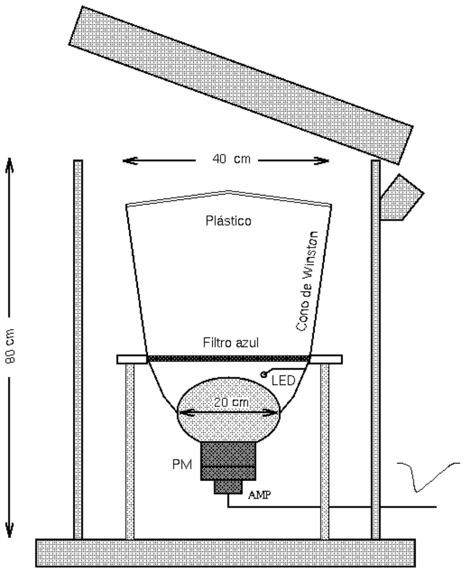

Figura 4.3: Esquema de una estación de AIROBICC.

La Figura 4.3 muestra el esquema de una estación de AIROBICC. Se compone básicamente de un concentrador que focaliza la luz de una gran parte del cielo sobre un fotomultiplicador muy sensible. El conjunto está protegido por una cubierta de plástico y se encuentra encerrado en una caja metálica para aislarlo de la luz y los elementos. La tapa de la caja se abre por control remoto cuando se dan las condiciones necesarias para la observación, esto es, cuando hay una noche despejada y sin la Luna sobre el horizonte.

El teorema de Liouville predice cual es el máximo factor de concentración que se puede conseguir con un cono de apertura dada y ese máximo se consigue con un paraboloide mucho más largo que ancho [29]. El concentrador usado en las casetas de AIROBICC es una aproximación denominada cono de Winston que consta de tres secciones cónicas, la inferior de 20 cm de diámetro acoplada al fotocátodo del fotomultiplicador y la superior de 40 cm de diámetro y casi medio metro de longitud. La parte interior está recubierta con una lámina de *mylar* aluminizado para maximizar la recolección de luz. Con este cono se consigue un factor de concentración ~ 4 con una eficiencia prácticamente constante hasta unos 20º de apertura, a partir de este punto la eficiencia disminuye, con especial rapidez a partir de los 30º. Se alcanza una eficiencia del 50% con un ángulo de incidencia de la luz de 35º respecto a la vertical de la caseta [24]. Así pues el campo de visión de AIROBICC es aproximadamente 1 sr centrado en el cenit.

El fotomultiplicador (Thorn-EMI D668 KB5) fue diseñado especialmente para AIROBICC por la casa EMI, es semiesférico con 20 cm de diámetro; tiene 6 etapas y es operado a una ganancia de 6 - $9\cdot10^3$. El número de etapas y la ganancia tienen valores bastante inferiores a los de un fotomultiplicador normal debido a que se diseñaron para operar bajo la intensa[12] luz de fondo del cielo nocturno, debida principalmente a la luz integrada de las estrellas, la luz difusa de la Vía Láctea, la luz zodiacal (luz solar reflejada por el polvo del Sistema Solar), la luz de fluorescencia atmosférica y la luz de ciudades cercanas. La corriente media del ánodo es de 25 μA y la tensión ánodo - cátodo es de unos 1500 V. El alto voltaje es producido en la propia caseta mediante un circuito muy estable especialmente diseñado por Matsusada (Matsusada HPMC-3N-MPI). Este circuito es básicamente un oscilador cuya salida está acoplada a una cascada de diodos de 21 etapas. El último dinodo está conectado a un sistema limitador de corriente retroalimentado para que en caso de operación accidental con una intensidad de luz excesiva su corriente no supere los 200 μA [24].

Las longitudes de onda (λ) a las que el fotomultiplicador es sensible están comprendidas entre unos 300 y 600 nm que es donde se produce la máxima emisión Cherenkov por las cascadas, no obstante

[12] Intensa comparada con la luz Cherenkov de las cascadas atmosféricas. Se ha estimado que la contribución de la luz Cherenkov de las cascadas al total del fondo nocturno es ~ 10^{-4} [4], de ahí la necesidad de usar un concentrador y un fotomultiplicador con una gran superficie de fotocátodo. En el sitio de AIROBICC el flujo del fondo nocturno entre 300 y 600 nm es $3.3\cdot10^{12}$ fotones m^{-2} s^{-1} sr^{-1} [24].

debido a que la intensidad del fondo de luz crece con λ se decidió colocar un filtro que maximizara la relación señal - ruido limitando el máximo valor de λ. El valor óptimo de corte es algo inferior a 400 nm, pero cortar en ese punto supone introducir un error sistemático ya que el espectro Cherenkov sufre una absorción en la atmósfera que depende de λ (mayor absorción a menor λ). Tomar un valor demasiado pequeño supone recibir la luz de etapas finales de la cascada (menor absorción) lo que va en contra del principio calorimétrico perseguido con la detección de la luz Cherenkov. Tomar un valor demasiado grande implica operar con mucho ruido de fondo y una corriente de ánodo demasiado alta, lo que acorta la vida del fotomultiplicador. Finalmente se encontró satisfactorio el valor de 470 nm como un valor de compromiso, el cual se logra mediante un filtro azul Schott BG1. Después de considerar la respuesta del fotomultiplicador, la transmisión del filtro, la reflectividad del cono y la transmisión del protector de plástico resulta que la respuesta del sistema en λ es, en grosera aproximación, una gaussiana con el máximo en 370 nm y una anchura a mitad de altura de unos 150 nm [24].

Durante la etapa de funcionamiento en pruebas de AIROBICC se observó que en noches frías y húmedas se condensaba agua o hielo en la cubierta de plástico, lo que disminuye el rendimiento del sistema por opacidad. Para evitarlo se incorporó una resistencia que disipa unos 10 - 20 W en forma de calor por debajo de la cubierta. En caso de producirse una subida de la humedad peligrosa para el funcionamiento del sistema (lluvia o niebla, por ejemplo) existe un sistema de seguridad que cierra automáticamente las casetas al detectarlo mediante dos medidores de humedad que sobrepasan un límite prefijado. A este sistema también están conectados un fotodiodo medidor de la intensidad de la luz de ambiente y un reloj programable, de forma que las casetas se cierran a la hora programada (normalmente al amanecer o a la salida de la Luna), o bien por si el reloj falla, cuando la intensidad de la luz supera un valor límite prefijado. Como medida adicional de seguridad existe otro temporizador que controla la alta tensión de los fotomultiplicadores para evitar que esté conectada fuera del periodo de uso de AIROBICC. La alimentación de los motores eléctricos que cierran las casetas está conectada a una batería para poder cerrarlas incluso en caso de un corte prolongado de corriente. Pese a todos estos sistemas de seguridad la fiabilidad no es tal como para operar de manera completamente automática y es necesaria la supervisión de un operador humano. Téngase en cuenta que un fallo en el cierre de las casetas podría ocasionar la destrucción de los filtros y los fotomultiplicadores debido al calentamiento producido por la concentración de la luz del Sol mediante el cono de Winston. ¡Los daños podrían ascender a más de 30 millones de pesetas!

La señal del fotomultiplicador es amplificada en la propia caseta antes de ser enviada a través de un cable coaxial RG213 de 150 m de largo hasta el contenedor central de la electrónica. El acoplamiento entre el fotomultiplicador y el amplificador es capacitivo para eliminar la corriente continua debida a la luz de fondo del cielo. La ganancia del amplificador es mayor a frecuencias altas para compensar la diferente atenuación del cable con la frecuencia. Entre el filtro azul y el fotomultiplicador hay colocado un LED amarillo (que próximamente será sustituido por uno de color azul, más acorde con el rango espectral del fotomultiplicador) cuyo propósito es participar en la calibración del retraso relativo entre las casetas, debido a diferentes longitudes y constantes dieléctricas de los cables de señal.

4.2 Proceso de las señales y toma de datos

La señal de los diversos detectores de HEGRA (centelleadores, torres Geiger, AIROBICC, telescopios Cherenkov) es enviada a través de cables hasta un contenedor central (con la temperatura controlada por un sistema de aire acondicionado) donde se sitúa toda la electrónica restante. Asimismo la alimentación y señales de control son enviadas desde el contenedor hasta los detectores a través de cables. Los telescopios Cherenkov tienen su propia toma de datos (basada en el sistema CAMAC) completamente independiente del resto de HEGRA y no se describirá por no ser relevante en este trabajo, aunque se puede encontrar una descripción en [15]. La toma de datos del resto de HEGRA se explica a continuación y está esquematizada en la Figura 4.4.

La señal de alta ganancia de las casetas de centelleador (proveniente del fotomultiplicador grande) a su llegada al contenedor es enviada a un discriminador de fracción constante (CFD) cuyo umbral está colocado a un nivel equivalente a 0.3 MIP. Cuando se supera este límite el CFD genera una señal cuadrada de 150 ns de duración que se suma a la de los demás CFDs. Esta señal suma es enviada a otro discriminador cuyo umbral está situado 14 veces más alto que la salida del CFD, de forma que si se produce la activación de 14 casetas o más dentro de 150 ns genera un impulso lógico que indica la detección de una cascada por parte de la matriz de centelleadores, esto es, se ha producido un "disparo". Este impulso es enviado a un módulo NIM, el cual también recibe las señales de disparo de AIROBICC y los telescopios y cuya función es iniciar el registro de los datos siempre que reciba la indicación de disparo de alguna componente cualquiera (centelleador, AIROBICC, telescopios). Cuando se ha producido el disparo este módulo pone en marcha los TDCs (***T**ime to **D**igital **C**onverter* - convertidor tiempo a digital) y genera la puerta de 600 ns durante la cual integrarán los ADCs (***A**nalog to **D**igital **C**onverter* - convertidor analógico a digital). El CFD tiene otra salida digital que es enviada a un retardador digital y de ahí a un canal de TDC (módulo FASTBUS Kinetic F432 de 12 *bits*) donde produce su parada. La salida analógica del CFD es dirigida a un retardador analógico y posteriormente a un canal de ADC (módulo FASTBUS LeCroy 1882F de 12 *bits* sensible a carga) donde es integrada. El retraso en las señales de tiempo y de carga es de unos 350 ns y se introduce para dar tiempo a la lógica del sistema a iniciar los TDCs y ADCs.

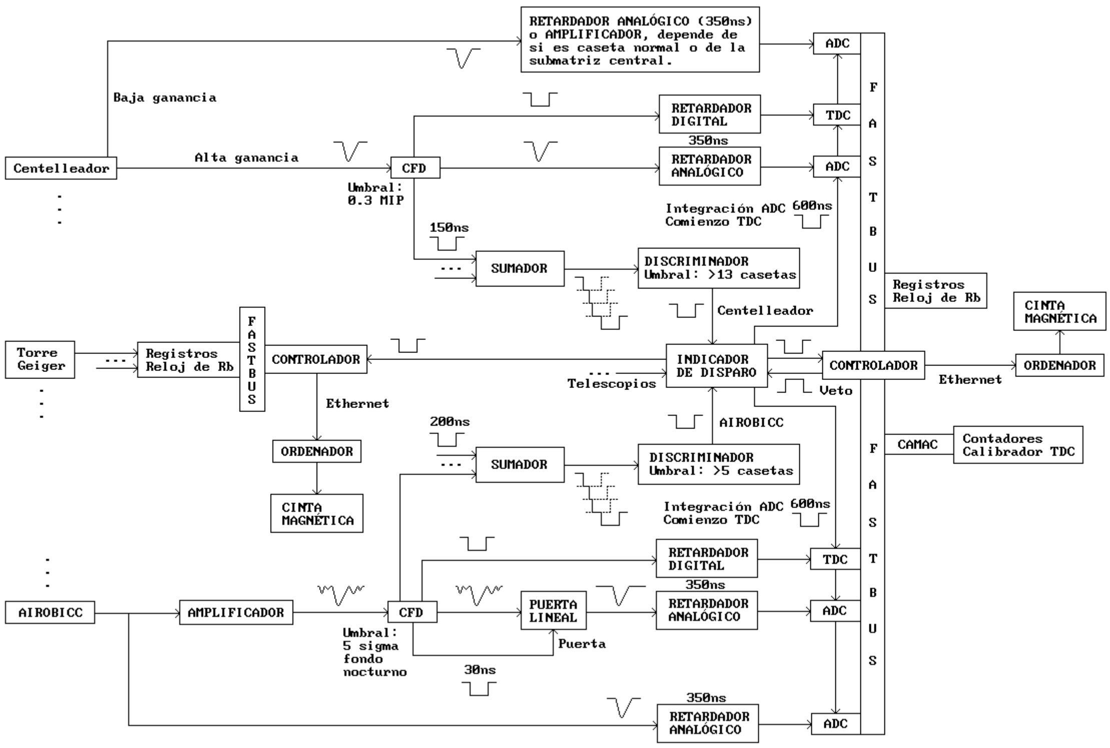

Figura 4.4: Diagrama esquematizando la toma de datos de HEGRA.

La señal de baja ganancia procedente del fotomultiplicador pequeño es amplificada y enviada sin ningún retraso hasta un ADC (módulo FASTBUS Kinetic F464 de 12 *bits* sensible al pico de voltaje). El retraso no es necesario porque el amplificador produce un ensanchamiento considerable de la señal y su pico de voltaje llega a tiempo al ADC. La señal de baja ganancia procedente de un dinodo (casetas de la submatriz central) no se amplifica, sino que es enviada directamente a un retardador analógico y de ahí a un ADC, ambos módulos iguales a los usados para la señal de alta ganancia.

El proceso de las señales de AIROBICC es bastante parecido al del centelleador. La señal del fotomultiplicador es dividida a su llegada al contenedor, siendo una parte enviada a un retardador y a continuación a un ADC idénticos a los empleados en la alta ganancia del centelleador. Esta rama constituye el canal de baja ganancia, usado cuando la densidad de fotones en la caseta es superior a unos 15000 m^{-2}, saturando por tanto el canal de alta ganancia. Este último se obtiene a partir de la amplificación de la otra parte de la señal del fotomultiplicador con un amplificador igual al existente en la propia caseta. Esta señal es enviada a un CFD del mismo tipo que los del centelleador, pero cuyo umbral está situado a un nivel equivalente a 5 σ de las fluctuaciones de las señales producidas por el fondo del cielo nocturno. En caso de superarse el umbral el CFD genera un impulso cuadrado de 200 ns de duración que se suma al de los demás CFDs de AIROBICC. La suma es introducida en otro discriminador cuyo nivel está colocado a la altura de 6 señales, por tanto la condición de disparo de AIROBICC es la activación de 6 casetas o más dentro de 200 ns. A partir de este punto el proceso es idéntico al de la matriz de centelleadores salvo por la inserción de una puerta lineal en el canal de ADC (y que se usa otro modelo de TDC, el módulo FASTBUS LeCroy 1875A de 12 *bits*). Para eliminar ruido presente en la señal del fotomultiplicador de AIROBICC se inserta entre la salida analógica del CFD y la entrada al retardador un módulo que sólo deja pasar la señal cuando se le aplica un impulso de control. Este dispositivo se denomina puerta lineal y está ajustado de modo que se abra durante los 30 ns en los que está presente la mayor parte del impulso de luz Cherenkov. La señal que abre la puerta lineal es proporcionada por el CFD. De esta forma se evita integrar luz del fondo nocturno durante los 600 ns que permanece abierta la puerta de los ADCs. Esto procedimiento no es necesario realizarlo en el canal de baja ganancia porque éste sólo será utilizado cuando la densidad de luz Cherenkov es grande y por tanto la influencia del fondo es mínima. El centelleador al estar aislado de contaminación luminosa no necesita una puerta lineal en ninguno de sus dos canales.

El sistema de toma de datos es automático y controlado por ordenador, estando basado en el estándar FASTBUS. El módulo encargado del control es un ordenador basado en el procesador Motorola 68k (módulo FASTBUS Kinetic F800) funcionando bajo el sistema operativo OS/9 (similar al UNIX) y ejecutando un programa escrito en C. Las torres Geiger disponen de un FASTBUS independiente del anterior controlado por un procesador similar (módulo FASTBUS Struck STR330) que ejecuta un programa escrito en ensamblador. Cada vez que se produce un disparo, el módulo NIM mencionado anteriormente envía una señal a los procesadores, los cuales generan una interrupción; en ese momento el procesador principal F800 (centelleadores y AIROBICC) manda una señal de veto al módulo NIM para que se abstenga de generar más disparos hasta que no se procesen los datos del que se acaba de producir. A partir de entonces el F800 comienza a leer el contenido de los módulos de TDC y ADC según el protocolo especificado por el estándar FASTBUS [30] y lo almacena en su propia memoria. Mientras tanto el procesador de las torres Geiger también se encarga de transferir a su memoria los datos de las torres. Cuando el procesador principal ha completado esta operación, elimina el veto de generación de disparos y empieza a trasvasar el contenido de su memoria a través de una red ETHERNET a un ordenador DECstation 5000 funcionando bajo ULTRIX y ejecutando un programa escrito en C. Asimismo el procesador de las torres Geiger transfiere sus datos a otro ordenador DEC de iguales características al anterior. Si durante este proceso se genera un disparo, el módulo F800 interrumpe la operación, lee la información del nuevo disparo almacenándola a continuación de la anterior y vuelve a retomar el envío de datos donde lo dejó antes del disparo. Los ordenadores DEC guardan los datos en un disco duro y cuando se llena es sustituido por otro mientras el primero es vaciado, guardando su contenido en cinta magnética de 8 mm EXABYTE. Con este sistema de lectura basado en *buffers* o compartimientos de memoria se consigue operar a más de 20 Hz (cuando funcionan el centelleador y AIROBICC simultáneamente), con un tiempo muerto aproximado del 20%, ya que el tiempo medio de recuperación del sistema (lectura de los datos) es de unos 8 ms.

Además de los datos de TDC, ADC y torres Geiger, los procesadores también leen y almacenan otro tipo de información tal como el contenido de registros (qué componente produjo el disparo), contadores (cuál es la tasa de disparo de cada componente) y el tiempo del suceso (según el reloj del propio procesador y según un reloj atómico de rubidio preciso hasta 0.1 μs conectado a un sistema GPS, *Global Position System* - Sistema de tiempo y posición global basado en satélites). Los registros y contadores son alimentados con un entramado de módulos NIM que forman el núcleo de la lógica del sistema. Los registros y el reloj de rubidio son leídos a través de un módulo FASTBUS Struck STR146 mientras que los contadores lo son a través de módulos CAMAC. El sistema CAMAC es enlazado con el FASTBUS mediante un módulo FASTBUS Struck STR320.

El procesador F800 ordena un ciclo de calibraciones al iniciar la toma de datos y después cada 20 minutos, las cuales duran unos 90 s. La calibración tiene dos partes, la primera consiste en generar disparos artificiales y enviar señales de comienzo y parada a los TDC cuya diferencia está programada a través de un módulo CAMAC Phillips Scientific 7120. Se mandan 35 diferencias de tiempo repitiendo cada una 5 veces e incrementándolas en 25 ns cada vez, por tanto se realizan 5 x 35 = 175 disparos ficticios. Conociendo el incremento en el intervalo de tiempo se puede conseguir una calibración de la pendiente de los TDCs (cuentas por ns) y también una comprobación de su linealidad. Los valores de los ADCs son usados para estimar sus pedestales (valor mínimo del ADC debido a cargas dispersas), ya que el disparo fue ficticio y por tanto no hay ninguna señal auténtica presente. La segunda parte de la calibración consiste en enviar 200 impulsos de luz a los fotomultiplicadores a través de los LEDs instalados en las casetas. Esto genera otros tantos disparos artificiales cuyo valor está en que los tiempos son siempre los mismos para todas las casetas y todas las calibraciones, por tanto las diferencias de tiempos de los TDCs entre distintas casetas se deben a diferentes longitudes de los cables, mientras que las diferencias de tiempos entre distintas calibraciones de la misma caseta son producidas por variaciones de la constante dieléctrica del cable debido a cambios de temperatura. Mediante un reflectómetro se ha medido la longitud de los cables que llevan la señal al LED con una precisión entre 50 y 100 ps, esto permite calibrar las diferencias relativas de tiempo con un error de 0.5 ns.