a*, *b*, *c* a los módulos *canal de neutrones* y presión. Las señales que genera este módulo son; *habr*, *habc*, *rstr* y *rstc*; estas señales representan el control del sistema y en ellas se define el proceso de funcionamiento.

Cuando el SDAQ se enciende, los módulos que lo componen pueden no encontrarse en condiciones iniciales. Para garantizar que el sistema parta de un estado definido, el maestro envía la instrucción *reestablecer*. Como resultado de reestablecer el sistema; las señales *habr* y *habc* se encuentran en nivel bajo; y las señales *rstr* y *rstc* están en nivel alto. En otras palabras, en este punto el sistema se encuentra detenido, sin ningún valor almacenado y esperando la instrucción *inicio de adquisición*.

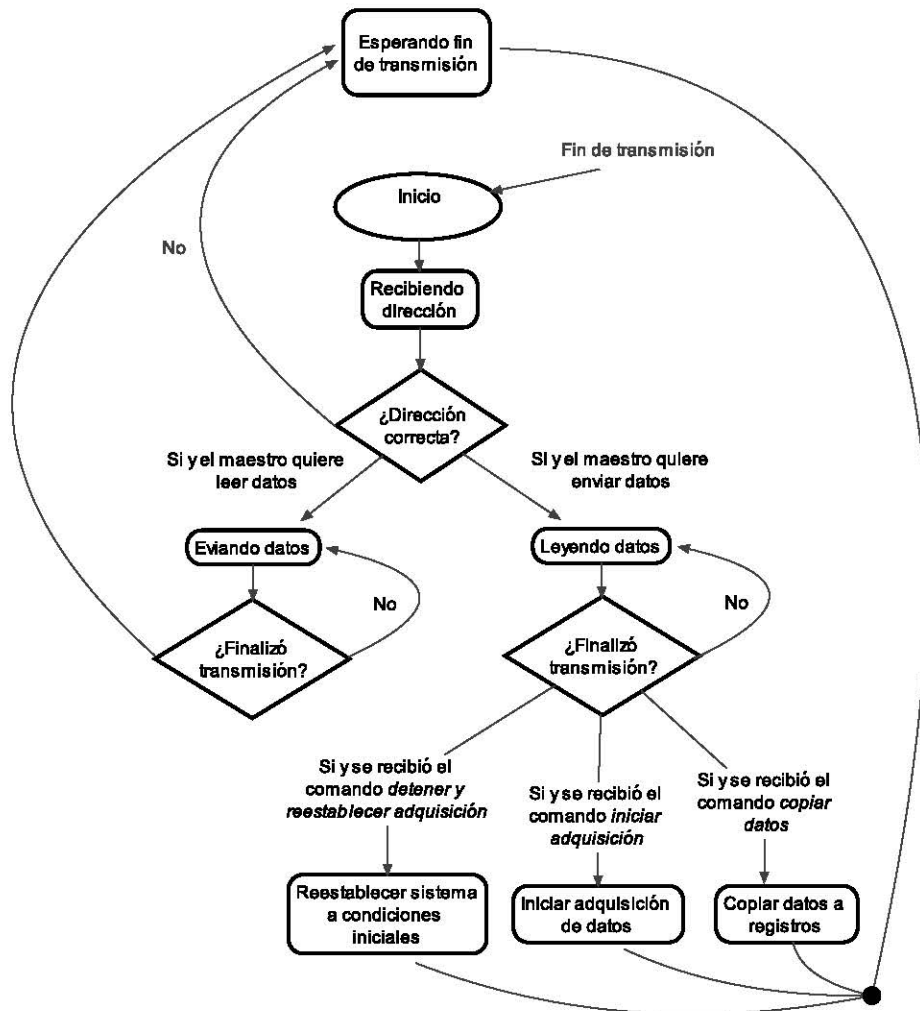


Figura 4.7: Diagrama de flujo de la máquina de estados del módulo asmi2c.

En el instante que el maestro manda la instrucción *inicio de adquisición*, la señal *habc* pasa a nivel alto y las señales *rstr* y *rstc* pasan a nivel bajo. En este punto el sistema se encuentra adquiriendo datos.

Al finalizar el tiempo de adquisición, el maestro envía el comando *copiar datos*. El sistema detiene la adquisición por un lapso corto de aproximadamente $10\mu s$. En el transcurso de este periodo *habr* permanece en nivel bajo, mientras se copian los datos a una memoria temporal —*habr* pasa a nivel alto. El proceso anterior tiene como finalidad; retener los datos mientras estos se transmiten y reanudar el proceso de adquisición lo más pronto posible — $10\mu s$ — sin que el envío interfiera en esto. Antes de reanudar el proceso de adquisición, es necesario

reestablecer el módulo *canal de neutrones*.

El algoritmo que describe el comportamiento del módulo de control se expresa a continuación (Fig. 4.8):

1. Se establecen condiciones iniciales. Sólo se puede regresar a este punto mediante la instrucción *reestablcer*.
2. Esperar comando *inicio de adquisición*.
3. Esperar finalice tiempo de adquisición y se envíe la instrucción *copia de datos*.
4. Se detiene la adquisición de datos y se copian los datos.
5. Se reestablece el módulo *canal de neutrones* y se regresa al punto 3.

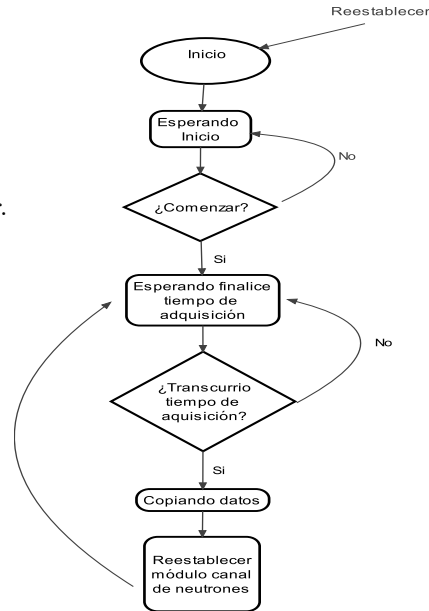


Figura 4.8: Diagrama de flujo de la máquina de estados de control.

La máquina de estados requiere de una señal de reloj externa para su funcionamiento, al igual que muchos otros circuitos de nuestro diseño. Sin embargo, por el momento, no profundizaremos en este punto. Será en el apartado final de este capítulo donde hablaremos de las señales que sincronizan al sistema y el módulo que es necesario para generarlas.

4.4. Módulo de canal de neutrones

El módulo *canal de neutrones* tiene la finalidad de contar los pulsos provenientes del monitor NM64 y posteriormente almacenarlos en un registro (Fig. 4.9). El sistema se compone de dos contadores: contador A y contador B.

El contador A incrementa su cuenta cada vez que detecta un flanco de subida en el pulso proveniente del detector. Al dato que se obtiene como resultado lo llamamos *cuentas sencillas*.

El contador B registra todos aquellos pulsos que tienen una duración mayor de $20\mu s$. Se toma como referencia esta duración ya que este parámetro define la duración que tienen la mayoría de los pulsos producidos por el detector. Aquellos

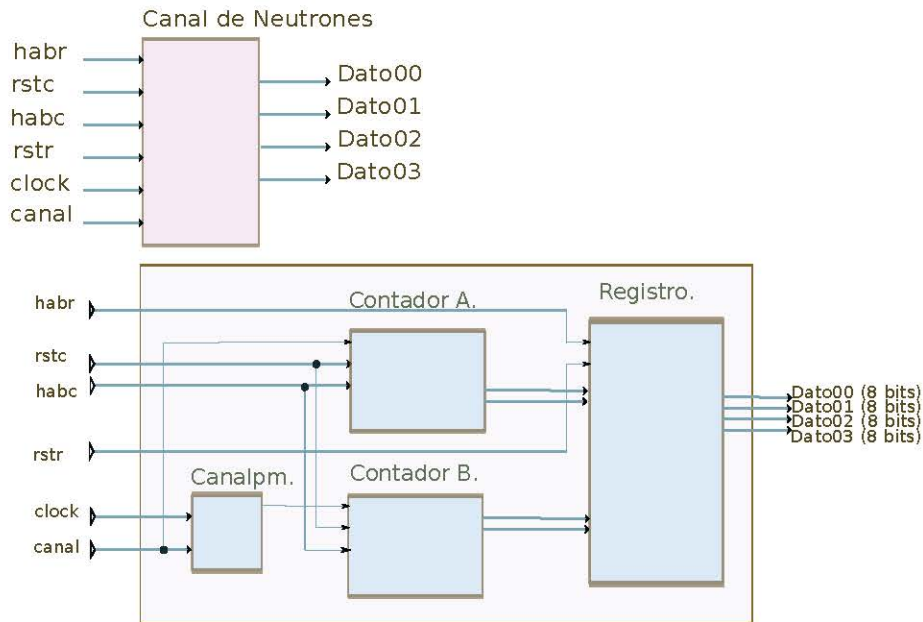


Figura 4.9: Diagrama del módulo canal de neutrones.

pulsos que superan el umbral son debidos a la multiplicidad del detector. Como resultado de este procedimiento se obtienen *cuentas múltiples*.

La señal del contador proporcional no llega directamente al contador B. Previamente se requiere de un módulo que discrimine entre los anchos de pulsos. Este módulo lleva por nombre *canalpm*.

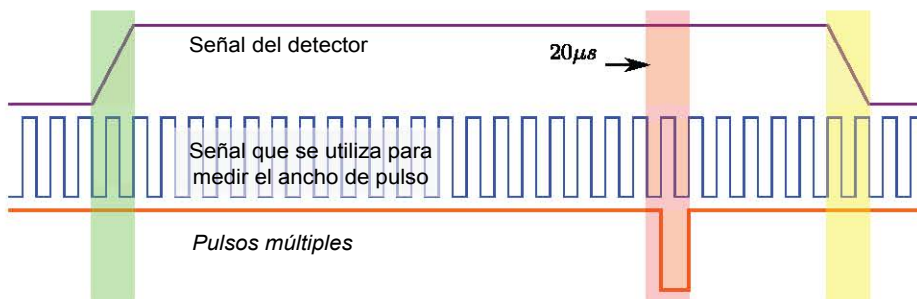


Figura 4.10: Principio de funcionamiento del módulo canalpm.

El *canalpm* se compone de un contador y un comparador. El contador se habilita cada vez que se sensa el flanco de subida de un pulso y finaliza cuando detecta su flanco de bajada (Fig. 4.10 secciones verde y amarilla). El contador trabaja a una frecuencia de $1MHz$ con objeto de medir la duración del pulso.

A la salida del contador se tiene un comparador; cuando el ancho de pulso de la señal supera la referencia se genera un pulso (Fig. 4.10 sección roja). Este pulso es el que entra al contador B para ser contabilizado.

En general, el módulo recurre a cuatro señales de control: *habr*, *habc*, *rstr* y *yrstc*. La señal *habc* habilita o deshabilita a los contadores; mientras que *habr* activa el registro para copiar los datos acumulados en los contadores. La copia se realiza mientras los contadores están detenidos.

La señal *rstr* y *rstc* sirven para reestablecer el registro y los contadores, respectivamente. En el caso de *rstr*, sólo se activa al inicio de la adquisición. La señal *rstc* se activa al inicio de la adquisición y cada vez que finaliza un *tiempo de adquisición*.

4.5. Módulo de presión

El barómetro digital Meteolabor AG GB1 es un instrumento de precisión cuyo principio de funcionamiento se basa en la deformación de una cápsula aneroide —celda metálica de paredes delgadas, sellada al alto vacío. Fabricada de un material especial, dicha cápsula forma parte de un oscilador LC. Los cambios en la presión atmosférica, producen deformación en la cápsula, lo que a su vez modifica su inductancia y la frecuencia de operación del circuito. Los cambios de frecuencia son registrados por un MCU, el cual asocia estos cambios con el valor de presión correspondiente.

El equipo cuenta con dos líneas de salida para transmitir los datos a otras unidades: *DCLK* y *DATA*. La línea *DATA* se encarga de transmitir los datos de presión atmosférica en forma serie, codificados en BCD —binary code decimal— a 4 dígitos. La señal de reloj *DCLK* tiene una frecuencia aproximada de $3kHz$. Es enviada por el equipo para sincronizar el envío y recepción de datos (Fig. 4.11).

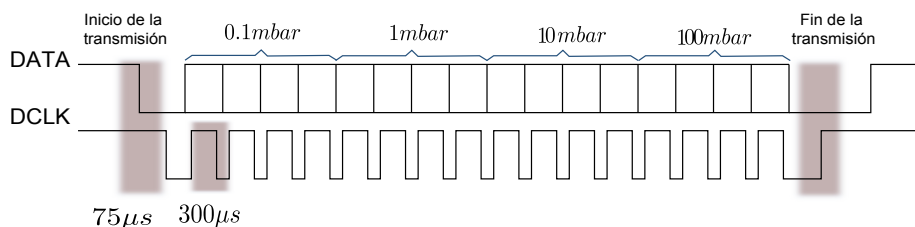


Figura 4.11: Señales correspondientes al sensor de presión.

Cuando el sensor no se encuentra transmitiendo datos, las líneas *DCLK* y *DATA* se encuentran en un nivel alto. Cada dos o tres segundos, el barómetro envía un dato de presión nuevo. En el observatorio de rayos cósmicos de CU sólo se recoge un dato de presión por cada periodo de adquisición.

Para el procesamiento de los datos de presión se cuenta con el *módulo de Presión*. Se compone de tres circuitos básicos; registro, contador y máquina de estados (Fig 4.12).

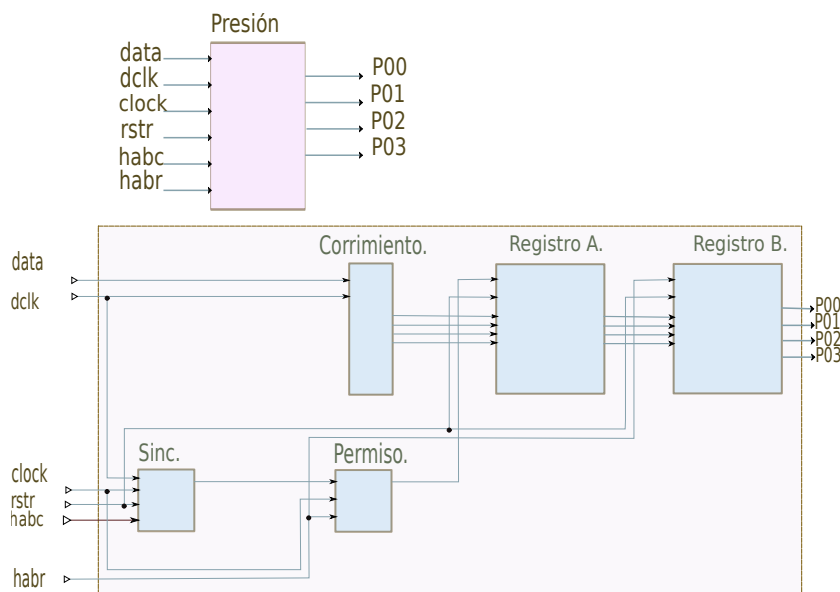


Figura 4.12: Esquema del Módulo de presión.

El primer paso es convertir los datos del sensor —*DATA*— transmitidos de forma serie a paralelo mediante un registro de corrimiento. La operación se hace con el fin de poder mantener los datos fijos durante un lapso de tiempo, mientras se copian a la memoria temporal. La memoria se compone de dos registros; registro X y registro Y.

El registro X sólo almacena datos del sensor de presión, cuando éste finaliza la transmisión. El registro Y copia datos del registro X, sólo cuando el sistema de control se lo indica. En conjunto, ambos registros se aseguran que se transmita el último dato de presión completo que llegó al sistema de adquisición.

Para que los registros cumplan su función se necesitan dos máquinas de estado que los controlen. Las máquinas de estado llevan por nombre; *sync* y *permiso*, respectivamente.

La primera máquina se encarga de generar una señal —*sync*— que nos indica cuando el sensor se encuentra transmitiendo. El valor de esta señal es un nivel alto sí el sensor no transmite datos y un nivel bajo en caso contrario.

Considerando que el conjunto de datos que envía el sensor tiene una duración fija de aproximadamente *5ms*, podemos generar la señal *sync*, midiendo este

intervalo de tiempo y detectando el inicio de la transmisión por parte del sensor. Si a través de la máquina de estados seamos la señal de reloj *DCLK*, se puede detectar cuando ésta sufre el primer cambio de nivel alto a nivel bajo. En ese instante, se debe habilitar un contador y permitirle alcanzar la cuenta necesaria para medir el intervalo de tiempo —24000 cuentas trabajando a una frecuencia de *5MHz*. Una vez que el contador llega al valor establecido, la máquina de estados detiene el contador, lo reestablece y vuelve a sentir la señal *DCLK* para repetir el proceso.

El siguiente algoritmo (Fig. 4.13) describe el funcionamiento de la máquina de estados *sync*:

1. Se establecen condiciones iniciales —contador detenido y *sync* en nivel bajo. Sólo se puede regresar a este punto por medio de la instrucción *Reestablecer*.
2. Esperar a que se indique el inicio de la adquisición de datos.
3. Se evalúa si el sensor de presión comenzó la transmisión de datos. En caso contrario se espera hasta que inicie una nueva transmisión.
4. Esperar a que se termine la transmisión de datos —se activa contador.
5. Se evalúa si el sensor comenzó una nueva transmisión de datos —contador se reestablece y *sync* en nivel alto. Si esto sucede se regresa al punto anterior.

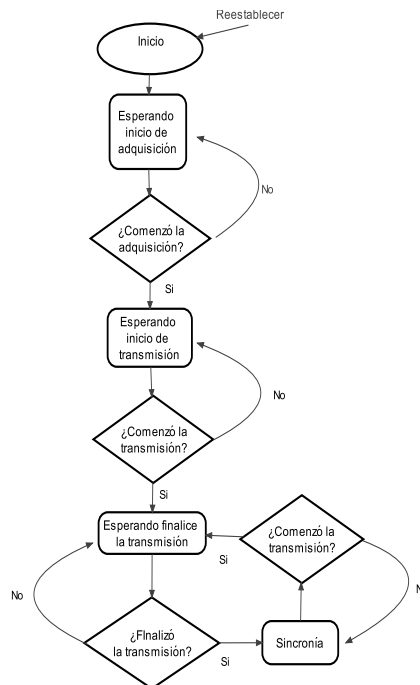


Figura 4.13: Diagrama de flujo de la máquina de estados *sync*.

Una vez generada la señal *sync*, ésta entra a la siguiente máquina de estados —*permiso*. El algoritmo que describe el funcionamiento de esta máquina de estados es:

1. Evaluar si *sync* está en nivel alto.
2. Asegurar que no se esten pidiendo datos para transmitir.
3. Habilitar el registro A y regresar al primer punto.

Permiso se encarga de habilitar el registro A únicamente cuando se obtenga un dato completo. Además, esta máquina de estados se asegura que los registros

A y B no se habiliten al mismo tiempo, pues esto ocasionaría que se transmita un dato incorrecto. Al fenómeno detrás de este problema se le denomina *metaestabilidad*, se profundizará en las repercusiones que tuvo en nuestro diseño en el siguiente capítulo.

4.6. Módulo de amplificación, discriminación y cambio de nivel

Con el fin de poder conectar el detector con el PLD, se necesita una etapa de acoplamiento. Debido a que la señal proveniente del detector tiene una amplitud de $130mV$, se requiere una etapa de amplificación previa para poder alcanzar los niveles que utiliza el PLD. Los PLD's al ser de tecnología CMOS, pueden trabajar con señales de niveles de voltaje de $3,3V$ y $5V$, entre otros.

Para el desarrollo de la etapa de amplificación, consideraremos amplificar la señal del detector a una amplitud de $5V$. Utilizaremos un amplificador operacional *MC33178* en configuración inversora. Se usaron dos etapas de esta configuración para una ganancia total de 39 y reducir los efectos por distorsión.

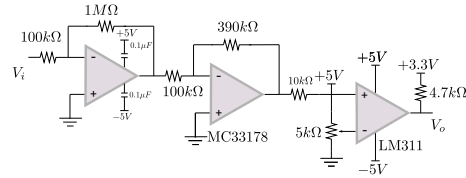


Figura 4.14: Diagrama eléctrico de la etapa de amplificación y discriminación para el detector.

A la salida de la etapa de amplificación se colocó un comparador *LM311*. La señal de salida de la etapa amplificadora entra al comparador por la terminal positiva. En la terminal negativa se conecta un voltaje de referencia que puede ser variado con un potenciómetro. El objetivo del comparador es funcionar como discriminador y eliminar todas las interferencias que se encuentran en la señal amplificada.

Por último, el comparador cuenta con una salida de colector abierto que nos permite cambiar de nivel de tensión a $3,3V$ (Fig. 4.14). La explicación del cambio de nivel está relacionada con el dispositivo PLD que se seleccionó. En el siguiente capítulo aclararemos este punto.

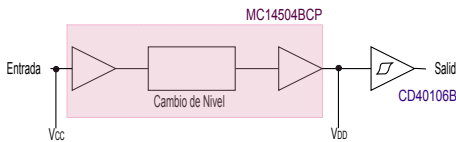


Figura 4.15: Diagrama de la etapa de acoplamiento para el canal de presión.

Para completar el diseño de la etapa de acoplamiento, es necesario acondicionar las señales del sensor de presión. Estas señales manejan niveles lógicos TTL y son transmitidas por un largo cable que las distorsiona. Por estas razones utilizamos un circuito cambiador de nivel y un buffer inversor *schmitt trigger* (Fig. 4.15).

El circuito cambiador de nivel *MC14504BCP* se utiliza para cambiar de niveles lógicos TTL a niveles CMOS —3,3V para nuestro caso.

El *schmitt trigger* nos sirve para reconstruir la señal y eliminar el ruido de ésta.

4.7. Módulo software de adquisición

Finalmente, hablaremos del módulo *software de adquisición de datos*. Las unidades que componen a dicho módulo son:

- Interfaz de comunicación *USB-I²C*.
- Descripción del maestro en la PC.
- Herramientas para el despliegue de la información.
- Módulo de corrección de tiempo.

Como principal objetivo de nuestro módulo se encuentra lograr la comunicación entre la PC y el PLD por medio del protocolo *I²C*. No obstante, una PC no cuenta con puerto de comunicación *I²C*. Por esta razón se necesita una interfaz de comunicación. De preferencia, esta interfaz de comunicación debe contar con la posibilidad de conexión via *USB* —Universal serie Bus. Actualmente *USB* es el puerto de comunicaciones estándar y se prefiere su uso al de otro puerto de computadora para garantizar compatibilidad en nuevos equipos de cómputo que solo tienen puertos USB.

Resultado de la investigación y prediseño de la interfaz USB- I²C, en la que se pretendía utilizar un dispositivo del fabricante FTDI-chip, se encontró una interfaz comercial con las mismas características necesarias establecidas en el diseño de la interfaz, por lo que se prefirió adquirir la interfaz comercial por su relativo bajo costo y tamaño reducido. El módulo *USB-I²C* Devantech nos proporciona una interfaz *I²C* completa para la PC a un bajo costo.

Una de las ventajas de trabajar con dicho módulo, radica en el uso del chip *FTDI-FT232R*, componente principal de la interfaz. Su uso, en conjunto con el controlador provisto por el fabricante, permite manejar el puerto USB mediante instrucciones propias de un puerto *RS232*. Esto facilita enormemente el manejo de la comunicación por parte del software, ya que se puede trabajar con un puerto serie virtual, disfrutando de la conexión práctica del puerto USB y al mismo tiempo, contar con la interfaz *I²C* necesaria.

El módulo *USB-I²C* está diseñado para trabajar sólo en modo maestro; será el encargado de generar las condiciones de *START* y *STOP* en la transmisión de datos.

De esta manera, nuestro esquema de comunicación queda de la siguiente forma: en primer lugar, la PC debe comunicarse con el módulo *USB-I²C*, por medio de un puerto serie virtual; al recibir las instrucciones de la computadora, el módulo *USB-I²C* administrará las tareas en el bus *I²C*.

El programa en la computadora tiene la tarea de establecer la comunicación serie asincrónica entre la PC y la interfaz. Además debe proporcionar los comandos necesarios para que la interfaz gestione correctamente el bus.

Los primeros pasos para establecer la comunicación serie son los siguientes:

1. Tener el controlador de la interfaz.
2. Contar con un lenguaje de programación que nos ofrezca bibliotecas que faciliten el manejo de comunicaciones serie asincrónicas.

La plataforma sobre la que se desarrolla el programa es *Software libre*. El sistema operativo con el que se trabaja es *Ubuntu 10.04*.

Trabajar con este sistema operativo facilita el manejo de la interfaz, ya que dentro de los módulos del Kernel se encuentran los controladores para diversos dispositivos *I²C*. Entre ellos nuestra interfaz.

Del segundo punto tendremos que decir que una de las ventajas de trabajar con un sistema operativo libre reside en la libertad de manejar los puertos de comunicación sin ninguna restricción, por lo que la elección del lenguaje de programación se basó principalmente en la facilidad de la estructura del lenguaje.

El lenguaje de programación elegido es *Python*.

Python es un lenguaje de programación de alto nivel que tiene una sintaxis sencilla y legible, permite el desarrollo de programas compactos y se puede ajustar a diferentes paradigmas de programación. Entre estos se encuentra: programación orientada a objetos, programación imperativa y programación funcional.

El intérprete de Python se encuentra bajo una licencia que lo hace de uso libre y distribuable incluso en aplicaciones comerciales.

Las razones por las que se prefirió programar en Python son:

Sintaxis legible. El software que se desarrolla en Python tiene una sintaxis clara, de tal manera que cualquier programador puede comprender su funcionamiento y reutilizar el código.

Código compacto. Python ayuda a reducir el tiempo de desarrollo, ya que puede ejecutar varias instrucciones con poco código.

Portabilidad. Los programas en Python pueden ejecutarse en diversas plataformas; tanto en Linux como en Windows.

Baterías incluidas. Se refiere a la colección de bibliotecas que vienen incluidas en el lenguaje. Tales bibliotecas nos permiten realizar variedad de funciones incluso en aplicaciones científicas.

Dentro del software que viene incluido en Ubuntu 10.04 se encuentra el interprete de Python y las bibliotecas necesarias para el acceso al puerto serie. La biblioteca *pyserial* encapsula el acceso al puerto serie y proporciona métodos a Python para manejar el puerto serie en Windows y Linux.

Una vez que se cuenta con las herramientas para establecer la comunicación serie, el primer paso en nuestro programa es abrir el puerto serie y configurarlo de acuerdo a las especificaciones que nos brinda el fabricante de la interfaz; velocidad de transmisión, número de bits de *stop*, bit de paridad y tamaño de palabra.

La información que requiere la interfaz *USB-I²C* para administrar el bus *I²C* se compone de una cadena de 3 *bytes*. El programa envía a través del puerto serie, 3 bytes con la información siguiente:

Comando de la interfaz *USB-I²C* —0H53 o 0H54. Por medio de este comando se le informa a la interfaz si se va a leer-escribir un solo byte o un conjunto de ellos.

Dirección del esclavo +R/W. Los primeros siete bits de la instrucción contienen la dirección del esclavo —0H16. El bit menos significativo informa a la interfaz si la operación que se va a realizar es de escritura o lectura.

Bytes de dato Si la operación es de escritura, este byte contiene la información que va a enviar el maestro al esclavo. Si la operación es de lectura, el byte indica cuantos datos va a esperar el maestro del esclavo.

El software de adquisición puede enviar tres instrucciones; para la instrucción *reestablecer* el byte 0H48, para *iniciar adquisición* el byte 0H49 y para *copiar dato* el byte 0H4A.

El dato recibido se almacena junto con la referencia de la fecha y hora en la que fue recogido. Estos datos se guardan en un archivo que lleva por nombre la fecha del día. Al finalizar el día el software de adquisición debe cerrar el archivo y abrir uno nuevo con la fecha correspondiente.

EL algoritmo que describe el módulo software de adquisición se enlista a continuación:

1. Abrir y configurar el puerto serie.
2. Preguntar la fecha y abrir un archivo donde se almacenen los datos.

3. Enviar instrucción *reestablecer*.
4. Enviar instrucción *iniciar adquisición*.
5. Esperar a que se cumpla tiempo de adquisición.
6. Enviar instrucción *copiar datos*.
7. Solicitar datos al esclavo.
8. Registrar la hora.
9. Almacenar datos con fecha y hora.
10. Sí finalizó el día abrir un nuevo archivo. Regresar al paso 5.

Sí el esclavo no responde a las intrucciones enviadas por el maestro, se vuelve a intentar reestablecer la comunicación con él. Si no se logra, el programa se cierra y le envía un mensaje de error al usuario que contiene la causa que provocó la interrupción de la adquisición. Para lograr este diagnóstico, el programa debe leer una byte que envía la intefaz cada vez que tiene respuesta por parte de un esclavo.

En caso de que se deseen hacer pruebas con el sistema, se cuenta con otro programa que facilita la fijación del tiempo de adquisición y espera que el usuario dé las instrucciones para comunicarse con el esclavo.

La información se despliega impresa en pantalla en todo instante. Además se puede solicitar al programa graficar los datos almacenados contra tiempo. Para generar las gráficas, el programa utiliza la biblioteca *matplotlib* de Python.

El programa ejecuta las siguientes instrucciones:

1. Preguntar al usuario que archivo desea graficar.
2. Abrir el archivo.
3. Preguntar al usuarios los datos que quiere se muestren.
4. Procesar la información del archivo para obtener la información de fecha, hora y datos.
5. Mostrar la gráfica.

Por último, para llevar el tiempo de adquisición el programa hace uso del reloj interno de la computadora. El ajuste de este reloj se realiza mediante *ntp*. Éste es un protocolo que permite la sincronización de relojes por medio de internet. Una vez a la semana *ntp* se encarga de ejecutar el reloj de la computadora conectándose al servidor: `ntp.astrosmo.unam.mx`.

4.8. Interconexión del sistema

En esta sección se mostrarán los detalles finales que se consideraron para la interconexión del sistema.

El primer punto concierne al envío de los datos. Para poder conectar el esclavo al bus, es necesario que éste tenga una salida de *open drain*. Utilizamos un buffer con salida *open drain* para hacer esto.

Para enviar los datos a través de la línea SDA es imprescindible convertirlos de forma paralela a serie. Como se mencionó en secciones anteriores esto se logra mediante un sistema multiplexor-contador. Es importante precisar: la salida del multiplexor debe conectarse al buffer, el buffer debe conectarse a la línea SDA y el multiplexor debe controlarse de tal forma que sólo opere durante el envío. Este control lo ejerce el *módulo de comunicación I²C*, el cual detecta la solicitud del maestro de *leer datos* del esclavo y genera una señal w que habilita al multiplexor. Al mismo tiempo se activa un contador —*contE*— que opera con la señal SCL.

La salida de *contE* se conecta a las líneas de selección del multiplexor —*numdato*. De este modo se logran enviar al maestro los datos que se encuentran a la entrada del multiplexor. En la siguiente figura se muestra la disposición de los módulos para el envío de datos.

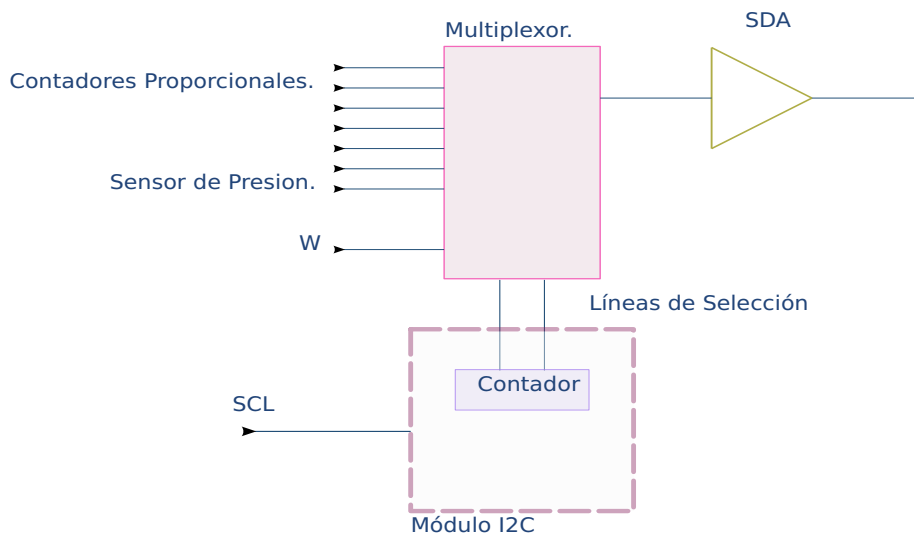


Figura 4.16: Conexión del sistema de adquisición para el envío de datos.

Cuando el *módulo de comunicación I²C* registra, mediante la salida del contador, que se alcanzó el barrido total de los datos, deshabilita el multiplexor y reestablece el contador.

La parte final de la interconexión del sistema corresponde la sincronización de sus elementos. La sincronización es el proceso por el cual se establece el orden en que se ejecutan las tareas del sistema. Para establecer este orden las máquinas de estado utilizan una señal de reloj que les permite trabajar de forma secuenciada, sin que un proceso interfiera con otro.

El módulo que genera las señales de reloj opera con una señal de $40MHz$, que se divide para obtener señales de $5MHz$, $1MHz$ y $0,5MHz$ —Fig. 4.17. A continuación se enlista la función de cada una de estas señales:

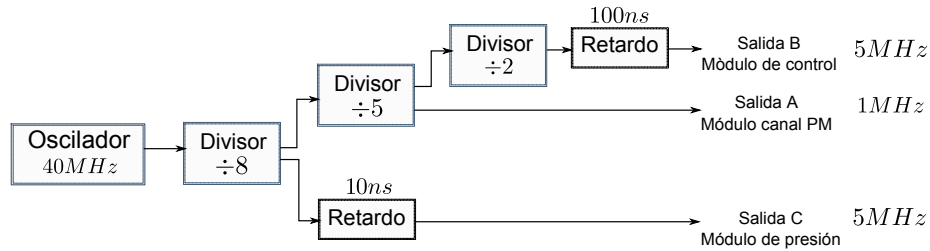


Figura 4.17: Circuito divisor de frecuencia.

- La señal de $1MHz$ sirve para medir el ancho de pulso de las señales provenientes del detector.
- La señal de $5MHz$ se ocupa en el módulo *sinc* para sincronizar la recepción de los datos del sensor de presión. Con esta señal trabajan las máquinas de estado y se mide el intervalo de $5ms$ —Sección 4.5.
- El módulo de *control* requiere una señal de reloj de $0,5MHz$ para que los demás módulos puedan detectar las señales que genera, es decir, tengan la duración necesaria.

Finalmente, las señales de reloj se adaptan para el resto del sistema de adquisición por medio de circuitos de retardo. La utilidad de dichos circuitos se explicará en el siguiente capítulo.

En resumen, el diseño del nuevo adquisidor de datos comprende; la descripción en VHDL de todos los módulos expuestos, su interconexión y posterior síntesis en el PDL; el programa de comunicación con la PC e interfaz del usuario, escrito en lenguaje Python, junto con las herramientas de diagnóstico y despliegue de información.

El nuevo sistema —Fig. 4.18— cubre las necesidades del Observatorio de Rayos Cósmicos de Ciudad Universitaria y aporta nuevas funciones que facilitan su operación y brindan nueva información sobre el monitor NM64. Debido a las herramientas con las que se elaboró el diseño, el nuevo adquisidor de datos puede reproducirse e incluso modificarse, si así se desea. Además se cuenta con

la documentación y diagramas eléctricos necesarios para dar mantenimiento y así garantizar su funcionamiento por varios años.

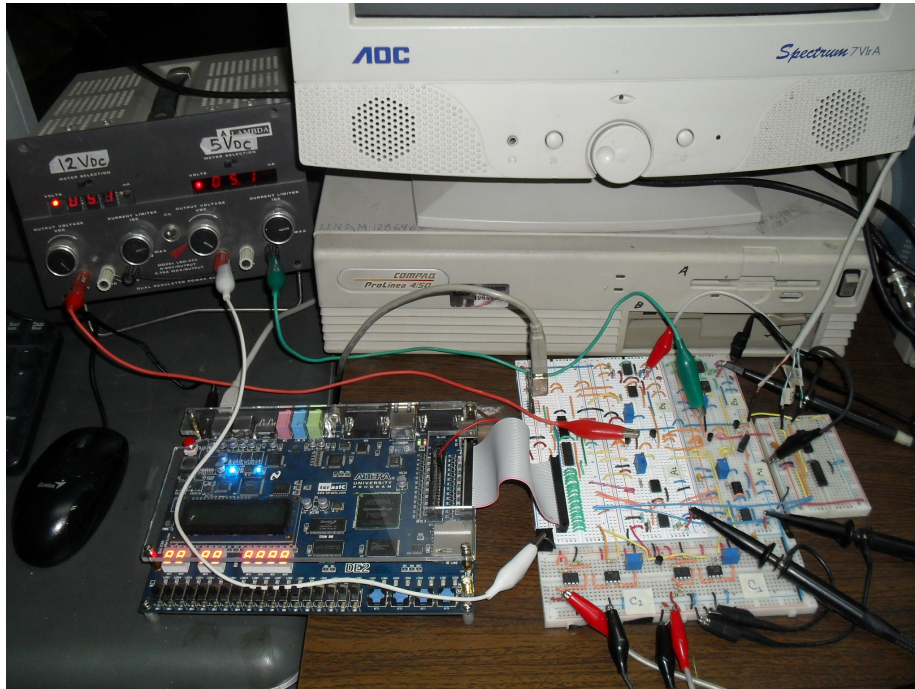


Figura 4.18: Fotografía del nuevo sistema de adquisición de datos.



Grupo de Rayos C3smicos de la Ciudad de M3xico en colaboraci3n con la Universidad de Nagoya.

Pruebas, resultados y conclusiones

En este capítulo nos enfocaremos en exponer la evaluación del prototipo final del proyecto. Para esto nos apoyaremos en los resultados obtenidos a través de nuestra experimentación con el nuevo sistema de adquisición de datos.

Antes de realizar pruebas con el sistema completo, se hicieron pruebas de forma individual a cada uno de los módulos para encontrar posibles fallas en su funcionamiento. El primer paso consistió en comprobar la operación de los módulos por medio de simulación. El HDL que utilizamos para describir los módulos fue VHDL —Very High Speed Integrated Circuit HDL— y se capturó el diseño mediante la plataforma de desarrollo Quartus II 9.1 de Altera. De igual modo, se utilizaron las herramientas de simulación, compilación y configuración de dispositivos que ofrece este software.

Después de que se obtuvieron resultados aceptables en la simulación, se evaluó el desempeño sintetizando los módulos con un PLD. Tras evaluar la capacidad necesaria para sintetizar cada módulo, se eligió un PLD con suficientes bloques lógicos para la realizar las pruebas.

El primer PLD que se ocupó fue un CPLD —PLD con capacidad de síntesis menor a la de un FPGA— de Altera modelo *EPM240T100C5*. Con este dispositivo se realizaron pruebas de los *módulos canales de neutrones y canal de presión*. Posteriormente se utilizó un CPLD *EPM570T100C5* de mayor capacidad. El objetivo fue probar en conjunto la parte de control del *módulo de comunicación I²C* y el *módulo canal de neutrones*. Asimismo se probó el *módulo de presión* con la parte de control.

Luego de verificar los módulos en el CPLD y antes de probar la comunicación con la PC, se examinó la respuesta de los tres módulos trabajando en grupo.

Como los dispositivos que se emplearon en un principio no cuentan con una capacidad de síntesis grande, para realizar las siguientes pruebas se recurrió a una tarjeta de desarrollo de Altera modelo DE1; proporcionada por el departamento de Ingeniería Electrónica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Dicha tarjeta cuenta con FPGA modelo *EP2C20F484* —de capacidad de síntesis 40 veces mayor a la de un CPLD— y diversos periféricos que facilitan el diseño de muchas aplicaciones. Tiempo después se adquirió por parte del Instituto de Geofísica una tarjeta de desarrollo DE2. Esta tarjeta tiene un FPGA de mayor capacidad y con ella se realizaron todas las pruebas restantes al sistema.

Como parte final, desarrollamos el *software de adquisición* y al mismo tiempo implementamos la comunicación entre el FPGA y la computadora personal. Se comprobó el funcionamiento de todo el sistema haciendo pruebas durante varias semanas. El resultado esperado de las pruebas es la adquisición de datos de forma continua y automática. Además, se aspira a tener un error absoluto distribuido normalmente, con media cero y desviación estándar diez; tomando como referencia los datos del sistema de adquisición de datos actual.

5.1. Depuración del sistema

A continuación mencionaremos algunos problemas que se presentaron durante el desarrollo de las pruebas e indicaremos su solución.

En la figura anterior se ilustra el proceso de habilitación, copia y reestablecimiento que lleva el *módulo de control* sobre el *módulo canal de neutrones*; proceso que se explicó en el capítulo cuatro.

Problema 1

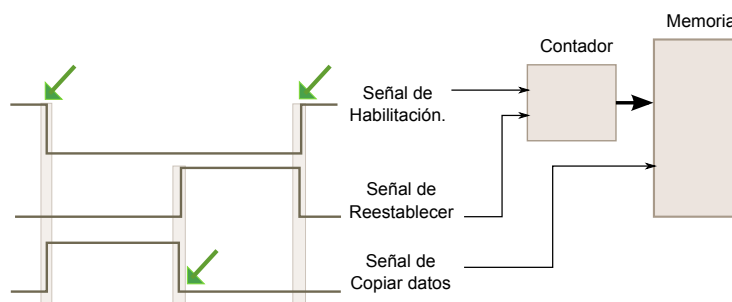


Figura 5.1: Señales que controlan la adquisición de datos.

En las regiones encerradas se observa que las señales de habilitación, copia y reestablecer cambian de valor en el mismo instante. Esto implica un problema ya que mientras se detiene el contador, el registro copia datos y mientras los datos son almacenados, el contador es reestablecido; en ambos casos los datos

están cambiando sin que se respete un tiempo para que se estabilicen.

Si los tiempos de estabilidad no se respetan, los datos registrados pueden ser incorrectos. A este fenómeno se le conoce como *Metaestabilidad*. Para resolver esta situación se agregaron pequeños periodos de tiempo entre cada cambio de señal, para dar oportunidad a que los datos se estabilicen. Este método se aplicó en todas las demás máquinas de estado que generan señales de forma secuencial.

Problema 2

En la imagen se pueden observar las señales provenientes del sensor de presión. Estas señales deben viajar por un cable de aproximadamente 8m de longitud y en consecuencia, se encuentran contaminadas con ruido y distorsionadas por la línea de transmisión.

Si deseamos procesar estas señales, primero debemos restaurarlas, ya que disminuir la longitud del cable no es una opción.

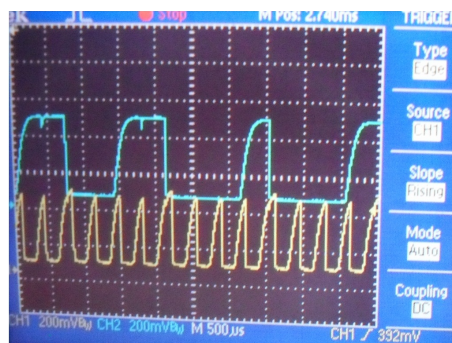


Figura 5.2: Señales del sensor de presión antes de la etapa de acondicionamiento.

Fue entonces necesario añadir la etapa de acoplamiento que se mencionó en el capítulo cuatro. El Schmitt Trigger se encarga de eliminar el ruido de las señales además de conformarlas.

Por otro lado, originalmente se hacía el cambio de nivel de 5V a 3,3V mediante un buffer colector abierto; sin embargo, este circuito deformaba en un mayor grado las señales. Por esta razón reemplazamos este circuito con un cambiador de nivel *MC14504BCP*.

Problema 3

Cuando se comenzó a trabajar con la tarjeta DE2 se tuvieron que realizar algunos cambios al diseño. El FPGA que tiene la tarjeta, además de ser de mayor capacidad, tiene un tiempo de respuesta menor. Esto lo hace más susceptible al ruido o perturbaciones que se encuentren en las señales que entran al dispositivo.

Como resultado de esta problemática se añadió a las líneas del bus I^2C un circuito Schmitt Trigger para eliminar el ruido de las señales del bus.

Problema 4

Otro módulo que requirió modificaciones es el módulo que genera las señales de reloj. En un principio las señales de reloj se generaban a partir de la *división de frecuencia* de una señal de $27MHz$. El inconveniente que este método presenta es que todas las transiciones de nivel en las señales se realizan de manera simultánea, como se puede observar en la parte superior de la siguiente figura.

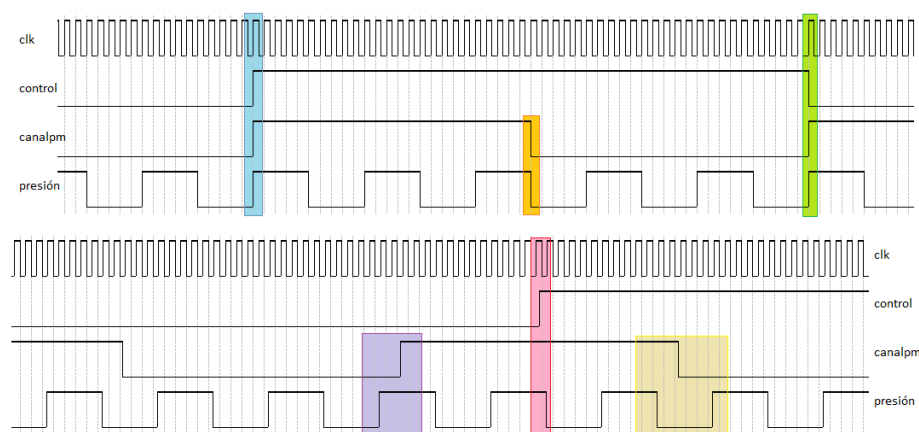


Figura 5.3: Señales de reloj que alimentan el sistema de adquisición de datos. En la parte superior se muestran las señales obtenidas por medio de un divisor de frecuencia. En la parte inferior se agregaron retardos para evitar que las señales cambien al mismo tiempo.

El problema que origina operar el sistema con estas señales es la metaestabilidad. La metaestabilidad se encuentra en la evaluación que realiza el circuito cuando sus entradas no son estables, cuando el circuito interpreta de manera incorrecta el valor de sus entradas. Esto se puede dar cuando dos circuitos se encuentran trabajando a diferentes frecuencias y transfieren información entre ellos. Si las señales que envía el circuito A al circuito B cambian de nivel al mismo tiempo que cambia la señal de reloj del circuito B, se presenta la metaestabilidad.

La solución de este problema es agregar retardos a las señales de reloj que se generan. Esto evita que las transiciones se efectuen en el mismo instante.

El circuito que genera las señales de reloj, expuesto en el capítulo anterior, cuenta con circuitos de retardo que resuelven el problema de metaestabilidad. Sus señales de salida se pueden observar en la parte inferior de la imagen anterior.

Problema 5

Cuando transferimos una señal entre dos circuitos que tienen señales de reloj independientes —no se generan a partir de la misma señal— es necesario sincronizar la señal que se transmite con la señal de reloj del receptor para poder utilizarla. Para sincronizar la señal se utiliza una cadena de registros conocida como *sincronizador*. Estos registros retardan la señal para que ésta se resuelva a un valor conocido antes de ser utilizada.

En la siguiente imagen se observan el resultado de utilizar un *sincronizador*:

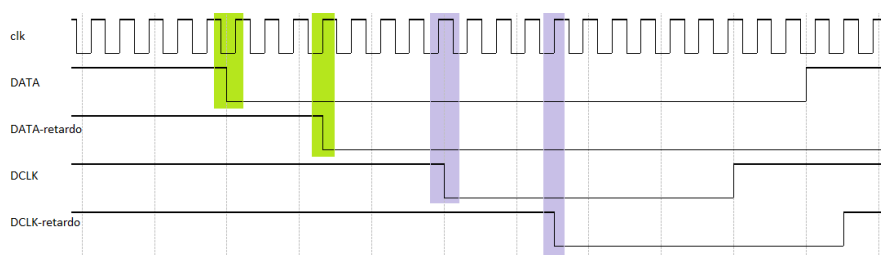


Figura 5.4: Resultado de pasar dos señales a través de una cadena de retardos. Se observa que en ambos casos la señal se sincroniza con la nueva señal de reloj.

En nuestro caso fue necesario utilizar este circuito en el *módulo de presión* para poder recibir las señales provenientes del sensor. Previo al uso de este circuito, los datos de presión adquiridos eran en ocasiones incorrectos.

Problema 6

Para desarrollar el *software de adquisición* el primer lenguaje de programación que se utilizó fue JAVA, por ser capaz de ejecutarse en cualquier plataforma que cuente con su máquina virtual. Sin embargo, JAVA nos representó un problema, debido al extinto soporte que ofrece Sun Microsystem a las API's para el manejo del puerto serie.

En JAVA se intentó desarrollar un software que enviara y recibiera información por el puerto serie. A pesar de esto, nunca se alcanzó una comunicación correcta.

En vista de tal situación se optó por buscar un lenguaje de programación que nos ofreciera soporte para nuestra aplicación y que su sintaxis fuera más sencilla que la de JAVA.

En respuesta a esto se utilizó como lenguaje de programación Python.

Como ejemplo ponemos dos fragmentos de código que realizan la misma función; uno escrito en JAVA y el otro en Python. En ambos casos se abre un

puerto serie y se configura. Se puede observar que el código hecho en Python es más sencillo y compacto que el de JAVA. Esto nos ayudó a reducir el tiempo de desarrollo del programa.

```

listapuertos=CommPortIdentifier.getPortIdentifiers();
while listapuertos.hasMoreElements() do
    puertoId = (CommPortIdentifier) listapuertos.nextElement();
    if puertoId.getPortType() == CommPortIdentifier.PORT_SERIAL
    then
        if puertoId.getName().equals(usb2c) then
            System.out.println(Conexión lista:-usb2c);
            encuentra=true;
            puertoserial=(SerialPort) puertoId.open("prueba",2000);
            salida=puertoserial.getOutputStream();
            puertoserial.setSerialPortParams(19200,DATABITS
            8,STOPBITS 2,PARITY_NONE);
        end
    end
end
end
if !encuentra then
    System.out.println("No se encontró interfaz USB-I2C");
end

```

Código en JAVA.

```

try;
    ser=serial.Serial('/dev/ttyUSB0',19200,timeout=1,stopbits=2);
except;
    print 'No se puede encontrar la interfaz USB-I2C';
    sys.exit(-1)

```

Código en Python.

Problema 7

Al realizar las pruebas finales con todo el sistema en funcionamiento, se detectaron errores en los datos de hora y fecha. El problema consistía en un *retraso* de un segundo cada 100 datos almacenados. El retraso se debía a la forma en que el *software de adquisición* llevaba el tiempo de adquisición por medio de la instrucción *time.sleep()*. Esta instrucción detiene la ejecución del programa por un periodo determinado y la reanuda al terminar este periodo —para nuestras pruebas 60s. El sistema operativo se encarga de gestionar los procesos que se ejecutan en una PC y les asigna una prioridad. Ya que *time.sleep()* no es un proceso prioritario, el tiempo que permanece detenido el programa no es siempre el mismo.

El primer paso para solucionar el problema fue evitar el uso de la instrucción

ya mencionada. En lugar de este método se utilizó `time.time()`. La instrucción `time.time()` nos devuelve el tiempo de la PC con una alta precisión. Por medio de un ciclo se puede determinar si ya transcurrió el *tiempo de adquisición*. Este proceso ayuda a mejorar la precisión con que se miden los intervalos de tiempo, sin embargo no resuelve del todo el problema del retraso. Para este caso, el retraso se presenta cada 1000 datos.

El segundo paso es detectar la ocurrencia del retraso en los datos de tiempo. Una vez detectado, se debe ajustar el *tiempo de adquisición* para compensar el retraso. De esta forma se logra eliminar la acumulación del retraso.

En la imagen se muestra una serie de datos y la ocurrencia de un retraso. También se puede observar que, en el siguiente periodo de adquisición, se logra compensar este retraso.

```

182134431 2238 14 2394 31 2494 15 2437 11 2287 20 2437 13 4596 4868 4690 7732 0
182134531 2253 12 2456 35 2512 22 2423 14 2123 18 2396 11 4678 4902 4476 7732 0
182134631 2292 12 2388 27 2507 14 2437 14 2148 14 2414 12 4642 4905 4522 7732 0
182134731 2192 11 2314 19 2385 12 2475 13 2110 17 2411 13 4483 4819 4473 7732 0
182134831 2266 15 2394 37 2519 14 2472 11 2192 29 2544 12 4631 4954 4688 7732 0
182134931 2126 14 2336 27 2354 16 2380 22 2337 27 2454 17 4440 4683 4734 7732 0
182135031 2300 12 2453 41 2487 19 2500 17 2141 20 2405 9 4719 4947 4503 7733 0
182135131 2180 8 2442 24 2569 12 2525 15 2324 12 2460 19 4588 5038 4741 7733 0
182135231 2258 9 2477 37 2410 13 2492 14 2057 21 2265 14 4699 4857 4285 7733 0
182135331 2188 16 2407 25 2555 15 2497 12 2271 24 2550 14 4565 5007 4769 7733 0
182135431 2132 12 2349 21 2381 18 2427 9 2181 22 2388 13 4442 4759 4518 7733 0
182135531 2396 15 2384 36 2524 13 2380 13 2157 19 2421 26 4738 4865 4532 7733 0
182135632 2173 15 2319 28 2520 10 2473 19 2205 19 2389 17 4460 4958 4557 7733 1
182135731 2153 12 2282 17 2389 8 2362 17 1974 20 2312 13 4404 4704 4243 7734 0
182135831 2322 8 2435 35 2503 17 2486 10 2189 18 2427 13 4715 4929 4564 7734 0
182135931 2271 7 2436 35 2424 14 2479 16 2170 15 2455 10 4670 4852 4571 7734 0
182140031 2223 11 2438 37 2467 14 2334 8 2151 23 2376 15 4631 4765 4473 7734 0
182140131 2128 14 2334 28 2421 6 2354 14 2299 29 2389 13 4443 4730 4638 7734 0
182140231 2207 12 2465 38 2515 13 2442 17 2219 25 2404 18 4655 4917 4588 7734 0
182140331 2268 10 2433 34 2378 15 2327 9 2142 17 2405 9 4676 4671 4504 7734 0

```

Figura 5.5: En el recuadro rojo se muestra un conjunto de datos que tienen un atraso de 1s. En la parte izquierda de la imagen se pueden ver los datos de fecha y hora. También se observa que al ocurrir el retraso, en el siguiente periodo éste se compensa.

5.2. Resultados

El prototipo final del sistema se constituye de las siguientes unidades:

- Seis *módulos canal de neutrones* para cada uno de los contadores proporcionales del monitor NM64: A1, A2, B1, B2, C1 y C2.
- Un *módulo canal de presión*.
- Tres módulos adicionales que llevan el conteo de la suma lógica entre cada pareja de contadores: $A1 + A2$, $B1 + B2$ y $C1 + C2$.
- Además de los módulos necesarios para la comunicación con la PC, sincronización del sistema y envío de datos.

Estas unidades se sintetizaron en el FPGA y tan sólo ocupan el 25% de la capacidad de éste.

Se realizaron pruebas de todo el sistema funcionando durante varios días para garantizar que el sistema podía operar de forma ininterrumpida y automática. El principal problema que se encontró en este punto fue con respecto a la sincronía en la recepción y envío de datos. Para solucionar esto, tuvimos que ajustar el diseño del *módulo de comunicación I²C* hasta llegar al diseño que se mostró en el capítulo anterior. Lograr superar este paso requirió de aproximadamente tres meses.

Una vez que conseguimos que el sistema funcionará por varios días, se puso como objetivo realizar una prueba de dos semanas y comparar los datos entre ambos sistemas de adquisición de datos; el adquisidor actual y el nuevo sistema de adquisición. Para efectuar correctamente esta prueba se sincronizaron ambos sistemas.

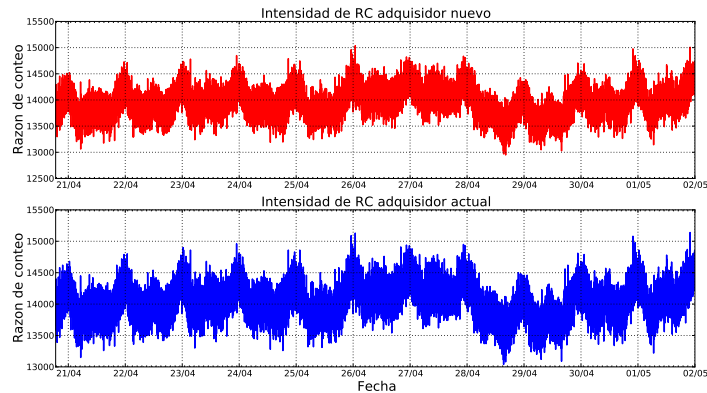


Figura 5.6: Intensidad de RC registrada por ambos sistemas de adquisición.

En la figura 5.6 se muestran los datos registrados por ambos sistemas de adquisición en el periodo del 4 de abril al 2 de mayo de 2011. Para estimar la intensidad de la radiación cósmica se sumaron las cuentas por minuto de todos los contadores proporcionales. Posteriormente se deben corregir los datos por presión atmosférica. En nuestro caso este ajuste no es necesario ya que ambos sistemas se encuentran sometidos a la mismas condiciones climáticas.

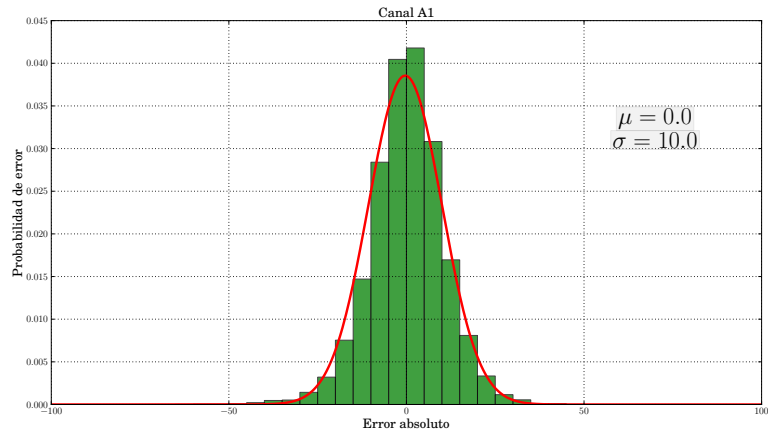
A simple vista podemos observar que las dos gráficas siguen la misma tendencia. Sin embargo, para obtener una comparación más acertada, obtendremos el error absoluto $—V_{SDAQnuevo} - V_{SDAQactual}—$ entre ambas mediciones. Como se tiene una gran cantidad de datos y todos distintos, consideraremos para nuestro análisis la distribución de probabilidad del error absoluto. Esta distribución se espera sea del tipo *normal* con μ igual a cero —error absoluto mínimo— y σ igual a diez. La razón de que se espere una desviación estándar de diez se debe a que los datos del sistema actual están escalados entre diez.

A continuación se muestran las distribuciones de *probabilidad de error* de cada uno de los seis detectores del NM64. La línea roja representa la distribución normal teórica. Ésta se genera con los valores de media y desviación estándar obtenidos para cada canal. Las barras verdes representan la distribución real, para cada uno de los canales.

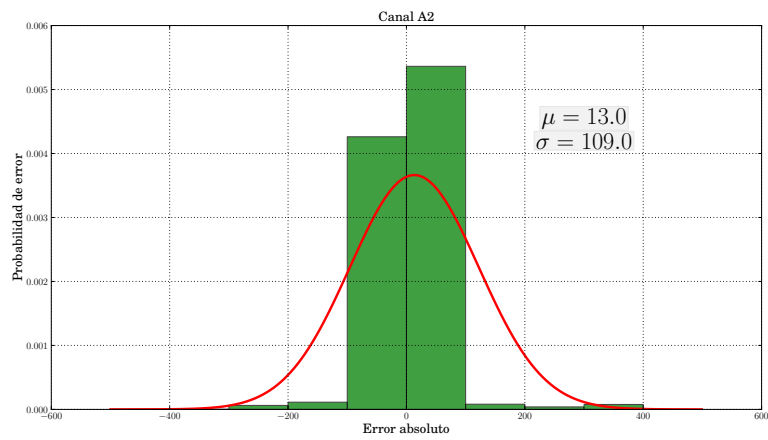
Se puede observar en las figuras, que las distribuciones de los canales A1, B2 y C1 corresponden a lo esperado, con lo que se infiere que no existe ningún problema con los datos.

Con respecto al canal C2, se observa un comportamiento del tipo *normal*; sin embargo su media está desplazada hacia la derecha. Esto puede solucionarse ajustando el nivel de discriminación en la etapa de acondicionamiento del canal en cuestión, en otras palabras, *calibrarlo*.

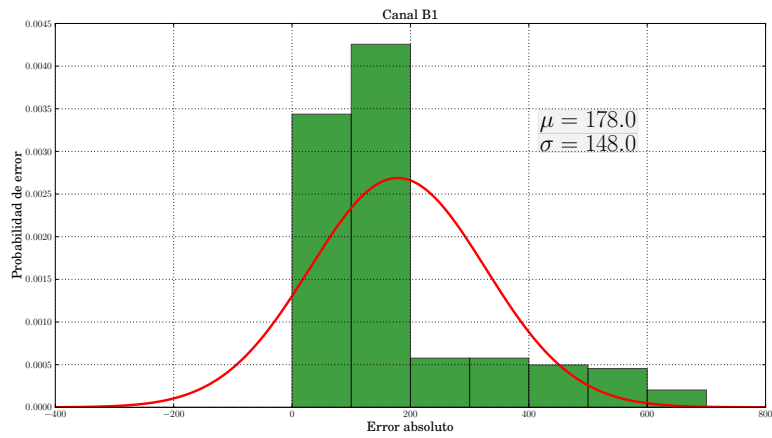
Sobresalen de entre las gráficas las de los canales A2 y B1, las cuales no tienen una distribución normal y sus parámetros μ y σ son de valores muy diferentes a los esperados. Para determinar el origen de este problema realizaremos otro tipo de análisis estadístico.



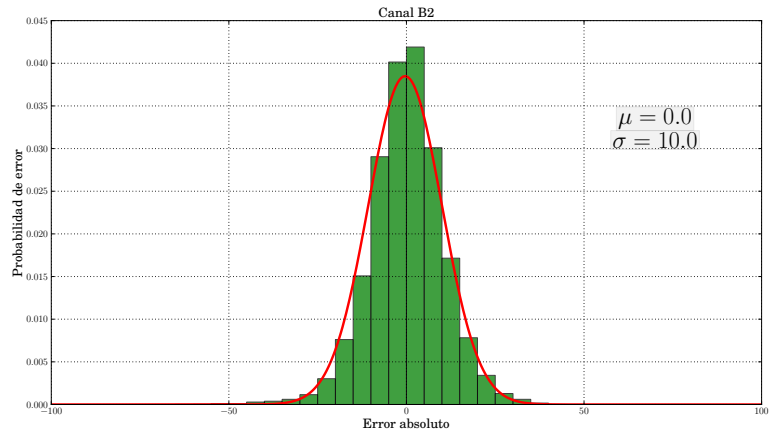
(a) Distribución canal A1



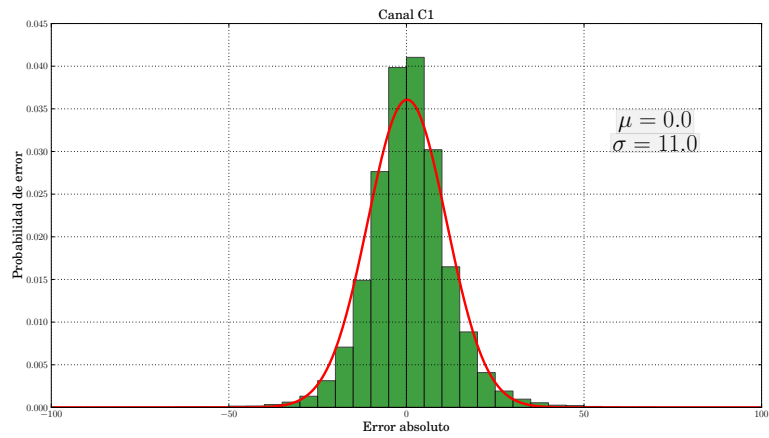
(b) Distribución canal A2



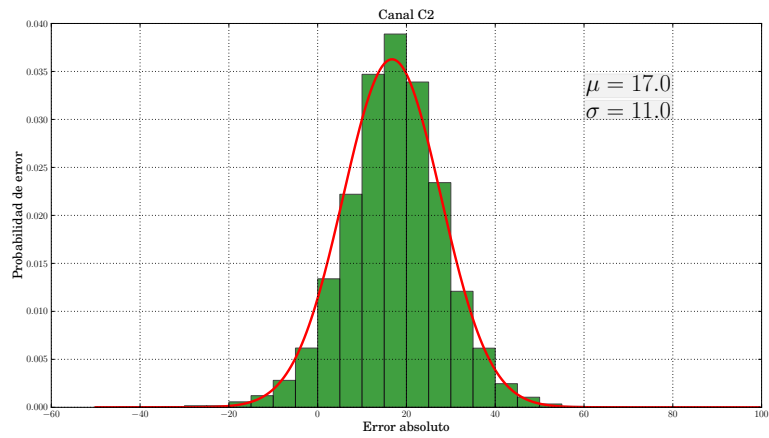
(c) Distribución canal B1



(a) Distribución canal B2



(b) Distribución canal C1

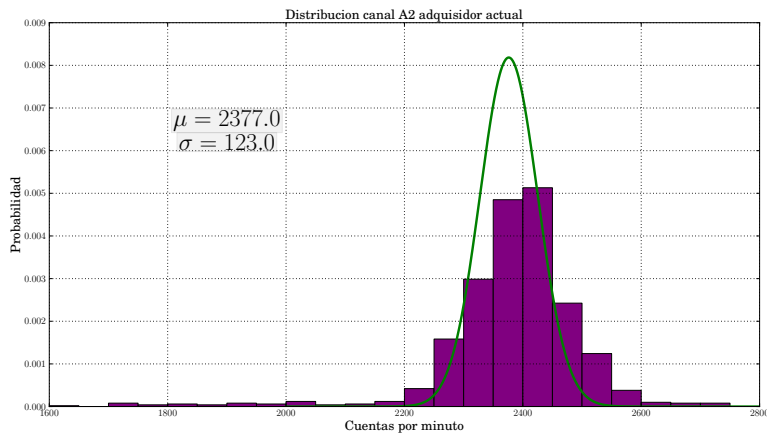


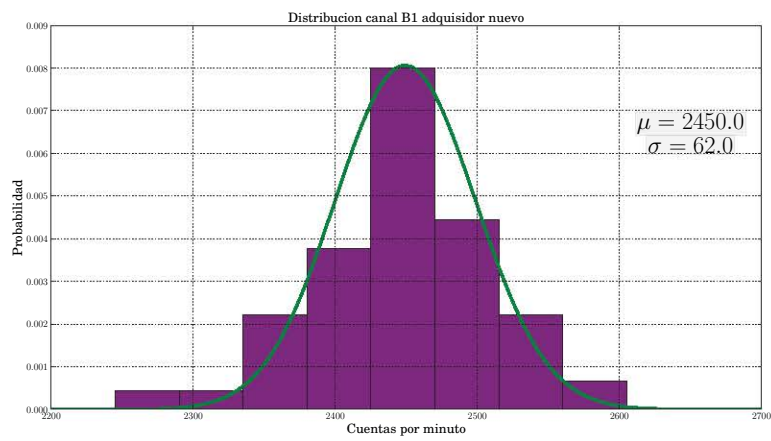
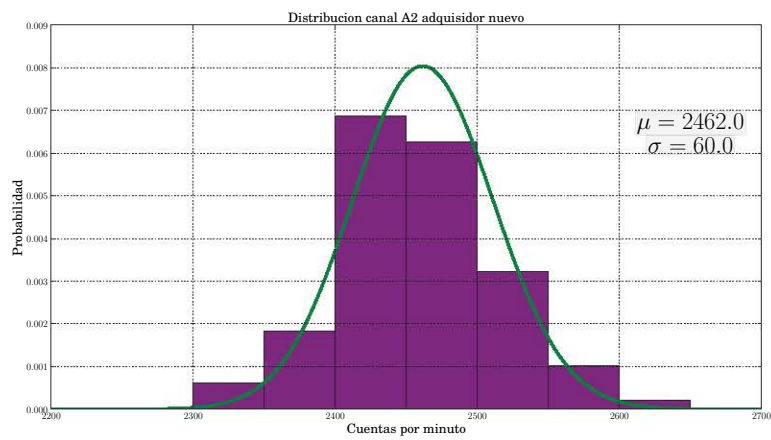
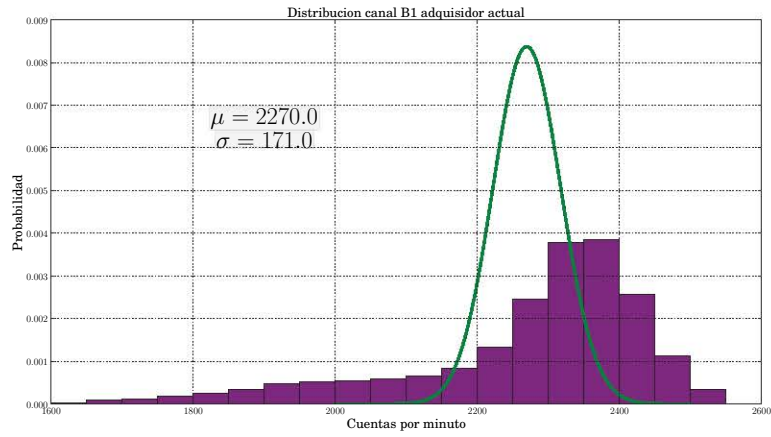
(c) Distribución canal B2

La *distribución de Poisson* es la *distribución de probabilidad* que expresa la *probabilidad de ocurrencia* de un cierto número de eventos en un intervalo de tiempo. En un sistema de conteo de partículas, se espera que la distribución de probabilidad de las cuentas se ajuste a una *poissoniana*. Tomando esto en cuenta, comprobaremos si los canales A2 y B1 de ambos sistemas se comportan de dicha forma.

En las siguientes gráficas se puede ver que existe una desviación en la distribución de las cuentas del equipo actual con respecto a la *distribución de Poisson* teórica. La línea verde representa la distribución teórica, mientras que las barras moradas, la distribución real de las cuentas. Entre los factores que pueden ocasionar que se alteren las cuentas del sistema, se encuentran: ruido eléctrico, humedad en el ambiente o desgaste en las tarjetas de circuito impreso, entre otras.

Por otro lado, las distribuciones del nuevo adquisidor se ajustan de manera satisfactoria al modelo poissoniano.





En conclusión, se infiere que el problema no se encuentra en los detectores, ni en el sistema nuevo, sino que proviene del sistema de adquisición de datos actual. Con esto se comprueba que es necesario el cambio hacia el nuevo sistema de adquisición de datos.

Cabe señalar que los datos de las cuentas individuales no son publicados por el observatorio; estos datos son útiles para estudios que se realizan internamente en la estación. Los datos publicados son la suma total de las tres secciones del monitor: $A1 + A2$, $B1 + B2$ y $C1 + C2$. Este proceso es independiente del proceso que lleva las cuentas individuales.

5.3. Conclusiones

Tras haber realizado todas las pruebas y analizado los datos arrojados por el sistema; concluimos que los resultados obtenidos son satisfactorios. Retomando los objetivos que planteamos al principio de esta tesis, podemos decir que se cumplió el objetivo principal de diseñar e implementar un sistema de adquisición de datos que cubra las necesidades del observatorio. En otras palabras, el nuevo sistema de adquisición de datos es un sistema orientado a la detección de radiación cósmica y en específico para el monitor NM64. El sistema se compone de seis canales para cada uno de los contadores proporcionales, tres canales para cada sección del monitor y un canal para el sensor MeteolaborAG.

Además, al basar nuestro diseño en tecnología moderna, se consiguieron superar limitaciones técnicas que afectan al sistema actual. Dentro de estas mejoras, el ajuste del tiempo de adquisición por medio del servidor *ntp*, contribuye en gran manera a la operación automática del sistema y mejora la precisión con la que se obtienen los datos.

De igual forma, el realizar el ajuste de tiempo mediante software contribuyó a incorporar el uso de la computadora en otras tareas, tales como: el control de adquisición, el almacenamiento de datos, el despliegue de información y el establecimiento de herramientas de diagnóstico. Todo esto se logra sin la necesidad de software comercial o tarjetas electrónicas especializadas y sin demandar una gran cantidad de recursos a la PC.

Por otra parte, se añadió al equipo un nuevo módulo de adquisición que discrimina entre dos tipos de pulsos. La información que arroja este nuevo canal permitirá caracterizar la multiplicidad del detector y de esta forma estimar con mayor precisión la intensidad de la radiación.

Finalmente, al haber utilizado un dispositivo lógico programable en el diseño, se concluye que es factible añadir nuevas funciones al sistema de adquisición de datos cuando este lo requiera. En un futuro, el Observatorio pretende incorporar mayor número de detectores y posiblemente nuevas funciones que requieran agregar más canales de adquisición. El FPGA que utilizó en el sistema, tiene

capacidad de albergar hasta cincuenta canales de adquisición.

A través de las pruebas que se realizaron, hemos podido constatar que el sistema puede operar de forma automática e ininterrumpida por un largo periodo de tiempo. Además, como resultado de este trabajo de investigación se ha generado la documentación necesaria para el mantenimiento y operación del sistema. Ambos factores, nos indican que el sistema está listo para su construcción.

Como parte final, mencionaremos algunas mejoras que se pueden hacer al sistema y temas de investigación que podrían desprenderse a partir de esta.

5.3.1. ¿Qué falta por hacer?

Agregar canales de muones. El nuevo adquisidor de datos captura datos del monitor de neutrones NM64; sin embargo el Observatorio de Rayos Cósmicos de la ciudad de México ubicado en Ciudad Universitaria cuenta con un telescopio de Muones. El nuevo equipo no cubre por el momento la adquisición de datos de este telescopio, no obstante que la capacidad del sistema soporta la incorporación de estos detectores.

Agregar sensor de temperatura. Como se mencionó en la sección 1.2, los rayos cósmicos se ven afectados por ciertas manifestaciones atmosféricas; entre ellas la presión y la temperatura. Añadir un sensor de temperatura al sistema de adquisición de datos nos brindaría mayor información sobre dichos efectos.

Software amigable. Aunque el software de adquisición no es complicado para su operación, ya que sólo necesita de algunas instrucciones —comandos—, se entiende por software amigable aquel cuya interacción con el usuario es de uso fácil, recurriendo a: gráficos intuitivos, guías, punteros, etc.

Tiempo de adquisición automático. El tiempo de captura de datos del nuevo sistema es de 60s y puede ser modificado según las necesidades del operador. Contar con un ajuste de tiempo automático es útil cuando se presenta un evento solar y se incrementa el número de cuentas del monitor. Si el sistema de adquisición logra detectar este incremento, puede disminuir el tiempo de adquisición para recoger un mayor número de datos y tener un mejor seguimiento del fenómeno.

Sensar fuentes de voltaje. La experiencia en el mantenimiento del equipo trabajando en el Observatorio de Radiación Cósmica en Ciudad Universitaria indica que la mayoría de las fallas provienen de las fuentes de alto voltaje que suministran energía a los contadores proporcionales. Sensar las fuentes ayudaría a prevenir posibles fallas.

Información sobre la energía que deposita cada partícula. Actualmente no se mide la cantidad de energía que cada partícula deposita en el monitor. El diseño e implementación de un *super módulo* encargado de registrar

esta información y procesarla, impulsaría nuevos estudios, además de reforzar la investigación que actualmente se desarrolla en el Observatorio.

Información sobre la trayectoria de arribo de cada partícula. Como se vio en secciones anteriores, el monitor NM64 tiene algunas limitaciones, una de estas es que no proporciona de manera inherente la trayectoria de las partículas. Sin embargo, se puede diseñar un *super módulo* que capte las señales de cada uno de los contadores proporcionales y por medio de alguna descripción lógica identifique cada partícula y la rastree durante su paso en el monitor. Esta información es sumamente importante para el estudio de la radiación cósmica.

Apéndice A

Hojas de especificaciones

Introduction

Following the immensely successful first-generation Cyclone® device family, Altera® Cyclone II FPGAs extend the low-cost FPGA density range to 68,416 logic elements (LEs) and provide up to 622 usable I/O pins and up to 1.1 Mbits of embedded memory. Cyclone II FPGAs are manufactured on 300-mm wafers using TSMC's 90-nm low-k dielectric process to ensure rapid availability and low cost. By minimizing silicon area, Cyclone II devices can support complex digital systems on a single chip at a cost that rivals that of ASICs. Unlike other FPGA vendors who compromise power consumption and performance for low-cost, Altera's latest generation of low-cost FPGAs—Cyclone II FPGAs, offer 60% higher performance and half the power consumption of competing 90-nm FPGAs. The low cost and optimized feature set of Cyclone II FPGAs make them ideal solutions for a wide array of automotive, consumer, communications, video processing, test and measurement, and other end-market solutions. Reference designs, system diagrams, and IP, found at www.altera.com, are available to help you rapidly develop complete end-market solutions using Cyclone II FPGAs.

Low-Cost Embedded Processing Solutions

Cyclone II devices support the Nios II embedded processor which allows you to implement custom-fit embedded processing solutions. Cyclone II devices can also expand the peripheral set, memory, I/O, or performance of embedded processors. Single or multiple Nios II embedded processors can be designed into a Cyclone II device to provide additional co-processing power or even replace existing embedded processors in your system. Using Cyclone II and Nios II together allow for low-cost, high-performance embedded processing solutions, which allow you to extend your product's life cycle and improve time to market over standard product solutions.

Low-Cost DSP Solutions

Use Cyclone II FPGAs alone or as DSP co-processors to improve price-to-performance ratios for digital signal processing (DSP) applications. You can implement high-performance yet low-cost DSP systems with the following Cyclone II features and design support:

- Up to 150 18×18 multipliers
- Up to 1.1 Mbit of on-chip embedded memory
- High-speed interfaces to external memory

- DSP intellectual property (IP) cores
- DSP Builder interface to The Mathworks Simulink and Matlab design environment
- DSP Development Kit, Cyclone II Edition

Cyclone II devices include a powerful FPGA feature set optimized for low-cost applications including a wide range of density, memory, embedded multiplier, and packaging options. Cyclone II devices support a wide range of common external memory interfaces and I/O protocols required in low-cost applications. Parameterizable IP cores from Altera and partners make using Cyclone II interfaces and protocols fast and easy.

Features

The Cyclone II device family offers the following features:

- High-density architecture with 4,608 to 68,416 LEs
 - M4K embedded memory blocks
 - Up to 1.1 Mbits of RAM available without reducing available logic
 - 4,096 memory bits per block (4,608 bits per block including 512 parity bits)
 - Variable port configurations of $\times 1$, $\times 2$, $\times 4$, $\times 8$, $\times 9$, $\times 16$, $\times 18$, $\times 32$, and $\times 36$
 - True dual-port (one read and one write, two reads, or two writes) operation for $\times 1$, $\times 2$, $\times 4$, $\times 8$, $\times 9$, $\times 16$, and $\times 18$ modes
 - Byte enables for data input masking during writes
 - Up to 260-MHz operation
- Embedded multipliers
 - Up to 150 18- \times 18-bit multipliers are each configurable as two independent 9- \times 9-bit multipliers with up to 250-MHz performance
 - Optional input and output registers
- Advanced I/O support
 - High-speed differential I/O standard support, including LVDS, RSDS, mini-LVDS, LVPECL, differential HSTL, and differential SSTL
 - Single-ended I/O standard support, including 2.5-V and 1.8-V, SSTL class I and II, 1.8-V and 1.5-V HSTL class I and II, 3.3-V PCI and PCI-X 1.0, 3.3-, 2.5-, 1.8-, and 1.5-V LVCMOS, and 3.3-, 2.5-, and 1.8-V LVTTTL
 - Peripheral Component Interconnect Special Interest Group (PCI SIG) *PCI Local Bus Specification, Revision 3.0* compliance for 3.3-V operation at 33 or 66 MHz for 32- or 64-bit interfaces
 - PCI Express with an external TI PHY and an Altera PCI Express $\times 1$ Megacore[®] function

- 133-MHz PCI-X 1.0 specification compatibility
 - High-speed external memory support, including DDR, DDR2, and SDR SDRAM, and QDR II SRAM supported by drop in Altera IP MegaCore functions for ease of use
 - Three dedicated registers per I/O element (IOE): one input register, one output register, and one output-enable register
 - Programmable bus-hold feature
 - Programmable output drive strength feature
 - Programmable delays from the pin to the IOE or logic array
 - I/O bank grouping for unique VCCIO and/or VREF bank settings
 - MultiVolt™ I/O standard support for 1.5-, 1.8-, 2.5-, and 3.3-interfaces
 - Hot-socketing operation support
 - Tri-state with weak pull-up on I/O pins before and during configuration
 - Programmable open-drain outputs
 - Series on-chip termination support
- Flexible clock management circuitry
 - Hierarchical clock network for up to 402.5-MHz performance
 - Up to four PLLs per device provide clock multiplication and division, phase shifting, programmable duty cycle, and external clock outputs, allowing system-level clock management and skew control
 - Up to 16 global clock lines in the global clock network that drive throughout the entire device
- Device configuration
 - Fast serial configuration allows configuration times less than 100 ms
 - Decompression feature allows for smaller programming file storage and faster configuration times
 - Supports multiple configuration modes: active serial, passive serial, and JTAG-based configuration
 - Supports configuration through low-cost serial configuration devices
 - Device configuration supports multiple voltages (either 3.3, 2.5, or 1.8 V)
- Intellectual property
 - Altera megafunction and Altera MegaCore function support, and Altera Megafunctions Partners Program (AMPPSM) megafunction support, for a wide range of embedded processors, on-chip and off-chip interfaces, peripheral functions, DSP functions, and communications functions and

protocols. Visit the Altera IP MegaStore at www.altera.com to download IP MegaCore functions.

- Nios II Embedded Processor support

The Cyclone II family offers devices with the Fast-On feature, which offers a faster power-on-reset (POR) time. Devices that support the Fast-On feature are designated with an “A” in the device ordering code. For example, EP2C5A, EP2C8A, EP2C15A, and EP2C20A. The EP2C5A is only available in the automotive speed grade. The EP2C8A and EP2C20A are only available in the industrial speed grade. The EP2C15A is only available with the Fast-On feature and is available in both commercial and industrial grades. The Cyclone II “A” devices are identical in feature set and functionality to the non-A devices except for support of the faster POR time.



Cyclone II A devices are offered in automotive speed grade. For more information, refer to the Cyclone II section in the *Automotive-Grade Device Handbook*.



For more information on POR time specifications for Cyclone II A and non-A devices, refer to the *Hot Socketing & Power-On Reset* chapter in the *Cyclone II Device Handbook*.

Table 1–1 lists the Cyclone II device family features. Table 1–2 lists the Cyclone II device package offerings and maximum user I/O pins.

Feature	EP2C5 (2)	EP2C8 (2)	EP2C15 (1)	EP2C20 (2)	EP2C35	EP2C50	EP2C70
LEs	4,608	8,256	14,448	18,752	33,216	50,528	68,416
M4K RAM blocks (4 Kbits plus 512 parity bits)	26	36	52	52	105	129	250
Total RAM bits	119,808	165,888	239,616	239,616	483,840	594,432	1,152,000
Embedded multipliers (3)	13	18	26	26	35	86	150
PLLs	2	2	4	4	4	4	4

Table 1–1. Cyclone II FPGA Family Features (Part 2 of 2)							
Feature	EP2C5 (2)	EP2C8 (2)	EP2C15 (1)	EP2C20 (2)	EP2C35	EP2C50	EP2C70
Maximum user I/O pins	158	182	315	315	475	450	622

Notes to Table 1–1:

- (1) The EP2C15A is only available with the Fast On feature, which offers a faster POR time. This device is available in both commercial and industrial grade.
- (2) The EP2C5, EP2C8, and EP2C20 optionally support the Fast On feature, which is designated with an “A” in the device ordering code. The EP2C5A is only available in the automotive speed grade. The EP2C8A and EP2C20A devices are only available in industrial grade.
- (3) This is the total number of 18×18 multipliers. For the total number of 9×9 multipliers per device, multiply the total number of 18×18 multipliers by 2.

MC33178, MC33179

Low Power, Low Noise Operational Amplifiers

The MC33178/9 series is a family of high quality monolithic amplifiers employing Bipolar technology with innovative high performance concepts for quality audio and data signal processing applications. This device family incorporates the use of high frequency PNP input transistors to produce amplifiers exhibiting low input offset voltage, noise and distortion. In addition, the amplifier provides high output current drive capability while consuming only 420 μ A of drain current per amplifier. The NPN output stage used, exhibits no deadband crossover distortion, large output voltage swing, excellent phase and gain margins, low open-loop high frequency output impedance, symmetrical source and sink AC frequency performance.

The MC33178/9 family offers both dual and quad amplifier versions, tested over the vehicular temperature range, and are available in DIP and SOIC packages.

- 600 Ω Output Drive Capability
- Large Output Voltage Swing
- Low Offset Voltage: 0.15 mV (Mean)
- Low T.C. of Input Offset Voltage: 2.0 μ V/ $^{\circ}$ C
- Low Total Harmonic Distortion: 0.0024% (@ 1.0 kHz w/600 Ω Load)
- High Gain Bandwidth: 5.0 MHz
- High Slew Rate: 2.0 V/ μ s
- Dual Supply Operation: \pm 2.0 V to \pm 18 V
- ESD Clamps on the Inputs Increase Ruggedness without Affecting Device Performance

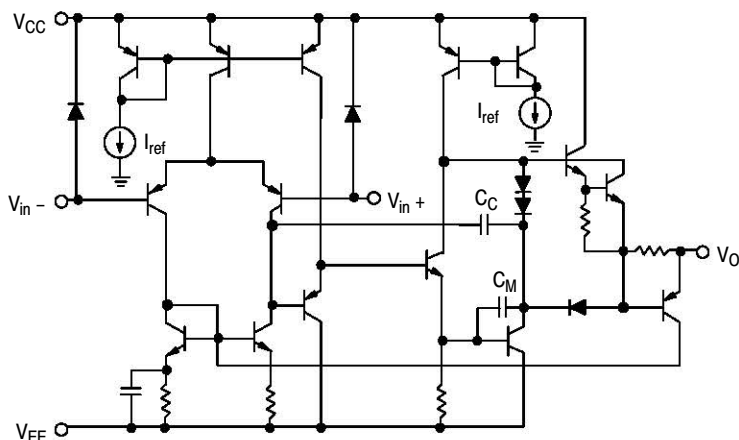


Figure 1. Representative Schematic Diagram
(Each Amplifier)



ON Semiconductor™

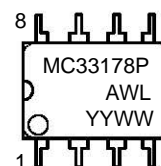
<http://onsemi.com>

MARKING DIAGRAMS

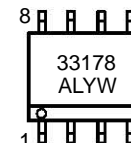
DUAL



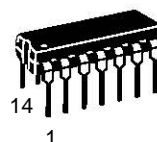
PDIP-8
P SUFFIX
CASE 626



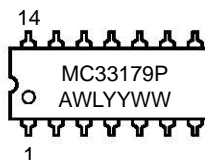
SO-8
D SUFFIX
CASE 751



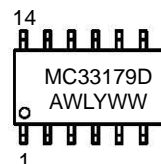
QUAD



PDIP-14
P SUFFIX
CASE 646



SO-14
D SUFFIX
CASE 751A



A = Assembly Location
WL, L = Wafer Lot
YY, Y = Year
WW, W = Work Week

ORDERING INFORMATION

Device	Package	Shipping
MC33178D	SO-8	98 Units/Rail
MC33178DR2	SO-8	2500 Tape & Reel
MC33178P	PDIP-8	50 Units/Rail
MC33179D	SO-14	55 Units/Rail
MC33179DR2	SO-14	2500 Tape & Reel
MC33179P	PDIP-14	25 Units/Rail

LM111/LM211/LM311 Voltage Comparator

1.0 General Description

The LM111, LM211 and LM311 are voltage comparators that have input currents nearly a thousand times lower than devices like the LM106 or LM710. They are also designed to operate over a wider range of supply voltages: from standard $\pm 15V$ op amp supplies down to the single 5V supply used for IC logic. Their output is compatible with RTL, DTL and TTL as well as MOS circuits. Further, they can drive lamps or relays, switching voltages up to 50V at currents as high as 50 mA.

Both the inputs and the outputs of the LM111, LM211 or the LM311 can be isolated from system ground, and the output can drive loads referred to ground, the positive supply or the negative supply. Offset balancing and strobe capability are provided and outputs can be wire OR'ed. Although slower than the LM106 and LM710 (200 ns response time vs 40 ns)

the devices are also much less prone to spurious oscillations. The LM111 has the same pin configuration as the LM106 and LM710.

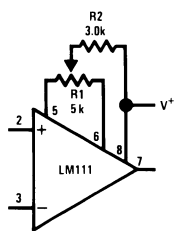
The LM211 is identical to the LM111, except that its performance is specified over a $-25^{\circ}C$ to $+85^{\circ}C$ temperature range instead of $-55^{\circ}C$ to $+125^{\circ}C$. The LM311 has a temperature range of $0^{\circ}C$ to $+70^{\circ}C$.

2.0 Features

- Operates from single 5V supply
- Input current: 150 nA max. over temperature
- Offset current: 20 nA max. over temperature
- Differential input voltage range: $\pm 30V$
- Power consumption: 135 mW at $\pm 15V$

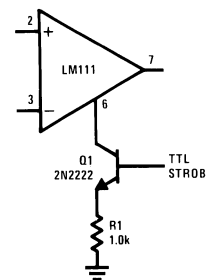
3.0 Typical Applications (Note 3)

Offset Balancing



00570436

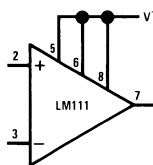
Strobing



00570437

Note: Do Not Ground Strobe Pin. Output is turned off when current is pulled from Strobe Pin.

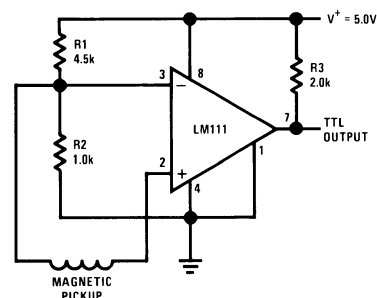
Increasing Input Stage Current (Note 1)



00570438

Note 1: Increases typical common mode slew from $7.0V/\mu s$ to $18V/\mu s$.

Detector for Magnetic Transducer



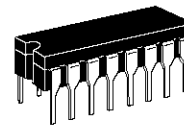
00570439

MC14504B

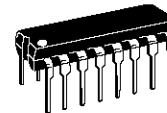
Hex Level Shifter for TTL to CMOS or CMOS to CMOS

The MC14504B is a hex non-inverting level shifter using CMOS technology. The level shifter will shift a TTL signal to CMOS logic levels for any CMOS supply voltage between 5 and 15 volts. A control input also allows interface from CMOS to CMOS at one logic level to another logic level: Either up or down level translating is accomplished by selection of power supply levels V_{DD} and V_{CC} . The V_{CC} level sets the input signal levels while V_{DD} selects the output voltage levels.

- UP Translates from a Low to a High Voltage or DOWN Translates from a High to a Low Voltage
- Input Threshold Can Be Shifted for TTL Compatibility
- No Sequencing Required on Power Supplies or Inputs for Power Up or Power Down
- 3 to 18 Vdc Operation for V_{DD} and V_{CC}
- Diode Protected Inputs to V_{SS}
- Capable of Driving Two Low-Power TTL Loads or One Low-Power Schottky TTL Load Over the Rated Temperature Range



L SUFFIX
CERAMIC
CASE 620



P SUFFIX
PLASTIC
CASE 648



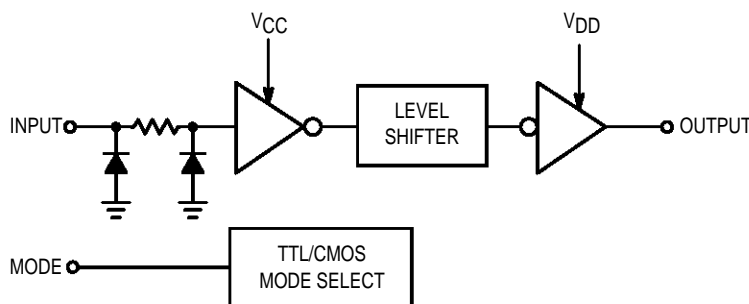
D SUFFIX
SOIC
CASE 751B

ORDERING INFORMATION

MC14XXXBCP Plastic
MC14XXXBCL Ceramic
MC14XXXBD SOIC

$T_A = -55^\circ$ to 125°C for all packages.

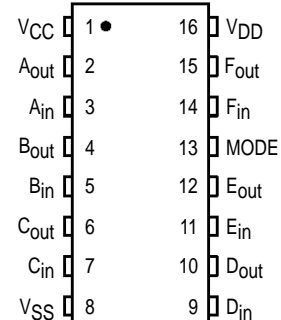
LOGIC DIAGRAM



Mode Select	Input Logic Levels	Output Logic Levels
1 (V_{CC})	TTL	CMOS
0 (V_{SS})	CMOS	CMOS

1/6 of package shown.

PIN ASSIGNMENT



This device contains circuitry to protect the inputs against damage due to high static voltages or electric fields referenced to the V_{SS} pin, only. Extra precautions must be taken to avoid applications of any voltage higher than maximum rated voltages to this high-impedance circuit. For proper operation, the ranges $V_{SS} \leq V_{in} \leq 18\text{ V}$ and $V_{SS} \leq V_{out} \leq V_{DD}$ are recommended.

Unused inputs must always be tied to an appropriate logic voltage level (e.g., either V_{SS} or V_{DD}). Unused outputs must be left open.