

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE GENERAL SAN MARTIN
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
"Prof. Jorge A. Sabato"**

**Contribución al Estudio Experimental de la
Degradación de Materiales de Uso Espacial Producida
por la Radiación Existente en Órbitas de Baja Altura y
por las Condiciones Ambientales en Vuelo**

por Alejandro Vertanessian

Director del Trabajo

Dr. Alberto Filevich

Codirector del Trabajo: Dr. Martín Alurralde

Tesis para optar al título de Doctor en Ciencia y Tecnología Mención Física

República Argentina

2008

.....
Lic. Alejandro Vertanessian
TESISTA

.....
Fecha y Lugar

.....
Dr. Alberto Filevich
DIRECTOR

.....
Dr. Martín Alurralde
CO DIRECTOR

.....
Fecha y Lugar

.....
Fecha y Lugar

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de tesis ha sido estudiar la influencia del ambiente espacial, incluyendo radiación, sobre los componentes sensibles que integran el diseño de partes de satélites. La motivación inicial fue la necesidad de evaluar la resistencia a la radiación de las celdas solares a ser utilizadas para el Plan Satelital Argentino, y se tuvo en cuenta también la posibilidad de extender esa evaluación a otros dispositivos y/o materiales cuyo empleo se prevé con propósitos similares.

Los trabajos fueron realizados como participación en el Grupo de Daño por Radiación de la división de Energía Solar de la CNEA, bajo convenio con CONAE, y en el marco de la Ley de Innovación Tecnológica.

En el transcurso del presente trabajo se ha dado énfasis al desarrollo de la infraestructura necesaria para estos estudios, ya que inicialmente se carecía por completo de ella.

Para la realización del estudio se consideraron tres factores principales, presentes en órbitas satelitales: influencias de la condición de alto vacío, del ciclado térmico, y de la presencia de radiación.

El vacío y el ciclado térmico a que se someten los componentes satelitales en vuelo durante su vida útil se traducen en sollicitaciones mecánicas y estructurales que pueden deteriorar el conexionado, las soldaduras y eventualmente el encapsulado de componentes, y que conducen a un “envejecimiento” del conjunto.

La radiación presente en el espacio puede deteriorar materiales poliméricos y especialmente, a través de diferentes procesos, puede inducir daño, transitorio o permanente, y producir modificaciones en las características de componentes activos que incluyen semiconductores o aisladores.

En el presente trabajo se describe en detalle la infraestructura que ha sido construida con el propósito mencionado y los ensayos realizados en componentes satelitales. El resultado de estos ensayos ha permitido evaluar y calificar componentes y procesos de fabricación, especialmente en relación a su resistencia a la radiación y al ciclado térmico. Esos componentes están destinados a integrar los paneles solares de satélites de la serie SAOCOM.

Esos resultados han sido objeto de informes emitidos por el Grupo de Daño por Radiación de la CNEA y dirigidos a CONAE, y se exponen con detalle en el presente trabajo. También se han realizado publicaciones en congresos internacionales sobre el tema y en revistas especializadas.

CAPÍTULO I

1. Introducción

En el marco del Plan Nacional Espacial, la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) ha definido dos familias de misiones satelitales, según los instrumentos argentinos principales a bordo: la Serie SAC (por Satélite de Aplicaciones Científicas) con instrumentos argentinos que operan en el rango óptico y la Serie SAOCOM (por Satélite de Observación y Comunicaciones) con instrumentos argentinos que operan en el rango de microondas (radar). Dentro de la serie SAC, el SAC-A y SAC-B ya han cumplido su misión, el SAC-C se encuentra en órbita desde el 21 de noviembre de 2000 (Ref. 1) y el satélite Aquarius/SAC-D está en desarrollo. El objetivo científico del SAC-D está orientado a obtener nueva información climática a partir de las mediciones de salinidad del agua y una nueva visión de la circulación y procesos de mezcla en el océano. El movimiento del agua en el océano está afectado por las diferencias de densidad y la densidad varía con la temperatura y con la salinidad del agua. También se medirá la concentración de hielo marino, sobre todo en la Antártida. Se podrán detectar focos de alta temperatura en la superficie terrestre y obtener mapas de riesgo de incendios. Asimismo, se podrán obtener mapas de humedad del suelo que servirán para aplicaciones agrícolas y para alerta temprana de inundaciones (Ref. 1).

Italia y Argentina han encarado un ambicioso proyecto aeroespacial que consiste en poner en órbita una constelación de satélites, el Sistema Italo-Argentino para la Gestión de Emergencias (SIASGE), que integrará las mediciones de seis instrumentos de radar capaces de relevar información detallada del medio ambiente, en todo tipo de condiciones meteorológicas incluso a través de la cubierta de nubes y sin necesidad de luz solar. Esta capacidad de detección, que no sería posible con instrumentos ópticos, es especialmente apropiada para monitoreo y prevención de catástrofes. Dentro de esta constelación satelital, cuatro satélites -los Cosmo-SkyMed (Ref. 2) - son responsabilidad de Italia y dos -los SAOCOM 1A y 1B-, de la Argentina. Pero todos los instrumentos podrán controlarse y comunicarse en forma similar con dos estaciones terrenas principales, una ubicada en Falda del Carmen, Argentina y otra en Lancio, Italia (Ref. 2). El SIASGE fue creado para obtener información sobre emergencias naturales, como incendios, inundaciones, erupciones, terremotos, etc., y constituye una herramienta de avanzada para el Sistema Federal de Emergencias de Argentina (Ref. 1).

Los radares que trabajan en la banda L (SAOCOM) tienen una resolución de diez metros y los que operan en banda X (Cosmo-SkyMed), de un metro a un metro y medio. Ambos instrumentos "ven" simultáneamente objetos diferentes: si pasan por una zona arbolada, la señal del de banda X rebota en las copas de los árboles y la del de banda L, en el piso. La combinación de datos de las dos bandas produce información mucho más detallada que la que se obtendría si se operaran por separado. El SAOCOM también llevará a bordo una cámara de infrarrojo térmico. La cámara infrarroja es capaz de detectar incendios y erupciones volcánicas (Ref. 3). El mercado internacional de venta de datos satelitales es difícil de estimar, pero podría superar los mil millones de dólares anuales (Ref. 4).

Argentina también está involucrada en el proyecto AQUARIUS/SAC-D, en el cual Estados Unidos construye un sofisticado instrumento que mide la salinidad del agua de mar y Argentina construye el satélite que le sirve de soporte a ese instrumento (SAC-D).

El Grupo Energía Solar de la CNEA junto a un grupo interdepartamental del Centro Atómico Constituyentes (CAC) se encuentra trabajando en el desarrollo de paneles solares para misiones satelitales previstas en el Plan Espacial Nacional desde la firma del convenio de cooperación específica entre la CNEA y la CONAE, en marzo de 2001. Este convenio, encuadrado dentro de la Ley N° 23.877 de innovación tecnológica, dio lugar a la iniciación en el CAC del Subproyecto Paneles Solares como parte del Proyecto SAOCOM y también del Proyecto SAC-D, para fabricar y ensayar los paneles fotovoltaicos de ambos satélites (Ref. 5).

Las órbitas de baja altura (LEO) permiten una observación excelente de la superficie terrestre y se utilizan para satélites de sensado remoto de ella o de la atmósfera. En general son órbitas aproximadamente circulares, con alturas entre 300 y 800 km, períodos de 90 minutos y velocidades del orden de 27.000 km/h.

La inclinación de una órbita es el ángulo que forma el plano orbital respecto al plano ecuatorial de la tierra. Las órbitas con inclinación de 90 grados se denominan polares y si la inclinación es cercana a los 90 grados, cuasipolares. Cuando la inclinación es cercana o igual a 90 grados y la altura es baja (480 km) se posibilita un barrido de toda la superficie terrestre, ya que se combina el movimiento del satélite con la rotación de la tierra. En estas condiciones el plan satelital prevé la realización de dos aplicaciones principales:

- Aplicaciones de sensado remoto: mediciones de características fisicoquímicas de suelos, de ecosistemas marinos y terrestres y estudios de geología (por ejemplo estudios de desertificación, de movimientos de placas tectónicas, etc.)
- Aplicaciones climatológicas: pronóstico meteorológico, seguimiento de tormentas, erupciones volcánicas, búsqueda y rescate de personas o naves.

CAPÍTULO II

2. El ambiente espacial

2.1. Fuentes potenciales de daño

2.1.1. Daños de diverso origen

2.1.2. Radiación existente en las diferentes órbitas

2.1.3. Efectos de la radiación en los materiales

2.2. Elementos principales de un satélite

2.2.1. Materiales que requieren ensayos. Paneles solares

2.2.2. Celdas solares

2.2.2.1. Semiconductores. Juntura p-n

2.2.2.2. Celdas

2. El ambiente espacial

El medio ambiente espacial es muy hostil para los materiales. Como se mencionó en la introducción, las órbitas que utilizarán los satélites son del tipo LEO. En este tipo de órbitas, el daño puede ser producido en los materiales por uno o más de los siguientes factores: alto vacío, fluctuaciones térmicas, impacto de basura espacial y radiación de diverso tipo. A continuación detallaremos, en primer lugar las fuentes potenciales de daño poniendo especial énfasis en la radiación. En segundo lugar describiremos el efecto de la radiación en los materiales. En tercer lugar describiremos la estructura básica y los componentes de un satélite, y dentro de estos el panel solar, ya que es un elemento especialmente vulnerable por estar muy expuesto y porque el daño que recibirían las celdas solares es el tema principal del presente trabajo. En cuarto lugar se describirá una celda solar, su principio de funcionamiento, características principales y composición de las celdas utilizadas en los paneles solares de uso espacial

2.1. Fuentes potenciales de daño

Aunque algunos de ellos no tienen relación con el presente trabajo, por completitud, se describen a continuación los diversos factores que pueden producir daño y afectar a los componentes y materiales de un satélite volando en una órbita de baja altura:

- **Basura espacial y micro meteoroides:** Se denomina space junk a un conjunto formado por residuos que provienen tanto de restos de artefactos espaciales como de meteoroides naturales. El número de estos objetos que están orbitando alrededor de la tierra está en el orden de los millones y sus velocidades son del orden de 36.000 km/h. Los objetos más grandes (diámetro mayor que 10 cm.) son rastreados por radar. La NASA mantiene un registro de las órbitas de 10000 de estos objetos por medio de una organización denominada USSC (Ref. 6). Sin embargo, hay mucha mayor cantidad de objetos más pequeños que este tamaño, cuyas órbitas no están identificadas y que también representan un riesgo para la integridad de los satélites.
-
- **Fluctuaciones térmicas:** a medida que el satélite se desplaza entre las zonas de sombra y de iluminación solar, y debido a la ausencia de una atmósfera que permita amortiguar los cambios de temperatura, se producen variaciones térmicas muy marcadas y que pueden afectar la integridad de los componentes más expuestos del satélite. Como se dijo anteriormente en una órbita LEO como la que utilizarán los satélites argentinos, las excursiones térmicas van de -100C a 75C. Sin embargo, en otros casos las excursiones térmicas pueden ir desde extremos de -120 C hasta +180 C, según el tipo de órbita, la duración del período y la época del año que define la distancia sol-tierra. Los satélites tienen sistemas de protección térmica: formados por aislaciones térmicas y unidades de distribución de calor. Pero los componentes exteriores, como paneles solares o antenas, que no pueden cubrirse, son los más expuestos a este tipo de fluctuaciones (Ref. 7).
-
- **Radiación:** En la Referencia 8 se detallan las diversas fuentes de radiación: rayos cósmicos, gama, X, UV, iones pesados, protones, electrones, neutrones y partículas alfa.
-
- **Anomalía del Atlántico Sur:** La tierra está rodeada por un campo magnético dipolar que se denomina magnetosfera. La interacción de este campo con las partículas que atrapa origina las auroras boreales. Además este campo magnético protege la biosfera de la radiación desviando partículas de alta energía del espacio o capturándolas en los cinturones de Van Allen. Desafortunadamente sobre el Océano Atlántico sur, cerca de la costa de Brasil, el efecto de blindaje de la magnetosfera presenta una discontinuidad mostrando una zona más tenue, un acercamiento del cinturón interno de Van Allen a la superficie de la tierra. En la figura 2.1 se muestra la ubicación geográfica y la distribución en altura de la anomalía. Esto se explica como resultado de la excentricidad entre el centro del campo magnético y el centro geográfico de la tierra (distanciados por 450 kilómetros) así como por el ángulo entre el eje magnético y el eje geográfico de la tierra (aproximadamente 11.5°). Para las órbitas

satelitales inclinadas a más de 35 grados respecto al ecuador de la tierra y para altitudes de algunos cientos de kilómetros esta singularidad, llamada anomalía del atlántico sur (SAA por sus siglas en inglés) llega a ser importante (Ref. 9). En esas órbitas el satélite pasa periódicamente por esa zona de blindaje natural reducido y se encuentra algunos minutos durante cada revolución expuesto a un flujo más alto de partículas que fuera de la anomalía, con un factor de cien veces o más. Debido a esto se requiere blindar más los equipos y es también particularmente importante para el diseño de los paneles fotovoltaicos que son degradados rápidamente por flujos intensos de partículas (Ref. 10).

-
- **Vacío y vibraciones:** Cuando el satélite abandona la cápsula que lo pone en órbita, se ve sometido a elevados niveles de vacío. En el capítulo 6 se detallará este tema. Además, durante el despegue y en el viaje del cohete hasta colocar el satélite en la posición de la órbita, se producen aceleraciones y vibraciones de todo el conjunto de componentes del mismo. Esto se menciona, pero no constituye el objeto del presente trabajo, que se concentra en los efectos del vacío, las fluctuaciones térmicas y fundamentalmente la radiación.

2.1.1. Daños de diverso origen

Las fuentes que se mencionaron en la sección precedente pueden dar lugar a los siguientes tipos de daño:

- ❖ **Fenómenos de Impacto Hiperveloz (HVI):** son causados por impactos de restos de artefactos espaciales o meteoros. Como se mencionó anteriormente, objetos de 10 cm de diámetro o más están identificados. Objetos más pequeños que 1 mm. no están identificados ni son detectados por el radar, y aunque en general no generan daños catastróficos pueden producir pequeños agujeros o micro abrasión. Los más peligrosos son los objetos de tamaños entre 1 y 10 cm que no son fácilmente detectables por el radar y son lo suficientemente grandes como para producir daños catastróficos en los satélites (Ref. 11). En los casos en que se puede desviar la órbita del vehículo, como un transbordador espacial, se desvía la trayectoria del vehículo, para evitar el daño (Ref. 6).
- ❖ **Daños por fluctuaciones térmicas:** Este tema se verá en detalle en el capítulo 6
- ❖ **Daño por radiación:** A continuación describiremos en detalle este punto.

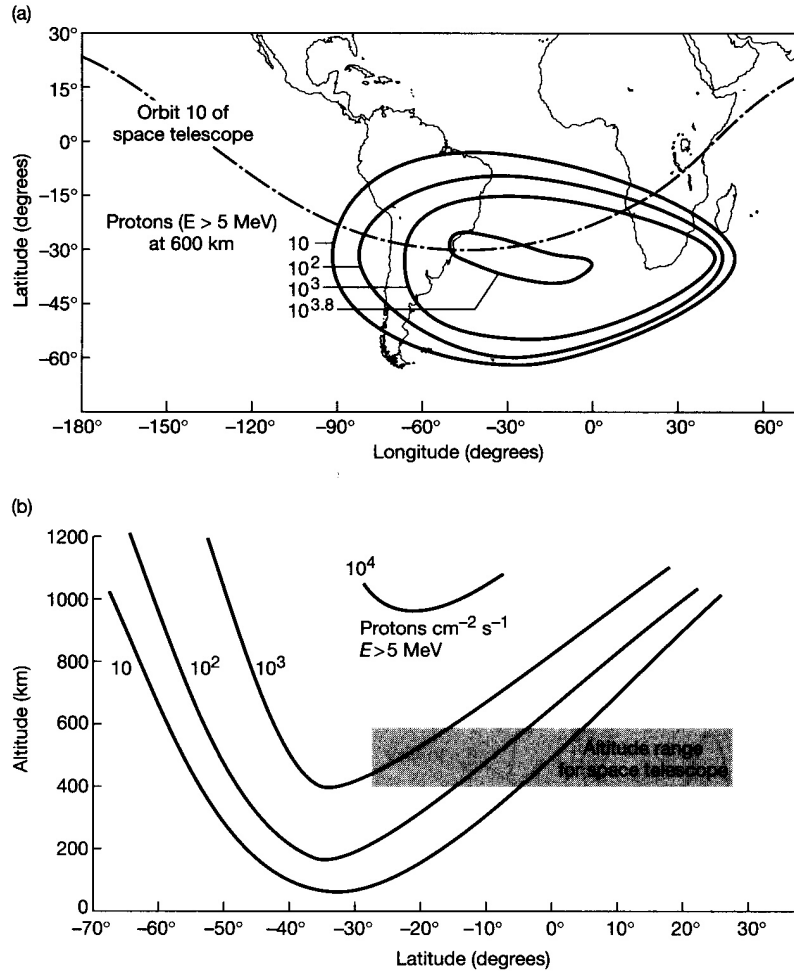


Figura 2.1. (a) Contornos de isoflujo para protones de más de 5 MeV a una altitud de 600 km (b) contornos de isoflujo de protones para diversas altitudes en función de la latitud para una longitud de 35 grados oeste. A modo de comparación la banda gris indica el rango de altitud del telescopio espacial Hubble.

Los materiales que constituyen un satélite están sometidos a dosis de radiación (Ref. 8) y los dispositivos electrónicos de estado sólido pueden ser afectados por la radiación. Especialmente aquellos dispositivos que se basan en materiales semiconductores y que no pueden ser blindados, como celdas solares y sensores, pueden degradarse durante la misión espacial. La degradación de sus propiedades eléctricas está en general relacionada con el tipo y energía de las partículas incidentes. Por otra parte el ciclado térmico a que están sometidos podría favorecer la difusión de defectos y en cierto modo contribuir a la reparación del daño. Experimentos de vuelo han demostrado que las celdas solares colocadas en órbita se degradan menos que lo predicho utilizando los métodos de cálculo usuales que son el JPL (por haber sido desarrollado en el Jet Propulsion Laboratory) y el NRL (por haber sido desarrollado en el Naval Research Laboratory) (Ref. 12).

También habría evidencia de que los modelos para el cálculo de la población de protones en la zona de vuelo sobrestiman la población de estas partículas (Ref. 13). Sin embargo, se debe hacer una estimación del daño y para ello se utilizan tanto mediciones experimentales como modelos.

En muchos laboratorios el estudio de la influencia de las condiciones ambientales espaciales en sistemas satelitales se desarrolla realizando ensayos separados, efectuándose cada uno en una condición particular. Por ejemplo, ensayos de ciclado térmico e irradiación de partículas por separado. Este procedimiento no reproduce adecuadamente la situación real en vuelo y puede llevar a conclusiones erróneas.

Estos problemas pueden ser solucionados en cierto modo, desarrollando ensayos que combinen las condiciones experimentadas en órbita: irradiación, ciclado térmico, iluminación con espectro solar, etc. Con este objetivo, se instaló una cámara de vacío en una de las líneas de haz del Acelerador Tandem, para realizar simulaciones del medio ambiente espacial.

Las condiciones del medio ambiente espacial que se pueden simular simultáneamente para celdas solares son: vacío, ciclado térmico para reproducir cambios de temperatura en órbita, irradiación con partículas de diferentes energías y con diferentes ángulos de incidencia (protones e iones pesados) y el espectro óptico solar utilizando un simulador solar. Se espera que podrían observarse efectos de correlación generados cuando se varían simultáneamente los factores mencionados.

Se espera también que la facilidad descrita sea útil para evaluar la tolerancia a la radiación de equipos electrónicos industriales y médicos, que están usualmente sujetos a altas dosis de radiación durante su vida útil, tales como componentes satelitales, componentes de tomógrafos, cámaras gamma, instrumentos para reactores, etc. También podrán ensayarse materiales sensibles, como componentes estructurales, vidrios protectores de celdas solares, materiales poliméricos, adhesivos, etc.

2.1.2. Radiación existente en las diferentes órbitas

En esta sección, describiremos las formas principales de radiación en el ambiente espacial. Los diversos tipos de radiación se pueden clasificar como sigue:

- 1- **Radiación atrapada:** Esta consiste en una variedad muy amplia de partículas energéticas cargadas, atrapadas por el campo magnético terrestre, y que forman los cinturones de Van Allen.
- 2- **Rayos cósmicos:** Los rayos cósmicos están formados por bajos flujos de partículas energéticas con energías que se extienden hasta el orden de magnitud de 10^{20} eV. En algunos casos estas partículas tienen velocidades cercanas a la velocidad de la luz e impactan en la tierra desde todas las direcciones. La mayoría de los rayos cósmicos son núcleos de átomos, extendiéndose desde el más ligero hasta elementos tan pesados como núcleos de hierro. También incluyen electrones de alta energía, positrones, y otras partículas subatómicas. Incluso puede considerarse como radiación cósmica a rayos gamma de energía elevada (Ref. 14). El término "rayos cósmicos" refiere generalmente a los rayos cósmicos galácticos o extragalácticos, que se originan en fuentes externas al sistema solar. Sin embargo, este término también ha

venido a incluir otras clases de partículas energéticas provenientes del espacio, incluyendo los núcleos y los electrones acelerados generados en el sol (llamadas partículas energéticas solares) (Ref. 15).

- 3- **Tormentas solares:** Las erupciones solares producen protones con contribuciones menores de partículas alfa, iones pesados y electrones. Las energías se extienden hasta varios cientos de MeV.

Tanto dentro como fuera de los cinturones de Van Allen, el espacio exterior cercano a la tierra está atravesado por un plasma de electrones y protones con energías hasta aproximadamente 100 keV. Pero dentro de los cinturones de radiación hay flujos con energías más altas. Los flujos asociados con este plasma son tan altos como $10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Ref. 9).

En la figura 2.2 se muestra esquemáticamente el viento solar y su distribución en los cinturones de Van Allen. Las figuras 2.3 y 2.4 muestran los flujos de electrones y de protones en los cinturones de Van Allen.

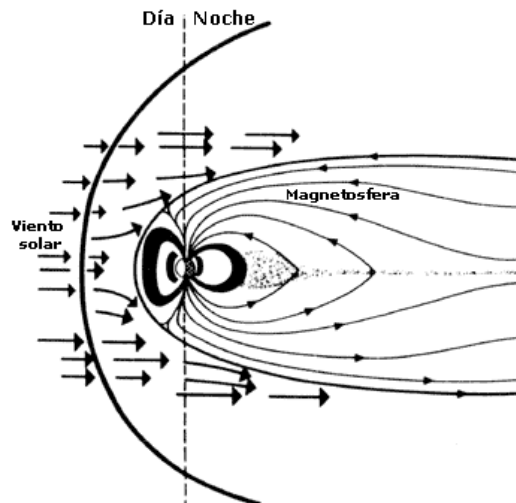


Figura 2.2. Esquema del viento solar y de la distribución del flujo en los cinturones de Van Allen. Radiación y partículas son emitidas por el sol. El campo magnético terrestre desvía las partículas con carga eléctrica haciendo un efecto de apantallamiento. Se observa la variación del flujo cercana a los polos magnéticos terrestres.

El flujo de electrones (figura 2.3) consiste en partículas de hasta 7 MeV. En cambio, las energías de los protones se extienden hasta varios cientos de MeV, con los más energéticos encontrados en las altitudes más bajas. El flujo de electrones presenta dos máximos, designados como “zonas interna” y “zona externa”. La zona interna se extiende hasta cerca de 2.4 radios de la tierra (Re) y la zona “externa” se extiende desde 2.8 a 12 Re. Al hueco entre 2.5 y 2.8 Re se lo nombra como la “ranura”. La zona externa envuelve a la zona interna y sus contornos se extienden hacia la tierra en regiones de flujo relativamente alto llamadas “cuernos polares” (ver figura 2.3). El flujo de protones no exhibe “zonas internas” y “externas” ni “cuernos polares”. En este caso el flujo disminuye con la distancia a la tierra y la magnitud del flujo varía inversamente con la energía. El límite exterior está aproximadamente en 3.8 Re

(ver figura 2.4) (Ref. 16). Las órbitas LEO se encuentran a altitudes que van del 5 al 12% del radio terrestre. En las figuras 2.3 y 2.4 se indican las posiciones en las que se encontraría una órbita LEO.

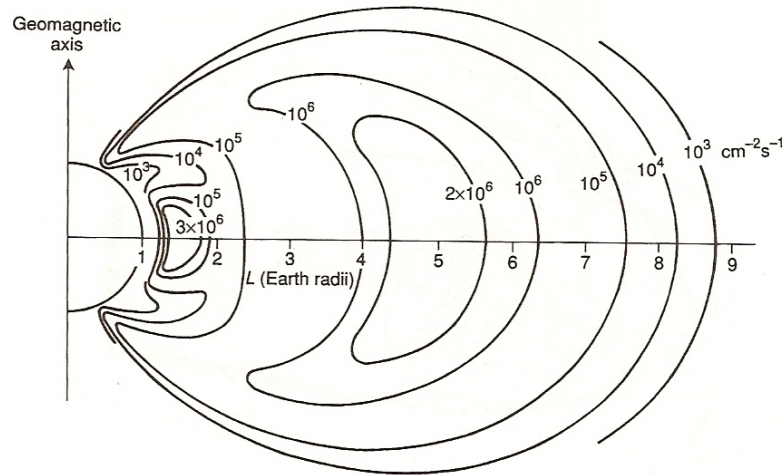


Figura 2.3. Electrones atrapados en los cinturones de radiación (Ref.17). Vista en corte en el plano del eje geomagnético. Se grafican contornos de igual flujo para energías por encima de 1 MeV. El radio de la tierra es de 6371 km. En esta escala la altura de LEO's estaría ubicada aproximadamente un milímetro a la derecha del 1 en el eje horizontal. Las órbitas geoestacionarias estarían ubicadas a 5,7 radios terrestres.

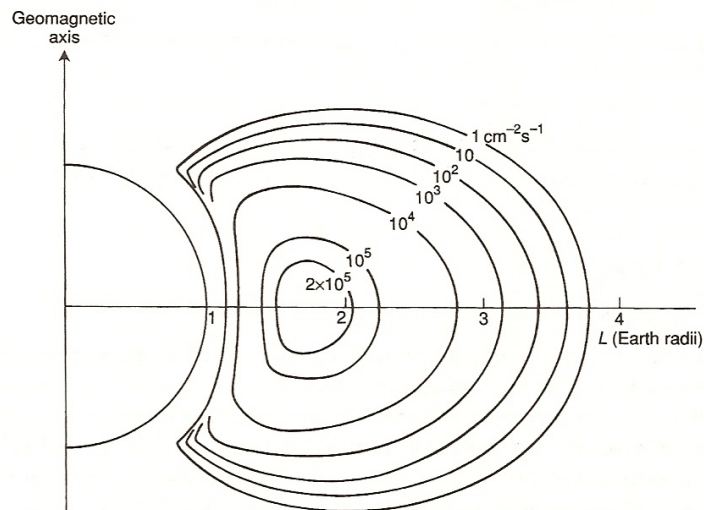


Figura 2.4: Protones atrapados en los cinturones de radiación (Ref.17). Vista en corte en el plano del eje geomagnético. Se grafican contornos de igual flujo para energías por encima de 10 MeV.

Los protones y electrones atrapados en los cinturones se encuentran girando muy rápidamente alrededor de las líneas del campo, al mismo tiempo que suben y bajan a lo largo de ellas, rebotando en un punto en el norte y otro en el sur llamados puntos espejo. Además dan vuelta alrededor de la Tierra, los protones hacia el oeste y los electrones hacia el este. En la figura 2.5 se muestran esquemáticamente los tres tipos de movimientos de las partículas

atrapadas en los cinturones de Van Allen. El tiempo que les toma a estas partículas dar un giro alrededor de la línea de campo es del orden de millonésimas de segundo, mientras que el tiempo que utilizan para ir y venir entre dos puntos espejo es de un segundo. Dar una vuelta completa a la Tierra les lleva algunas decenas de minutos.

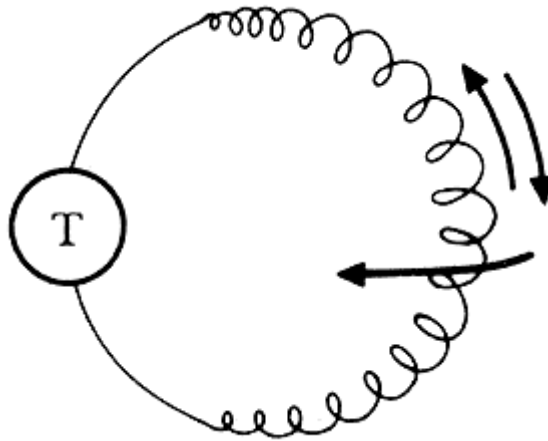


Figura 2.5. Diagrama esquemático que muestra los tres movimientos de las partículas en los cinturones de Van Allen: un movimiento de giro alrededor de la línea de campo; un movimiento de vaivén entre dos puntos de reflexión (puntos espejo) sobre la línea y un movimiento que deriva alrededor de la tierra.

La existencia de puntos espejo surge de la naturaleza dipolar del campo magnético, cuya intensidad aumenta hacia los polos. Cuando las partículas cargadas se van moviendo alrededor de una línea hacia regiones de campos más intensos van a encontrar un punto de alcance máximo, más allá del cual ya no pueden penetrar. Como esto ocurre si se dirigen hacia el polo norte o al polo sur, las partículas quedan atrapadas entre dos puntos de reflexión. Estos dos puntos no son los mismos para todas las partículas, pues dependen de la manera como éstas fueron inyectadas en esas regiones (Ref. 18).

2.1.3. Efectos de la radiación en los materiales

En esta sección describiremos los efectos que la radiación produce sobre los materiales con los que interactúa. Uno de ellos es la degradación en los materiales principalmente a través de dos mecanismos: ionización y desplazamientos atómicos.

La partícula incidente pierde energía por dos mecanismos: ionización (extracción de electrones atómicos) y pérdida de energía no ionizante. Se denomina choque inelástico a aquel que transfiere energía al sistema electrónico. Esta energía excita niveles electrónicos e ioniza al átomo. Cuando una partícula energética atraviesa el material de la celda, la mayor parte de la transferencia de energía se realiza a través de procesos de ionización de los

átomos de la red, cuyos electrones absorben energía y son promovidos a estados excitados o arrancados dando origen a un par electrón-agujero. El resto de la energía se transfiere a través de eventos no ionizantes, que pueden producir desplazamientos de átomos, el denominado primary knock-on atom o PKA, que es el primer átomo impactado por la partícula incidente. A su vez, si la energía transferida al átomo desplazado es suficiente, este PKA podrá desplazar otro átomo y así sucesivamente hasta que los últimos reciban menor energía que la necesaria para desplazarlo y termine allí la secuencia. Además el protón puede encontrar otro átomo en su camino y producir otro PKA.

El PKA puede generar un árbol de desplazamientos en tiempos del orden de picosegundos. Los racimos terminales de ese árbol, con altas concentraciones de vacancias e intersticiales difunden térmicamente con tiempos mayores. Hay energías umbrales por debajo de las cuales los desplazamientos atómicos son extremadamente improbables. Por ejemplo, para neutrones este umbral de energía es de 10 keV y para electrones o positrones es de 125 keV (Ref. 9). Sin embargo hay excepciones, como por ejemplo el Si, donde con protones de 130 eV se puede producir un par de Frenkel, aunque es muy raro que suceda (Ref. 19). Un par de Frenkel se forma cuando la energía que se transfiere al átomo blanco es mayor que la energía de enlace a la red. En esta situación, el átomo desplazado se ubica en una posición intersticial y se crea una vacancia en el lugar que deja. Las vacancias se mueven y pueden combinarse con otra vacancia (creando una divacancia), combinarse con un átomo intersticial o sustitucional y aniquilarse o migrar a otra región o a la superficie del material.

Defectos extendidos son por ejemplo agrupamientos complejos de vacancias y/o intersticiales o dislocaciones. Las dislocaciones, que son defectos en el orden cristalográfico de un material, también constituyen defectos extendidos.

Un material muy estudiado es el silicio. En general en los materiales los intersticiales son más móviles que las vacancias. Una excepción es el silicio donde es al revés y las vacancias tienden a combinarse con impurezas u otros defectos. Los átomos intersticiales tienen una fuerte tendencia a desplazar impurezas y a retornar a una posición normal de un átomo de silicio dentro de la red. El intersticial intercambia carga con sus vecinos muy fácilmente, por lo cual migra rápidamente. Todo esto sucede a temperatura ambiente.

Las partículas que transfieren momento son los electrones, positrones, muones, piones, protones, deuterones, partículas alfa o cualquier otro ión pesado. Los neutrones también transfieren momento. Los fotones no pueden desplazar un átomo, pero pueden producir electrones por efecto fotoeléctrico, efecto Compton o por creación de pares. Luego estos electrones si tienen suficiente energía producen daño. Se ha buscado establecer una relación entre el daño producido y la energía de la partícula incidente. Una de estas relaciones se denomina "non-ionizing energy loss" (NIEL), que es la energía depositada en el material por unidad de masa. Hay una regla simple que combina el valor de NIEL con el espectro de energías de esa partícula para obtener un valor de daño total expresado en "daño producido por partículas equivalentes por cm^2 ". En el capítulo 3 se verá este tema en forma detallada.

Usualmente se cuantifica el daño refiriéndolo a una irradiación monoenergética utilizando un ión de referencia y con incidencia normal. Luego, se dice por ejemplo que el daño producido por electrones con determinado

espectro es “equivalente” al daño que produciría una determinada cantidad de electrones por cm^2 de 1 MeV con incidencia normal.

A pesar de las diferencias en el espectro de PKA's generado por diferentes partículas incidentes, en general existe una muy buena relación lineal entre el NIEL y la degradación de los dispositivos irradiados. Se ha sugerido (Ref. 20) que esto se debe a que el gran número de colisiones que se produce en la red hace que se pierda la memoria del espectro PKA original y no se observen diferencias en el daño producido por electrones, neutrones y protones. Sin embargo esta sugerencia se cuestiona ya que existen diferencias entre efectos producidos por partículas con o sin carga en silicio tipo float-zone y aparecen niveles en la banda prohibida con protones que no se observan con electrones (Ref. 21).

En la terminología de daño por radiación en componentes satelitales se denomina BOL (Beginning Of Life) al comienzo de la vida útil del componente que es el principio de la misión y EOL (End Of Life) al estado en que se encuentra al finalizar la misión, es decir al final del período requerido por diseño. En general, las misiones satelitales argentinas toman como tiempo de misión un período de 5 años (Ref. 4).

2.2. Elementos principales de un satélite

Como se mencionó al principio de este capítulo, los materiales de uso espacial están inmersos en un medio ambiente hostil. Para identificar los componentes vulnerables al daño, describiremos primero los elementos constitutivos de un satélite y luego nos concentraremos en los materiales que conforman el panel solar. Un satélite artificial típico está conformado por seis subsistemas (Ref. 22) cuyas funciones se enumeran a continuación:

POTENCIA:	paneles solares, baterías, unidades de distribución y regulación.
COMANDO y DATOS:	computadora de vuelo, procesador de entrada-salida.
COMUNICACIONES	varias antenas, receptor (recibe instrucciones), transmisor (envía imágenes, datos de mediciones, mensajes).
CONTROL de POSICIÓN:	corrige posición y orientación del satélite, sensores, mecanismos propulsores, ruedas de momento.
CARGA de la MISIÓN:	instrumentos, cámaras, telescopios, antenas de radar, antenas especiales. Sistemas de control, adquisición y procesamiento de datos.
PROTECCIÓN TÉRMICA:	aislación del medio ambiente espacial, unidades de distribución de calor, aislaciones térmicas.

Cada subsistema contiene tanto dispositivos electrónicos como piezas de diversos materiales. Muchos de estos se alojan dentro de la carcasa del satélite, que hasta cierto punto funciona como blindaje frente a la radiación y los impactos de pequeños meteoritos o de basura espacial que se encuentra en la órbita (Ref. 6). Incluso está amortiguado el efecto del ciclado térmico, ya que el satélite se cubre de mantos aisladores especialmente diseñados que atenúan las fluctuaciones térmicas de los elementos del interior. Un ejemplo de esto es la multicapa dorada de mylar metalizado que recubre la carcasa del satélite, que cumple la función de aislante térmico y amortigua las excursiones térmicas del satélite en su conjunto. Mecanismos colocados en el exterior de la carcasa se construyen con metales o materiales que en general son mucho más resistentes al daño que los semiconductores o polímeros. Los dispositivos más expuestos son las celdas solares y los materiales constitutivos del panel solar, ya que estas estructuras deben estar permanentemente expuestas a la radiación solar. La superficie expuesta de la celda solar no puede ser protegida más que por delgadas láminas de vidrio, ya que toda barrera puede disminuir su eficiencia energética. Los materiales también están sometidos a alto vacío. Esto puede afectar a aquellos materiales que desgasan o que presentan algún tipo de deterioro en estas condiciones y que por lo tanto no se deben usar en satélites.

2.2.1. Materiales que requieren ensayos. Paneles solares

A continuación se describen los elementos constitutivos de un panel solar y se identifican aquellas partes más vulnerables al daño. Como se dijo anteriormente, los dispositivos más expuestos a la radiación son aquellos que no pueden ubicarse dentro del cuerpo del satélite, y que por esa razón no pueden beneficiarse de la protección que brindan las paredes exteriores del mismo. Las celdas solares (se van a describir en 2.2.7) del panel son las más expuestas, ya que como se muestra en la Tabla 2.1, solo están recubiertas por una delgada lámina de vidrio. En las celdas solares que estamos considerando para nuestro programa satelital, la lámina se fabrica usando un vidrio denominado OCLI-0214, que es un vidrio tipo borosilicato dopado con cerio. Este vidrio tiene en una de sus caras una cubierta antirreflectante de fluoruro de magnesio (índice de refracción $n_{\text{promedio}} = 1,38$). El cerio utilizado como dopante favorece la resistencia del vidrio al daño por radiación, ya que al ser un metal del grupo IA es un donador de electrones y esos electrones favorecen la neutralización de las cargas positivas que se forman en los centros de color generados por el impacto de partículas. Los centros de color opacarían el vidrio y reducirían su transparencia. Esta lámina de vidrio de 100 micrones está pegada sobre la parte frontal de la celda con resina siliconada transparente Dow Corning 93500. Esta resina, además de cumplir una función adhesiva, tiene un índice de refracción promedio $n = 1,54$ que sirve para acoplar los índices de refracción promedio del vidrio ($n = 1,52$) y de las dos capas antirreflectantes de la celda solar triple juntura, que son la exterior de alúmina ($n_{\text{promedio}} = 1,78$) y la interior de óxido de titanio ($n_{\text{promedio}} = 2,6$). En la figura 2.6 se muestra un conjunto de 64 celdas ensambladas en un panel solar para ensayo. Los paneles de ingeniería son más pequeños que los paneles de vuelo

y se fabrican para desarrollar y ensayar la técnica de construcción antes de comenzar a construir el panel “de vuelo” que portará el satélite en órbita.

Como ilustración, se presenta a continuación la lista de los componentes que constituyen un panel solar completo de uso satelital (Ref. 23). Este panel de ensayo tiene menos celdas que el panel de vuelo, pero contiene los mismos elementos constitutivos. El panel completo está siendo construido (2007) en los laboratorios del Grupo Energía Solar (GES) del departamento de Física del Centro Atómico Constituyentes-CNEA:

- 72 celdas solares de triple juntura (Emcore Advanced Triple Junction, ATJ) fabricadas por Emcore Corp., con un espesor de 150 μ m, eficiencia mejor que 25% y un área activa de 27,5 cm².
- 72 diodos de paso de silicio de forma triangular, Emcore Corp.
- Interconectores (de 2 y 3 patas) de Kovar plateados, Emcore Corp., con lazo de alivio de tensiones fuera del plano.
- Conectores terminales posteriores de Ag, con lazo de alivio fuera del plano, para las subcadenas de 4 celdas en serie.
- Colectores (buses) de Ag con lazo de alivio para la interconexión de subcadenas entre sí y a los cables.
- Coberturas de vidrio OCLI-0214, del tipo borosilicato dopado con Cerio, con capa antirreflectante.
- Adhesivo Dow Corning 93500 para el pegado del vidrio.
- Adhesivo RTV 566 para el pegado de las celdas, los colectores y los cables al sustrato.
- Cables.
- Diodos de bloqueo.
- Sustrato tipo panal de abeja de aluminio, con piel de fibra de carbono y recubrimiento aislante de Kapton en cara frontal.

Hasta aquí la descripción de los materiales que conforman el panel. A continuación se describe el tipo de conexionado eléctrico que se utiliza para conformarlo.

Un panel solar se construye agrupando celdas en serie y en paralelo de modo tal de poder obtener el voltaje deseado y la corriente deseada entre los bornes exteriores del mismo. Una cadena (string) es un arreglo de celdas solares conectadas en serie. Colocando varias cadenas en paralelo se construye un grupo. El panel solar que ha sido diseñado en este laboratorio para los satélites SAOCOM se construye colocando varios grupos conectados en paralelo. Cada cadena tiene 4 subcadenas de 5 celdas cada una conectadas en serie. El número de celdas conectadas en serie dentro de una cadena es de 20. El número de cadenas que se conectan en paralelo para formar un grupo es de 5.

Los interconectores tienen un pequeño lazo de alivio o doblez, que visto de perfil en una dirección paralela al plano de la celda tiene la forma de la letra griega Ω . Esto sirve para aliviar las tensiones que producen pequeñas dilataciones o contracciones de las celdas que interconectan. Los

interconectores de dos patas conectan celdas entre sí. Los de tres patas conectan además al diodo de paso.

En la figuras 2.7 y 2.8 se muestra un esquema del conexionado de las celdas para formar un panel solar como el que utiliza el SAOCOM. Hay detalles que no se indican en este esquema. Cada celda solar tiene un diodo de paso conectado en paralelo (diodo by pass), que funciona como conductor en caso de que esa celda en particular resulte dañada. De este modo no se inutiliza la cadena de la cual forma parte. También hay elementos de interconexión que permiten habilitar uno u otro bloque o una u otra cadena según la necesidad del momento. Es decir que hay toda una lógica de operación del panel, pero a los fines de este trabajo, baste describir someramente el modo de interconexión de las celdas.

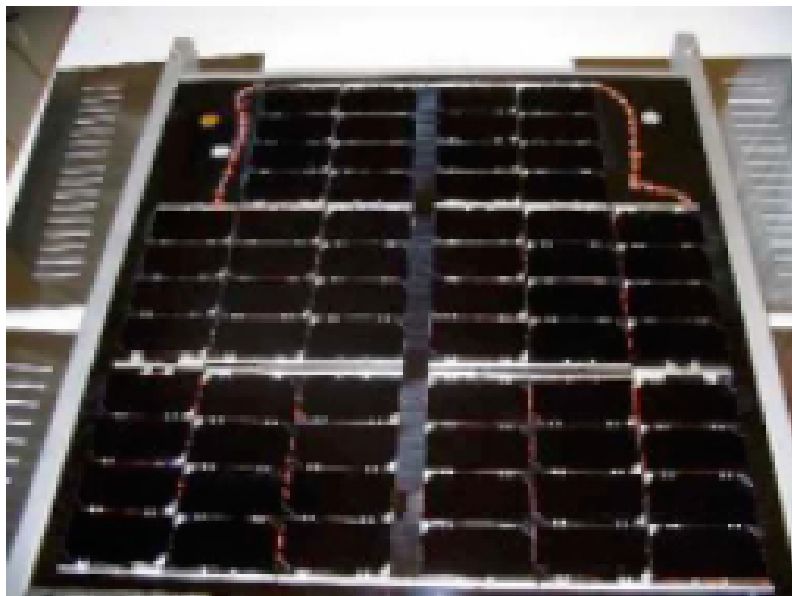


Figura 2.6. Panel solar de ingeniería formado por 64 celdas ensambladas en cadenas de cuatro celdas en serie cada una. Las cadenas a su vez se conectan en paralelo para construir un grupo. El panel solar se construye colocando varios grupos conectados en paralelo. En este prototipo la dimensión de las celdas es siempre igual y de 76 por 37 mm y las del panel, de 50 x 50 cm.

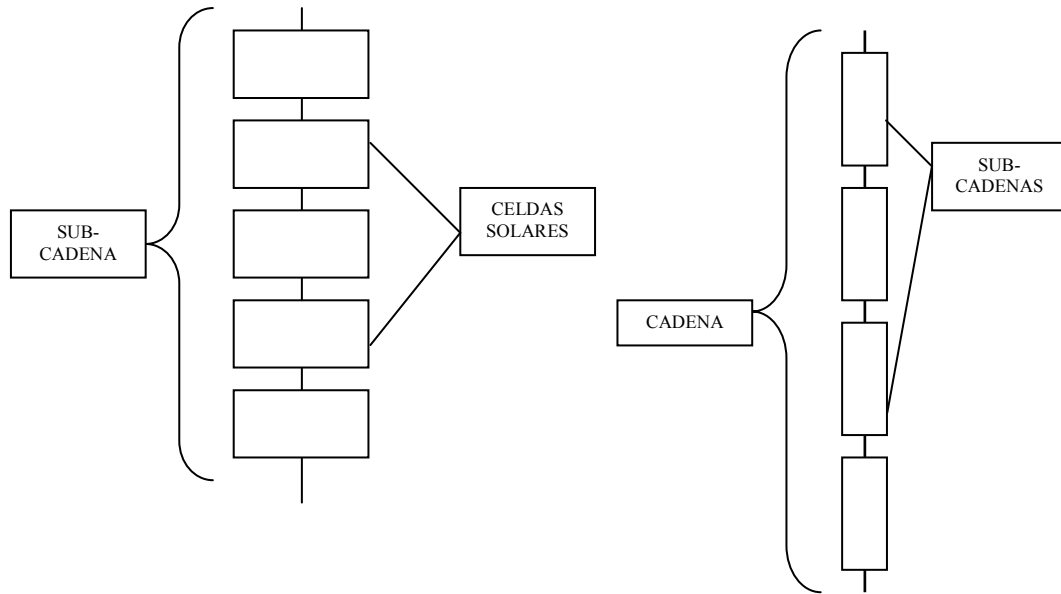


Figura 2.7. Esquema de interconexión de las celdas solares a nivel de subcadena y cadena

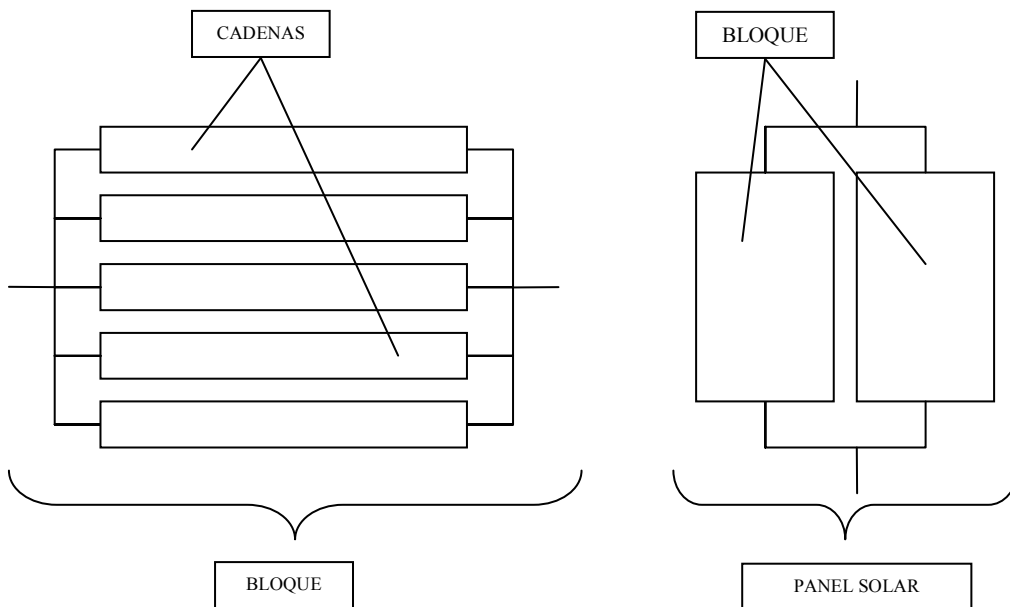


Figura 2.8. Esquema de interconexión de las cadenas a nivel de bloque y panel solar

Las celdas solares ATJ Emcore han sido seleccionadas por su alta eficiencia de conversión. Por el valor comercial elevado que poseen y debido a la imposibilidad de recambiar elementos una vez que el satélite se encuentre en vuelo es necesario evaluar y calificar estos componentes y este es uno de los objetivos principales del presente trabajo de tesis. En la sección 2.2.2 nos concentraremos en el tema específico de las celdas solares.

2.2.2. Celdas solares

Las celdas solares son dispositivos semiconductores (SC) capaces de convertir energía lumínica en eléctrica. Como ilustración, la energía de los fotones correspondientes a luz de color rojo, verde y violeta está en el orden de 1,75 eV, 2 eV y 3 eV respectivamente. El mecanismo esencial de esta conversión es el efecto fotoeléctrico interno en el cristal que forma la celda.

2.2.2.1. Semiconductores, juntura p-n

En esta sección se describirán brevemente los semiconductores y la juntura p-n.

Cuando se aplica la ecuación de Schrödinger a los átomos de un sólido, la solución de la misma para sistemas periódicos predice la formación de estructuras de bandas de energía en las cuales pueden ubicarse los electrones. La estadística de Fermi-Dirac, que tiene en cuenta el principio de exclusión de Pauli, predice cómo se llenarán con electrones las bandas en el sólido. Se denominan semiconductores (SC) a aquellos materiales donde la banda de valencia está completamente llena a la temperatura de cero absoluto y la de conducción dista solo algunos eV por encima. A temperatura ambiente la banda de conducción se puebla por excitación térmica con electrones que provienen de la banda de valencia. En presencia de un campo eléctrico estos electrones que están en la banda de conducción pueden moverse libremente. Por otro lado, el movimiento de acomodamiento de los restantes electrones en la banda de valencia se comporta como si existiese un movimiento de partículas de carga positiva (que se denominan huecos) en sentido opuesto. Al referirse a la banda de valencia, se habla de "migración de huecos" pero es una representación simbólica para facilitar la explicación, ya que cuando se mueven electrones en un sentido, se puede decir que se están moviendo huecos en sentido opuesto. En general son semiconductores aquellos elementos o aleaciones que tienen en promedio cuatro electrones de valencia, por ejemplo: Si, Ge, GaAs, etc.

Se dice que un semiconductor está dopado cuando contiene pequeñas cantidades de elementos con tres o cinco electrones de manera de generar un exceso de cargas positivas (dopaje tipo p) o negativas (dopaje tipo n), respectivamente.

El dispositivo más simple formado por semiconductores es una juntura única entre dos materiales semiconductores dopados; uno para obtener un exceso de electrones libres (tipo n) y otro con un exceso de huecos libres (tipo p). Ambos semiconductores dopados son eléctricamente neutros, pero cuando se forma una juntura cristalográfica entre ellos, se produce una migración de electrones hacia el SC tipo p y una migración de huecos hacia el SC tipo n. La migración se detiene al llegar a un punto de equilibrio en el cual aparece una diferencia de potencial en la juntura. Esta diferencia de potencial se genera entre una delgada capa de material cargada negativamente del lado p y una delgada capa cargada positivamente del lado n, como se muestra en la figura 2.9.

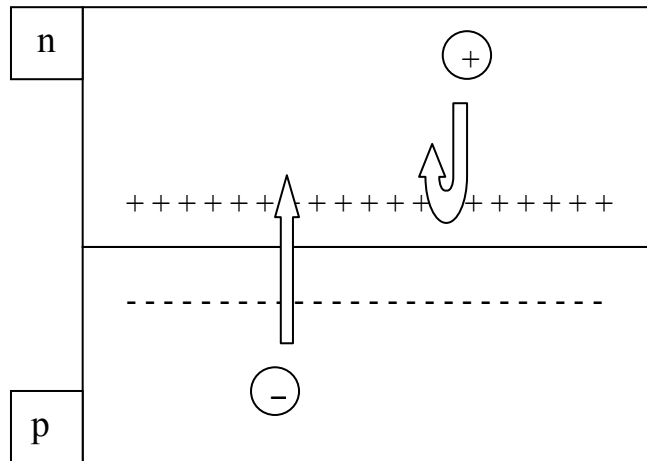


Figura 2.9. Esquema simplificado de una juntura. Se genera un campo eléctrico interno que representa un obstáculo para el movimiento de electrones. El movimiento $p \rightarrow n$ se ve favorecido, en tanto que el movimiento $n \rightarrow p$ se ve dificultado

El movimiento de electrones se verá favorecido por este campo eléctrico desde el lado p hacia el lado n, en tanto que se verá dificultado al moverse desde el lado n hacia el lado p, ya que deberá sortear una barrera de potencial. La zona desde donde han migrado los electrones se denomina región libre de carga espacial o zona desierta porque ya no contiene portadores de carga libres.

2.2.2.2. Celdas solares

La estructura básica de una celda solar es la juntura p-n. Cuando un fotón incide sobre el material SC, si su energía $h\nu$ es mayor que la banda prohibida (BP) del semiconductor considerado, se puede generar un par electrón-hueco (PEH) por efecto fotoeléctrico. El electrón pasa a la banda de conducción y se mueve hacia la zona n y el hueco hacia la zona p. En el caso de haber un excedente de energía, esta se transfiere finalmente a la red cristalina en forma de calor. Si la BP es pequeña, hay una gran proporción de fotones en el espectro solar que tienen la energía necesaria para elevar electrones a la banda de conducción, pero como el voltaje de una celda aumenta con la BP, hay que llegar a un compromiso entre BP baja para mayor generación y BP alta para mayor voltaje. Para una celda monojuntura la BP óptima funcionando con el espectro solar es de aproximadamente 1,4 eV. La figura 2.10 muestra esquemáticamente lo que sucede cuando un fotón incide sobre una juntura.

Hay materiales SC de BP directa (AsGa, TeCd) e indirecta (Si, Ge). Cuando la BP es directa, solo se necesita la concurrencia de un fotón para realizar el salto a la banda de conducción. Cuando la BP es indirecta, el fotón se debe combinar con un fonón u oscilación de la red de valor apropiado para realizar el salto a la banda de conducción. Esto se indica esquemáticamente en la figura 2.11. Con la BP directa la generación de PEH es más eficiente, por lo tanto las celdas son más delgadas ($\sim 5 \mu\text{m}$) que en el caso de los de BP indirecta ($\sim 150 \mu\text{m}$). También es importante si la luz es absorbida cerca o lejos

de la superficie, ya que el lugar de la máxima absorción de fotones debe ubicarse en la región cercana a la juntura, pues allí los PEH generados se colectan con mayor eficiencia. Si los PEH se generan lejos del campo de la juntura, deben migrar hasta ella y eso resta eficiencia al proceso.

El efecto que produce una determinada fuente luminosa en una celda depende del número de fotones y de su energía o frecuencia, es decir del espectro de esa fuente luminosa. La fuente luminosa por excelencia es el sol. Para cuantificarla se ha dado en llamar “constante solar” a la radiación proveniente del sol que, por unidad de tiempo, es recibida en la unidad de área por una superficie perpendicular a la radiación y situada fuera de la atmósfera terrestre a la distancia astronómica unidad ($1 \text{ AU} \equiv 1,495 \cdot 10^{11} \text{ m}$, distancia media entre Sol-Tierra) (Ref. 24).

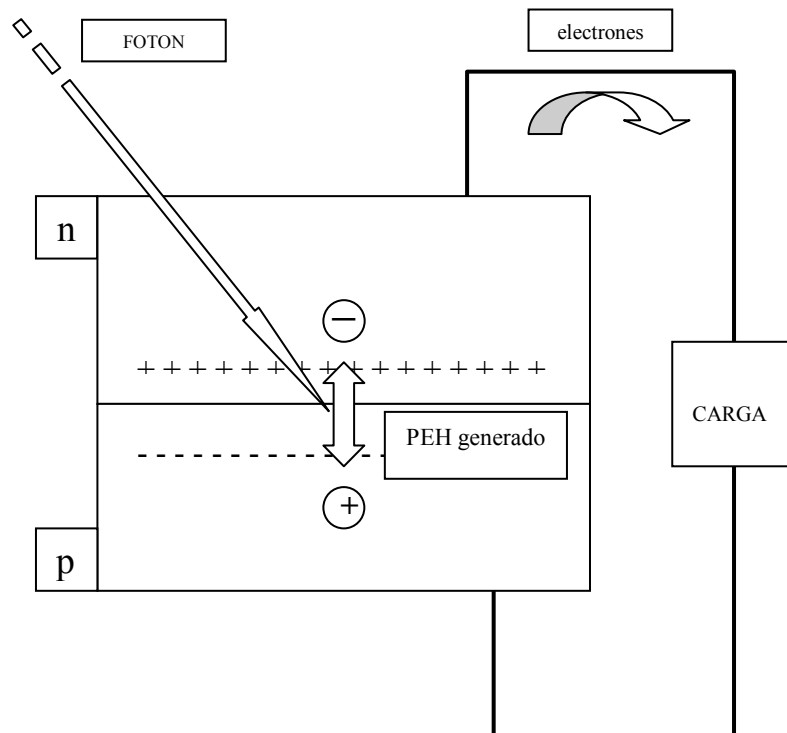


Figura 2.10. Esquema simplificado de una juntura sobre la cual incide un fotón. Se genera un par electrón hueco. El electrón se mueve hacia la zona n y el hueco hacia la zona p. Cuando esto sucede con un gran número de fotones, se genera una corriente que puede circular por una carga conectada a los bornes de la celda solar.

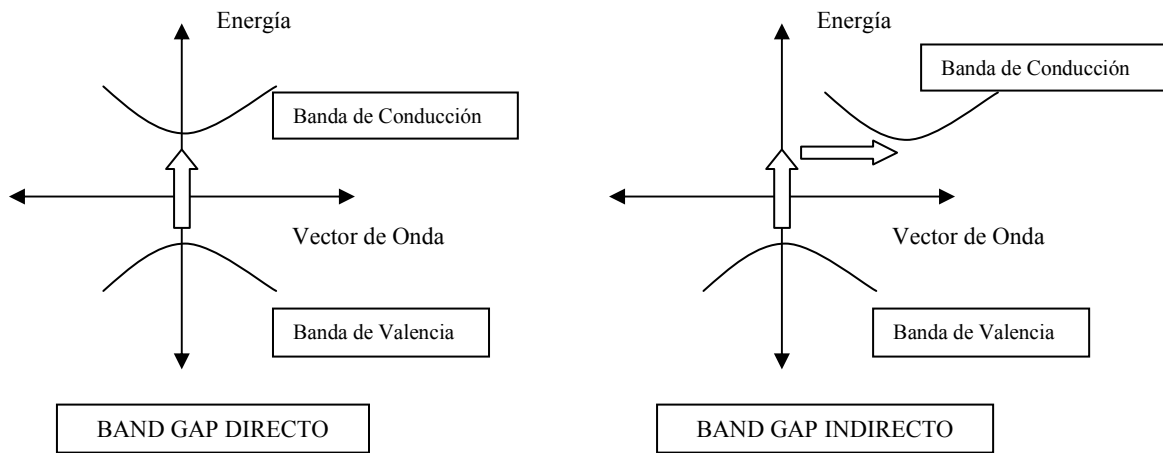


Figura 2.11. Esquema simplificado de la estructura de bandas para los dos tipos de band gap. En el caso del band gap directo el electrón solo necesita la concurrencia de un fotón para saltar de la banda de conducción a la banda de valencia. Este salto se indica con la flecha vertical. En el caso del band gap indirecto el electrón necesita la concurrencia simultánea de un fotón y de un fonón para saltar de la banda de conducción a la banda de valencia. El salto producido por el fotón se indica con la flecha vertical y el producido por el fonón por la flecha horizontal.

Así pues, el valor aceptado internacionalmente al presente (Organización Meteorológica Mundial, 1982) para la constante solar G_{sc} es $(1367 \pm 7) \text{ W.m}^{-2}$. A este valor de radiación encima de la atmósfera, se la denomina AM0. Para la radiación global a nivel del mar para un cielo muy claro se adoptó el valor de 1.111 W.m^{-2} y se la denomina AM1. El número indica el espesor de atmósfera que atraviesa la radiación (Air Mass #). La radiación AM1.5 corresponde a una irradiancia de 1000 W.m^{-2} y un espectro correspondiente a un cuerpo negro a una temperatura de 5600 Kelvin (ASTM E 927, Class A). Para cada AMx el espectro es ligeramente diferente, ya que la atmósfera terrestre produce absorción selectiva en determinadas longitudes de onda (Ref. 24).

Celdas multijuntura

En las celdas multijuntura, se colocan dos o más celdas superpuestas formadas por SC de BP decrecientes, de modo tal que los fotones de mayor energía son absorbidos en la primera juntura, los restantes pasan a la segunda, que absorbe los fotones de energía menor y así sucesivamente hasta llegar a la última juntura. La cola del espectro solar, que no genera PEH, se absorbe y se transforma en calor. De este modo se aprovecha mejor el espectro solar, aumenta el voltaje total de la celda, que es la suma de los voltajes parciales ya que cada celda tiene su propio campo voltaje. Al aumentar el campo eléctrico total aumenta la colección de portadores. Estas celdas se fabrican con compuestos de arseniuro de galio (AsGa) y alcanzan eficiencias de 24 a 29 % en condiciones AM0. En el caso de la celda triple juntura ATJ (denominación comercial de un modelo de celda triple juntura de Emcore), tres conjuntos forman tres celdas en serie, que dan un voltaje final entre bornes aproximadamente igual a la suma de los voltajes de las tres celdas monojuntura. Las celdas EMCORE entregan un voltaje a circuito abierto de

2.6V y una corriente de cortocircuito de aproximadamente 454 mA. Estos valores se miden en condiciones AM1.5.

En la tabla 2.1 se presenta un detalle de las diversas capas que conforman las celdas ATJ Emcore (Ref. 25). A continuación describimos brevemente la función que cumple cada capa. Como se dijo anteriormente, el vidrio borosilicato da una protección parcial a la celda en el espacio exterior. El adhesivo de siliconas cumple las funciones de adhesivo. La capa de alúmina y la de óxido de titanio forman una doble capa antirreflectante para la celda solar. Los diversos tonos de sombreado indican la ubicación de las tres juntas generadoras propiamente dichas dentro de la heteroestructura. La primera junta es de InGaP, la segunda junta de InGaAs y luego una tercera junta de Ge está sobre un sustrato de germanio que le da soporte a todo el conjunto. Cada celda capta energía de un sector diverso del espectro solar (ver figura 2.12). La sigla BSF significa **back surface field**. El BSF es una capa fuertemente dopada que genera un campo eléctrico adicional en la parte posterior de una homojuntura y que sirve para prevenir la recombinación superficial de portadores en la cara posterior, aumentando así la I_{sc} y la V_{oc} que esta genera. Se coloca justo detrás de la junta correspondiente; en este caso detrás de la primera y la segunda juntas. La capa denominada TJ (ver tabla 2.1) es un diodo túnel que está para hacer la conexión eléctrica en una estructura monolítica. Su función es permitir el pasaje de electrones desde la banda de valencia del lado p de una junta a la banda de conducción del lado n de la siguiente junta (Ref. 26).

Vidrio Borosilicato	100	μm
Adhesivo Siliconado	100	μm
Al ₂ O ₃	0,1	μm
TiO ₂	0,06	μm
Ventana (Al In P ₂)	0,03	μm
Emisor (In Ga P₂)	0,05	μm
Base (In Ga P₂)	0,55	μm
BSF (In Ga P ₂)	0,05	μm
TJ (Ga In P ₂)	0,03	μm
Ventana (Al In P ₂)	0,05	μm
Emisor (In Ga As)	0,1	μm
Base (In Ga As)	3,0	μm
BSF (In Ga P ₂)	0,1	μm
TJ (Ga In P ₂)	0,3	μm
Buffer (As Ga Al)	0,1	μm
Emisor (Ge)	0,25	μm
Base (Ge)	140	μm

Tabla 2.1. Secuencia esquemática de las capas que componen la celda solar triple juntura incluyendo el vidrio de borosilicato y el adhesivo de siliconas de uso espacial. Los espesores son aproximados. Las barras sombreadas indican qué capas contiene cada subcelda, comenzando desde arriba la superior, intermedia e inferior. Entre subceldas están los diodos túnel que sirven para hacer la conexión eléctrica en una estructura monolítica. Debajo de la base de Ge está el contacto metálico posterior (Ref. 26)

Esta disposición permite superponer capas con niveles de conducción y valencia disímiles. Las celdas ATJ tienen propiedades de SC de tipo p del lado del sustrato y de tipo n del lado iluminado. Las ventanas son transparentes y sirven para pasivar la cara frontal de la subcelda respectiva. Esto se logra formando una capa con elevado valor de BP que tiene la finalidad de evitar que los portadores lleguen a la superficie límite de la celda y se aniquilen allí. Esto mejora la eficiencia de conversión de energía de la subcelda. El BSF tiene la misma función que las ventanas (Refs. 27 y 28).

En la figura 2.12 se muestra un extracto de la hoja de datos de las celdas ATJ de Emcore Corporation. El tamaño de las celdas es de 76 x 37 mm. El fabricante da una información muy sucinta respecto a la resistencia a la radiación referida a electrones de 1 MeV. Por ejemplo, informa que las relaciones entre la potencia máxima final y la inicial son de 0,89 y 0,85 luego de recibir fluencias de $5 \cdot 10^{14} \text{ e}^-/\text{cm}^2$ y de $1 \cdot 10^{15} \text{ e}^-/\text{cm}^2$ respectivamente (Ref. 29).

En la curva IV de una celda solar iluminada, el valor de voltaje a circuito abierto (corriente nula) se denomina Voc. El valor de corriente de cortocircuito (voltaje nulo) se denomina Isc. En realidad la celda trabaja en un

punto intermedio en el cual se obtiene la potencia máxima. El factor de llenado o FF, es la relación entre la potencia máxima entregada y el producto $V_{oc} \cdot I_{sc}$. La potencia máxima se encuentra en un punto del codo de la curva I-V (ver las definiciones de estos parámetros en el epígrafe de la figura 2.12).

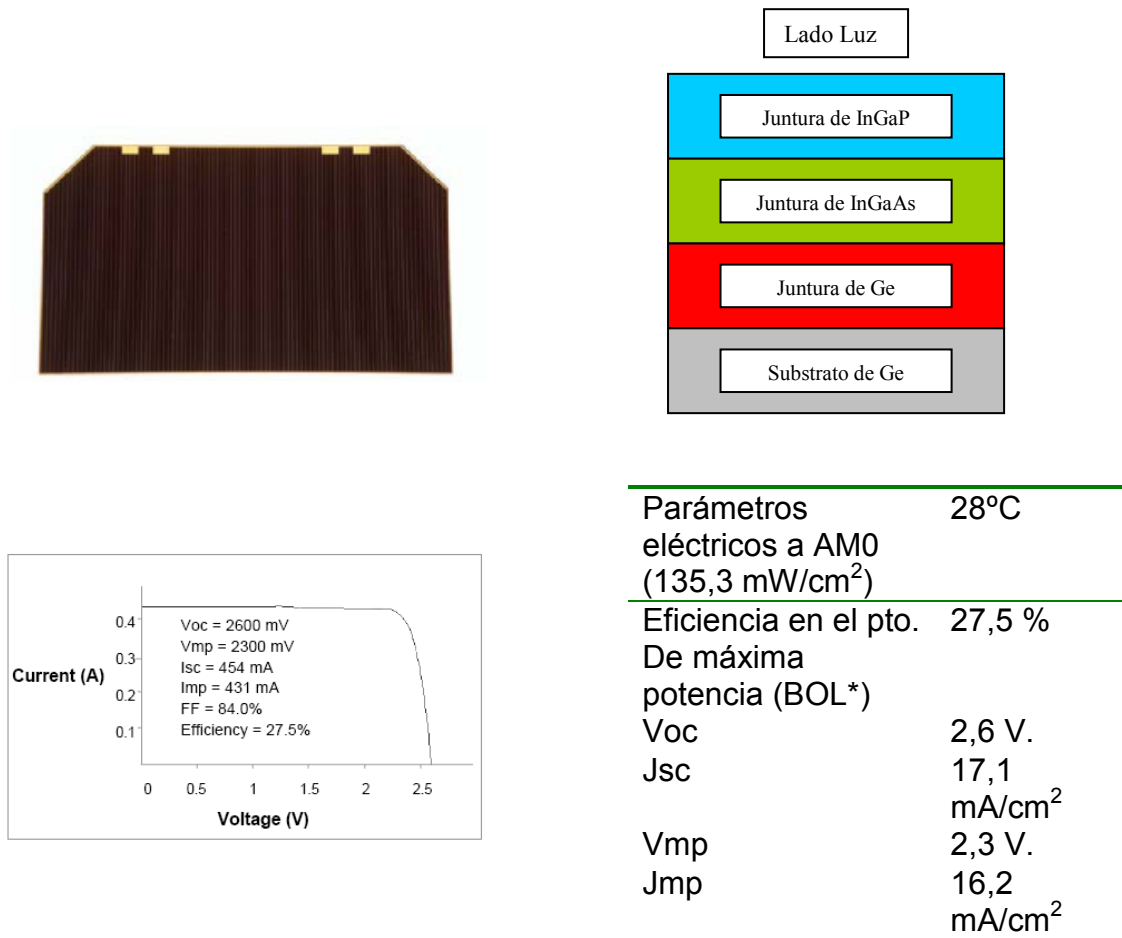


Figura 2.12. Extracto de la hoja de datos de las celdas de triple juntura de Emcore Corporation. Se muestra una celda sin conectar, un esquema de las capas que la forman, una curva I-V con los valores de tensión a circuito abierto (V_{oc}), corriente de cortocircuito (I_{sc}), tensión a la potencia máxima (V_{mp}), corriente a la potencia máxima (I_{mp}) y eficiencia de conversión. (*) La sigla BOL significa Beginning Of Life o comienzo de la vida útil, es decir, antes de ser utilizada. J_{sc} y J_{mp} son las densidades de corriente en cortocircuito y para el punto de máxima potencia. La figura superior derecha muestra las tres junturas superpuestas. La primera capta energía de los fotones de menor longitud de onda del espectro, la intermedia capta los fotones de longitudes de onda intermedias y la juntura de germanio capta la cola del espectro llegando al infrarrojo.

A los fines prácticos del funcionamiento del panel solar, el parámetro más importante de una celda solar es la potencia máxima entregada, que no debe caer por debajo de cierto umbral crítico. La celda no debe interrumpir la conducción a través de la cadena de la que forma parte. Por ello, ante la eventualidad de destrucción, cada celda tiene un diodo en paralelo que deja pasar la corriente si la celda respectiva falla. Este diodo evita que la celda averiada se transforme en un circuito abierto. De este modo una celda que falla no inutiliza la cadena de la cual forma parte.

El hecho de poder obtener una curva característica con valores no muy inferiores a los iniciales, implica que la celda solar siga funcionando como tal y que sigue aportando energía a la cadena de la cual forma parte después de recibir radiación acumulada desde el lanzamiento en órbita hasta el final de su vida útil.

Otros parámetros importantes para utilización satelital son la resistencia mecánica estructural y la resistencia a vibraciones, el peso, la vida útil esperada incluyendo la resistencia a la radiación que recibirá durante la misión, y el precio.

CAPÍTULO III

3. Técnicas de simulación de degradación por radiación
 - 3.1. Simulación directa
 - 3.2. Simulación indirecta (método CAC)
 - 3.3. Simulaciones realizadas en el presente trabajo
 - 3.3.1. Simulaciones directas realizadas
 - 3.3.2. Fluencias y condiciones recomendadas para ensayos
 - 3.4. Simulaciones realizadas para diseñar el degradador

3. Técnicas de simulación de degradación por radiación

3.1 Simulación directa

Existen técnicas o métodos utilizados para simular el daño producido por la irradiación con protones y electrones en celdas solares para uso espacial, que denominamos de simulación directa y que se detallan a continuación.

Los dos métodos comúnmente utilizados para predecir la degradación de celdas solares por radiación en el medio ambiente espacial incluyen daño por electrones y protones. Los dos métodos dan como resultado de degradación una fluencia equivalente de electrones de 1 MeV (Ref. 33). Esto significa que el valor final que dan es un número que indica la fluencia de electrones de 1 MeV en incidencia normal que tendría que recibir la celda para que se produzca en ella un daño igual al producido por el espectro isotrópico de electrones o protones al cual estará sometida.

En la referencia 30 se puede ver una comparación entre los dos métodos utilizando resultados obtenidos para celdas de GaAs/Ge.

Método JPL

El método más antiguo es el desarrollado en el Jet Propulsion Laboratory de EEUU (método JPL) que se puede aplicar a celdas de Si, GaAs, etc (Ref. 31). Se basa en el concepto del *coeficiente de daño relativo*. Este coeficiente es el cociente entre la fluencia crítica medida a una energía de referencia (10 MeV para protones y 1 MeV para electrones) y la fluencia crítica medida a diferentes energías. Estas energías son usualmente cuatro para electrones (0,6 / 1 / 2,4 y 12 MeV) y ocho para protones (0,05 / 0,1 / 0,2 / 0,3 / 0,5 / 1 / 3 y 9,5 MeV). La fluencia crítica se define como la fluencia necesaria para degradar una propiedad eléctrica (Voc, Isc, Pmax, etc.) hasta un cierto valor (usualmente 75% de su valor original). Las celdas se irradian con

incidencia normal y sin ningún tipo de cubierta protectora. Este método también indica cómo escalar estos resultados a condiciones espaciales, incluyendo las celdas solares cubiertas con vidrio.

En las figuras 3.2 a 3.4 se muestra en forma esquemática el procedimiento utilizado para aplicar el método JPL. Al pie de la figura 3.1 se explica el método JPL en general.

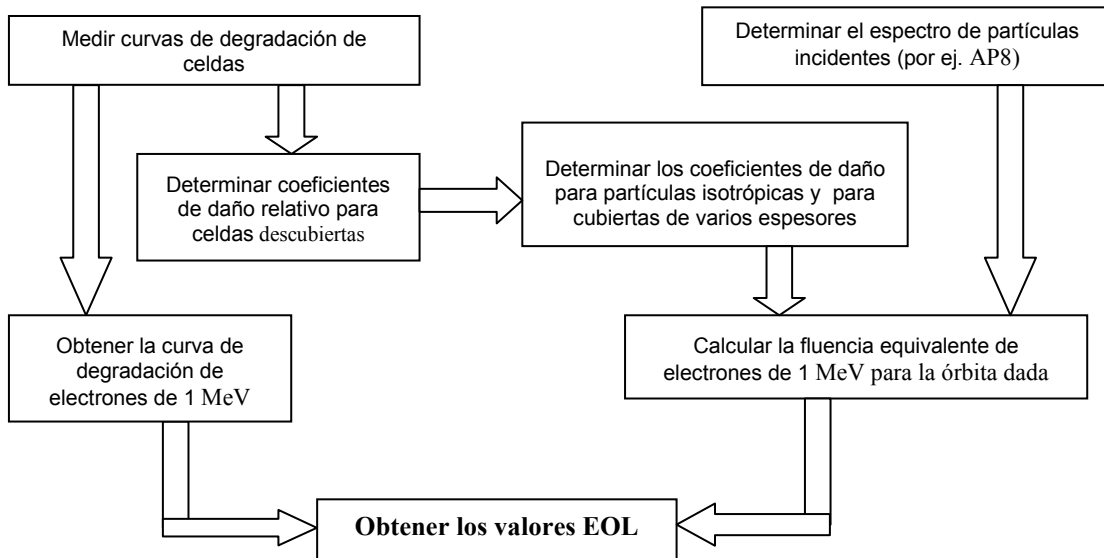


Figura 3.1: Diagrama de flujo que muestra el procedimiento para aplicar el método JPL. Las curvas de degradación se miden para cuatro energías de electrones y ocho de protones en incidencia normal. Típicamente ocho valores de fluencia son necesarios para tener una curva detallada (ver un ejemplo de curvas de degradación medidas en la figura 3.6 donde se indica 'Mediciones'). Para tener una buena estadística, varias celdas se deben medir para cada condición. Esto significa irradiar cientos de celdas. Para cada tipo de partícula y energía incidente se determina a partir de la curva de degradación, la fluencia a la cual el respectivo parámetro fotovoltaico (V_{oc} , I_{sc} o P_{max}) se reduce al 75% de su valor inicial. Estos valores se denominan fluencias críticas. Para los protones, los coeficientes de daño relativo para cada energía se obtienen dividiendo la fluencia crítica respectiva por la fluencia crítica para 10 MeV. Para los electrones, los coeficientes de daño relativo para cada energía se obtienen dividiendo la fluencia crítica respectiva por la fluencia crítica para 1 MeV. Estos coeficientes normalizados se grafican en función de la energía y dan la dependencia en energía de los coeficientes de daño relativo. El próximo paso es calcular los coeficientes de daño relativo para partículas isotrópicas a partir de los valores medidos para incidencia normal. Esto se realiza tomando en cuenta consideraciones geométricas y para el caso de protones de baja energía y cubiertas de vidrio se realizan modelizaciones de frenado y daño (ver. Ref. 30 para más detalles). El resultado de esto son curvas de daño relativo en función de la fluencia, tanto para protones como para electrones, y en las cuales está considerado el efecto de las cubiertas de vidrio. Ejemplos de estas curvas se pueden ver en las figuras 3.2 y 3.3. Por otro lado, se determina el espectro de partículas incidentes. Esto se puede hacer por ejemplo utilizando el AP-8 (Ref. 34) para protones o el AE-8 (Ref. 35) para electrones. Estos son los códigos que dan el espectro de protones o de electrones para una órbita a elección y que están disponibles en la literatura. Para calcular la fluencia equivalente de electrones de 1 MeV para la órbita dada y la celda considerada, hay que combinar los espectros con las curvas de daño relativo en función de la fluencia. Esto se explica en el texto a continuación.

Para obtener los valores EOL hay que combinar los espectros que se quiere evaluar (por ej. los obtenidos para la órbita definida utilizando el AP8 ó el AE8), con las curvas de daño relativo en función de la fluencia para la celda considerada. Para ello se realiza el siguiente procedimiento:

Se convierten los espectros de electrones y protones a una forma diferencial $d\Phi_{elec}(E)/dE$ y $d\Phi_{prot}(E)/dE$ y luego se integra su producto con los respectivos coeficientes de daño relativo, que dependen de la energía.

$$\Phi_{1MeVelectrones,electrones} = \int \frac{d\Phi_e(E)}{dE} D_e(E) dE \quad (\text{ec. 3.1})$$

$$\Phi_{1MeVelectrones,protones} = D_{pe} \int \frac{d\Phi_p(E)}{dE} D_p(E) dE \quad (\text{ec. 3.2})$$

Siendo D_e y D_p los coeficientes de daño relativo y D_{pe} el coeficiente que convierte la fluencia de protones de 10 MeV a una fluencia equivalente de electrones de 1 MeV. Para el caso del silicio vale ~ 3000 para todos los parámetros fotovoltaicos. Para otras celdas su valor cambia según el parámetro considerado.

El resultado de las integrales es una curva que indica las fluencias de electrones de 1MeV en incidencia normal que causarían el mismo daño a las celdas recubiertas que el espectro isotrópico seleccionado.

Todo este procedimiento se indica esquemáticamente en la figura 3.4.

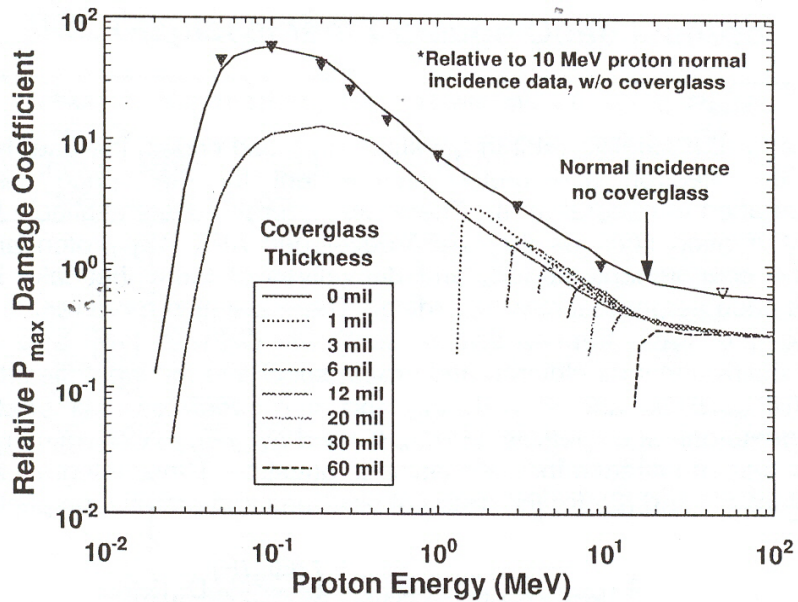


Figura 3.2: La curva superior muestra los coeficientes de daño relativo para protones referidos a protones de 10 MeV en incidencia normal en función de la energía para una celda de GaAs/Ge. Los puntos son determinaciones experimentales. La curva inferior de trazo continuo corresponde a la conversión de la curva anterior al caso isotrópico, es decir, considerando irradiación omnidireccional en lugar de incidencia normal. Las otras curvas incluyen, además del efecto isotrópico, la influencia de los diversos espesores de vidrio indicados en la leyenda (mil. se refiere a milésimas de pulgada; 1 mil.= 25,4 μm).

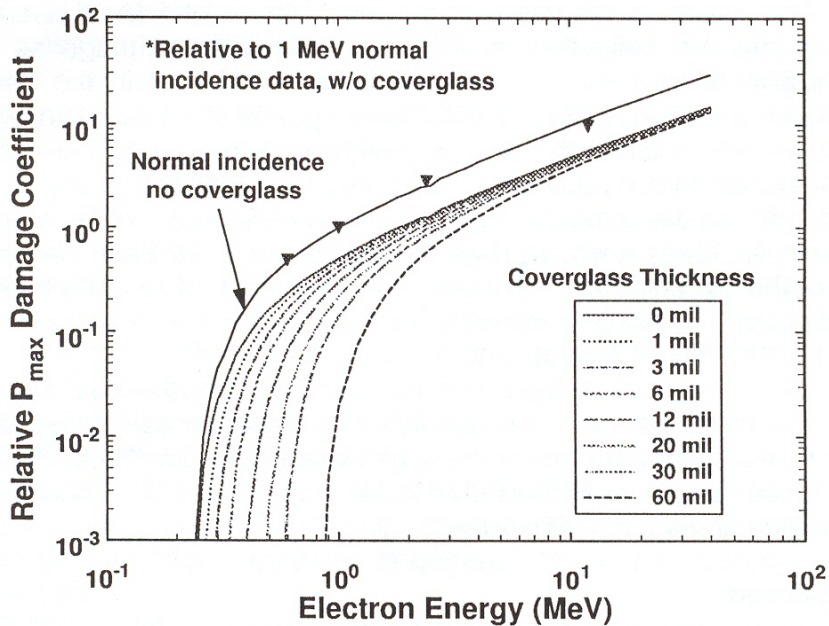


Figura 3.3: La curva superior muestra los coeficientes de daño relativo para protones referidos a electrones de 1 MeV en incidencia normal en función de la energía para una celda de GaAs/Ge. Los puntos son determinaciones experimentales. La curva inferior de trazo continuo, justo por encima de las curvas punteadas, corresponde a la conversión de la curva anterior al caso isotrópico. Las otras curvas, que son punteadas, incluyen además del efecto isotrópico, la influencia de los diversos espesores de vidrio indicados en la leyenda (mil. se refiere a milésimas de pulgada; 1 mil.= 25,4 μm).

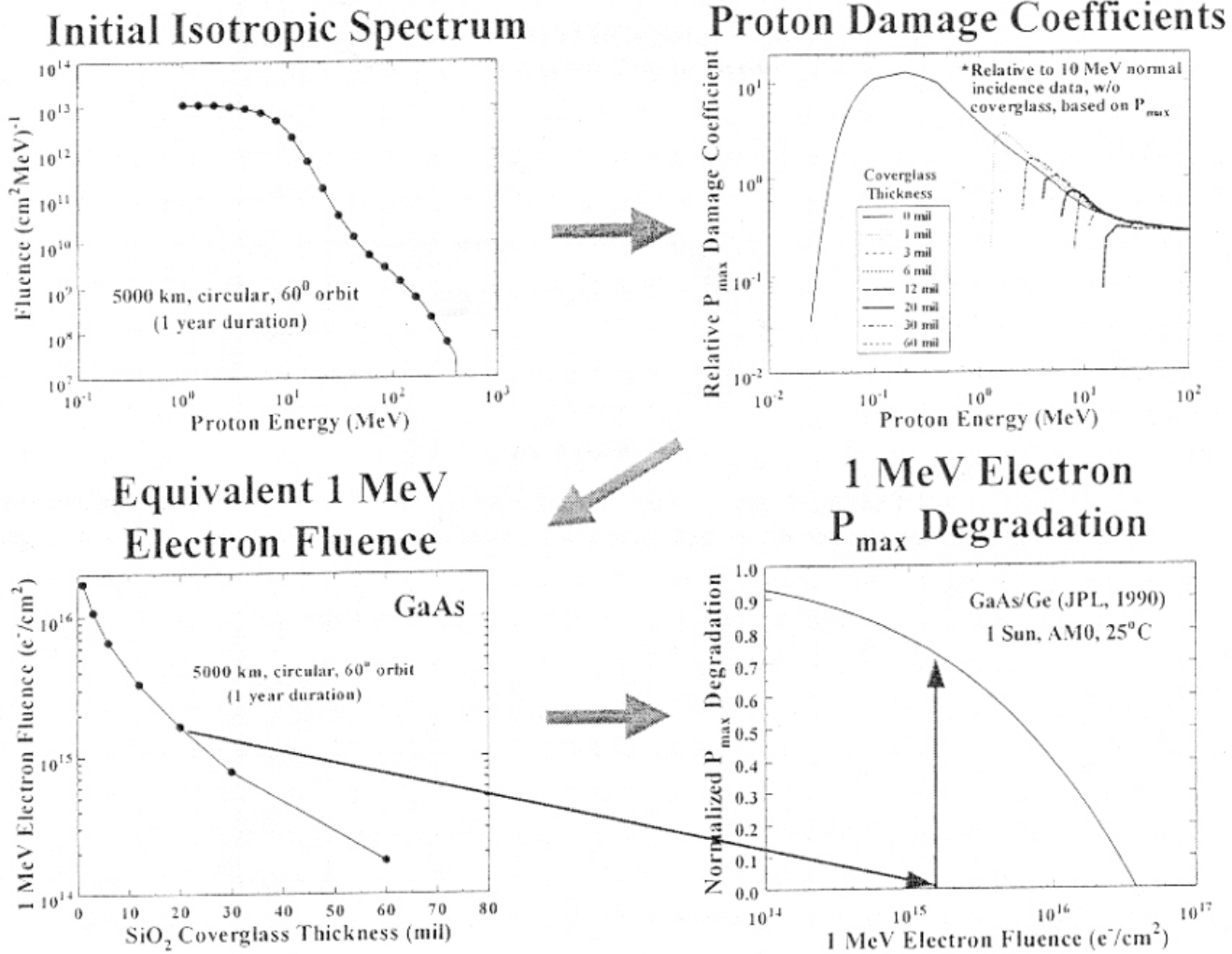


Figura 3.4: Esquema que muestra gráficamente el procedimiento para aplicar el método JPL explicado al pie de la figura 3.1. El resultado final es la curva inferior derecha que grafica, para el tipo de celda al que se le aplicó el método JPL, la reducción del parámetro fotovoltaico correspondiente en función de la fluencia de electrones de 1 MeV en incidencia normal. La curva superior izquierda muestra el espectro espacial al que estará sometida en órbita la celda considerada. La curva superior derecha muestra la dependencia con la energía de los coeficientes de daño relativo teniendo en cuenta las correcciones por isotropía. Esta se combina con la curva inferior izquierda para sumar el efecto del espesor de vidrio. El resultado de la combinación de estas dos últimas curvas se combina con la figura superior izquierda utilizando el procedimiento descrito en el texto y se obtiene el valor, en este caso normalizado, del parámetro fotovoltaico considerado (en este caso P_{max}) en función de la fluencia de electrones de 1MeV en incidencia normal.

Método NRL

En el segundo método, desarrollado en el Naval Research Laboratory de EEUU (método NRL), la dependencia de los coeficientes de daño por radiación con la energía de la misma se determina a partir de un cálculo de la pérdida de energía no ionizante (non-ionizing energy loss ó NIEL) y necesita menos mediciones que el método JPL (usualmente dos energías para electrones y una para protones). Este método es aplicable a celdas de GaAs y a otras celdas que presentan una dependencia lineal del daño con protones con el NIEL. Una excepción son las celdas de silicio cristalino, donde los coeficientes de daño medidos se desvían del NIEL por efectos que resultan del espesor de las celdas. Al ser el silicio un SC de gap indirecto, la longitud de difusión de los protones de alta energía es grande y pierden una porción considerable de su energía en la zona activa de la celda. Debido a esto las energías de los protones no están bien definidas dentro de la celda (Ref. 32).

En este método se grafica la degradación de la celda en función de la dosis de daño por desplazamiento en lugar de la fluencia. Una misma fluencia de electrones por ejemplo puede producir distinto daño en dos celdas de tecnologías diferentes.

La dosis de daño por desplazamiento (displacement damage dose) para la partícula i se define como:

$$D_i(E) \equiv \Phi_i(E)S_i(E) \quad (\text{ec. 3.3})$$

Donde $\Phi_i(E)$ es la fluencia de la partícula i y $S_i(E)$ es el NIEL, ambas correspondientes a la energía E . Como la dependencia de la degradación con el valor de NIEL es no lineal, hay que definir un coeficiente de daño por desplazamiento relativo, en el cual se relaciona el coeficiente a una energía de referencia del electrón de 1 MeV y el cociente entre el valor de NIEL a la energía dada y el valor de NIEL a 1 MeV.

$$D_{e,eff}(1.0) \equiv D_{e,eff}(E) \left[\frac{S_i(E)}{S_e(1.0)} \right]^n \quad (\text{ec. 3.4})$$

Para protones, el valor del exponente n es 2. En el caso de electrones, el exponente tiene el valor $n=1$ para silicio tipo n y $n \approx 2$ para silicio tipo p y para otros semiconductores tipo p .

En las figuras 3.2 a 3.4 se muestra en forma esquemática el procedimiento utilizado para aplicar el método JPL. Al pie de la figura 3.1 se explica el método JPL en general.

En las figuras 3.5 y 3.6 se muestra en forma esquemática el procedimiento utilizado para aplicar el método N.R.L., en el cual partiendo de un grupo de curvas se llega a obtener una sola Curva Característica. Esta curva característica indica la reducción del valor de un parámetro fotovoltaico determinado en función de la dosis de daño por desplazamiento.

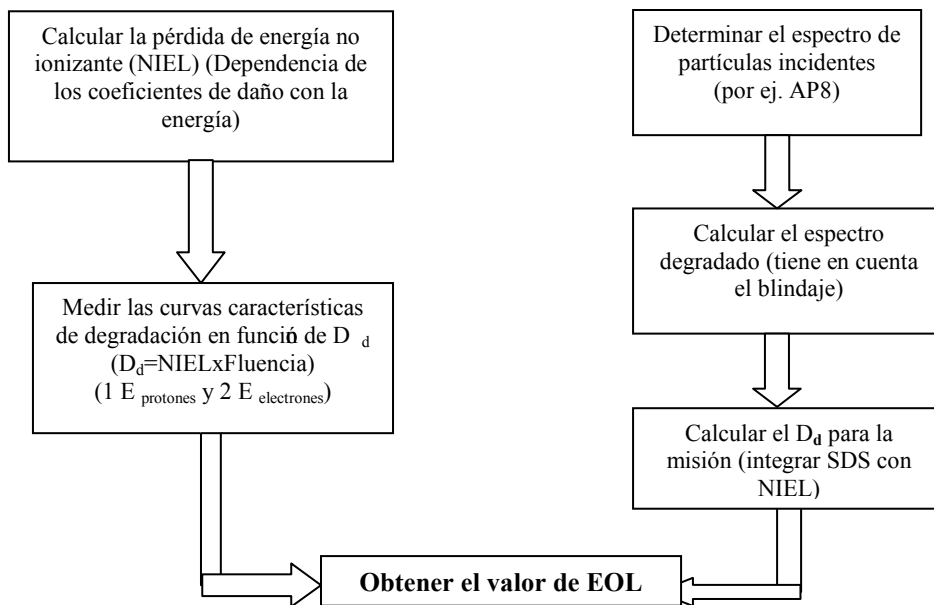
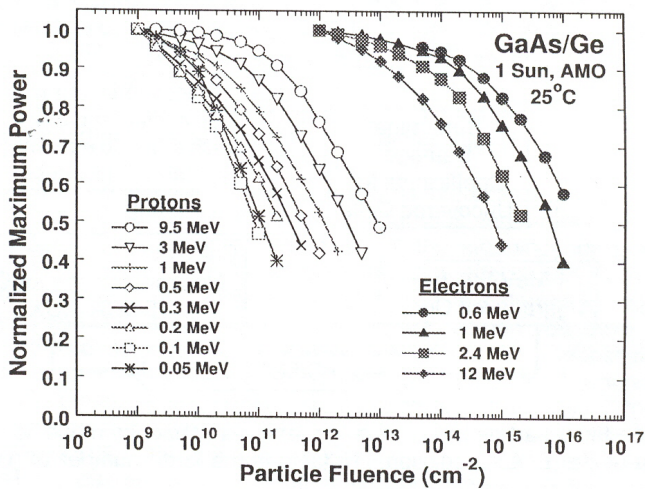


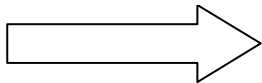
Figura 3.5: Diagrama de flujo que detalla los pasos a realizar para aplicar el método NRL

En la figura 3.6 se explica este procedimiento con mayor detalle. Allí se muestran curvas de degradación de potencia normalizadas a la potencia BOL. Se ven dos grupos de curvas, uno para protones y otro para electrones. El de electrones se encuentra del lado derecho porque se necesitan fluencias mayores de esta partícula menos masiva que el protón para producir el mismo daño. Dentro de un grupo, cada curva corresponde a una energía diferente. Las curvas del lado izquierdo corresponden a energías mayores, ya que con partículas más energéticas se necesitan menores valores de fluencia para producir daño. En la figura inferior izquierda, se grafica el NIEL en función de la energía, tanto para protones (curva superior) como para electrones (curva inferior). Combinando estos dos grupos de curvas, se obtiene la curva única de la derecha que es la curva característica.

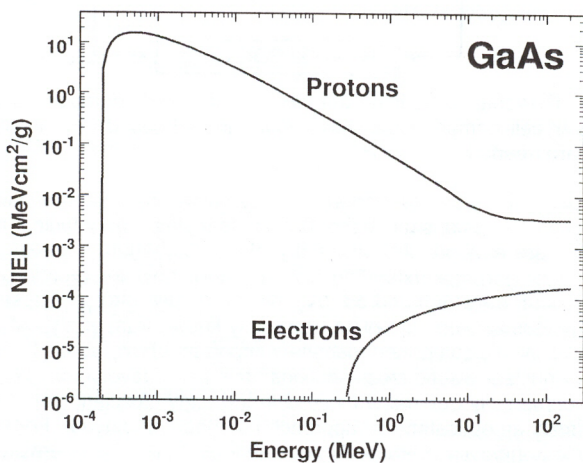
Mediciones



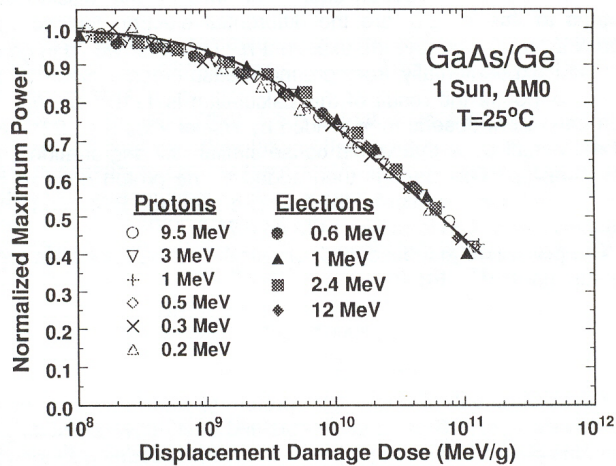
X



Non-Ionizing Energy Loss



Curva Característica



Contiene los datos para todas las energías en una única curva

Figura 3.6. Esquema gráfico detallando el uso del método NRL. En la figura superior izquierda vemos curvas de degradación de potencia normalizadas a la potencia BOL. Se ven dos grupos de curvas, uno para protones y otro para electrones. En la figura inferior izquierda, se grafica el NIEL en función de la energía, tanto para protones (curva superior) como para electrones (curva inferior). Combinando estos dos grupos de curvas, se obtiene la curva única de la derecha. Esto se hace de la siguiente manera: para cada valor normalizado de Pmax hay varios valores de Fluencia correspondientes a varias energías. Para cada una de esas energías hay un valor de NIEL. Se multiplican el valor de fluencia y el valor de NIEL para una misma energía y se grafica el valor de Pmax normalizado respectivo en función del resultado de ese producto. La curva obtenida, que se muestra a la derecha, es la Curva Característica para celdas de esa tecnología específica (Ref. 30).

Comparación entre JPL y NRL

El método NRL es el más fácil de aplicar en la mayoría de los casos, especialmente para tecnologías nuevas o emergentes, debido a que se necesitan menos mediciones en tierra para obtener los coeficientes de daño. Sin embargo, para tecnologías que tienen bases de datos bien establecidas, el método JPL ha sido aplicado exitosamente y es el único método que permite un cálculo directo del daño en celdas de silicio de gran espesor (Ref. 30).

3.2. Simulación indirecta (método CAC)

La técnica o método que denominaremos de simulación indirecta es una técnica propuesta por M. Alurralde (Ref. 33) y consiste en seleccionar adecuadamente irradiaciones “monoenergéticas” que produzcan en la muestra un daño cristalográfico equivalente en la estructura a ensayar; en este caso la celda solar. Esto ocurriría si los espectros PKA que producen tanto el espectro simulado como el espacial, son similares.

Denominamos energía PKA (E_{PKA}) a la energía que adquiere el átomo PKA (ver sección 2.1.3 para una descripción de los PKA). Cuando consideramos todos los protones del haz, como en el caso de simulaciones TRIM (ver Apéndice 1 para una descripción de los programas TRIM/SRIM y Apéndice 2 para una descripción de los aspectos generales de la interacción ión-materia), para cada protón incidente podremos tener uno o más átomos PKA con su correspondiente energía E_{PKA} . Si graficamos el número de átomos en el entorno de un determinado valor de E_{PKA} en función de ese valor de energía, tendremos el espectro de PKA correspondiente a ese espectro de protones incidentes. Con los datos de salida del código TRIM, y con un programa hecho para tal efecto (Ref. 19), se puede graficar el espectro PKA en función de la profundidad dentro de la muestra, con lo cual se puede tener una idea de la distribución espacial del daño cristalográfico producido.

Es sabido que la degradación de la celda solar o del dispositivo electrónico está definida por el espectro de electrones y protones en la zona activa. En el caso de una celda solar se trata de la zona fotoeléctricamente activa. Los métodos usuales para el análisis de daño en celdas solares (métodos JPL y NRL), que fueron descritos en la sección anterior, se basan en analizar un lote de celdas a energías especificadas a priori y luego, dado un determinado espectro espacial, se realiza el cálculo de la degradación.

El método desarrollado en el CAC (Ref. 33) se basa en calcular a partir de datos de la estructura de la celda y del espectro espacial cómo va a ser la deposición de energía en la red cristalina de la misma. La distribución de PKA's describe cómo la energía de los proyectiles se transfiere a los átomos de la red. El espectro E_{PKA} muestra en función de la energía el número integral de colisiones en las cuales los átomos reciben una dada energía.

En el espectro de protones espaciales, el rango de energías relevantes va de los centenares de keV hasta decenas de MeV. Las colisiones con átomos de la red pueden ser Coulombianas o nucleares (elásticas o inelásticas), pero como indicó Alurralde (Ref. 33) solo las colisiones elásticas de protones con energía menor que 50 MeV contribuyen significativamente a la producción de

daño. Burke refiere a que para energías por encima de 50 MeV el daño por interacciones nucleares es importante para materiales masivos (Ref. 36). Pero para muestras delgadas debajo del milímetro de espesor, como es el caso de las celdas solares, el daño nuclear no es importante (Ref. 33)

Además, se ha encontrado que para elementos livianos las excitaciones electrónicas son más significativas que las nucleares solo para E_{PKA} mayores que un umbral de 400 keV (Refs. 37 y 38). Estos valores de energía PKA son muy poco probables en las colisiones con protones espaciales. Para el caso de elementos pesados el umbral sería aún mayor. Esto significa que en el caso de las celdas solares en el espacio, la fracción de colisiones en el rango en donde las reacciones inelásticas son relevantes es menor que 10^{-5} . Consecuentemente, la interacción dominante con protones para el caso de las celdas en el espacio es de tipo elástico o Coulombiano y no se consideran interacciones nucleares. Esto justifica que el método CAC utilice un código de cálculo Monte Carlo como el TRIM, que se basa en ese supuesto y que utiliza la aproximación de colisión binaria, que considera solo interacciones Coulombianas, para simular la interacción con los átomos de la muestra (Ref. 33).

El objetivo de este método es reproducir, en la muestra estudiada, el mismo espectro PKA que produce el espectro espacial. Luego, la distribución de defectos sería equivalente, salvo una constante debida a diferencias entre las eficiencias de ambas situaciones. Para que esto ocurra y para tener cuantitativamente la misma distribución de defectos, será necesario escalar el valor de fluencia de ensayo al correspondiente al espectro espacial.

Este método se basa en dos supuestos:

- a) Que las cascadas de desplazamiento no se superponen en tiempo y posición, lo cual es bastante plausible para la fluencia en la misión considerada.
- b) Que los defectos puntuales tienen un efecto despreciable en este proceso, lo cual se justifica ya que los intersticiales no son móviles a las temperaturas usuales en el espacio y las vacancias son tan móviles que rápidamente se aniquilan al llegar a un sumidero o crecen en un defecto extendido, dejando los defectos extendidos producidos por protones. Esto es válido para silicio (Ref. 39).

Entonces, el procedimiento para utilizar el método CAC consta de tres pasos como se detalla a continuación:

- 1) Evaluar si los espectros PKA de las simulaciones con espectro espacial y espectro de laboratorio son similares.
- 2) Ver si las dependencias con la profundidad de la muestra de ambos espectros PKA son similares.
- 3) Asumiendo que el proceso PKA muestra formas de espectro similares para protones provenientes de cualquier origen, la fluencia total necesaria para producir ese daño es:

$$\Phi_i|_{Lab} \equiv \Phi_i|_{Space} K(E_{ref}) \quad (\text{ec. 3.5})$$

donde

$$K(E_{ref}) \equiv \frac{n_i(E_{ref})|_{Space}}{n_i(E_{ref})|_{Lab}} \quad (\text{ec. 3.6})$$

El número integral de colisiones en las cuales la partícula i transfiere la energía E_{PKA} es $n_i(E_{PKA})$. Del mismo modo, $n_i(E_{Ref})$ es el número integral de colisiones en las cuales la partícula i transfiere la energía tomada arbitrariamente como referencia tanto en el espectro espacial como en el de laboratorio.

Si las condiciones 1 y 2 no se cumplen o si $K(E_{ref})$ no es razonablemente constante, las condiciones de la irradiación de laboratorio deberán ser modificadas hasta que se cumplan los puntos 1 y 2. Esto podrá hacerse modificando la energía de irradiación o el ángulo de irradiación.

Es importante tener en cuenta la variación del daño con la profundidad, ya que solo cuando el valor de $K(E_{ref})$ es aproximadamente constante para cada profundidad relevante y valor de E_{ref} , podemos asumir que tenemos espectros PKA similares en el espacio y en el laboratorio y entonces podremos hacer una medición real, que excepto por un factor de multiplicación, describirá bien la degradación de la celda.

En algunos casos, como celdas solares de silicio, irradiando la celda desde la parte trasera se puede compensar por el efecto de concentración de daño cerca de la superficie frontal. La concentración de daño en la superficie frontal se genera por el espectro isotrópico espacial esta concentración se reproduciría al irradiar con incidencia normal desde la cara trasera, ya que los protones son frenados y su sección eficaz de colisión aumenta.

La figura 3.7 muestra las gráficas más representativas del trabajo mencionado en la referencia 30 realizado con celdas de silicio monocristalino. En los dos gráficos superiores se muestra en función de la profundidad de la muestra, la relación K entre el espectro PKA espacial (en el caso estudiado se tomó el AP8-MAX; ver apéndice 3) y el espectro PKA correspondiente a 10 MeV. Los dos casos corresponden a cubiertas de vidrio borosilicato de 70 y 150 μm respectivamente.

En los dos gráficos inferiores se grafica, en función de la profundidad de la muestra, la relación K entre el espectro PKA espacial y el espectro PKA correspondiente a irradiación desde la parte trasera de la celda con 6 y 8 MeV respectivamente. Las tres curvas en cada caso corresponden a distintos umbrales de energía transferida (1 eV, 100 eV y 1 keV).

Un valor de K constante en función de la profundidad indica que la distribución de daño que generan ambos espectros es similar. En este caso, estos resultados indican que para producir un daño equivalente al del espectro espacial considerado, es conveniente irradiar las celdas desde la parte trasera con protones de 6 y 8 MeV cuando las cubiertas delanteras de vidrio borosilicato son de 70 y 150 μm . Respectivamente.

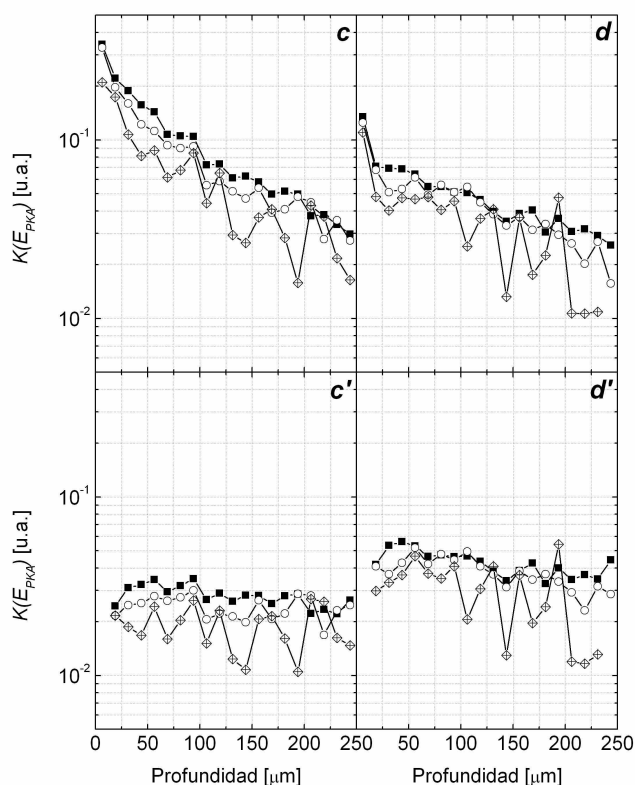


Figura 3.7. En los dos gráficos superiores se muestra en función de la profundidad de la muestra, la relación K entre el espectro PKA espacial y el espectro PKA correspondiente a protones de 10 MeV. Los dos casos corresponden a cubiertas de vidrio borosilicato de 70 y 150 μm respectivamente. En los dos gráficos inferiores se grafica, en función de la profundidad de la muestra, la relación K entre el espectro PKA espacial y el espectro PKA correspondiente a irradiación desde la parte trasera de la celda con 6 y 8 MeV respectivamente. Las tres curvas en cada caso corresponden a distintos umbrales de energía transferida (\blacksquare 1 eV , \circ 100 eV y \blacklozenge 1 keV) (Ref. 33).

3.3. Simulaciones realizadas en el presente trabajo

3.3.1. Simulaciones directas realizadas

En un trabajo previo y dentro de las tareas llevadas a cabo para el proyecto paneles solares, se ha estimado la dosis equivalente que recibirían las celdas del panel solar en la órbita propuesta para el satélite (Ref. 40).

Esto se hizo utilizando la facilidad Spenvis (Ref. Apéndice 3), que utiliza el método JPL. A continuación se describen las generalidades y en el apéndice 3 se describe en detalle el cálculo efectuado.

Spenvis requiere ingresar datos en tres áreas: características de la órbita, características del entorno espacial y características de la celda a ensayar. El resultado que se obtiene es una fluencia equivalente total para electrones de 1 MeV y una fluencia equivalente total para protones de 10 MeV,

lo cual indica qué recibirían las celdas durante la misión modelada. Cabe señalar que estos cálculos se basan en modelos, y por lo tanto estos valores son estimaciones.

La órbita propuesta es heliosincrónica circular, con una inclinación de $98,01^\circ$ y una altitud de 657 km. Las órbitas heliosincrónicas son aquellas en las que el plano de la órbita siempre es normal a la recta que une la tierra y el sol.

Las características del entorno espacial incluyen: radiación atrapada en los cinturones de Van Allen, anisotropía del campo de radiación y efectos debidos a protones solares (nivel de actividad solar).

La facilidad SPENVIS no incluye datos específicos para celdas Emcore ATJ. Entonces, para obtener la fluencia equivalente, es decir aquella dosis de electrones de 1 MeV que produciría un daño equivalente al del espectro espacial en esa órbita durante el período de tiempo especificado, se utilizó la celda Spectrolab 3J EOL como modelo. Esta celda está destinada al mismo segmento de mercado que la ATJ de Emcore.

Los valores calculados de este modo indican que para una misión iniciándose en julio de 2009, la fluencia equivalente total estaría por debajo de $1,46 \cdot 10^{14} \text{ e}^-/\text{cm}^2$ para una duración de 3 años y de $1,77 \cdot 10^{14} \text{ e}^-/\text{cm}^2$ para una duración de 5 años. La fluencia equivalente total referida a protones de 10 MeV estaría por debajo de $3 \cdot 10^{11} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ (ver Apéndice 3).

3.3.2. Fluencias y condiciones recomendadas para ensayos

En base a estas consideraciones, los ensayos realizados y cuyos resultados se presentan en el capítulo 5, consistieron en irradiar celdas ATJ Emcore con protones de 10 MeV hasta fluencias máximas de $3 \cdot 10^{11} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ y con electrones de 3 MeV (en la sección 5.3.1. se explica porqué no son de 1 MeV) hasta fluencias máximas de $4 \cdot 10^{14} \text{ e}^-/\text{cm}^2$.

Las irradiaciones con protones se realizaron en vacío y con la celda mantenida a diversas temperaturas (28°C , 80°C y -140°C) durante la irradiación. Las irradiaciones con electrones se realizaron en aire y a temperatura ambiente.

3.4. Simulaciones realizadas para diseñar el degradador

Las simulaciones realizadas en este trabajo consistieron en utilizar el programa TRIM para calcular el espectro E_{PKA} correspondiente al espectro espacial (Refs. 41, 42 y 43) y buscar una sumatoria de picos gaussianos de protones que produzcan en el material estudiado un espectro E_{PKA} similar al que produce el espectro espacial. A priori, nada hace pensar que en este caso la forma del espectro simulado se deba asemejar necesariamente al espectro espacial, pero como primera aproximación se buscó que sean semejantes. El espectro espacial abarca energías que van de los pocos keV hasta 190 MeV. Sin embargo el espectro simulado abarca energías hasta 14.5 MeV, ya que solo se tomó en cuenta el rango de energías que luego podría medirse experimentalmente en la facilidad que se construyó a tal efecto y que es relevante para producir daño.

El primer paso consistió en obtener el espectro de protones espaciales, calculado para una órbita de interés con la facilidad Spenvi (ver Apéndice 3), Se obtuvo un espectro para condiciones semejantes a las utilizadas por los satélites de CONAE y luego se aproximó con una curva analítica, obteniéndose la siguiente ecuación empírica:

$$\Phi(\text{prot cm}^{-2}) = 6.0928 * 10^{10} [E(\text{MeV})]^{-1.86031} \quad (\text{ec. 3.7})$$

El segundo paso consistió en aproximar el espectro obtenido con Spenvi con la sumatoria de las contribuciones de una serie de catorce picos gaussianos de intensidades apropiadas, como se observa en la figura 3.8. A este espectro aproximado lo denominamos espectro del degradador. Con catorce picos gaussianos, la aproximación al espectro espacial se consideró satisfactoria. Las alturas de los picos gaussianos se obtuvieron utilizando el siguiente criterio: que el espectro de protones generado por el degradador y el espectro espacial tengan la misma área entre 2.5 y 14.5 MeV. Para ello se lo dividió en dos zonas, una de baja energía [2.5 a 6.823 MeV] y otra de alta energía [6.823 a 14.5 MeV]. En ambas zonas se igualó el valor del área debajo de ambos mediante el procedimiento de ajustar la altura de cada pico. Se dividió en dos zonas para facilitar los cálculos. La altura de los picos se fijó proporcional al valor de la curva del espectro espacial para la energía del máximo del pico. Más adelante en esta sección se explica porqué no se consideraron energías por debajo de 2.5 MeV.

El procedimiento para obtener un pico gaussiano es hacer atravesar el haz monoenergético que provee el acelerador Tandem por láminas delgadas de aluminio. Referimos al lector al capítulo 4 para todos los detalles experimentales y constructivos que en el presente capítulo no se mencionan. En la tabla 3.2 se indican los espesores de aluminio con los que se obtienen los valores de energía correspondientes a los picos gaussianos de la figura 3.8.

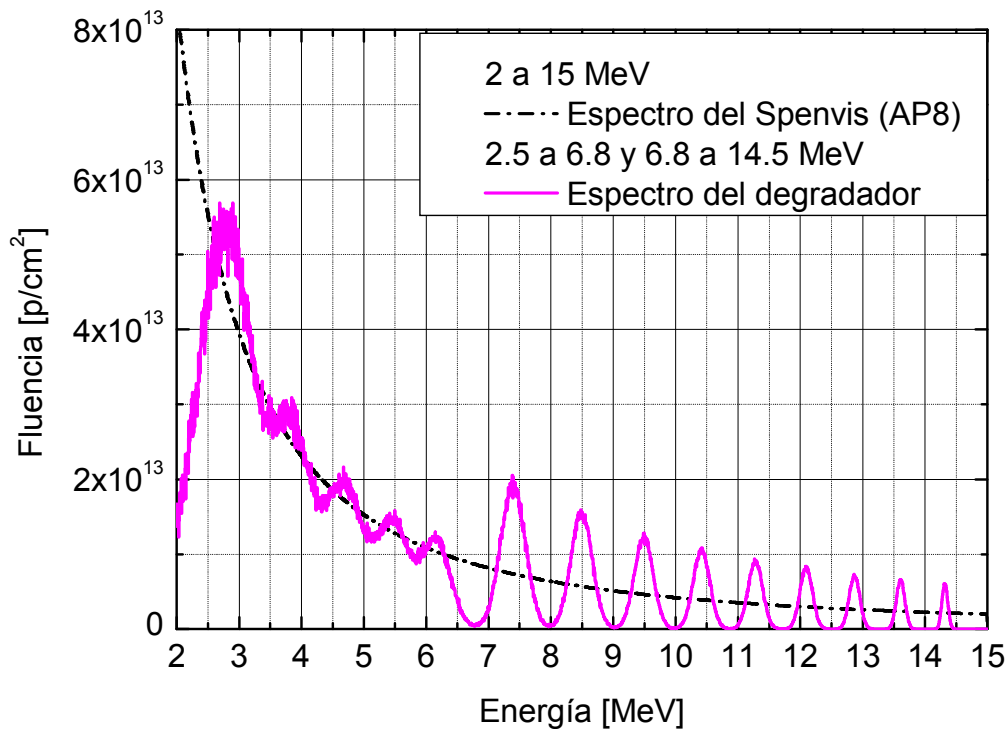


Figura 3.8. Aproximación de la fluencia del espectro espacial con la sumatoria de catorce picos gaussianos de energías e intensidades apropiadas. Para facilitar los cálculos se dividió el espectro del degradador en dos zonas, una de bajas energías y otra de altas energías.

Cuando el haz atraviesa una lámina de determinado espesor, el haz emergente tiene una distribución de energías que se aproxima por una gaussiana en su forma y cuyo valor medio es función del espesor de la lámina y de su composición química. Las colisiones de los protones con los átomos son aleatorias e independientes entre sí. Como hay un gran número de eventos aleatorios independientes entre sí, la distribución es normal y se puede describir con una curva gaussiana. Tanto la energía como la distribución angular del haz emergente se han modelado utilizando el programa SRIM (ver Apéndice 1). Esto puede verse en las figuras 3.9 y 3.10 que muestra resultados de una simulación TRIM para el caso de una folia de aluminio de 400 μm . En la figura 3.10, en lugar del ángulo se grafica el desvío del haz respecto a la trayectoria rectilínea a una distancia de 5.45 metros de la lámina. Los porcentajes son acumulativos y los iones que llegan a la zona de irradiación son aquellos que se desvían hasta 6.3 cm. (ver sección 5.1 donde se describen los aspectos geométricos de las trayectorias de los haces de protones).

El tercer paso consistió en elegir un blanco simplificado de prueba, apropiado para comparar el espectro E_{PKA} generado por los dos espectros de protones, el espacial y la suma de picos gaussianos. El blanco simplificado se detalla en la tabla 3.1. La primera capa simula el vidrio protector que se coloca sobre cada celda en el panel solar espacial. La segunda capa simula el pegamento de siliconas de uso espacial que sirve para adherir el vidrio ceriado

a la superficie frontal de la celda (Ref. 5). La tercera capa simula una celda solar Emcore ATJ aproximándola con una capa de germanio (puede ser cristalino o amorfo indistintamente) que tiene un espesor de 55 μm . La celda de germanio puro se utilizó para evitar las complicaciones de una multicapa de composiciones diversas, ya que con el programa TRIM hay que simular independientemente cada capa. La primera capa se simula sola, en tanto que para simular las capas subsiguientes los protones deben atravesar las anteriores y eso lentifica enormemente las simulaciones. Por otro lado, como se indica en la tabla 2.1, la celda Emcore ATJ está compuesta por tres subceldas de composiciones InGaP_2 , InGaAs y Ge . Las dos primeras sumadas tienen un espesor menor a 5 μm . Si se toman en cuenta los números atómicos promedio de los dos primeros compuestos y los de los compuestos de las capas intermedias, en una aproximación muy simplificada, se parecen al número atómico del germanio. Este hecho hace suponer que su comportamiento frente a colisiones con protones con estas energías puede ser similar.

Material	Composición	Espesor (μm)
Vidrio borosilicato dopado con cerio	(% at.: 0.95 Al , 57.1 O , 24.7 Si , 8.57 B, 2.85 Na , 5.71 Ce)	100
Pegamento de siliconas	(%at.: 20 H , 40 O , 40 Si)	100
Germanio puro	(%at.: 100 Ge)	55

Tabla 3.1. Tabla indicando la composición y los espesores correspondientes al blanco utilizado para comparar el efecto de los dos espectros.

Como se mencionó anteriormente, para obtener las energías medias de los picos gaussianos de la figura 3.8, se utilizaron los espesores de aluminio indicados en la tabla 3.2. En esta tabla se muestran resultados de simulaciones que se hicieron para 16 folias con espesores crecientes hasta 1270 μm , que es el espesor de aluminio que deja pasar menos del 1% de protones de 15 MeV en incidencia normal. Este último valor se incluye en la tabla solamente por completitud, ya que en la figura 3.5 no hay un pico con el valor de energía media correspondiente.

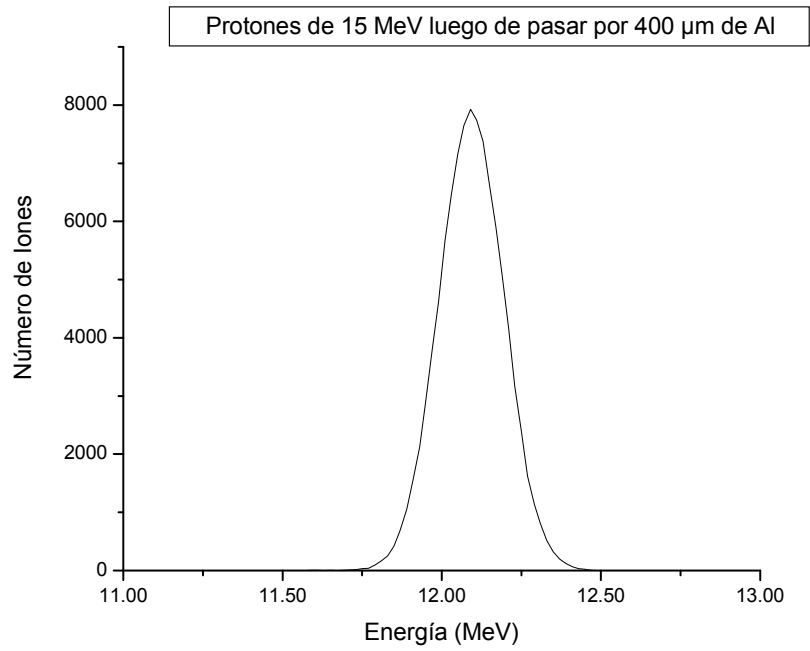


Figura 3.9. Distribución de energías de protones luego de atravesar una folia de 400 μm de aluminio. Se simuló con 100000 protones en incidencia normal

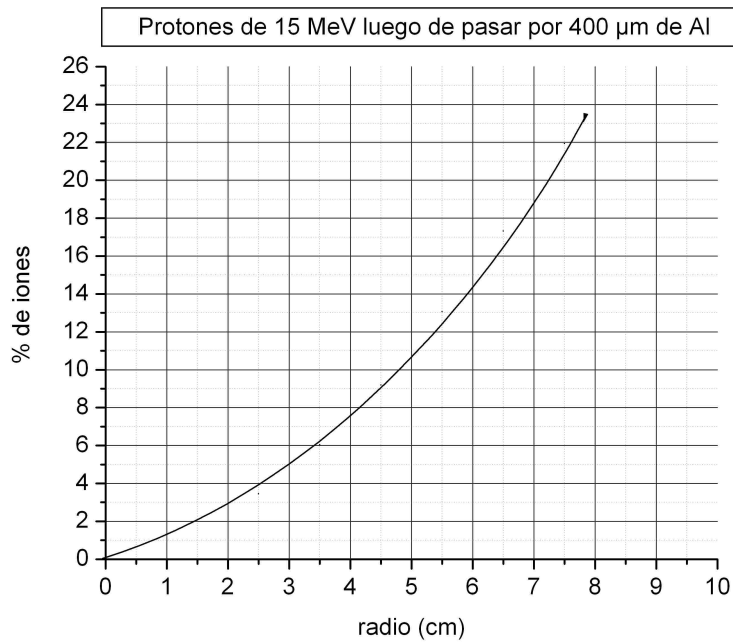


Figura 3.10. Se grafica el porcentaje de protones emergentes en función de su desviación de la trayectoria rectilínea del haz a una distancia de 5.45 metros de la folia. La curva indica valores acumulativos. Como ejemplo, el 20% de los protones emergentes se aparta de la trayectoria del haz una distancia igual o menor a 6.5 cm.

No todos los protones atraviesan las dos capas protectoras de vidrio y de silicona que llamaremos cobertura. En la tabla 3.2 se indica para cada espesor de folia simulado, el porcentaje de protones que atraviesan la cobertura. A los fines de comparación también se indica el porcentaje de protones que atraviesan los 100 μm de vidrio solamente. Como puede observarse, los protones de 15 MeV que atraviesan las folias de 1250 y 1270 μm pierden energía de modo tal que luego menos de un 0.67% de los incidentes originalmente atraviesan los 100 μm de vidrio. De modo análogo, de los protones de 15 MeV que atraviesan las folias de 1270 y 1250 μm , ninguno logra atravesar los 100 μm de vidrio más los 100 μm de silicona.

Espesor de Al [μm]	Energía del Pico Emergente [MeV]	Transmitidos a través de 100 μm de Vidrio [%]	Transmitidos a través de 100 μm de Vidrio + 100 μm de Silicona [%]
0	15	100	100
100	14.3	100	100
200	13.6	100	100
300	12.8	100	100
400	12.1	100	100
500	11.3	100	100
600	10.4	100	100
700	9.5	100	100
800	8.5	100	100
900	7.4	100	100
1000	6.15	100	100
1050	5.45	100	100
1100	4.7	100	100
1150	3.8	99.33	68.7
1200	2.75	59.2	1.24
1250	1.33	0.67	0
1270	0.8	0.02	0

Tabla 3.1. Porcentaje de protones de 15 MeV que luego de atravesar una folia de aluminio del espesor indicado en la primera columna, atraviesan la lámina de vidrio o la lámina más el pegamento de siliconas.

Como se puede observar, el espectro espacial de la figura 3.8 tiene mayores intensidades en las energías bajas. Para simular estas energías, hay que utilizar las láminas más gruesas que son las que más dispersan el haz. Tener un haz disperso significa perder una cantidad de protones que no llegan al portamuestras. Teniendo en cuenta estas consideraciones, no tiene sentido hacer irradiaciones intercalando las láminas de 1270 y 1250 μm , ya que insumiría muchísimo tiempo de irradiación porque solo un reducido número de protones alcanzarían a llegar hasta el portamuestras. Esto equivale a considerar los protones de más de 2.5 MeV para evaluar el daño, ya que los de menor energía no llegan a la celda. Por esta razón, las láminas de aluminio que

se utilizan en las simulaciones que siguen, son las de espesores hasta 1200 μm inclusive.

El cuarto paso en la simulación consistió en utilizar el TRIM con el blanco elegido considerando las dos distribuciones de haces de protones como entrada o haz incidente. Para ello se generaron los correspondientes archivos TRIM.DAT para ingresar al TRIM. La primera distribución corresponde al espectro espacial descrito por la ecuación 3.7, con energías que van desde 2.5 hasta 15 MeV y con ángulos polares de la trayectoria de ingreso escogidos al azar. Para el caso del espectro espacial se hizo un programa en Fortran 95 que utiliza la técnica de Monte Carlo para generar números aleatorios para la energía y los ángulos de incidencia asegurando que la incidencia sea isotrópica y el espectro sea el correspondiente a la ecuación 3.7.

La segunda distribución corresponde al espectro del degradador; la suma de picos de forma gaussiana, obtenida del modo descrito a continuación.

Para cada espesor de aluminio, se ingresó para el cálculo con TRIM con un haz monoenergético de 15 MeV. Para cada espesor de lámina se obtuvo un archivo de salida TRANSMIT.TXT que contiene, para cada protón simulado, la energía emergente, la posición x, y, z del punto de emergencia y los cosenos directores de la trayectoria de salida.

Por una cuestión de geometría de la facilidad experimental, los protones pasantes que llegan al portamuestras y nos interesan, son los que están incluidos dentro de un ángulo sólido de $0,8^\circ$ (ver sección 5.1 para una explicación de este número). Un programa, denominado Trim_in_filter.exe, escrito en Fortran 95 y que corre bajo Linux (Ref. 44), se utilizó para rescatar los protones que emergen dentro de este ángulo sólido, asignarles $x = y = z = 0$ para posicionarlos en el centro del haz y darles un ángulo de salida al azar alrededor de un eje vertical entre 0° y 90° . El ángulo al azar se obtuvo mediante un generador de números aleatorios que simula que la muestra gira alrededor de un eje vertical que pasa por la superficie de la muestra. Es decir que los protones que ingresan al blanco simulado lo hacen con una distribución al azar de ángulos. Juntando los 14 archivos obtenidos de esta manera se armó la segunda distribución de haces de protones combinando en un solo archivo mediante un programa Fortran 95 que estimaba, dada la dosis a utilizar, cuantos iones de cada folia debían aparecer en el espectro final. Este agregado de partes de archivos TRANSMIT.TXT procesados se denominó TRANSMIT.DAT y es el que se ingresó al TRIM como espectro del degradador.

Al correr el código TRIM con ambos archivos de entrada se verificó tanto que los espectros de PKA son similares, como que la dependencia del daño con la profundidad es la misma.

En la figura 3.11 se muestra el espectro de PKA's obtenido. Se grafica el número de colisiones que transmiten la energía indicada en función de la energía. La curva con círculos cruzados corresponde al blanco irradiado con el espectro espacial. La curva con cuadrados corresponde al blanco irradiado con el espectro formado por la suma de gaussianas. Ambas curvas presentan pendientes similares.

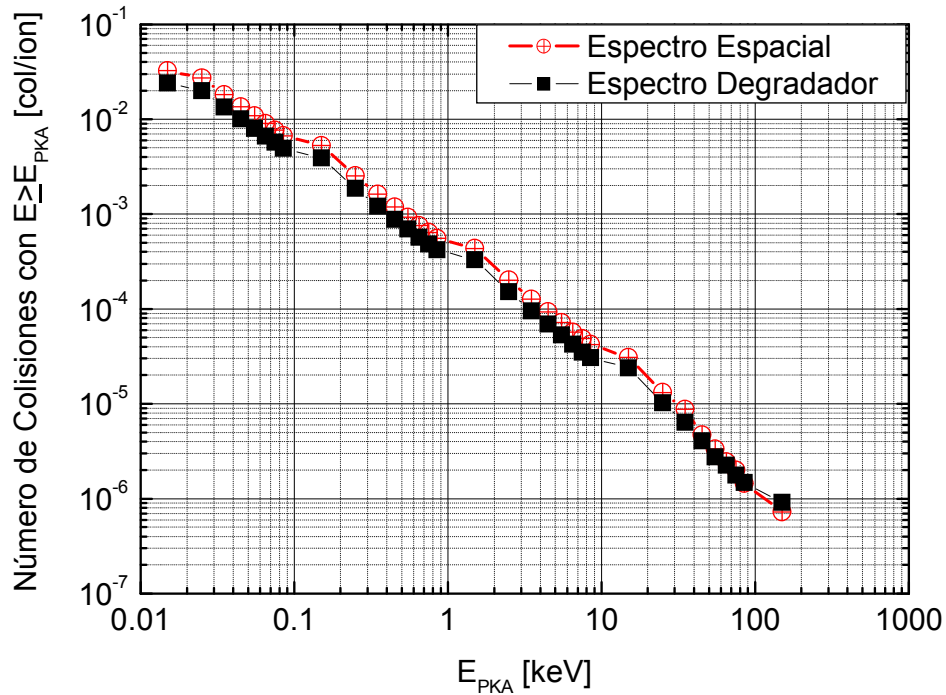


Figura 3.11. Se muestra el espectro de PKA's. Se grafica el número de colisiones que transmiten la energía indicada en función de la energía. La curva en círculos cruzados corresponde al blanco irradiado con el espectro espacial. La curva con cuadrados llenos corresponde al blanco irradiado con el espectro formado por la suma de gaussianas.

En la figura 3.12 se muestra el número de colisiones por ión que se produjo a la profundidad dada y donde se transfirió al menos la energía indicada para la curva respectiva. Se muestra la zona de interés fotovoltaico de $55 \mu\text{m}$ a partir de la superficie frontal de la celda de germanio. Cuando comparamos las pendientes de ambos grupos de curvas observamos que son similares, lo cual indica un patrón de comportamiento similar en cuanto al daño producido. Esto significa que ambas distribuciones de haces de protones podrían generar el mismo tipo de daño en los átomos de la estructura de la celda.

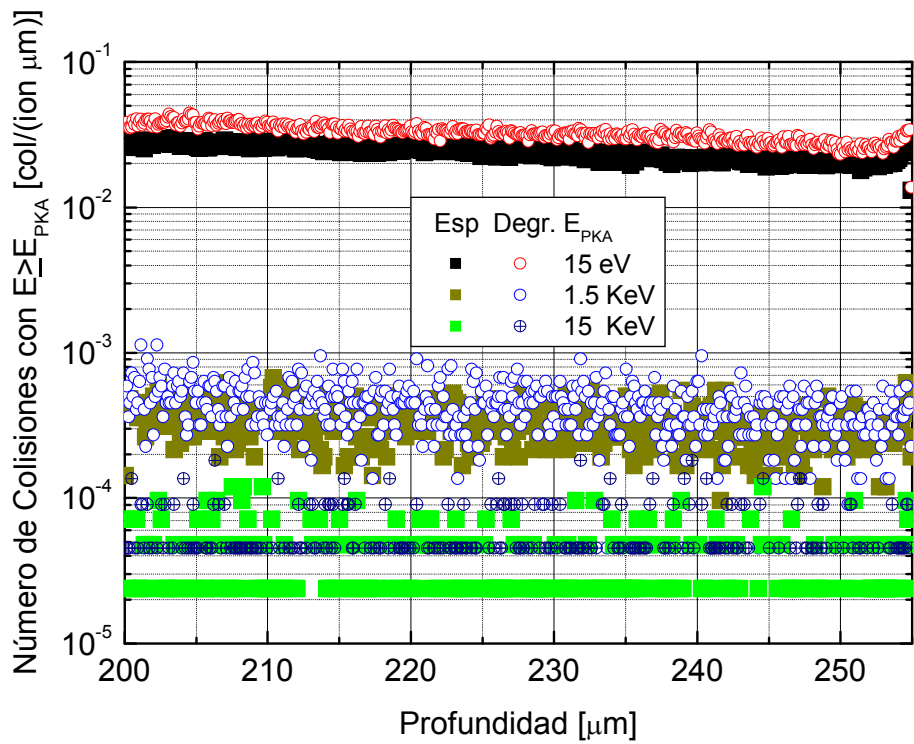


Figura 3.12: Se muestra el número de colisiones por ión que se produjo a la profundidad dada y donde se transfirió al menos la energía indicada para la curva respectiva. Los símbolos se presentan en el recuadro en el mismo orden en el que aparecen en la gráfica. Los símbolos llenos corresponden al espectro espacial y los huecos al espectro del degradador. Se muestra la zona de interés fotovoltaico de $55 \mu\text{m}$ a partir de la superficie frontal de la celda de germanio.

CAPÍTULO IV

4. Técnicas usadas en ensayos experimentales
 - 4.1. Generalidades, haces de partículas con y sin carga. Posibilidades de producir daño.
 - 4.2. Aceleradores de partículas
 - 4.2.1. Acelerador Van de Graaff (TANDAR). Descripción, línea experimental, óptica iónica, cámara, haces y energías alcanzables, trabajos para implementar la cámara EDRA.
 - 4.2.2. Degradación de energía. Su necesidad o conveniencia. Descripción del degradador construido. Problemas con la uniformidad de dosis. Jaula de Faraday múltiple. Sistema de adquisición de datos. Uniformidad de dosis.
 - 4.2.3. Barrido del haz. Sistema de visualización. Mediciones.
 - 4.2.4. Acelerador lineal de electrones del CAB (LINAC). Descripción, línea experimental, calibración de energía y fluencia.

4. Técnicas usadas en ensayos experimentales

En el presente capítulo se describen las técnicas y los equipos desarrollados y construidos para llevar a cabo las mediciones que se detallarán en el capítulo 5. Se describen en primer lugar los haces de partículas en general y los haces de protones en particular. Luego se describe el acelerador Van de Graaff (Tandar) y los trabajos llevados a cabo para la construcción de la cámara de irradiación y el acondicionamiento y modificaciones realizados en su línea de irradiación correspondiente. En tercer lugar, se describen los métodos empleados para modificar las características del haz, detectarlo y caracterizarlo. En cuarto lugar se describen los detalles experimentales y el tipo de mediciones realizadas en las celdas solares. Y en último término, se describe en una sección aparte lo concerniente al acelerador de electrones (Linac) y los detalles experimentales de las irradiaciones que utilizan electrones.

4.1. Generalidades, haces de partículas con y sin carga. Posibilidades de producir daño.

Dentro del marco del proyecto de desarrollo y construcción de los paneles solares de los satélites SAOCOM I y II y AQUARIUS/SAC-D, se están llevando a cabo mediciones que apuntan a caracterizar el daño que sufrirán los componentes más sensibles debido a la radiación espacial. De primordial importancia por su magnitud es el daño disperso y difuso producido por protones. En segundo lugar el daño disperso pero localizado producido por

electrones. Para simular el daño por protones utilizamos el acelerador TANDAR del CAC y para simular el daño por electrones, el acelerador LINAC del Centro Atómico Bariloche (CAB). En el Apéndice 2 se resumen los principales aspectos de la interacción de la radiación con la materia que están relacionados con el presente trabajo.

En esta sección se describirá el trabajo realizado para armar la infraestructura necesaria para realizar los ensayos y experimentos que utilizan radiaciones. En un trabajo anterior realizado en el laboratorio Tandar, se caracterizó la degradación de propiedades eléctricas de celdas fotovoltaicas de uso espacial como resultado de la irradiación de protones o electrones en el aire mediante un nuevo dispositivo portátil (Refs. 45 y 46). El dispositivo utilizado permite la medición in situ de la degradación de una misma celda para diferentes dosis de radiación acumuladas. Se utilizó una copa de Faraday con imanes permanentes como supresores para medir la fluencia de partículas irradiada. La misma se probó con haces de protones de 10 MeV y de electrones de 3 MeV. Este trabajo previo utilizó haces externos.

En el presente trabajo, continuando con esta línea de investigación y con el objeto de aproximar a las condiciones orbitales, se utilizó una cámara que permite emular el vacío, las variaciones de temperatura y la radiación que experimentan los componentes de vuelo, y poder validar y calificar componentes de diverso tipo. La cámara permite ensayar celdas solares, vidrios, pegamentos, dispositivos electrónicos y otros componentes de uso satelital que son susceptibles al daño por radiación. Se pueden irradiar muestras tanto con protones como con iones pesados de cualquier elemento, menos los gases nobles, a excepción del helio. En las siguientes secciones se describen los pasos llevados a cabo para la adaptación e instalación de una cámara de vacío especialmente dedicada a estos estudios.

4.2. Aceleradores de partículas

4.2.1. Acelerador tandem Van de Graaff (TANDAR). Descripción, línea experimental, óptica iónica, cámara, haces y energías alcanzables, trabajos para implementar la cámara EDRA.

La cámara está ubicada al final de una de las líneas de irradiación de un acelerador de iones. Este acelerador es del tipo tandem Van de Graaff con un voltaje de aceleración de diseño de hasta 20 MV¹. Debido a que la energía del ión depende tanto del voltaje de aceleración como de la carga eléctrica, el valor de 26 MeV se obtiene para un ión con carga unitaria y mayores energías pueden obtenerse para cargas iónicas mayores a uno. En la figura 4.1 se puede ver un corte del edificio mostrando el acelerador y en la figura 4.2 se pueden ver imágenes de una de las salas donde se alojan cuatro líneas de irradiación, de la columna de aceleración del imán deflector y de la sala de control del acelerador.

La máquina tiene una geometría vertical y el haz es deflectado a un plano horizontal por un imán de 90° rotatorio. La fuente de iones se encuentra en el tope de la máquina.

¹ Actualmente, Diciembre de 2007, se consiguen 13 MV

El haz de iones, y en particular el haz de protones, es esencialmente monoenergético luego de pasar por una ranura situada en el foco del imán deflector de 90° . El haz es enfocado y puede ser deflectado respecto al eje longitudinal de la línea. El enfoque se realiza con un triplete cuadrupolar magnético y las deflexiones con dos pares de dipolos magnéticos orientados a 90° entre sí.

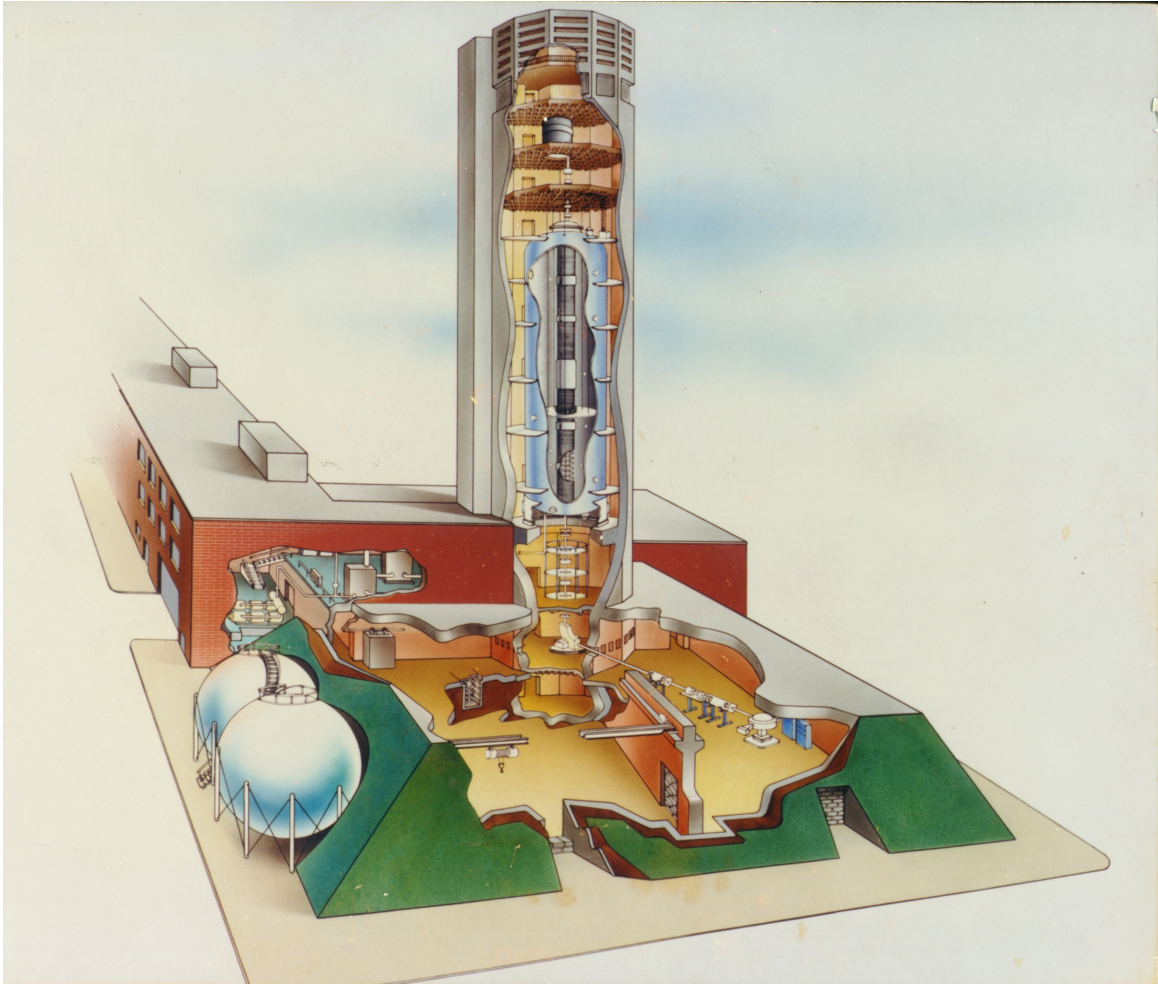


Figura 4.1. Vista en corte del edificio del acelerador TANDAR. En la torre está el acelerador propiamente dicho. En la base, a la derecha se ve una línea de irradiación. Las dos esferas del lado izquierdo son reservorios de una mezcla de gases que se utiliza como dieléctrico.

Línea experimental y cámara

La cámara de irradiación tiene forma de cilindro recto, con un diámetro mayor que su altura. El espacio libre interior cilíndrico mide 38 cm. de alto por 65 cm. de diámetro. Está construida íntegramente en acero inoxidable 304 y tiene una tapa superior removible. Con la ayuda de un pequeño puente grúa, se puede levantar y desplazar la tapa a un costado para liberar el espacio aéreo. La cámara tiene cinco bridas laterales de 15 cm. de diámetro. Las

bridas laterales no están soldadas a la pared de la cámara sino que están montadas sobre estructuras removibles, lo cual permite modificar la distribución de las mismas en cientos de combinaciones angulares posibles. Existe un programa que permite calcular la distribución de bridas más conveniente para una aplicación determinada. La cámara se alineó con la dirección del haz en la posición en que dos de esas bridas quedan alineadas con la dirección del eje óptico del haz del acelerador. El procedimiento de alineación se describirá brevemente más adelante. Esto permite colocar instrumental de medición en la posición de salida del haz. Las bridas laterales son tipo ISO de 15 cm. de diámetro cada una. La tapa removible tiene cinco bridas planas de 6 pulgadas de diámetro cada una y están distribuidas regularmente. La figura 4.3 muestra la cámara instalada al final de la línea de irradiación.



Figura 4.2. Vista de la sala que aloja cuatro la líneas de irradiación, de la columna de aceleración, del imán deflector y de la sala de control del acelerador. En la primera fotografía se ven tres líneas de irradiación. La línea utilizada es la última de la izquierda.

La cámara tiene en su base del lado interior un sistema de tres anillos concéntricos rotatorios. Los anillos pueden girar en el plano basal respecto al centro de la cámara y pueden rotarse desde el exterior independientemente unos de otros. En el centro hay una plataforma con forma de disco de unos

cinco centímetros de diámetro. Esta plataforma es apropiada para colocar el portamuestras, ya que es movable en rotación y altura.

Los anillos tienen cremalleras que permiten girarlos accionándolos mediante engranajes. Estos engranajes a su vez están conectados a través de pasantes rotatorios para vacío a engranajes externos. Se pueden girar los tres anillos en forma independiente. Los engranajes externos pueden accionarse mecánicamente o manualmente. Por ahora se está utilizando este último método para girar los anillos concéntricos y mover lo que se encuentra en el interior de la cámara sin romper el vacío.

Se han construido tapas que contienen pasantes eléctricos, pasantes de nitrógeno líquido y que permiten instalar medidores de vacío, un visor y una tapa transparente de vidrio borosilicato para poder iluminar el interior con el simulador de iluminación solar.



Fig. 4.3. Imágen de la cámara de vacío de 76 cm. de diámetro montada en una línea del acelerador TANDAR. A la izquierda de la cámara se ven dos válvulas plato, una te que conecta la bomba turbomolecular y uno de los tableros eléctricos.

Sistema de vacío

El acelerador se maneja con distintos niveles de vacío según la zona. La fuente de iones opera a 10^{-7} mbar, la línea por la que baja y se acelera el haz opera a $10^{-8} - 10^{-9}$ mbar, el stripper a 10^{-8} mbar y el imán deflector con su tramo de línea móvil a 10^{-7} mbar.

La línea que lleva el haz a la cámara tiene varios niveles de vacío según el sector de que se trate. En la zona del cuadrupolo magnético y los deflectores magnéticos, el vacío de la línea es de 10^{-7} mbar. La cámara propiamente dicha opera a 10^{-6} mbar.

Se realizaron las siguientes tareas referidas al sistema de vacío:

- Acondicionamiento de la cámara y de sus componentes.

- Diseño y construcción de bridas para conectar mangueras para bombas de vacío y medidores de vacío.
- Reparación de bomba iónica y re-acondicionamiento de su correspondiente fuente de alta tensión y conectores asociados

Trabajos realizados para implementar la cámara EDRA

Se ha realizado el diseño, construcción, ensayo, montaje y puesta en funcionamiento de un gran número de componentes de vacío, tales como tapas, cierres, mordazas, tuberías, adaptadores, soportes, etc. Algunas de estas tareas se detallan a continuación

CABEZALES DE VACIO COMPRADOS Y ADAPTADOS A LA CAMARA

Se han adquirido dos cabezales de vacío marca BOC Edwards modelo Active WRG de rango extendido, capaces de medir presiones entre una atmósfera y 10^{-9} mbares. Los cabezales entregan una señal de voltaje continua en el rango de 10 a 0 Volts que es proporcional al nivel de vacío según una curva muy aproximadamente lineal provista por el fabricante. Para adaptar los diámetros de las bridas ISO de los cabezales a los diámetros de las entradas de ambas cámaras, se han fabricado adaptadores adecuados.

UNIDAD DE ALIMENTACIÓN Y MEDICIÓN DE VACÍO CONSTRUIDA Y PUESTA EN OPERACIÓN

Para los cabezales se utilizó una fuente de alimentación estabilizada de 24 Volts que tiene incorporado un voltímetro analógico de 10 Volts de fondo de escala que fue graduado para leer directamente el valor de presión.

INSTALACIÓN DE VÁLVULA COMPUERTA DE 4"

Reparación y reciclado de válvula plato de accionamiento neumático que sirve para dividir la línea de irradiación en dos partes. Esta válvula permite aislar el vacío de la zona de óptica iónica respecto al de la zona final de la línea y la cámara de irradiación. Se eliminaron las pérdidas de vacío y se reacondicionó el sistema de accionamiento neumático.

SOPORTE DE POSICIÓN REGULABLE PARA BOMBA TURBO

Se adquirió e instaló una bomba de vacío turbomolecular marca Varian modelo TV551 NAVIGATOR. Se diseñó y construyó un sistema de soporte adecuado para esta bomba de vacío y para las válvulas plato asociadas a la misma.

INSTALACIÓN DE NUEVA BOMBA IÓNICA

Se adquirió e instaló una nueva bomba iónica marca Varian modelo STAR CELL con una velocidad de bombeo de 40 l/h. Para conectarla a la línea de irradiación se construyó una te de reducción y un soporte para fijarla en la posición adecuada. Se reparó también una bomba iónica existente en la línea. Las bombas iónicas permiten medir el vacío en la línea, ya que la corriente de fuga entre los electrodos es proporcional a la presión.

OBTENCIÓN DEL VACÍO NECESARIO PARA OPERACIÓN

Se realizaron sucesivas pruebas de vacío para detectar y localizar pérdidas y fugas. Se obtuvo un vacío de 10^{-2} mbar con una bomba mecánica

marca Leybold-Heraeus modelo TRIVAC D65B, de 65 litro/hora y luego se conectó la bomba turbomolecular Varian, de 350 l/seg., con lo cual se alcanzó un vacío en el rango de 10^{-4} mbar, en un tiempo total de 1 hora aproximadamente. Se utilizó un detector de pérdidas marca Leybold-Heraeus modelo ULTRATEST M que utiliza helio gaseoso. Se repararon las fugas encontradas y luego se obtuvo un vacío de 10^{-6} mbar en la cámara y de 10^{-7} mbar en la primera parte de la línea de irradiación. Con este nivel de vacío, se está en condiciones de recibir el haz del acelerador.

REPARACIÓN DE BOMBA DE SUBLIMACIÓN DE TITANIO EXISTENTE

Se reacondicionó una bomba de sublimación de titanio existente a la cual se le reemplazaron los cabezales de titanio.

Óptica iónica y alineación

Se realizó la evaluación e implementación de la mejor distribución posible de componentes dentro de la línea de irradiación. Los componentes considerados fueron entre otros, el medidor de perfil de haz (beam profile monitor), el degradador del haz de protones (ver sección 4.2.2.), la copa de Faraday, las bridas para conectar bombas y medidores de vacío, las bridas de entrada/salida de información y demás componentes del sistema. Luego de ubicar los componentes en la secuencia elegida, se realizó la alineación óptica y el ensamblado de todos los componentes para cerrar la línea. En la figura 4.4 se muestran en forma esquemática los componentes principales de la línea de irradiación.

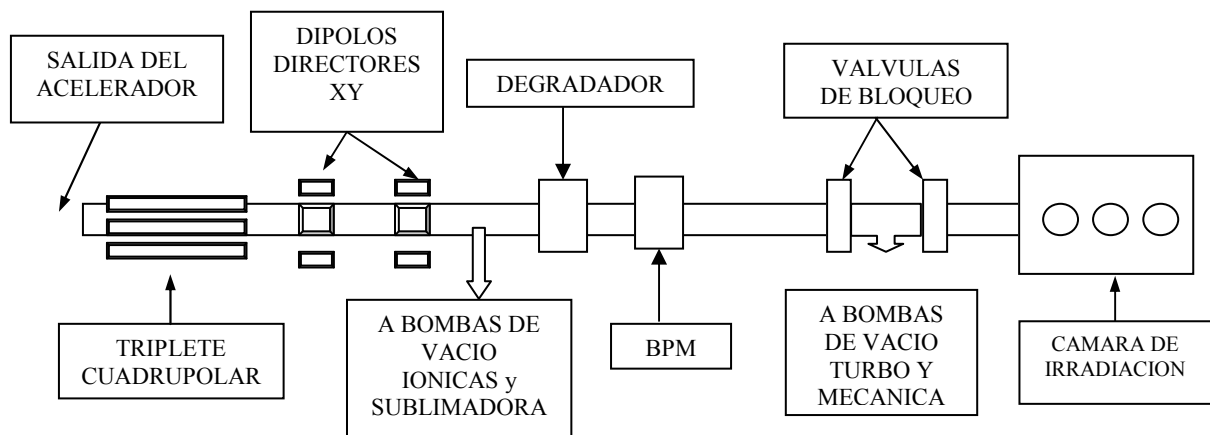


Fig. 4.4. Esquema simplificado de la línea de irradiación. Se indican los elementos más importantes para obtención de vacío y adecuación del haz. BPM = Beam Profile Monitor o Medidor de Perfil de Haz.

ALINEACIÓN DE LA LÍNEA DE IRRADIACIÓN

Tanto la cámara como la línea de irradiación deben estar alineadas con el eje óptico del haz para asegurar una buena transmisión. Para lograr esto, cada elemento constitutivo de la línea está montado sobre soportes que permiten mover en las tres direcciones espaciales cada elemento específico y fijarlo sólidamente. Las bridas están sostenidas por soportes que tienen cuatro pernos regulables que permiten mover la brida en el plano x-y

perpendicular a la dirección del haz y estos soportes a su vez están montados sobre armazones movibles y ajustables que permiten la fijación al soporte estructural de toda la línea. De este modo, las tuberías, las bridas de unión, las válvulas, los detectores, el medidor de perfil de haz y la entrada a la cámara de irradiación se alinearon utilizando un nivel óptico marca Wild modelo N3 con una precisión mejor que un minuto de grado sexagesimal. Primero se nivela y alinea el nivel óptico enfocándolo en la parte trasera del imán deflector, donde existe una referencia de nivel. Cada elemento individual que se va encontrando en el camino hacia la cámara se va alineando y se lo fija firmemente a la estructura de soporte de la línea. El error en la alineación obtenida para cada componente fue menor a ± 1 mm. Cuando se envió el haz de protones por primera vez se comprobó que la alineación era correcta, ya que el haz impactaba en el centro de la pantalla fosforescente ubicada en el interior de la cámara dentro de un margen de error de ± 2 mm.

ALINEACIÓN DE LA CÁMARA

Utilizando el nivel óptico mencionado en el punto anterior, la brida de entrada a la cámara fue alineada y nivelada con la brida de salida del imán deflector y con la brida trasera de referencia del imán. La cámara tiene un sistema de seis soportes con regulación vertical que permiten ubicar el plano basal en posición horizontal. Luego la cámara puede girar sobre su eje central vertical y a su vez puede desplazarse como un todo en el plano basal unos pocos milímetros en todas direcciones. Con la combinación de estos tres grupos de movimientos y la ayuda de un nivel de burbuja de precisión, se niveló y alineó la cámara con una precisión de ± 1 mm. En las bridas se colocaron dispositivos centradores que permiten localizar el centro de la brida con el nivel óptico. Se tomó como aceptable la alineación dentro de la precisión mencionada.

PUESTA EN OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS ÓPTICOS DE TRANSPORTE

La línea tiene un medidor de perfil de haz (Beam Profile Monitor o BPM) que muestra la distribución de corriente del haz que lo atraviesa. El perfil del haz se visualiza en la consola del acelerador. También se establecieron los valores de corriente necesarios en los deflectores magnéticos y en el triplete cuadrupolar de enfoque.

Mediante los componentes de óptica iónica, el haz de iones, y en particular el haz de protones, experimenta una serie de enfoques y desenfoces a lo largo de la línea de irradiación. Con este procedimiento se trata de lograr al final de la línea de irradiación, un haz con las condiciones siguientes:

- haz de sección transversal extensa, relativamente uniforme para medición de blancos grandes (del orden de 10×10 cm.)
- haz de gran uniformidad a ser obtenido mediante enfoque sobre el plano de la muestra y posterior barrido transversal X-Y por medios magnéticos.

La figura 4.5 muestra un esquema simplificado de los elementos de la óptica iónica de la línea de irradiación.

Adquisición de datos

Se diseñaron y construyeron tapas para alojar conectores de entrada y salida de señales eléctricas y electrónicas. Se construyeron tapas para pasantes multipines DB25. Los pasantes son removibles. En total se dispone de 75 pines de contacto y 3 conectores BNC. Se construyó un sistema de adquisición de datos que se explicará en la sección 4.2.2.

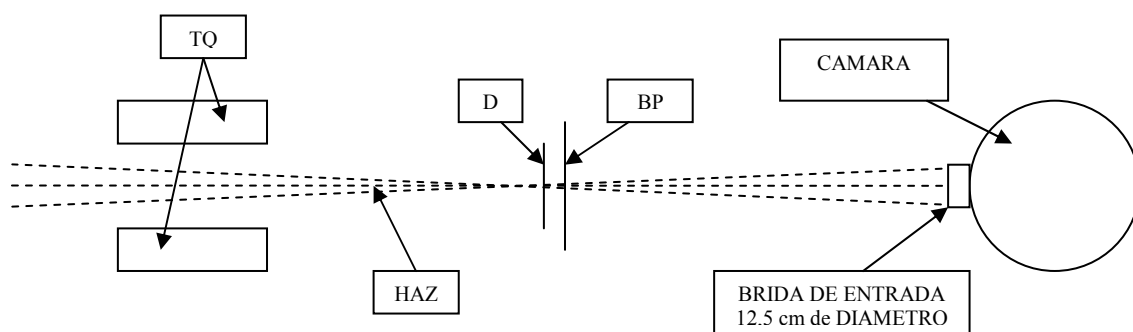


Figura 4.5. Esquema simplificado de la óptica iónica. El triplete cuadrupolar TQ produce un foco primario en la zona del BPM – Degradador D. A continuación las trayectorias se abren en un ángulo de 0,82 grados ocupando la apertura de la brida de entrada de la cámara.

4.2.2. Degradación de energía. Su necesidad o conveniencia. Descripción del degradador construido. Problemas con la uniformidad de dosis. Jaula de Faraday múltiple. Sistema de adquisición de datos. Uniformidad de dosis.

Para realizar los estudios de daño por radiación es necesario irradiar las muestras de una manera homogénea. Esto es necesario para asegurar una reproducción lo más fidedigna posible de la condición espacial, que consiste en una irradiación isotrópica, homogénea y con un espectro continuo de energías (Ref. 16). Para ello se desarrolló una metodología de homogenización del flujo y variación de la energía del haz que se describe a continuación. En la sección 3.5.2 se describieron las simulaciones realizadas para diseñar este degradador. Aquí se describirá el modo en que se lo implementó en la cámara de irradiación.

Dado que para celdas solares el daño más importante en una órbita LEO es causado por protones en órbita, nos concentramos en simular su efecto. El acelerador provee haces de protones monoenergéticos, pero necesitamos simular el espectro continuo del espacio exterior (ver figura 3.1.3).

La forma normal de cambiar la energía del haz de protones es variando el voltaje del acelerador. Sin embargo, este método es relativamente lento y requiere tiempo para estabilizar los parámetros de control del haz. Por esta razón, para poder modificar fácilmente la energía del haz, se desarrolló un dispositivo basado en la degradación de la energía que se produce al pasar por un material. Este método permite dispersar el haz y aproximar a la condición de homogeneidad mencionada anteriormente. El degradador de energía del haz cumple una doble función. Por un lado reduce la energía de los protones y por otro lado convierte un haz puntual y concentrado en uno disperso y relativamente homogéneo.

Si bien el haz es monoenergético, como se mencionó en el capítulo 3, se puede modificar su energía haciéndolo pasar por una lámina de modo tal que los protones, al colisionar con los electrones de los átomos de la estructura, van perdiendo energía y al colisionar con los núcleos se desvían de su trayectoria y de ese modo se dispersa el haz. Para llevar a la práctica este mecanismo de modo eficiente, se ha diseñado y construido un disco degradador que contiene láminas de aluminio de diversos espesores y que está situado cerca del último punto de enfoque, donde el haz de protones reduce su diámetro a unos pocos milímetros. El degradador está formado por un disco de 25 cm. de diámetro, con 16 perforaciones de 2,5 cm de diámetro cada una distribuidas regularmente en su periferia. El disco está contenido en una caja prismática de acero inoxidable. La caja tiene una tapa removible con una ventana de Lucite para ver el interior. En la figura 4.6 se muestra un esquema del dispositivo degradador.

Se escogió el aluminio para las láminas porque no se activa con vidas medias largas con los protones de energías de 15 MeV y al mismo tiempo es fácilmente laminable en láminas de algunos μm . Tanto el disco como las láminas y las arandelas de soporte están construidas en aluminio. Las láminas se laminaron en frío y el espesor se midió con micrómetro hasta obtener el valor apropiado. Con este método de laminado se logró una precisión de $\pm 5 \mu\text{m}$, tomando tres mediciones por lámina. El disco puede rotar accionado desde el exterior para intercalar de ese modo la lámina apropiada en la trayectoria del haz. Se puede seleccionar la lámina manualmente con una llave selectora de 16 posiciones y controlar el tiempo de haz desde la consola del acelerador. De este modo se controla la dosis total obtenida. El sistema puede ser fácilmente motorizado para control remoto. Uno de los orificios se deja sin lámina para permitir el paso del haz sin ser perturbado.

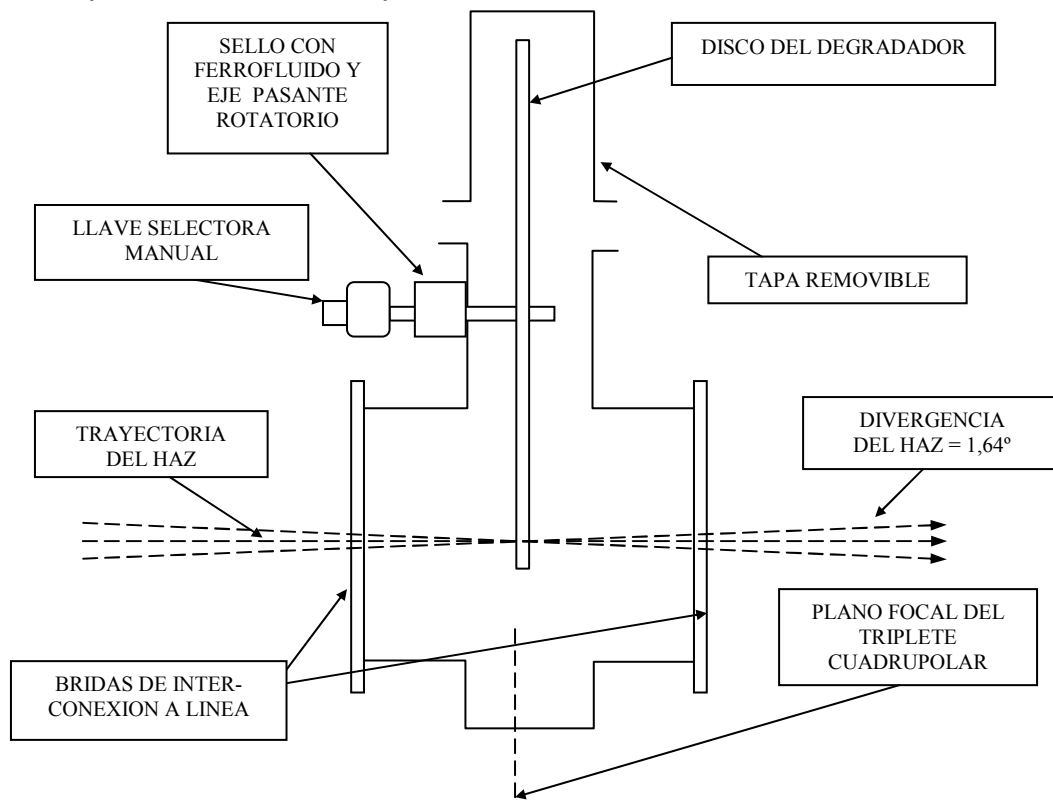


Fig. 4.6. Esquema del dispositivo degradador del haz de protones en una vista lateral.

La figura 4.7 muestra la manera en que se sujetan las láminas en la periferia del disco del degradador. En la figura 4.8 se muestra una imagen del dispositivo degradador instalado en la línea y en la figura 4.9 un detalle del disco degradador.

En la sección 5.2.1. se describen los experimentos realizados para validar esta técnica y los resultados que se obtuvieron.

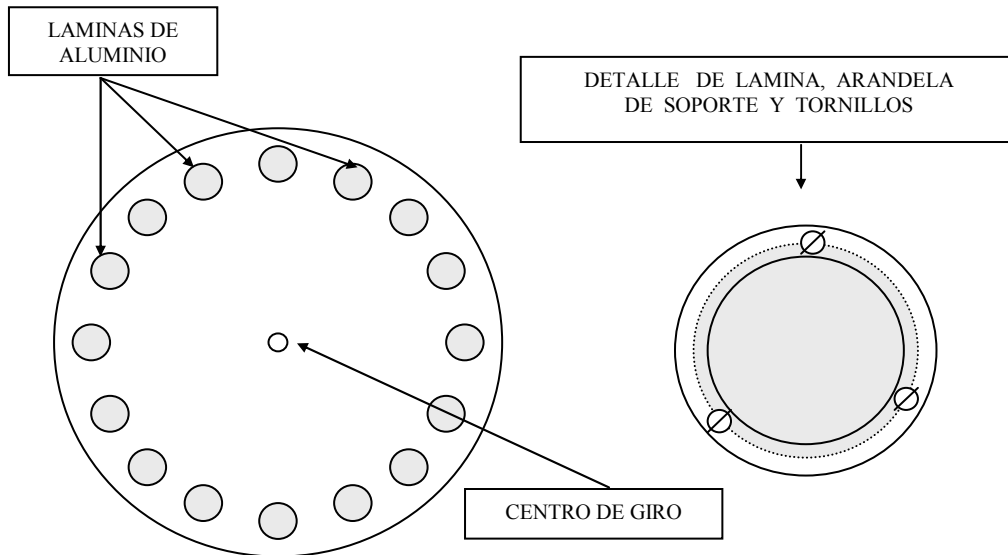


Figura 4.7. Detalle del disco del degradador y del sistema de sujeción de las respectivas láminas

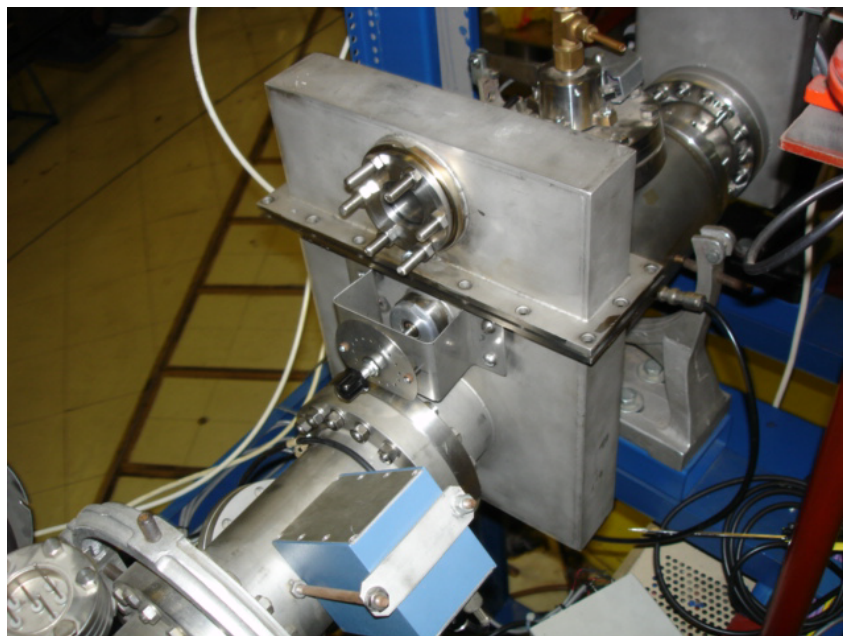


Figura 4.8. Vista exterior del degradador. La tapa superior es removible y en su parte central tiene una ventana de visualización. En la parte inferior una perilla permite girar el disco de aluminio y ubicarlo en 16 posiciones diferentes.

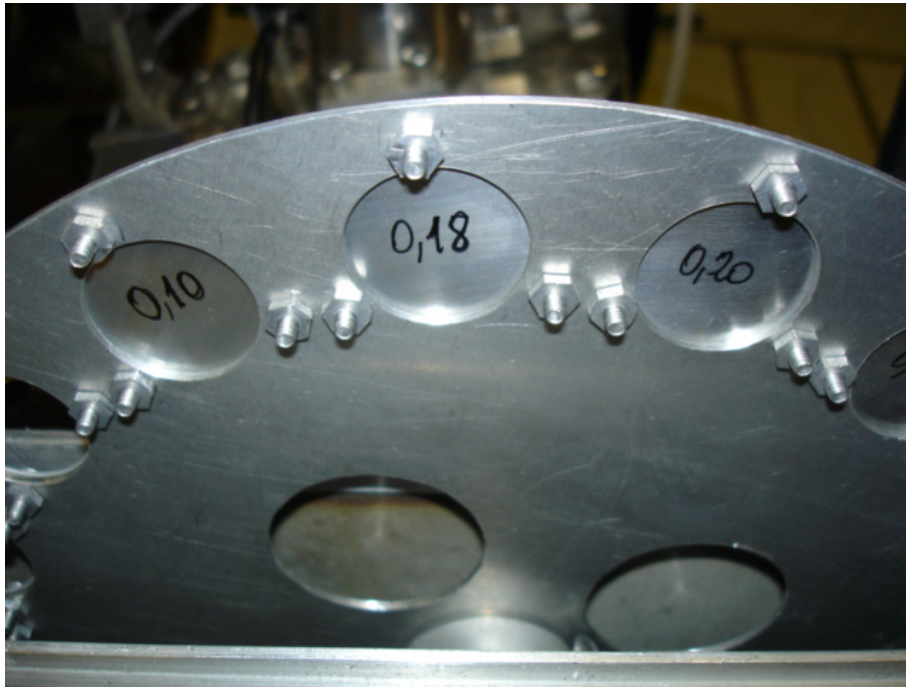


Figura 4.9. Detalle del disco degradador, de las láminas y de los correspondientes tornillos de sujeción también de aluminio.

4.2.3. Barrido del haz y medición de fluencia. Sistema de visualización. Disposición experimental

Barrido del haz y medición de fluencia

Como se mencionó en la sección 4.2.2., para realizar los estudios de daño por radiación es necesario irradiar las muestras de una manera homogénea. En este trabajo se han empleado dos métodos para lograr homogeneidad. El primero consiste en degradar el haz, como se mencionó anteriormente. El segundo método consiste en obtener un haz concentrado y realizar un barrido x-y del mismo sobre el blanco.

Para llevar a cabo esto, se empleó uno de los dipolos directores XY (el más cercano a la cámara en la figura 4.4). Cada dipolo director posee dos bobinas y en la consola del acelerador hay una fuente de tensión y corriente variables con la que se puede modificar la corriente de cada bobina tanto manualmente como automáticamente. Para este último caso hay que aplicar a una de las entradas de la fuente una señal de baja tensión de un generador de funciones de onda con la forma de onda que se desea aplicar a las bobinas.

El procedimiento consistió entonces en aplicar una señal eléctrica de forma de triángulo en los dos pares de bobinas del dipolo XY simultáneamente. Si los valores de frecuencias de barrido son no congruentes entre si, lo que se obtiene son figuras tipo de Lissajous que no son repetitivas. Es decir, que la trayectoria del haz no pasa siempre por el mismo punto y de este modo se barre toda la superficie de la muestra de forma homogénea (Ref. 47).

Para poder caracterizar el daño que se produce en las muestras irradiadas, es necesario conocer la energía y la dosis de las partículas empleadas. El valor de la energía de las partículas o protones lo da el potencial de aceleración del Tandem, y este valor se lee desde la consola. Para conocer la dosis que reciben las muestras durante la irradiación hay que obtener el valor de fluencia, que indica cuántas partículas por centímetro cuadrado han

impactado en la muestra durante la irradiación de la misma. Este valor se puede conocer midiendo la corriente de haz. A continuación se describirá la metodología empleada para medir la corriente.

El acelerador tiene copas de Faraday colocadas a lo largo de la columna de aceleración. Estas copas son intercalables, se controlan desde la consola y están conectadas a electrómetros marca Keithley modelo 610CR que permiten medir la corriente que está ingresando a la línea de irradiación. Sin embargo, existen pérdidas a lo largo del camino y es necesario conocer la corriente que efectivamente llega a la muestra. Para esto se desarrolló una copa de Faraday múltiple (Ref. 48). Esta consiste en un arreglo de 9 tubos de aluminio de 10 cm. de largo y 2 cm. de diámetro ubicados en tres filas de tres, y colocados en posición horizontal sobre una placa de aluminio con 9 orificios de 2cm de diámetro. Delante de esta estructura hay una placa metálica con 9 orificios de 1cm. de diámetro ubicados de manera correspondiente. Esta es la placa supresora, que está a un potencial de -1000 V. En la figura 4.10 se ve una vista de la jaula de Faraday colocada detrás de una pantalla fluorescente.

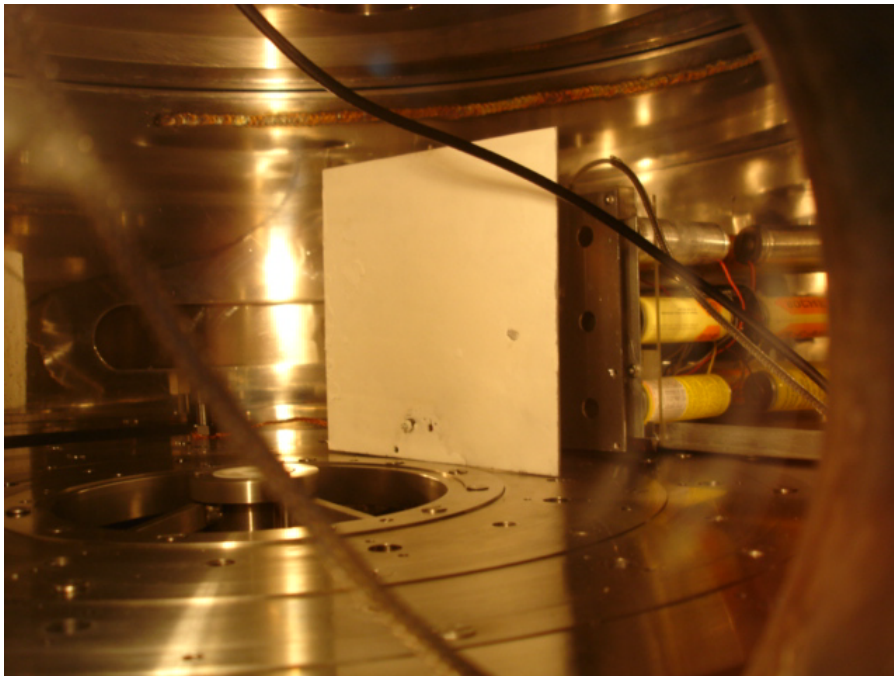


Figura 4.10. Vista del interior de la cámara de irradiación con la pantalla fluorescente montada sobre uno de los anillos concéntricos. Detrás de esta se observa la copa de Faraday múltiple, de la que se puede observar una columna de tres tubos. Cuando se gira 90 grados el anillo en un sentido, se intercala en la trayectoria del haz (dirección z) la pantalla fluorescente. Cuando se lo vuelve a girar 90 grados en otro sentido, queda liberada la trayectoria del haz, que impacta sobre la copa de Faraday múltiple y se puede de este modo medir la distribución de la corriente de haz en el plano xy.

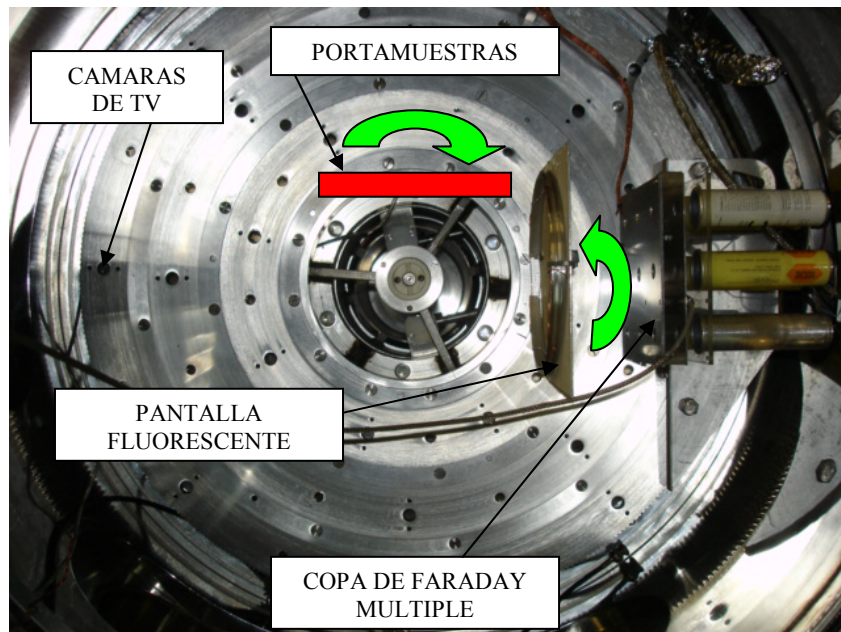


Figura 4.11. Vista superior de la cámara de irradiación, con el portamuestras ubicado en el mismo anillo que la pantalla fluorescente. A la derecha se observa la copa de Faraday múltiple, detrás de la pantalla fluorescente. Cuando se gira 90 grados el anillo en un sentido, se intercala en la trayectoria del haz la pantalla fluorescente. Cuando se lo vuelve a girar 90 grados en otro sentido, se intercala el portamuestras.

En la base de cada uno de los 9 cilindros hay un conector que colecta la corriente que ingresa por cada tubo. Esta corriente se mide con un electrómetro digital marca Keithley modelo 6517A con capacidad para medir corrientes de pA. El electrómetro está ubicado fuera de la cámara y un sistema multiplexor con registro en computadora desarrollado por Christian Nigri permite visualizar las nueve corrientes remotamente desde la consola (Ref. 48). En la figura 4.12 se puede ver un esquema, tomado del informe mencionado en la referencia nombrada, que muestra los elementos básicos del sistema de barrido del haz y de la medición de corriente en la copa de Faraday múltiple con un sistema de adquisición de datos remoto.

Sistema de visualización

Para poder observar lo que ocurre dentro de la cámara sin tener que abrirla ni romper el vacío, se ha construido un visor y se ha colocado una cámara CCD con visor remoto.

Para poder caracterizar dispositivos fotovoltaicos, optoelectrónicos, sensores, etc mientras se los ilumina con luz visible, UV o infrarroja proveniente de un simulador solar o de otra fuente luminosa instalada fuera de la cámara, se ha construido una tapa especial para soportar un disco de vidrio borosilicato BOROFLOAT™ transparente desde 350 nm hasta 2.000 nm (Ref. 49).

Para poder visualizar la posición del haz, se empleó una pantalla fluorescente que al recibir el impacto de los protones, se torna luminosa. Está formada por una placa cuadrada de aluminio sobre la cual se depositó una capa de pigmento puro fosforescente, de color natural amarillo claro, que al brillar en ausencia de luz tiene un color amarillo verdoso (Ref. 50). Esta placa se montó sobre uno de los anillos concéntricos de la cámara, como se puede ver en las figuras 4.10 y 4.11, de modo de poder ubicarla en el camino del haz

para visualizarlo y luego retirarla para irradiar la muestra. Se detalla a continuación la disposición experimental utilizada.

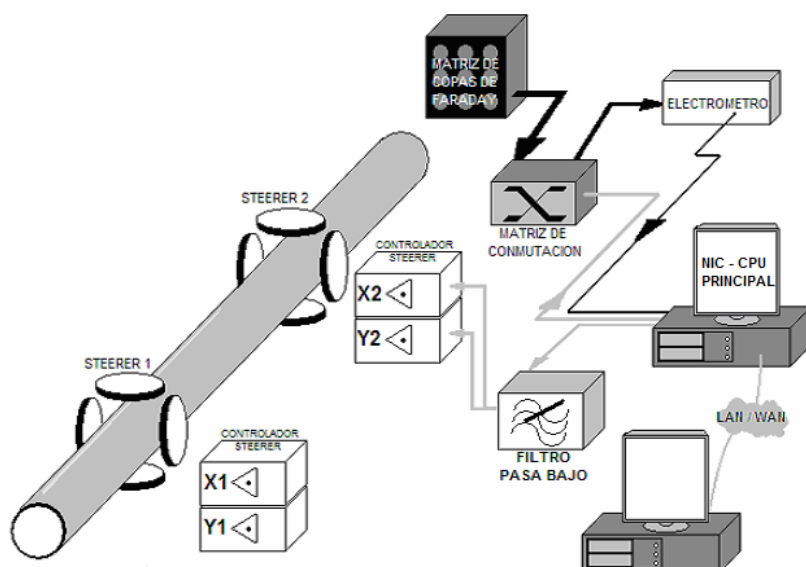


Figura 4.12. Esquema que muestra los elementos básicos del sistema control de barrido del haz y de la medición de corriente en la copa de Faraday múltiple. Dos señales de barrido de diferente frecuencia se generan por software y se envían, luego de pasar por un filtro pasabajos, a las entradas auxiliares del controlador de los dipolos directores. Las 9 señales de corriente (también se puede medir carga) son conmutadas por una matriz electrónica y medidas con el electrómetro, que envía la medición en formato digital a la computadora de control. A través de una línea de conexión, se controla la CPU principal desde una computadora remota ubicada en la sala de control (Ref. 48).

TAPA CON VISOR TRANSPARENTE

Se construyó una tapa con Plexiglass (nombre comercial del polimetil metacrilato (PMMA)) que funciona como visor óptico. La tapa apoya una de sus caras sobre un O'ring colocado sobre una de las bridas laterales ISO de 6 pulgadas de la cámara de irradiación. El interior de la cámara puede observarse mediante iluminación interna.

CAMARA CCD PARA VISUALIZACIÓN DEL PORTAMUESTRAS

Con el objeto de poder visualizar el interior de la cámara durante la irradiación, se ha colocado una cámara CCD tipo webcam en el interior de la misma. A través de pasantes eléctricos se envía la señal a una computadora ubicada cerca de la cámara. Las imágenes se leen de la cámara con el programa AmCap y se transmiten vía internet usando el programa VNC viewer. De este modo es posible observar remotamente la cámara desde la sala de control. Al principio, se colocó la cámara sin ninguna cubierta y si bien funcionaba, frecuentemente se interrumpía la transmisión de las imágenes. Luego se blindó la cámara web para protegerla de los impactos de partículas colocándola dentro de una caja de aluminio con una ventana de vidrio frente a la lente. De este modo las interrupciones desaparecieron. Posteriormente se reemplazó esta cámara por dos cámaras; una color y otra blanco y negro (b/n)

con detección en el infrarrojo y lente de enfoque. La primera permite tener una visión global del interior de la cámara de irradiación y la segunda se enfoca directamente sobre la zona donde se ubica el portamuestras. La cámara web permitía la observación pero cuando la imagen era móvil el sistema de transmisión resultaba muy lento e incómodo para el ajuste. Las cámaras color y b/n producen señal de TV norma NTSC de velocidad suficientemente elevada para la observación de las imágenes móviles de los experimentos realizados.

Disposición experimental

Para irradiar las celdas solares ATJ Emcore se emplean dos tipos de montaje.

El primer tipo de montaje es flotante y consiste en colocar la celda sobre un portamuestras formado por un marco de Pertinax que aloja los terminales de contacto al sistema de medición. El marco tiene un hueco central, de forma rectangular y de tamaño ligeramente mayor que la celda. La celda está sostenida por sus contactos eléctricos y de este modo permanece suspendida del marco y posicionada en la trayectoria del haz de protones. La ventaja de este tipo de montaje es que se puede colocar sobre uno de los anillos rotatorios concéntricos de la cámara y de este modo posicionarlo en la trayectoria del haz o fuera de esta, como se muestra en la figura 4.10. Su desventaja es que no se puede controlar la temperatura de la muestra, especialmente durante irradiaciones bajo condiciones de iluminación con el simulador solar.

El segundo tipo de montaje utiliza un portamuestras fijo colocado directamente en la posición de irradiación. La ventaja de este segundo portamuestras es que permite, al mismo tiempo que se irradia tener la temperatura de la muestra controlada entre $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$. La figura 4.13 es una vista de este portamuestras. Tiene un sistema de calentamiento por resistencia eléctrica y un serpentín de tubo de cobre que permite enfriar por circulación de nitrógeno líquido. La muestra se fija con dos mordazas de aluminio provistas de un sistema de ajuste rápido. Este sistema de ajuste permite sacar fácilmente la muestra cuando se encuentra activada (típicamente con más de $200\text{ }\mu\text{Sv/h}$) luego de la irradiación. La celda solar se pega con una cinta de Kapton de uso espacial, adherente en ambas caras, sobre una placa de aluminio. Sobre esta cinta se colocan los terminales de medición, que son conectores de uso espacial (en la sección 2.3 se describen estos conectores). Esta placa es la que se coloca sobre el portamuestras descrito, ajustándola con las dos mordazas. Para medir las características eléctricas de la celda, se sueldan a los terminales de contacto cuatro cables, dos en el terminal superior y dos en el terminal inferior. Esto permite medir a cuatro puntas simultáneamente la tensión y la corriente en la celda.

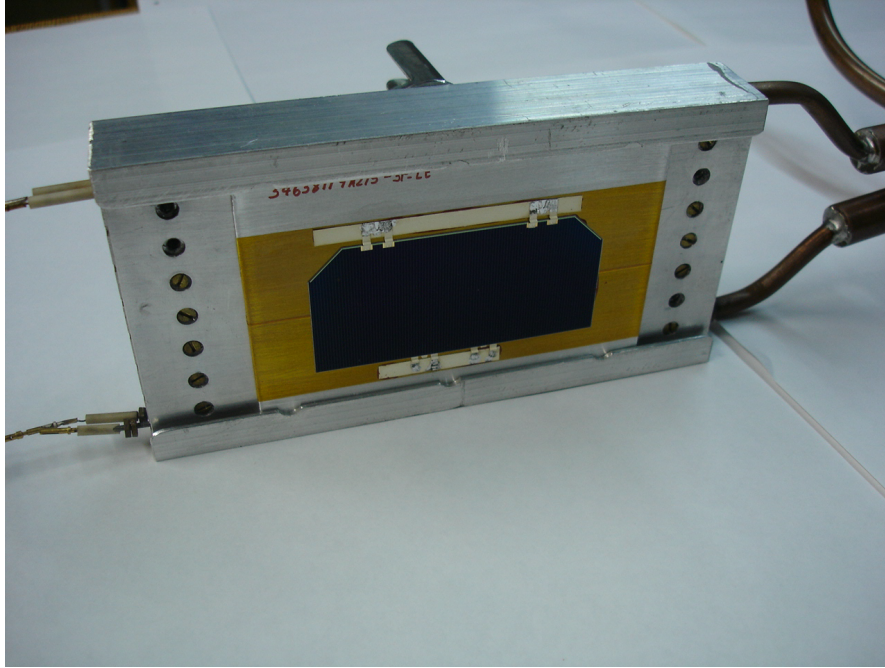


Figura 4.13. Vista frontal del portamuestras de la cámara de irradiación. Hay una celda pegada con cinta Kapton sobre placa de aluminio y con sus correspondientes terminales. No se muestran en esta figura los cuatro cables, dos en el terminal superior y dos en el terminal inferior. Se puede ver en la parte superior de la imagen, la manija del ajuste rápido de la mordaza superior.

El método experimental consiste en obtener la curva característica de la celda ATJ, con los parámetros más importantes: corriente de cortocircuito, voltaje a circuito abierto y potencia máxima entregada. Esto se hace para la misma celda antes y después de la irradiación en las mismas condiciones de iluminación y de carga. Un sistema de adquisición automático permite medir en una celda la curva de Corriente versus Tensión utilizando una carga variada electrónicamente. En el cuadrante de la curva I-V donde se produce energía, se varía la carga y se mide simultáneamente corriente y tensión. En el cuadrante de la curva I-V donde no se produce energía eléctrica, que corresponde a la conexión de la celda en inversa, se aplica un voltaje y se mide la corriente que circula. Este sistema fue desarrollado en el grupo de Energía Solar de la CNEA (Ref. 51). Esto se realiza de un modo estandarizado.

La irradiación se realiza aumentando la dosis de manera incremental. Cada valor de dosis es aproximadamente un orden de magnitud superior al anterior, comenzando en $4 \cdot 10^9$ p/cm² y terminando con la dosis máxima a la cual se quiere llegar.

Con respecto a la iluminación de las celdas, se emplean dos procedimientos.

El primer procedimiento es el que se utilizó originariamente y consiste en iluminar la celda durante la medición de las curvas eléctricas con una lámpara dicróica de 50 Watts alimentada por una fuente de corriente continua de potencia con una tensión de 24 V. Para asegurar que la intensidad luminosa sea siempre la misma para todas las mediciones, se coloca un radiómetro y se regula la tensión sobre la lámpara para que el valor del radiómetro sea siempre el mismo. El radiómetro es una celda fotovoltaica de silicio. Este método tiene

como inconvenientes, por un lado que el espectro de emisión de la lámpara dicróica no es igual al espectro de luz solar y por otro lado que este espectro varía con la temperatura de la lámpara. Para evitar que la lámpara dicróica se recaliente excesivamente y para tener una temperatura de lámpara reproducible, durante la irradiación, la celda no se ilumina. Solo se enciende la lámpara para tomar una curva IV individual. Luego se apaga y se vuelve a encender para tomar otra curva. La lámpara tiene adosado un ventilador que funciona continuamente para reducir su temperatura. Se utiliza este tipo de lámpara porque su espectro se asemeja más que el de una lámpara de tungsteno al espectro solar y su eficiencia es mayor.

El segundo procedimiento, que reproduce mucho mejor las condiciones espaciales, emplea un simulador solar marca Sciencetech modelo SS1kW que tiene un espectro de iluminación muy similar al AM0 (Ref. 52).

4.2.4. Acelerador lineal de electrones del CAB (LINAC). Descripción, línea experimental, calibración de energía y fluencia.

El LINAC es un acelerador que permite acelerar electrones a dos energías fijas de 25 MeV y de 3 MeV. Tiene una única fuente de electrones que los inyecta en una guía de microondas que funciona como medio acelerante acelerando por onda migrante. Hay una guía de ondas de múltiples etapas consecutivas y que es colineal con la fuente de electrones. La guía de ondas acelera los electrones hasta 25 MeV o hasta 3 MeV según la elección. Un sistema de deflexión permite desviar el haz de electrones hacia otra línea más corta y ortogonal a la primera cuando se lo requiere. En los extremos finales de ambas guías de onda hay una serie de dipolos y cuadrupolos magnéticos que sirven para deflectar y enfocar el haz respectivamente. Finalmente el haz de electrones emerge a través de una delgada lámina ubicada en el extremo de la línea respectiva. Cabe mencionar que la línea de 25 MeV se usa primordialmente para producir foto-neutrones que se utilizan para estudios de materiales.

El acelerador está alojado en un bunker al que se accede por una puerta corrediza de blindaje de hormigón armado. Desde una sala de control exterior al bunker es posible controlar a distancia todos los parámetros de funcionamiento del acelerador.

A los fines del procedimiento de irradiación, el acelerador funciona como proveedor de un haz pulsado de electrones con energía fija (3 MeV), corriente variable (0 a 20 nA) y duración controlable. Fijando la corriente y controlando el tiempo durante el cual se irradia, se puede controlar la dosis que recibe el componente bajo estudio. En la figura 4.14 se muestra una vista del acelerador LINAC. La figura 4.15 es un detalle de la línea de 3 MeV con el arreglo experimental utilizado para irradiar celdas solares.

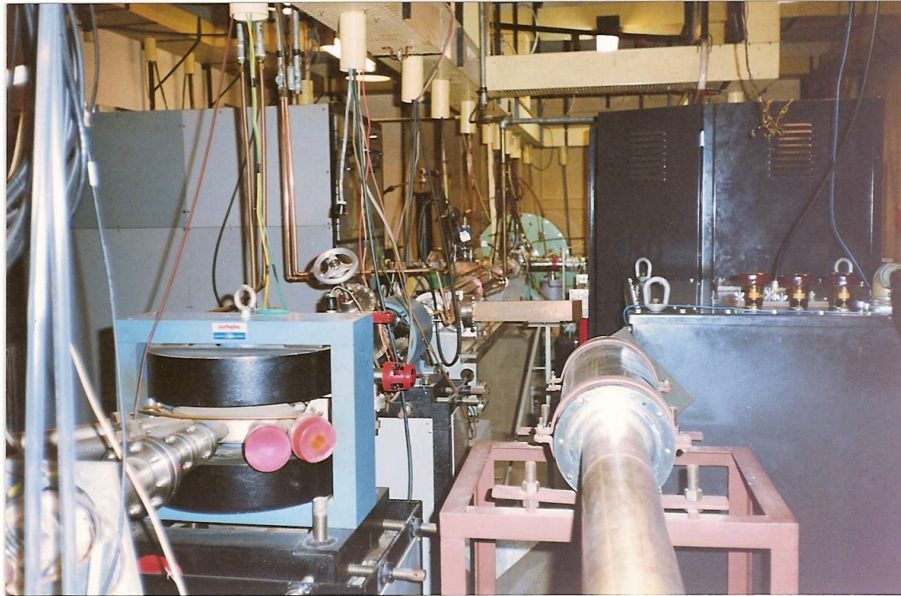


Figura 4.14. Vista de la línea de aceleración de 25 MeV formada por una secuencia de etapas de guía de onda para microondas. Se muestra el dipolo magnético en primer plano. El dipolo sirve para direccionar el haz hacia alguna de las bridas que se ven en su parte central. En la figura se muestra el segmento final de 20 cm. de largo de la línea de irradiación conectado a la brida central. La línea de irradiación termina en una lámina por la que sale el haz. En la parte derecha de la figura se observan las fuentes de alimentación.

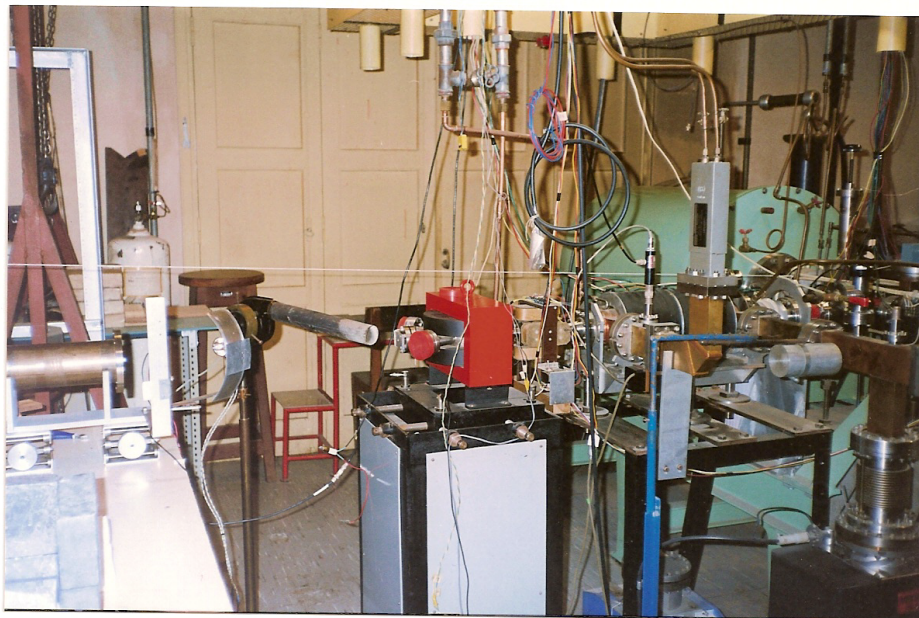


Figura 4.15. Detalle de la línea de aceleración de 3 MeV transversal a la de 25 MeV. El haz emerge al final de la línea luego de atravesar una delgada lámina metálica a la izquierda del dipolo magnético que se muestra en el centro de la figura. A la derecha del dipolo se muestran las guías de microondas con sus accesorios. En el extremo izquierdo se observa un tubo horizontal que es la jaula de Faraday y delante de este tubo está el blanco y la lámpara dicróica.

Los dispositivos a irradiar se instalan frente a la lámina de salida del haz de electrones, y todos los equipos de adquisición de datos y control del experimento se ubican en una sala contigua a la sala de control del acelerador.

En forma similar a lo realizado con protones, el método experimental consiste en obtener la curva característica de la celda con los tres parámetros importantes; corriente de cortocircuito, voltaje a circuito abierto y potencia máxima entregada. Esto se hace para la misma celda antes y después de la irradiación reproduciendo siempre las mismas condiciones de iluminación y de carga. Se utilizó el sistema de adquisición automático mencionado anteriormente para medir en las celdas la curva de Corriente versus Tensión utilizando una carga variada electrónicamente (Ref. 51). En la figura 4.16 se muestra con mayor detalle la disposición experimental empleada.

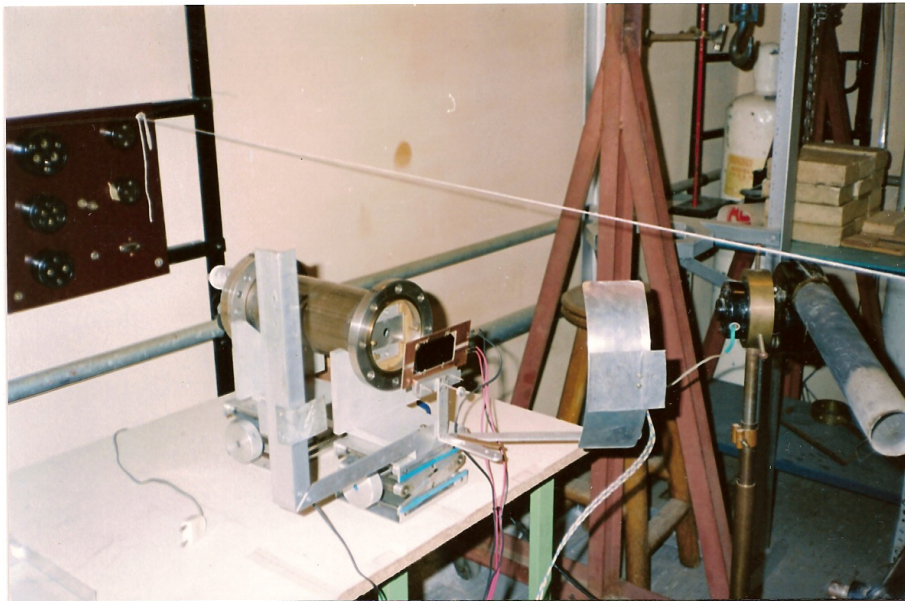


Figura 4.16. Disposición experimental empleada. La celda solar está montada sobre un armazón. A la derecha se ve la pantalla de aluminio que protege la lámpara que ilumina la celda. El brazo en forma de L a la izquierda sostiene el radiómetro de control. El cilindro ubicado horizontalmente detrás de la celda es la copa de Faraday. El haz de electrones proviene desde el ángulo inferior derecho de la figura, incidiendo sobre la muestra antes de entrar en la copa de Faraday.

La celda solar se irradió con dosis acumulativas. Entre irradiaciones se iluminó y se midió la curva I-V con un sistema de medición electrónico. Este sistema de medición tiene una carga electrónica cuya impedancia varía entre cero e infinito para medir la curva I-V de la celda solar y entre cero y menos infinito para medir la curva I-V del diodo de paso que está conectado en paralelo con la celda. Se iluminó con una lámpara dicróica de 50 Watts cuya intensidad luminosa se midió con un radiómetro y se mantuvo constante por medio de un lazo de realimentación cerrado.

El detalle de los experimentos con electrones se presenta en el punto 5.3.

CAPÍTULO V

- 5. Estudios experimentales
 - 5.1. Generalidades. Descripción básica de experimentos con haces de partículas.
 - 5.2. Experimentos usando el TANDAR
 - 5.2.1. Experimentos usando el degradador. Resultados. Análisis.
 - 5.2.2. Irradiación de celdas solares con protones
 - 5.2.2.1. Mediciones con lámpara dicroica a diferentes temperaturas
 - 5.2.2.2. Mediciones con simulador solar a diferentes temperaturas
 - 5.2.2.3. Resumen de resultados y comparación con datos de Emcore. Calificación de celdas ATJ
 - 5.3. Experimentos usando el LINAC del CAB, métodos de irradiación, medición de fluencia, jaula de Faraday
 - 5.3.1. Experimentos realizados
 - 5.3.2. Resumen y análisis de resultados. Calificación de ATJ con electrones
 - 5.4. Resumen general y comparación de resultados entre TANDAR y LINAC

5. Estudios experimentales

5.1. Generalidades. Descripción básica de experimentos con haces de partículas

En este capítulo se detallan los experimentos y resultados obtenidos con haces de protones y de electrones y la contribución al estudio de la degradación de celdas solares ATJ Emcore por irradiación con los mismos. En primer lugar, se detallan los experimentos usando protones; se describen los experimentos usando el degradador de protones y se analizan los espectros obtenidos. Como ya se mencionó en el capítulo 4, se utilizaron dos procedimientos para iluminar las celdas. La iluminación con lámpara dicroica se utilizó hasta que se pudo obtener el simulador solar (Ref. 52). Aquí describimos primero los experimentos realizados iluminando con lámpara dicroica y luego los experimentos realizados utilizando el iluminador solar. En la sección 5.3 se detallan los experimentos realizados irradiando con electrones.

5.2 Experimentos usando el TANDAR

Se realizaron los experimentos que se describen a continuación. En primer lugar se describe el ensayo y caracterización del degradador de protones. En segundo lugar las irradiaciones de celdas utilizando iluminación

dicroica a temperatura ambiente y a alta temperatura (80 °C) y en tercer lugar las irradiaciones de celdas utilizando el iluminador solar a tres temperaturas diferentes: a temperatura ambiente (medición Standard), a alta temperatura (80 °C, que es la condición de vuelo) y a baja temperatura (-140 °C por interés académico).

5.2.1. Experimentos usando el degradador. Resultados, análisis

Para poder caracterizar el funcionamiento del degradador descrito en los capítulos 3 y 4, se midió la energía del haz luego de atravesar las diversas folias de aluminio del mismo. Para ello se montó el arreglo experimental indicado en la figura 5.1. Un detector de germanio hiperpuro se colocó en una de las bridas de acceso a la cámara de irradiación. En el centro de la cámara se montó una lámina de oro de unos pocos micrones, posicionada a 45 grados respecto a la dirección del haz, de modo tal que el haz degradado impacte en ella. Una fracción de los protones dispersados son colectados por el detector de germanio, cuyo dedo frío de cobre está sumergido en un tanque de nitrógeno líquido que permite mantener al detector a muy baja temperatura durante la operación. La señal del detector se envía a un sistema de electrónica EG&G ORTEC y la señal es procesada por una computadora con el software Maestro-Adquisition-2MCB3. Este software permite visualizar en tiempo real el número de cuentas o eventos que se producen en el detector en función del número de canal. Para calibrar la curva y obtener una nueva curva de eventos en función de la energía de los protones, se calculó de acuerdo con la fórmula de Rutherford el cambio de energía del haz de 10 MeV que impacta en el oro. El ángulo que forma la línea del haz entrante con la dirección del haz dispersado que llega al detector de germanio es de 100 grados (ver figura 5.1). La energía del haz dispersado se modifica levemente y se puede calcular según la siguiente ecuación (Ref. 53):

$$E_1 = \frac{E_0}{(1+A)^2} \left(\cos \alpha_1 \pm \sqrt{A^2 f^2 - \sin^2 \alpha_1} \right)^2 \quad (\text{ec. 5.1})$$

donde:

E_1 : energía del haz dispersado

E_0 : energía del haz incidente

α_1 : ángulo que forma la trayectoria de la partícula incidente con la trayectoria de la partícula dispersada en el sistema del laboratorio.

$$A = \frac{M_2}{M_1} \quad \text{y} \quad f = 1 - \frac{(1+A) Q}{A E_0} \quad (\text{ecs. 5.2})$$

siendo:

M_2 : masa del átomo blanco

M_1 : masa de la partícula incidente

Q : pérdida de energía inelástica; para choque elástico $Q \approx 0$

En nuestro caso, con $E_0=10$ MeV , $\alpha_1= 80$ grados, $A=196,96$ y, considerando un choque elástico ($f=1$), obtenemos un valor promedio de

$$E_1 = 9,9 \text{ MeV.}$$

Ya cuando el haz atraviesa la folia de 10 μm de espesor, se dispersa. Esto se puede visualizar observando las figuras 5.2 a y 5.2 b, que muestran el haz sin degradar impactando en una pantalla de fósforo ubicada dentro de la cámara. La fotografía (a) muestra el haz cuando se lo enfoca en la posición del degradador. La fotografía (b) muestra el haz enfocado sobre la pantalla fluorescente. Con el haz enfocado en la pantalla, se intercaló una lámina de aluminio de 10 μm de espesor y el haz se dispersó. Esto se puede observar en la figura 5.3, que muestra el mismo haz de protones de 10 MeV de la figura 5.2.b, pero luego de atravesar la folia de 10 μm . Se observa una sección transversal del haz de forma circular de unos 4 centímetros de diámetro.

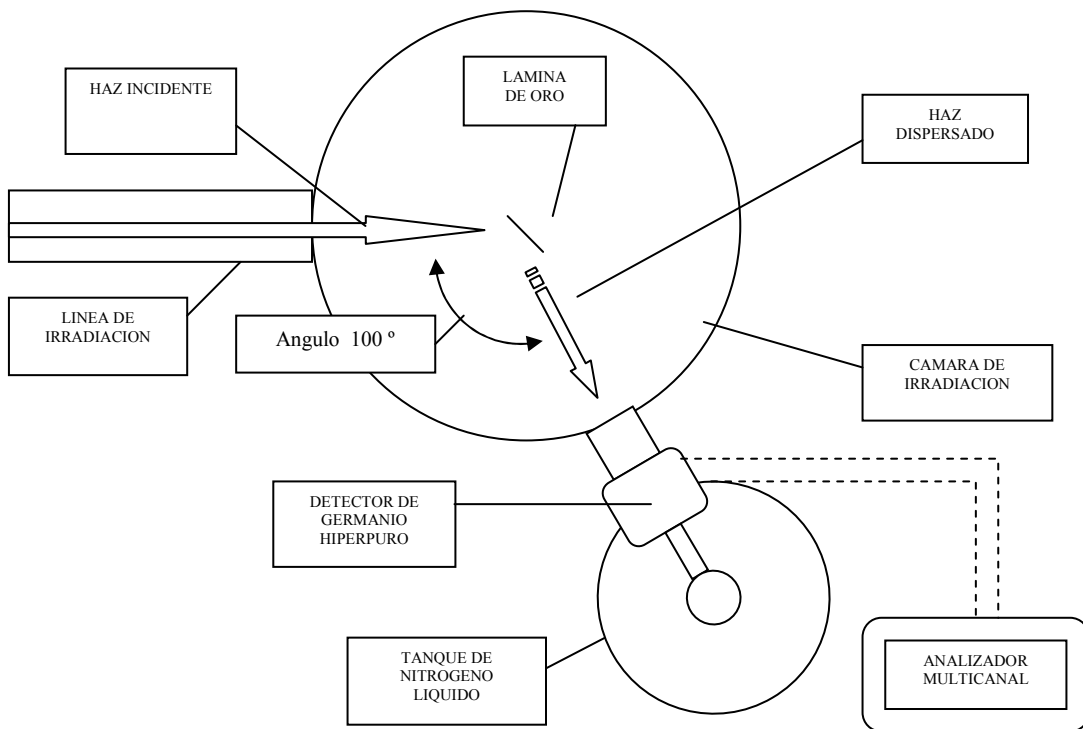


Figura 5.1. Arreglo experimental utilizado para caracterizar el funcionamiento del degradador y medir la energía del haz de protones luego de atravesar folias de aluminio de diversos espesores.

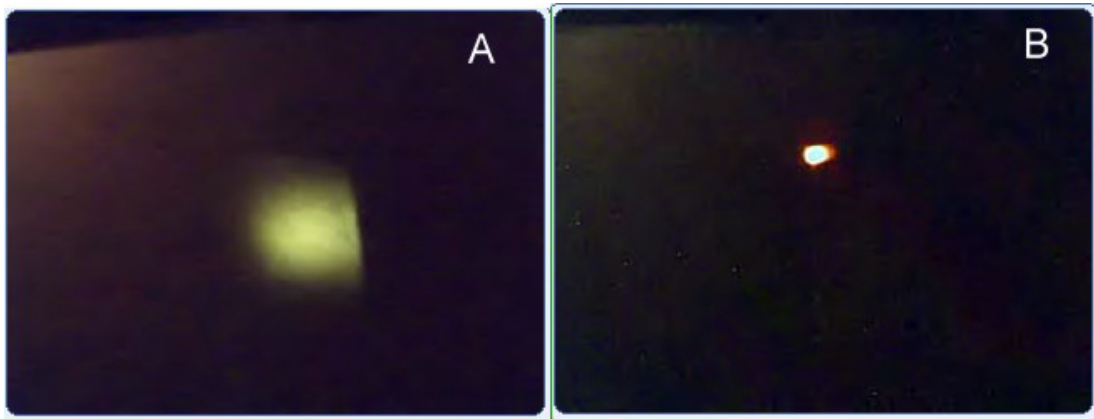


Figura 5.2. (a) Imagen del haz no degradado sobre la pantalla fluorescente al enfocarlo en la posición del degradador, ubicado a 5,2 metros de la pantalla (halo de aproximadamente 4 cm. de ancho). (b) Imagen del haz no degradado y enfocado en la pantalla (imagen de diámetro aproximado 1 cm.)

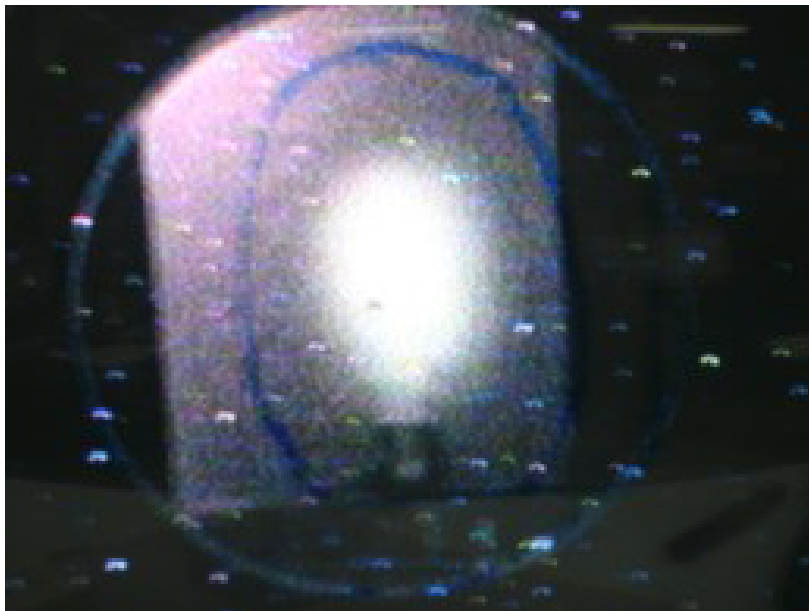


Figura 5.3. Imagen producida por un haz de protones impactando sobre una pantalla de fósforo ubicada dentro de la cámara de irradiación luego de haber sido degradado por una lámina de aluminio de 10 μm de espesor.

Los resultados obtenidos en estos experimentos se muestran en las figuras 5.4 a 5.8, que muestran los espectros medidos con el detector de germanio hiperpuro y corresponden a la señal obtenida luego de que el haz de protones ha atravesado las folias de aluminio de 10, 100, 180, 200 y 300 μm . de espesor.

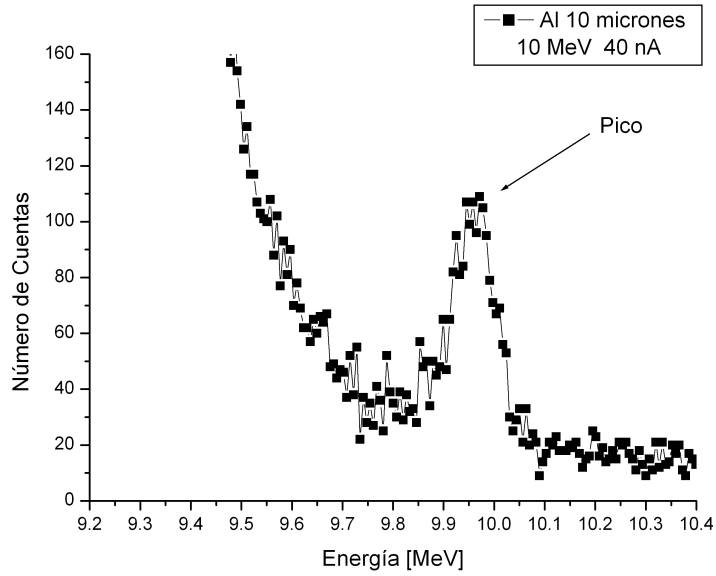


Figura 5.4. Señal recibida en el detector de germanio hiperpuro. Se grafica el número de cuentas en función de la energía para la lámina de aluminio de 10 μm . El eje de energías fue calibrado como se indica en la sección 5.2.1.

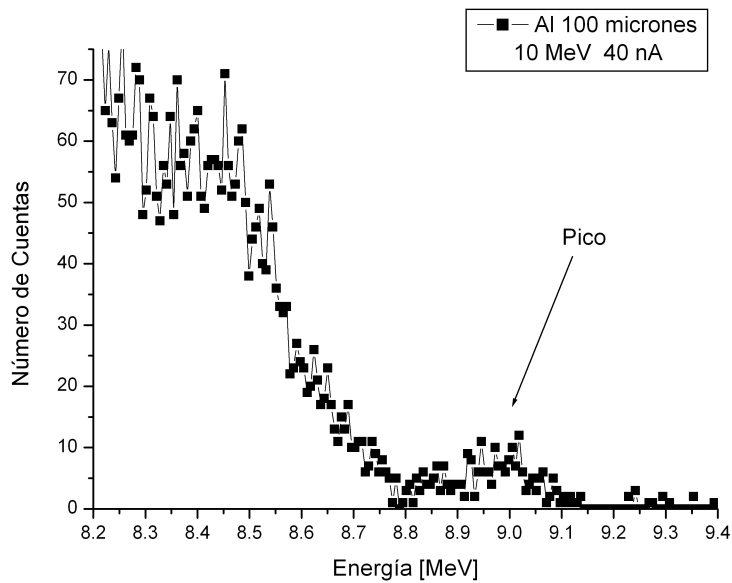


Figura 5.5. Señal recibida en el detector de germanio hiperpuro. Se grafica el número de cuentas en función de la energía para la lámina de aluminio de 100 μm .

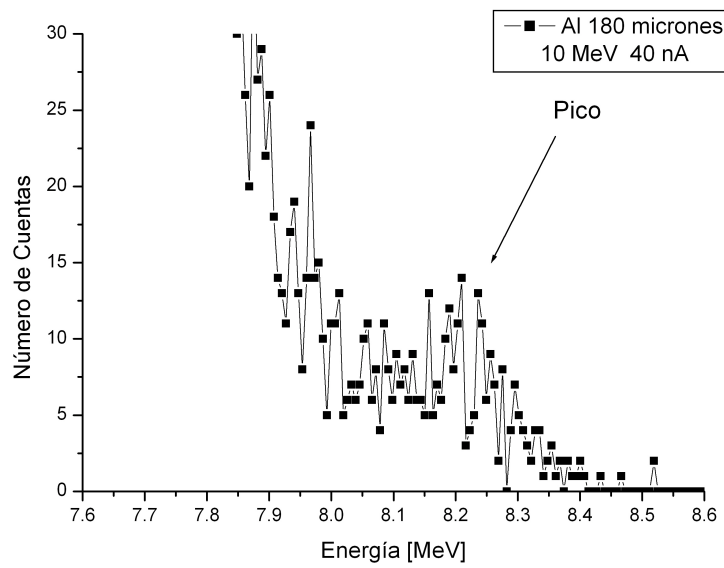


Figura 5.6. Señal recibida en el detector de germanio hiperpuro. Se grafica el número de cuentas en función de la energía para la lámina de aluminio de 180 μm .

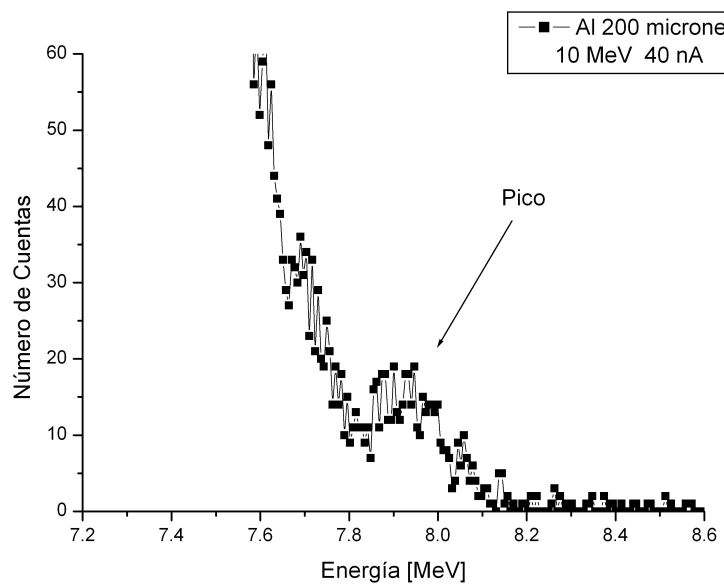


Figura 5.7: Señal recibida en el detector de germanio hiperpuro. Se grafica el número de cuentas en función de la energía para la lámina de aluminio de 200 μm .

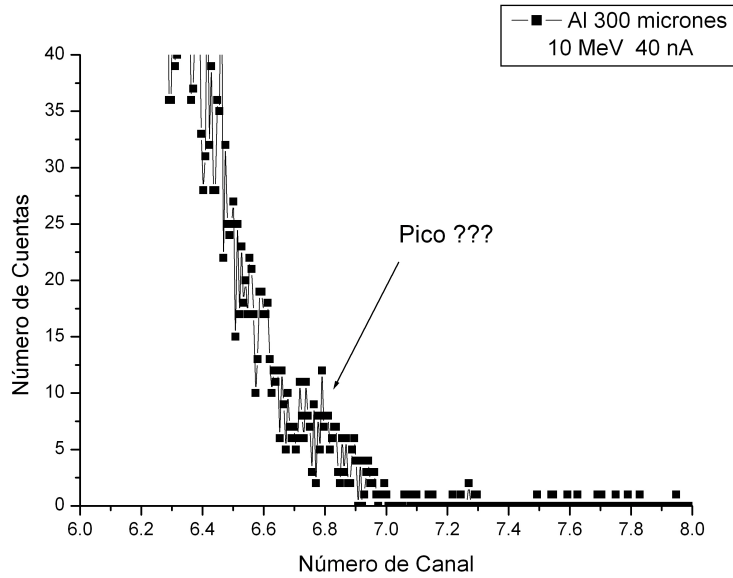


Figura 5.8: Señal recibida en el detector de germanio hiperpuro. Se grafica el número de cuentas en función de la energía para la lámina de aluminio de 300 μm . Aquí el pico resulta prácticamente indistinguible.

En la figura 5.9 se resumen los resultados obtenidos. En esta figura se grafica el valor de la energía media del pico degradado en función del espesor de la folia de aluminio que atraviesa. Se indican los errores correspondientes. El error en la energía se tomó como el ancho medio del pico en cada caso. El ancho medio del pico indica la dispersión en energía del haz emergente. Con las modelizaciones con TRIM se obtuvieron para el ancho mitad los siguientes valores: 38, 110, 153 y 176 keV para las folias de 10, 100, 180 y 200 μm respectivamente.

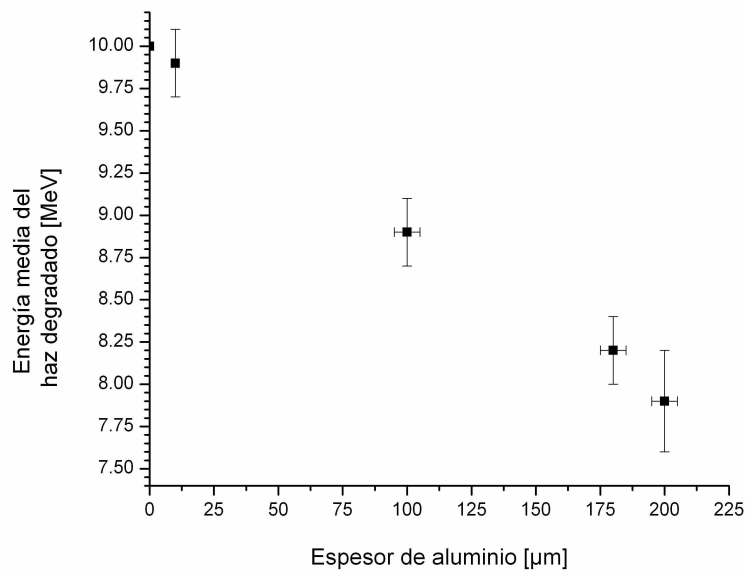


Figura 5.9: Valor de la energía media del pico degradado medido en función del espesor de la folia de aluminio que atraviesa.

En la tabla 5.1 se comparan para los cuatro espesores de aluminio medidos, los valores de energía y ancho mitad de los picos simulados con TRIM con los medidos con el detector de germanio hiperpuro. El ancho mitad en los picos se midió gráficamente sobre un fiteo realizado a mano en las curvas respectivas.

Espesor de aluminio (μm)	Energía del pico medida (MeV)	Energía del pico calculada con TRIM (MeV)	Ancho mitad del pico medido (keV)	Ancho mitad del pico calculado con TRIM (keV)
10	$9,9 \pm 0,2$	9,907	90 ± 30	38
100	$8,9 \pm 0,2$	9,045	150 ± 50	110
180	$8,2 \pm 0,2$	8,220	180 ± 60	153
200	$7,9 \pm 0,3$	8,005	200 ± 80	176

Tabla 5.1: Valores de la energía media del pico degradado y del ancho medio del pico en función del espesor de la folia de aluminio que atraviesa. Se comparan los valores simulados con TRIM con los medidos con el detector de germanio hiperpuro. La energía del haz de protones es de 10 MeV.

Con estos experimentos se ha comprobado que las mediciones concuerdan con los cálculos realizados previamente (ver capítulo 3). El degradador funciona correctamente y reduce la energía del haz en las proporciones calculadas previamente a su diseño. Para comprobar el funcionamiento de las folias de espesores mayores a 300 micrones será necesario utilizar un detector de mayor sensibilidad, como podría ser un detector con mayor área de recepción, ya que las corrientes de haz de protones utilizables según normas de la ARN (Autoridad Regulatoria Nuclear) en la facilidad Tandem no deben superar los 100 nA. Por lo tanto en lugar de subir la corriente habría que tener el detector midiendo durante más tiempo.

Esta metodología de obtención del espectro podrá utilizarse en un futuro para aproximarse más a las condiciones de irradiación en órbita.

5.2.2 Irradiación de celdas solares con protones

En los experimentos que se describen a continuación, en los que se irradiaron celdas con protones a diferentes temperaturas, se empleó el método de barrido. Con este método se obtiene uniformidad pero siempre con la misma energía. Todas las irradiaciones que se presentarán se realizaron con protones de 10 MeV en incidencia normal, en vacío ($< 10^{-5}$ mbar) y manteniendo la celda a diferentes temperaturas. La motivación de este estudio es saber cómo y cuánto varía el daño producido por protones según la temperatura de la celda. Esto se hace para saber cómo habría que modificar el coeficiente de degradación de la potencia que se utiliza para modelar la disminución de potencia del panel solar durante la misión (Ref. 49) y tomar más de un coeficiente de degradación según la temperatura.

Todas las irradiaciones que se presentarán en este capítulo se realizaron con dosis incrementales de protones de 10 MeV. Antes de la

irradiación y para cada dosis incremental y condición, se midió la curva I-V con iluminación constante (ver sección 4.2.3). Cada medición se repitió tres veces para tener estadística razonable con un error estadístico menor que el 1%. En todas las tablas, las columnas a, b y c corresponden a las tres mediciones efectuadas.

Las curvas I-V se utilizaron para obtener los valores de Voc, Isc, Vpmax e Ipmax. Los dos últimos son los valores de tensión y corriente que dan la máxima potencia y se obtuvieron analizando los pares de valores de tensión-corriente de la medición de la curva I-V correspondiente cuyo producto daba el máximo valor de potencia. El error en los parámetros Voc e Isc se debe a la imprecisión en la lectura del cruce por cero en los gráficos correspondientes. Para el error en el valor de Pmax se considera el error de la corriente y el de la tensión correspondientes. Se consideran estos errores y el error estadístico para obtener el error total que es el que se indica para el promedio en todas las tablas que se presentan.

En la figura 5.10 se muestra a modo ilustrativo un ejemplo de curvas I-V obtenida en una irradiación con protones. Las curvas tienen la misma apariencia con ambos métodos de iluminación. Con la información y los parámetros extraídos de estas curvas realizamos el análisis que se presenta a continuación. Cuando se describan otras irradiaciones, se presentarán los parámetros y el análisis correspondiente sin presentar las curvas I-V, ya que no se pueden sacar demasiadas conclusiones tan solo observando este tipo de curvas. Sin embargo, las curvas dan una buena idea de la calidad de la medición. En todas ellas (Figuras 5.11 a 5.16, 5.21 a 5.29 y 5.30 a 5.32), se han trazado manualmente sobre los puntos medidos, curvas continuas destinadas a guiar el ojo sobre el comportamiento de esos puntos en función de la fluencia irradiada.

En todas las tablas que se presentarán a continuación se indicarán los valores de tensión a circuito abierto, corriente de cortocircuito y potencia máxima (Voc, Isc y Pmax) obtenidos de las curvas que corresponden a la medición respectiva y el error indicado en las últimas columnas de las tablas se obtuvo como la suma cuadrática de los errores estadístico, considerado como la desviación standard de los valores medidos y experimental, es decir:

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{\text{exp}}^2} \quad (\text{ec. 5.3})$$

donde σ_t es el error total, σ_x la desviación standard y σ_{exp} el error experimental de la medición individual. Este último es menor al 1 %.

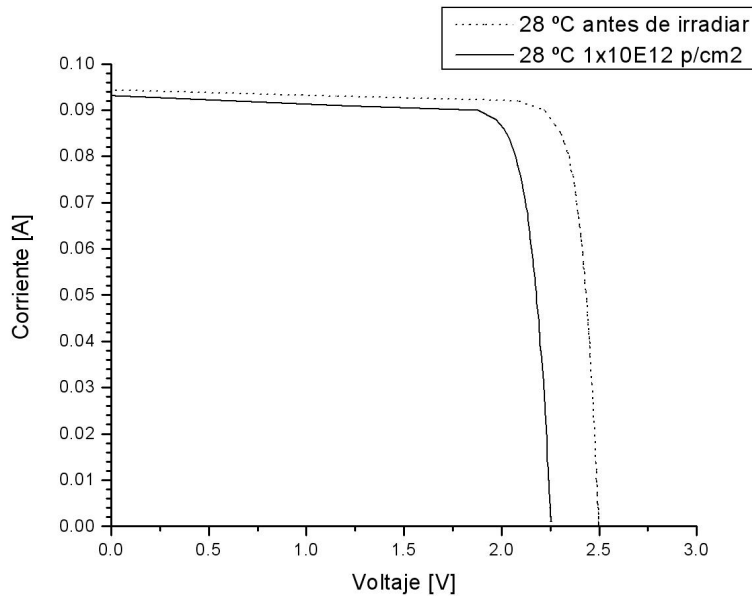


Figura 5.10. Curvas I-V obtenidas en la irradiación de la celda # 35654423A 282-PA-3P-MV. Medición a Alta T, 16 de Marzo de 2007 con protones de 10 MeV.

La fluencia irradiada en ensayos sobre celdas solares fue medida de la siguiente forma:

Se barrió el spot del haz sobre una superficie total de $A_{tot} = 10.8 \text{ cm} \times 10.8 \text{ cm}$ (área colimadores copa de Faraday múltiple ó CFM). La fluencia irradiada en cada caso está dada por la siguiente ecuación:

$$\Phi_i = \frac{\delta_l \Delta t_i}{e} \quad (\text{ec. 5.4})$$

Donde

$$\delta_l = \frac{I_{03}}{A_{tot}} \quad (\text{ec. 5.5})$$

es la densidad de corriente efectiva en la superficie de barrido (siendo I_{03} la corriente medida en la CF-03 del imán analizador para cada etapa de irradiación), Δt_i es el tiempo efectivo de irradiación sobre la superficie de la celda en cada dosis y e es la carga del electrón. Cabe aclarar que I_{03} e I_{CF5} son iguales, lo que fue comprobado por medición directa. En cada etapa de irradiación se estimaron los tiempos efectivos conociendo el período de barrido del haz y la superficie recorrida. La fluencia acumulada es $\Phi = \sum \Phi_i$ donde i denota las sucesivas fluencias irradiadas.

Para estimar el error de cada fluencia Φ_i se considera la propagación de errores en las ecuaciones 5.4 y 5.5, en las cuales los errores significativos para el cálculo son: el error en la medición de I_{03} , el error en la medición de A_{tot} y el error en la medición de Δt_i .

El valor máximo de fluencia se eligió para lograr una dosis máxima equivalente a la que recibirá el panel solar durante la misión de acuerdo con el

método JPL. Los valores intermedios se eligieron para tener puntos equiespaciados en un gráfico semilogarítmico.

Por completitud y antes de pasar a describir los experimentos usando protones, se detallan las numeraciones de las celdas utilizadas en cada irradiación:

Utilizando lámpara dicróica:

# 35050321A 251-3P-LE	Medición	Tamb 14 de Marzo de 2007
# 35654423A 282-PA-3P-MV	Medición	Alta T 16 de Marzo de 2007

Utilizando simulador solar:

# 35653721A 279-P9-3P-MV	Medición	Tamb 10 de Agosto de 2007
# 35648517A 249-PO-3P-MV	Medición	Baja T 07 de Julio de 2007
# 35050323A 249-3P-LE	Medición	Alta T 19 de Octubre de 2007

**5.2.2.1. Mediciones con lámpara dicróica a diferentes temperaturas
Medición a temperatura ambiente**

En las tablas 5.2, 5.3 y 5.4 se muestran los valores de tensión a circuito abierto, corriente de cortocircuito y potencia máxima (V_{oc} , I_{sc} y P_{max}) para cada dosis incremental. Estos valores también se grafican en las figuras 5.11, 5.12 y 5.13 respectivamente.

Nombre Archivo	Fluencia [p^+/cm^2]	Error Fluencia [%]	Voc (V)			Voc Promedio (V)
			a	b	c	
Cero	0	0	2.200 ± 0.005	2.200 ± 0.005	2.205 ± 0.005	2.202 ± 0.007
Uno	1.79E9	33	2.195 ± 0.005	2.185 ± 0.005	2.185 ± 0.005	2.188 ± 0.009
Dos	1.33E10	38	2.180 ± 0.005	2.180 ± 0.005	2.195 ± 0.005	2.19 ± 0.01
Tres	1.68E11	37	2.085 ± 0.005	2.115 ± 0.005	2.120 ± 0.005	2.11 ± 0.02

Tabla 5.2. Voltaje a circuito abierto para distintos valores de dosis de protones de 10 MeV

Nombre Archivo	Fluencia [p^+/cm^2]	Error Fluencia [%]	Isc (mA)			Isc Promedio (mA)
			a	b	c	
Cero	0	0	56.0 ± 0.05	56.2 ± 0.05	55.1 ± 0.05	55.8 ± 0.6
Uno	1.79E9	33	53.0 ± 0.05	53.7 ± 0.05	53.8 ± 0.05	53.5 ± 0.5
Dos	1.33E10	38	52.0 ± 0.05	52.1 ± 0.05	52.1 ± 0.05	52.1 ± 0.2
Tres	1.68E11	37	49.0 ± 0.05	49.0 ± 0.05	50.0 ± 0.05	49.3 ± 0.6

Tabla 5.3. Corriente de cortocircuito para distintos valores de dosis de protones de 10 MeV

Nombre Archivo	Fluencia [p^+/cm^2]	Error Fluencia [%]	Pmáx (mW)			Pmáx Promedio (mW)
			a	b	a	
Cero	0	0	103.46 ± 0.30	103.40 ± 0.30	103.46 ± 0.30	103.4 ± 0.5
Uno	1.79E9	33	98.74 ± 0.30	97.87 ± 0.30	98.74 ± 0.30	98.5 ± 0.7
Dos	1.33E10	38	96.38 ± 0.30	95.50 ± 0.30	96.38 ± 0.30	96.1 ± 0.7
Tres	1.68E11	37	87.03 ± 0.30	85.15 ± 0.30	87.03 ± 0.30	86 ± 2

Tabla 5.4. Potencia máxima para distintos valores de dosis de protones de 10 MeV

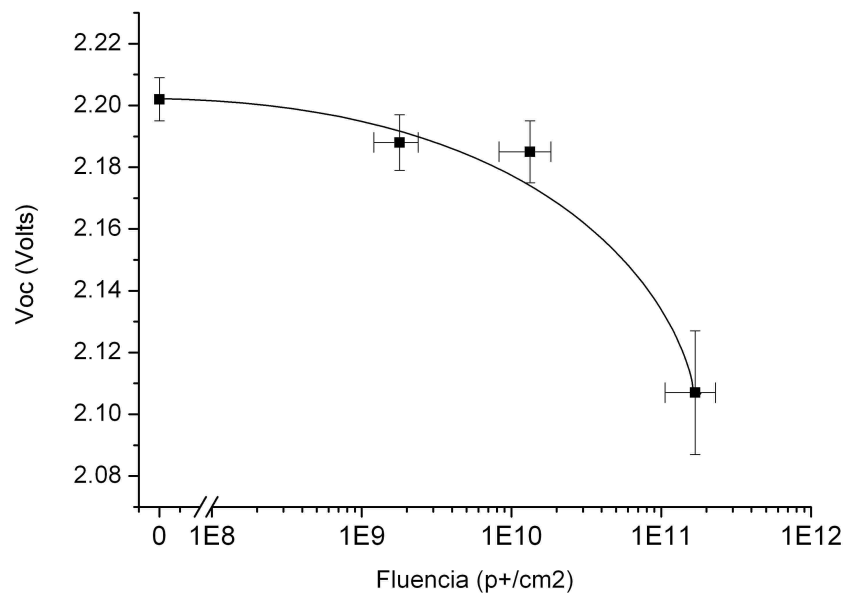


Figura 5.11. Voltaje a circuito abierto en función de la dosis de protones de 10 MeV.

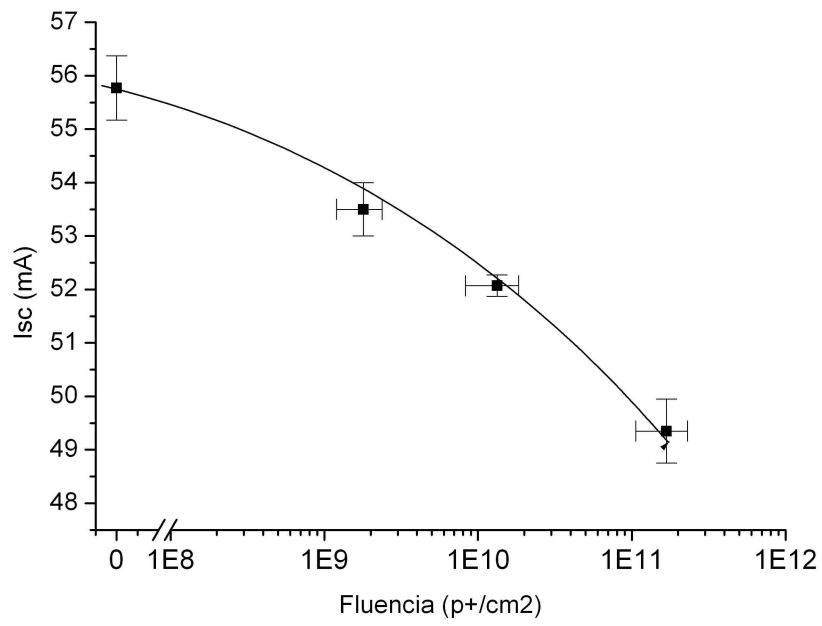


Figura 5.12. Corriente de cortocircuito en función de la dosis de protones de 10 MeV.

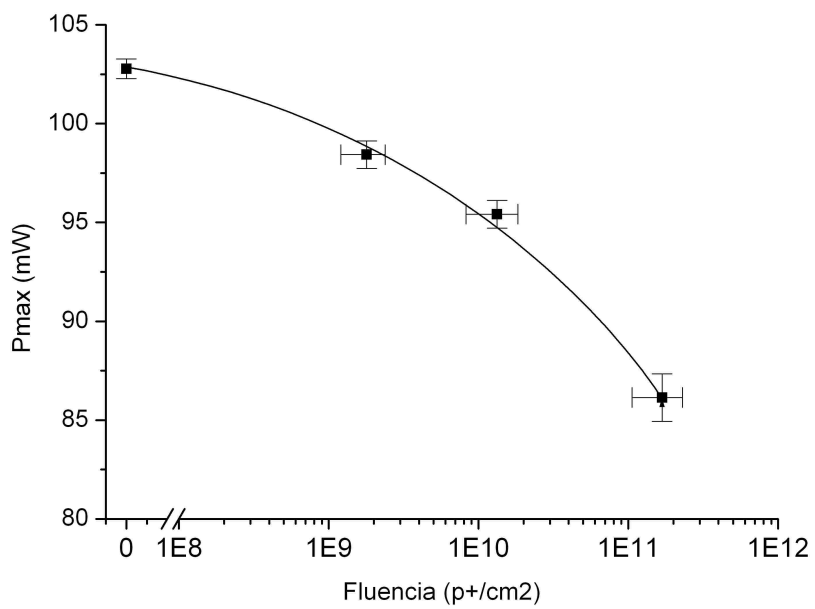


Figura 5.13. Potencia máxima en función de la dosis de protones de 10 MeV.

De los datos obtenidos se observa que luego de irradiar la celda con $1,68 \cdot 10^{11}$ protones/cm² a temperatura ambiente, la tensión a circuito abierto Voc se redujo 4,5 %, la corriente de cortocircuito Isc se redujo 11,5 % y la potencia máxima Pmax. se redujo 16 % respecto al valor medido antes de la irradiación. Esta mayor reducción en la corriente Isc que en el voltaje Voc se observa en la irradiación de celdas solares de gap indirecto, como las de silicio. En las celdas ATJ Emcore, hay dos celdas de gap directo (la Top y la Medium) y una de gap indirecto (la Bottom). Como se verá al final de la sección 5.2.2., en las irradiaciones con simulador solar también se observa una reducción porcentual mayor en la corriente que en el voltaje.

Medición a alta temperatura

La celda fue irradiada con dosis incrementales de protones de 10 MeV mientras se mantenía a una temperatura fija de 80 ± 1 °C. Las curvas I-V se midieron a 28 °C y 80 °C antes de la irradiación (condición BOL). Manteniendo la temperatura a 80 °C se irradió con las fluencias indicadas en la segunda columna de la tabla 5.5. La séptima medición fue efectuada luego de haber aplicado una fluencia total de 10^{12} p⁺/cm², que es algo mayor que la fluencia que se habrá recibido al final de la misión (la condición EOL es aproximadamente $3 \cdot 10^{11}$ p⁺/cm²). Esta medición se realizó a 80 °C y luego a 28 °C. Después de unos 15 minutos a 28 °C se volvió a 80 °C y se mantuvo esta temperatura por 24 horas (recocido), luego de lo cual se midió la curva I-V tanto a 80 °C como a 28 °C.

En las tablas 5.5, 5.6 y 5.7 se muestran los valores de tensión a circuito abierto, corriente de cortocircuito y potencia máxima (Voc, Isc y Pmax) medidos a 80 °C en función de la dosis recibida. Los valores promedio de las tablas se grafican en las figuras 5.14, 5.15 y 5.16 respectivamente.

Nombre Archivo	Fluencia [p ⁺ /cm ²]	Error Fluencia [%]	Voc (V)			Voc Promedio (V)
			a	b	c	
Cero	0.00E+00	0	2.152 ± 0.005	2.153 ± 0.005	2.154 ± 0.005	2.153 ± 0.007
Uno	1.63E+09	29	2.147 ± 0.005	2.149 ± 0.005	2.150 ± 0.005	2.149 ± 0.007
Dos	4.66E+09	27	2.143 ± 0.005	2.143 ± 0.005	2.144 ± 0.005	2.143 ± 0.006
Tres	1.05E+10	25	2.128 ± 0.005	2.131 ± 0.005	2.134 ± 0.005	2.131 ± 0.007
Cuatro	7.34E+10	23	2.084 ± 0.005	2.085 ± 0.005	2.086 ± 0.005	2.085 ± 0.007
Cinco	1.95E+11	25	2.025 ± 0.005	2.027 ± 0.005	2.028 ± 0.005	2.027 ± 0.007
Seis	5.90E+11	28	1.925 ± 0.005	1.927 ± 0.005	1.929 ± 0.005	1.927 ± 0.007
Siete	1.04E+12	26	1.870 ± 0.005	1.871 ± 0.005	1.872 ± 0.005	1.871 ± 0.007

Tabla 5.5. Voltaje a circuito abierto para distintos valores de dosis de protones de 10 MeV. La temperatura de la muestra durante la irradiación y la medición fue de 80 °C.

Nombre Archivo	Fluencia [p ⁺ /cm ²]	Error Fluencia [%]	Isc (mA)			Isc Promedio (mA)
			a	b	c	
Cero	0.00E+00	0	99,10 ± 0.05	99,20 ± 0.05	99,10 ± 0.05	99.1 ± 0,2
Uno	1.63E+09	29	99,05 ± 0.05	99,15 ± 0.05	99,05 ± 0.05	99.1 ± 0,2
Dos	4.66E+09	27	100,00 ± 0.05	99,80 ± 0.05	100,00 ± 0.05	99.9 ± 0,2
Tres	1.05E+10	25	98,25 ± 0.05	98,90 ± 0.05	98,25 ± 0.05	98.5 ± 0,4
Cuatro	7.34E+10	23	98,80 ± 0.05	99,70 ± 0.05	98,80 ± 0.05	99.1 ± 0,6
Cinco	1.95E+11	25	98,40 ± 0.05	98,85 ± 0.05	98,40 ± 0.05	98.5 ± 0,3
Seis	5.90E+11	28	98,40 ± 0.05	98,55 ± 0.05	98,40 ± 0.05	98.5 ± 0,2
Siete	1.04E+12	26	98,40 ± 0.05	98,55 ± 0.05	98,40 ± 0.05	98.5 ± 0,2

Tabla 5.6. Corriente de cortocircuito para distintos valores de dosis de protones de 10 MeV. La temperatura de la muestra durante la irradiación y la medición fue de 80 °C.

Nombre Archivo	Fluencia [p ⁺ /cm ²]	Error Fluencia [%]	Pmax (mW)			Pmax Promedio (mW)
			a	b	c	
Cero	0.00E+00	0	171,93 ± 0.60	174,06 ± 0.60	171,93 ± 0.60	174 ± 2
Uno	1.63E+09	29	173,19 ± 0.60	173,85 ± 0.60	173,19 ± 0.60	174 ± 1
Dos	4.66E+09	27	175,30 ± 0.60	175,30 ± 0.60	175,30 ± 0.60	175 ± 1
Tres	1.05E+10	25	172,79 ± 0.60	174,19 ± 0.60	172,79 ± 0.60	174 ± 2
Cuatro	7.34E+10	23	169,26 ± 0.60	169,35 ± 0.60	169,26 ± 0.60	169 ± 1
Cinco	1.95E+11	25	162,56 ± 0.60	162,47 ± 0.60	162,56 ± 0.60	162 ± 1
Seis	5.90E+11	28	151,78 ± 0.60	151,59 ± 0.60	151,78 ± 0.60	152 ± 1
Siete	1.04E+12	26	144,99 ± 0.60	145,24 ± 0.60	144,99 ± 0.60	145 ± 1

Tabla 5.7. Potencia máxima para distintos valores de dosis de protones de 10 MeV. La temperatura de la muestra durante la irradiación y la medición fue de 80 °C.

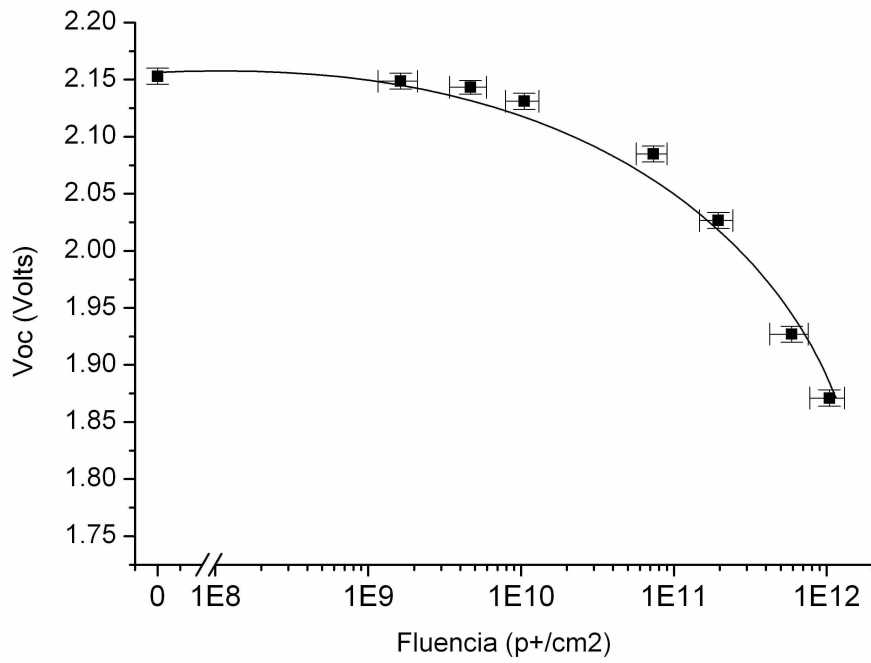


Figura 5.14. Voltaje a circuito abierto en función de la dosis de protones de 10 MeV. Temperatura de la muestra 80 °C durante la irradiación y la medición.

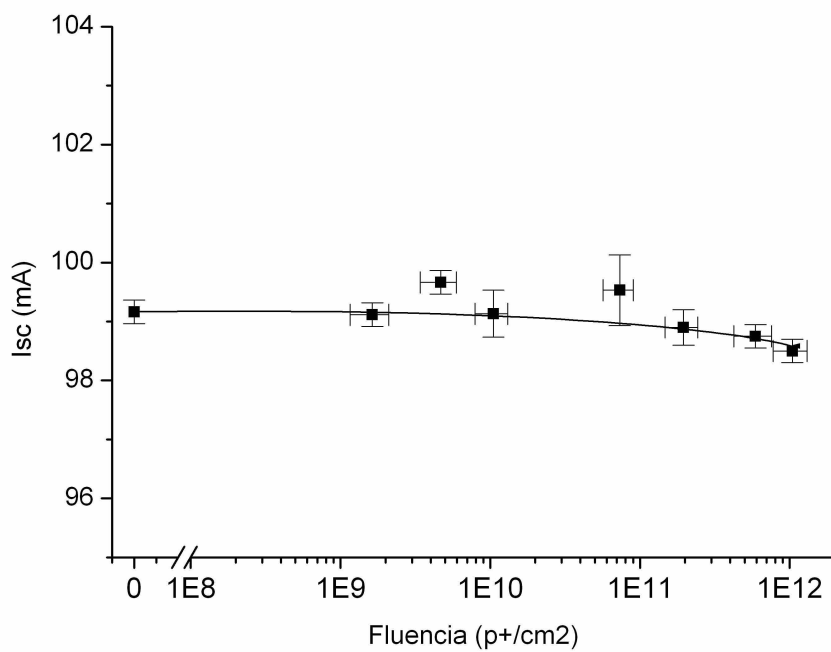


Figura 5.15. Corriente de cortocircuito en función de la dosis de protones de 10 MeV. Temperatura de la muestra 80 °C durante la irradiación y la medición.

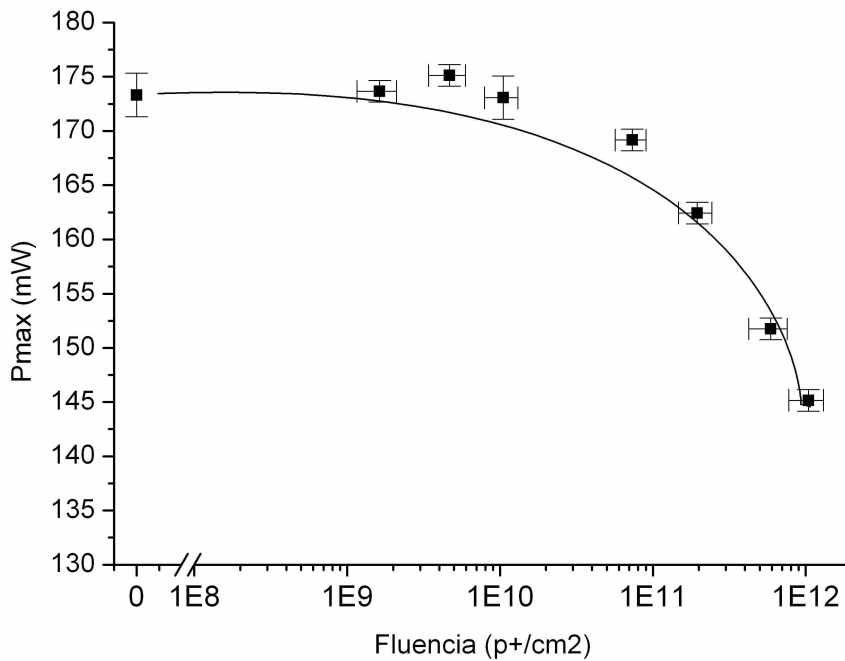


Figura 5.16. Potencia máxima en función de la dosis de protones de 10 MeV. Temperatura de la muestra 80 °C durante la irradiación y la medición.

En la figura 5.17 se muestran las potencias máximas antes y después de una dosis de $1,04 \cdot 10^{12}$ protones de 10 MeV. Al finalizar la serie de irradiaciones, como se mencionó anteriormente, se hizo un recocido de 24 horas manteniendo la temperatura a 80 °C.

Luego de la irradiación, la potencia máxima Pmax. se redujo 6% respecto al valor medido antes de la irradiación. Después del recocido se redujo un 2 % respecto al valor medido inmediatamente después de la irradiación, como se muestra en la figura 5.17.

Aunque aquí solo graficamos los valores de potencia a lo largo del proceso de medición a 80 °C, señalamos que luego del recocido, el Voc se recuperó 0,5 % y la Isc se redujo un 2 % respecto al valor medido inmediatamente después de la irradiación. Las reducciones en los valores de Voc e Isc medidos a 80 °C inmediatamente después de la irradiación fueron de 13 % y 0,6 % respectivamente.

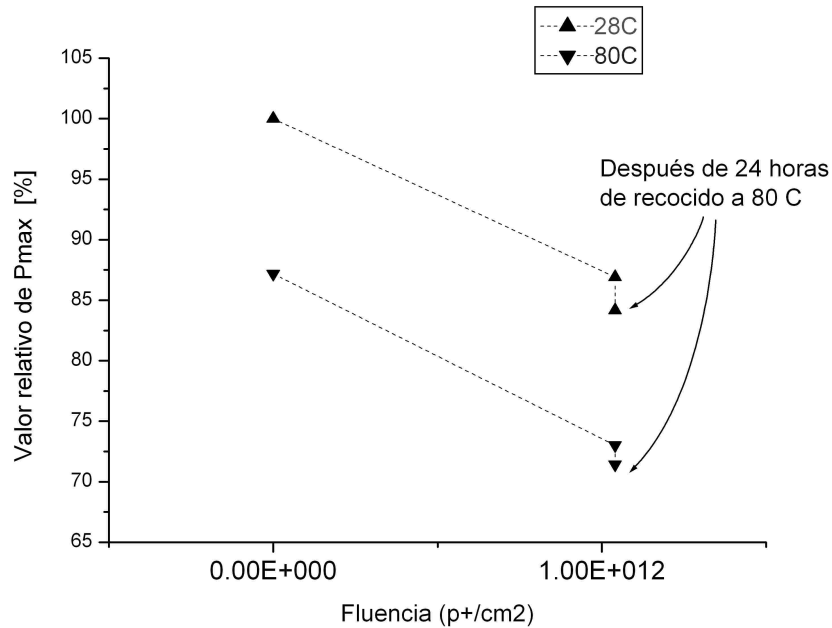


Figura 5.17. Potencia máxima en función de la dosis de protones de 10 MeV. Valores normalizados respecto a la condición BOL a 28 °C. Temperatura de irradiación y recocido: 80 °C. Mediciones a 28 °C y 80 °C.

Para comparar el daño introducido irradiando a 28 °C con el daño introducido irradiando a 80 °C, se comparan en la tabla 5.8 los valores medidos de Voc, Isc y Pmax en las condiciones BOL y EOL para las dos celdas irradiadas iluminando con lámpara dicróica. En un caso, la celda fue irradiada a 28 °C y en el otro caso fue irradiada a 80 °C. En ambos casos, tanto para la condición BOL como EOL, fueron medidas a 28 °C.

Los errores que se indican en la tabla 5.8 para los valores medidos de Voc, Isc y Pmax en la celda irradiada a 28 °C, tanto para la condición BOL como para la condición EOL son los que se indicaron en las tablas 5.2, 5.3 y 5.4 y cuyo cálculo se indicó en la sección 5.2.2. Los errores para el caso de la celda irradiada a 80 °C se calcularon de manera análoga con valores de las mediciones a temperatura ambiente, que por claridad no se incluyeron en las tablas 5.5, 5.6 y 5.7.

En las figuras 5.18, 5.19 y 5.20 se muestran gráficamente los resultados normalizados al respectivo valor de BOL para los valores de Voc, Isc y Pmax de la tabla 5.8. Con excepción del valor de Voc, se observa que los valores indicados como "Irradiada a 80 °C" se encuentran por encima de los valores indicados como "Irradiada a 28 °C". Esto significa que la irradiación a alta temperatura deteriora menos la potencia que la irradiación a temperatura ambiente. En la sección 5.2.2.2 se mostrará un efecto análogo en las mediciones realizadas con simulador solar.

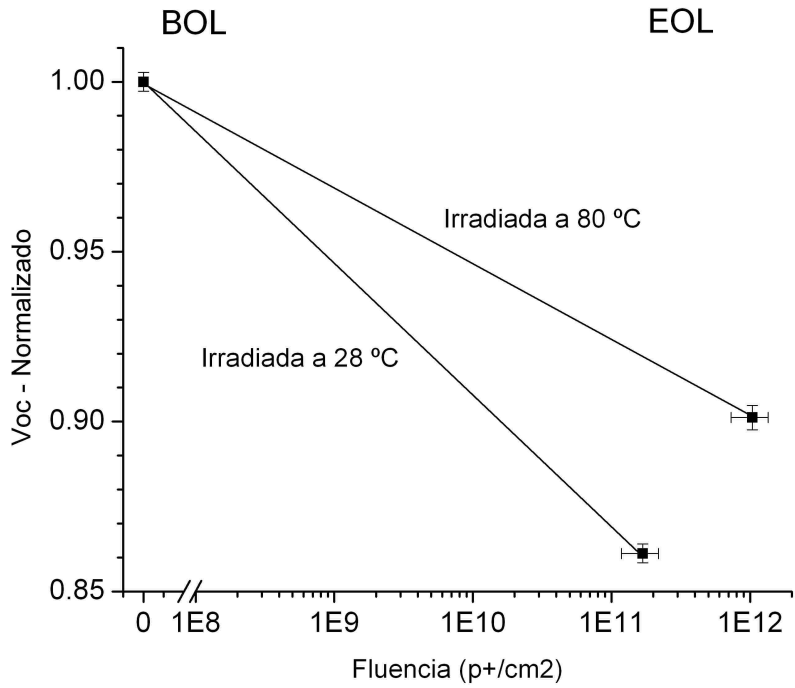


Figura 5.18. Valores normalizados de voltaje a circuito abierto en las condiciones BOL y EOL. Temperatura de las mediciones: 28 °C. Temperatura de irradiación 28 °C y 80 °C.

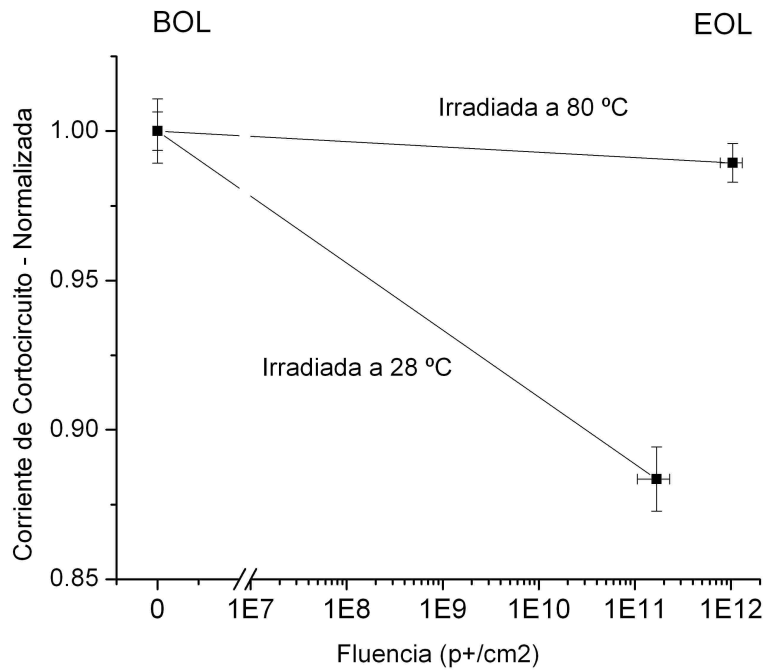


Figura 5.19. Valores normalizados de corriente de cortocircuito en las condiciones BOL y EOL. Temperatura de las mediciones: 28 °C. Temperatura de irradiación 28 °C y 80 °C.

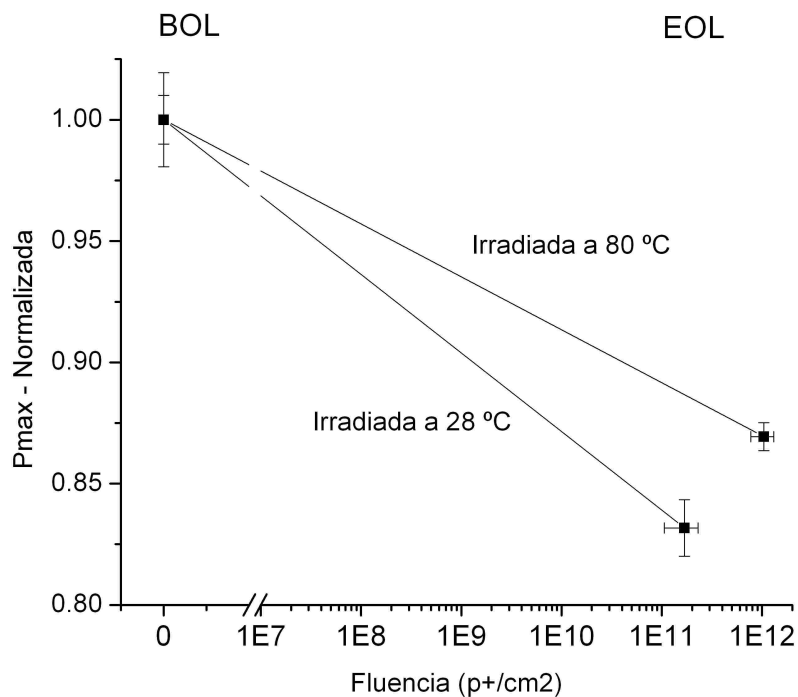


Figura 5.20. Valores normalizados de potencia máxima en las condiciones BOL y EOL. Temperatura de las mediciones: 28 °C. Temperatura de irradiación 28 °C y 80 °C.

		Voc [V]	Isc [mA]	Pmax [mW]
Medida a 28 °C Irradiada a 28 °C	BOL	2,500 ± 0,007	55,8 ± 0,6	103,4 ± 0,5
	EOL 1,68 E11 p+/cm ²	2,153 ± 0,007	49,3 ± 0,6	86 ± 2
<hr/>				
Medida a 28 °C Irradiada a 80 °C	BOL	2,500 ± 0,009	94,0 ± 0,6	199 ± 2
	EOL 1,04 E12 p+/cm ²	2,253 ± 0,009	93,0 ± 0,6	173 ± 1

Tabla 5.8. Valores de Voc , Isc y Pmax medidos a 28 °C en condiciones BOL y EOL. En la parte superior de la tabla se muestran los valores correspondientes a irradiación a 28 °C y en la parte inferior los valores correspondientes a irradiación a 80 °C.

5.2.2.2. Mediciones con simulador solar a diferentes temperaturas

A continuación se muestran los resultados obtenidos para irradiaciones a T_{amb} , $-140\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Como se mencionó anteriormente, estas temperaturas se eligieron para aproximarnos a las condiciones de ciclado espacial y la celda fue continuamente iluminada durante la irradiación y la medición con una potencia constante de aproximadamente 1 kW/m^2 . En los laboratorios del GES se verificó este valor dado por el fabricante del simulador solar. La irradiación con iluminación es más representativa de las condiciones del medioambiente espacial, ya que cuando el panel solar está en órbita se busca que esté continuamente iluminado para maximizar la potencia generada.

Irradiación a temperatura ambiente

La celda fue irradiada con dosis incrementales de protones de 10 MeV mientras se mantenía a una temperatura de $30 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Antes de la irradiación y para cada dosis incremental y condición, se midió la curva I-V con iluminación constante.

En las tablas 5.9, 5.10 y 5.11 se muestran los valores de tensión de circuito abierto, corriente de cortocircuito y potencia máxima (V_{oc} , I_{sc} y P_{max}) medidos a $30 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en función de la dosis recibida. Los valores promedio de las tablas se grafican en las figuras 5.21, 5.22 y 5.23 respectivamente.

Nombre Archivo	Fluencia [p^+/cm^2]	Error Fluencia [%]	Voc (V)			Voc Promedio (V)
			a	b	c	
Cero	0	0	$2,604 \pm 0,005$	$2,606 \pm 0,005$	$2,606 \pm 0,005$	$2,605 \pm 0,006$
Uno	1,2E9	30	$2,601 \pm 0,005$	$2,602 \pm 0,005$	$2,603 \pm 0,005$	$2,602 \pm 0,006$
Dos	1,01E10	30	$2,599 \pm 0,005$	$2,602 \pm 0,005$	$2,603 \pm 0,005$	$2,601 \pm 0,006$
Tres	6,3E10	30	$2,558 \pm 0,005$	$2,559 \pm 0,005$	$2,560 \pm 0,005$	$2,559 \pm 0,006$
Cuatro	2,38E11	30	$2,504 \pm 0,005$	$2,505 \pm 0,005$	$2,510 \pm 0,005$	$2,506 \pm 0,006$
Cinco	3,31E11	30	$2,484 \pm 0,005$	$2,486 \pm 0,005$	$2,491 \pm 0,005$	$2,487 \pm 0,007$
Seis	4,51E11	30	$2,458 \pm 0,005$	$2,459 \pm 0,005$	$2,462 \pm 0,005$	$2,460 \pm 0,006$
Siete	4,53E11	30	$2,470 \pm 0,005$	$2,471 \pm 0,005$	$2,471 \pm 0,005$	$2,471 \pm 0,005$
Ocho	4,55E11	30	$2,461 \pm 0,005$	$2,465 \pm 0,005$	$2,467 \pm 0,005$	$2,464 \pm 0,006$

Tabla 5.9. Voltaje a circuito abierto para distintos valores de dosis de protones de 10 MeV . La temperatura de la muestra durante la irradiación y la medición fue de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se computa el error como la suma cuadrática del error experimental más la desviación estándar.

Nombre Archivo	Fluencia [p^+/cm^2]	Error Fluencia[%]	Isc (mA)			Isc Promedio (mA)
			a	b	c	
Cero	0	0	407,5 ± 0,1	407,9 ± 0,1	409,3 ± 0,1	408 ± 1
Uno	1,2E9	30	404,5 ± 0,1	405,5 ± 0,1	407,2 ± 0,1	406 ± 2
Dos	1,01E10	30	405,9 ± 0,1	407,4 ± 0,1	409,8 ± 0,1	408 ± 2
Tres	6,3E10	30	409,6 ± 0,1	409,9 ± 0,1	410,6 ± 0,1	410 ± 1
Cuatro	2,38E11	30	404,2 ± 0,1	406,0 ± 0,1	407,0 ± 0,1	406 ± 2
Cinco	3,31E11	30	402,8 ± 0,1	402,9 ± 0,1	403,1 ± 0,1	403 ± 1
Seis	4,51E11	30	400,7 ± 0,1	402,7 ± 0,1	403,6 ± 0,1	402 ± 2
Siete	4,53E11	30	401,4 ± 0,1	402,8 ± 0,1	403,8 ± 0,1	403 ± 2
Ocho	4,55E11	30	400,2 ± 0,1	400,5 ± 0,1	401,9 ± 0,1	401 ± 1

Tabla 5.10. Corriente de cortocircuito para distintos valores de dosis de protones de 10MeV. La temperatura de la muestra durante la irradiación y la medición fue de 30 °C.

Nombre Archivo	Fluencia [p^+/cm^2]	Error Fluencia [%]	Pmax (mW)			Pmax Promedio (mW)
			a	b	c	
Cero	0	0	863,4 ± 1,9	857,6 ± 1,9	858,4 ± 1,9	860 ± 4
Uno	1,2E9	30	855,0 ± 1,9	857,6 ± 1,9	858,1 ± 1,9	857 ± 3
Dos	1,01E10	30	861,5 ± 1,9	866,4 ± 1,9	863,7 ± 1,9	864 ± 4
Tres	6,3E10	30	853,9 ± 1,9	853,5 ± 1,9	854,2 ± 1,9	854 ± 2
Cuatro	2,38E11	30	824,3 ± 1,9	817,2 ± 1,9	830,1 ± 1,9	824 ± 7
Cinco	3,31E11	30	807,2 ± 1,9	813,8 ± 1,9	814,5 ± 1,9	812 ± 5
Seis	4,51E11	30	800,4 ± 1,9	794,5 ± 1,9	794,0 ± 1,9	796 ± 4
Siete	4,53E11	30	802,5 ± 1,9	801,3 ± 1,9	803,5 ± 1,9	802 ± 3
Ocho	4,55E11	30	793,0 ± 1,9	797,7 ± 1,9	797,2 ± 1,9	796 ± 4

Tabla 5.11. Potencia máxima para distintos valores de dosis de protones de 10 MeV. La temperatura de la muestra durante la irradiación y la medición fue de 30 °C.

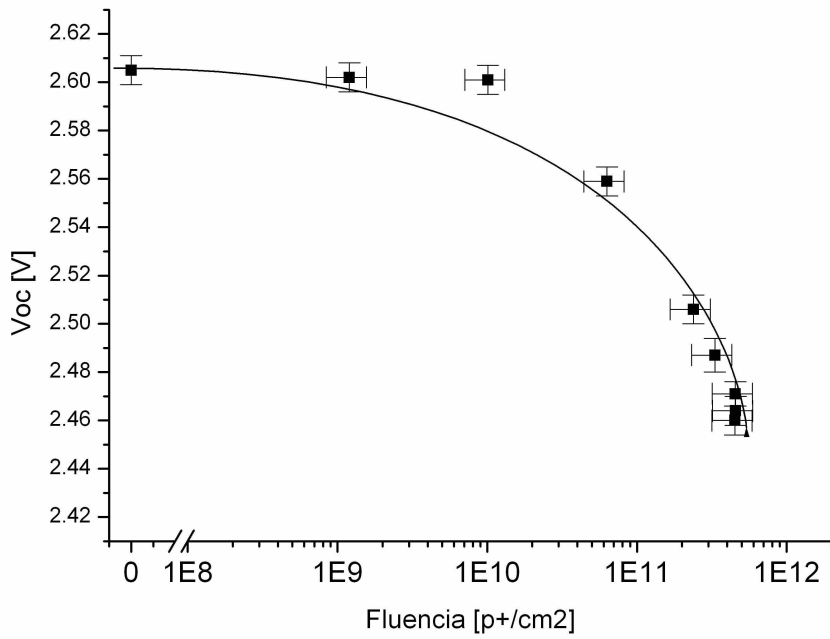


Figura 5.21. Voltaje a circuito abierto en función de la fluencia de protones de 10 MeV.

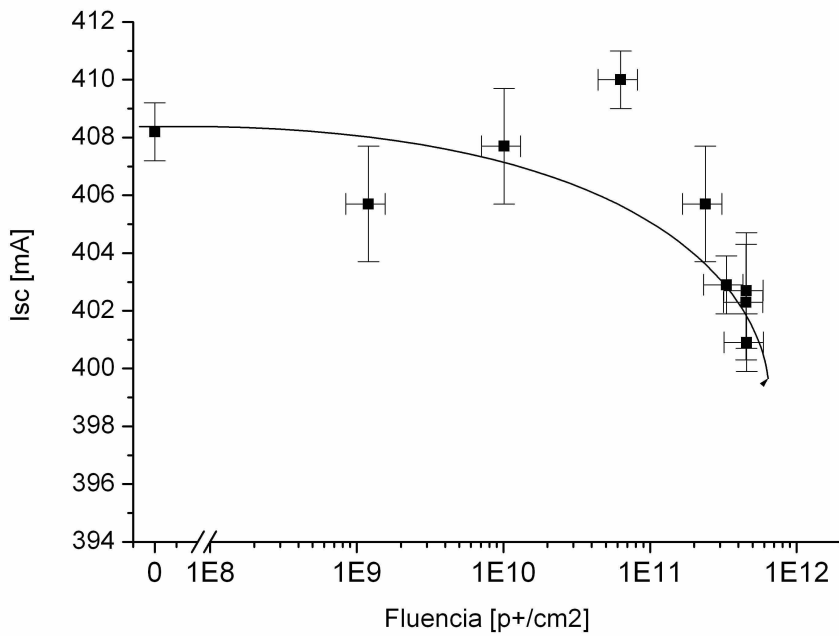


Figura 5.22. Corriente de cortocircuito en función de la fluencia de protones de 10 MeV.

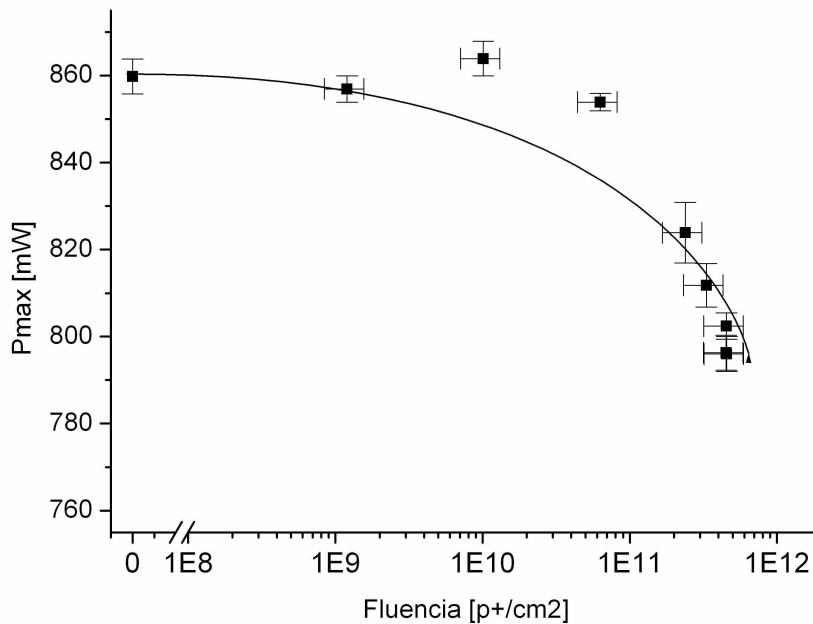


Figura 5.23. Potencia máxima en función de la fluencia de protones de 10 MeV.

Irradiación a baja temperatura

La celda fue irradiada con dosis incrementales de protones de 10 MeV mientras se mantenía a una temperatura de -140 ± 2 °C. Antes de bajar la temperatura, se midió la curva I-V a temperatura ambiente en condición BOL y al llegar a la condición EOL se midió a baja temperatura e inmediatamente después a temperatura ambiente. Los datos que se presentan a continuación son los que corresponden a curvas I-V medidas exclusivamente a baja temperatura, entre la condición BOL y la EOL.

En las tablas 5.12, 5.13 y 5.14 se muestran los valores de tensión de circuito abierto, corriente de cortocircuito y potencia máxima (V_{oc} , I_{sc} y P_{max}) medidos a -140 ± 2 °C en función de la dosis recibida. El error indicado en la última columna de las tres tablas es la suma cuadrática de los errores estadístico y experimental. Los valores promedio de las tablas se grafican en las figuras 5.24, 5.25 y 5.26 respectivamente.

Nombre Archivo	Fluencia [p^+/cm^2]	Error Fluencia [%]	Voc (V)			Voc Promedio (V)
			a	b	c	
Cero	0	0	3.607 ± 0.006	3.608 ± 0.006	3.606 ± 0.006	3.607 ± 0.007
Uno	2.13E9	30	3.599 ± 0.006	3.598 ± 0.006	3.600 ± 0.006	3.599 ± 0.007
Dos	1.13E10	30	3.603 ± 0.006	3.603 ± 0.006	3.606 ± 0.006	3.604 ± 0.007
Tres	9.47E10	30	3.593 ± 0.006	3.600 ± 0.006	3.600 ± 0.006	3.598 ± 0.008
Cuatro	5.05E11	30	3.561 ± 0.006	3.562 ± 0.006	3.562 ± 0.006	3.562 ± 0.006
Cinco	7.0E11	30	3.554 ± 0.006	3.556 ± 0.006	3.557 ± 0.006	3.556 ± 0.007

Tabla 5.12. Voltaje a circuito abierto para distintos valores de fluencia de protones de 10 MeV. La temperatura de la muestra durante la irradiación y la medición fue de $-140\text{ }^\circ\text{C}$. Se computa el error como la suma cuadrática del error experimental más la desviación estándar.

Nombre Archivo	Fluencia [p^+/cm^2]	Error Fluencia [%]	Isc (mA)			Isc Promedio (mA)
			a	b	c	
Cero	0	0	362 ± 1	363 ± 1	365 ± 1	363 ± 2
Uno	2.13E9	30	360 ± 1	361 ± 1	361 ± 1	361 ± 2
Dos	1.13E10	30	363 ± 1	365 ± 1	367 ± 1	365 ± 3
Tres	9.47E10	30	355 ± 1	355 ± 1	357 ± 1	356 ± 2
Cuatro	5.05E11	30	335 ± 1	337 ± 1	337 ± 1	336 ± 2
Cinco	7.0E11	30	329 ± 1	331 ± 1	332 ± 1	331 ± 2

Tabla 5.13. Corriente de cortocircuito para distintos valores de fluencia de protones de 10MeV. La temperatura de la muestra durante la irradiación y la medición fue de $-140\text{ }^\circ\text{C}$.

Nombre Archivo	Fluencia [p^+/cm^2]	Error Fluencia [%]	Pmax (mW)			Pmax Promedio (mW)
			a	b	c	
Cero	0	0	1113 ± 5	1119 ± 5	1108 ± 5	1113 ± 8
Uno	2.13E9	30	1095 ± 5	1100 ± 5	1107 ± 5	1101 ± 8
Dos	1.13E10	30	1123 ± 5	1125 ± 5	1122 ± 5	1123 ± 6
Tres	9.47E10	30	1079 ± 5	1084 ± 5	1086 ± 5	1083 ± 7
Cuatro	5.05E11	30	1014 ± 5	1018 ± 5	1012 ± 5	1015 ± 6
Cinco	7.0E11	30	993 ± 5	1003 ± 5	995 ± 5	997 ± 7

Tabla 5.14. Potencia máxima para distintos valores de fluencia de protones de 10 MeV. La temperatura de la muestra durante la irradiación y la medición fue de $-140\text{ }^\circ\text{C}$.

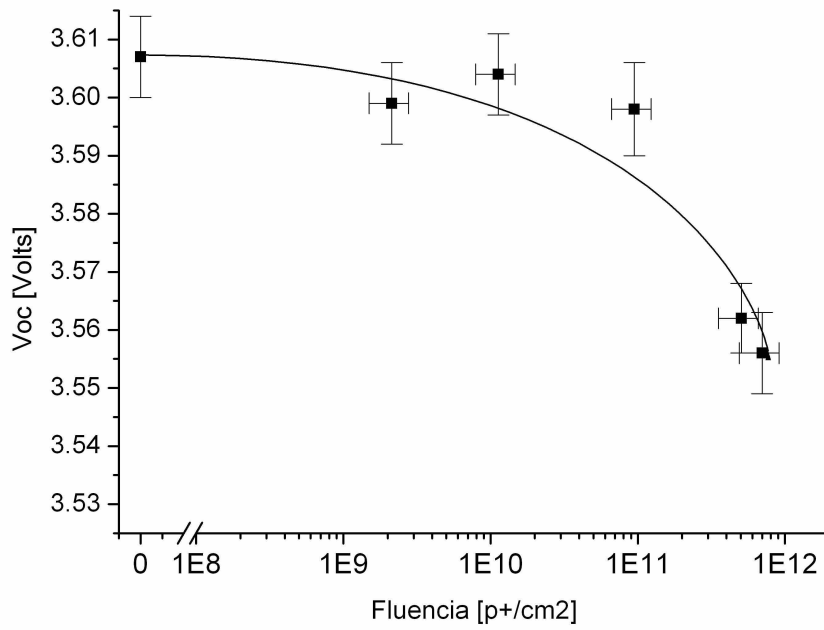


Figura 5.24. Voltaje a circuito abierto en función de la fluencia de protones de 10 MeV.

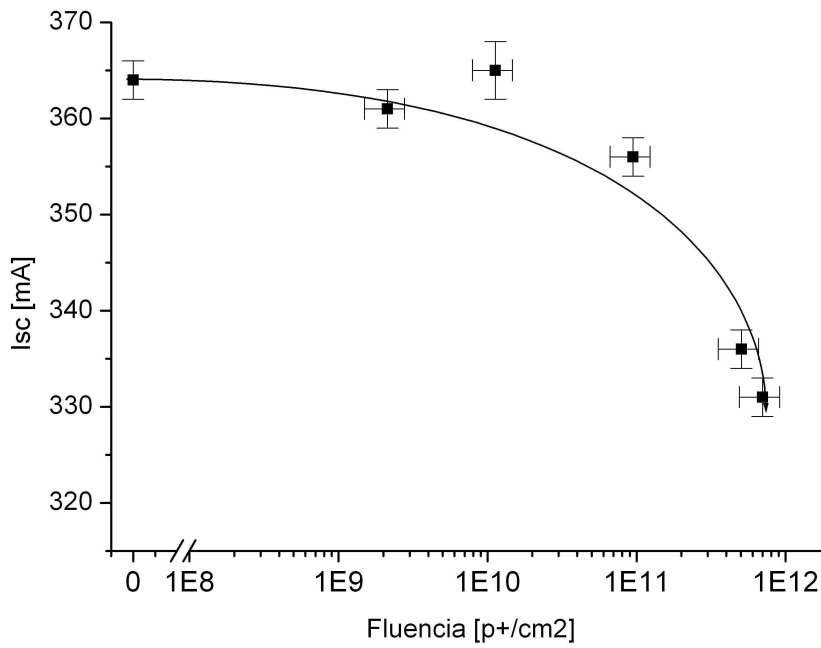


Figura 5.25. Corriente de cortocircuito en función de la fluencia de protones de 10 MeV.

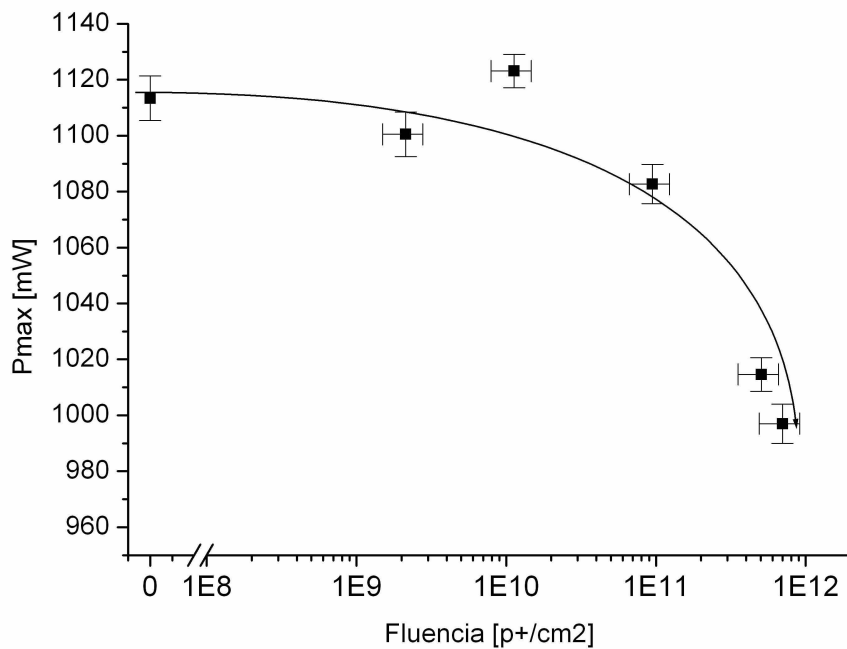


Figura 5.26. Potencia máxima en función de la fluencia de protones de 10 MeV.

Irradiación a alta temperatura

La celda fue irradiada con dosis incrementales de protones de 10 MeV mientras se mantenía a una temperatura de 80 ± 1 °C. Antes de subir la temperatura, se midió la curva I-V a temperatura ambiente en condición BOL y al llegar a la condición EOL se midió a alta temperatura e inmediatamente después a temperatura ambiente. Los datos que se presentan a continuación son los que corresponden a curvas I-V medidas exclusivamente a alta temperatura, entre la condición BOL y la EOL.

En las tablas 5.15, 5.16 y 5.17 se muestran los valores de tensión de circuito abierto, corriente de cortocircuito y potencia máxima (V_{oc} , I_{sc} y P_{max}) medidos a 80 ± 1 °C en función de la dosis recibida. El error indicado en la última columna de las tres tablas es la suma cuadrática de los errores estadístico y experimental. Los valores promedio de las tablas se grafican en las figuras 5.27, 5.28 y 5.29 respectivamente.

Nombre Archivo	Fluencia [p^+/cm^2]	Error Fluencia [%]	Voc [V]			Voc Promedio [V]
			A	b	c	
Cero	0	0	2.094 ± 0.005	2.082 ± 0.005	2.082 ± 0.005	2.086 ± 0.009
Uno	4.97E10	30	2.084 ± 0.005	2.090 ± 0.005	2.100 ± 0.005	2.09 ± 0.01
Dos	1.11E11	30	2.08 ± 0.005	2.091 ± 0.005	2.097 ± 0.005	2.09 ± 0.01
Tres	3.18E11	30	2.093 ± 0.005	2.082 ± 0.005	2.077 ± 0.005	2.08 ± 0.01
Cuatro	4.91E11	30	2.093 ± 0.005	2.085 ± 0.005	2.074 ± 0.005	2.08 ± 0.01
Cinco	2.07E12	30	2.069 ± 0.005	2.067 ± 0.005	2.056 ± 0.005	2.064 ± 0.009

Tabla 5.15. Voltaje a circuito abierto para distintos valores de fluencia de protones de 10 MeV. La temperatura de la muestra durante la irradiación y la medición fue de 80 °C. Se computa el error como la suma cuadrática del error experimental más la desviación estándar.

Nombre Archivo	Fluencia [p^+/cm^2]	Error Fluencia [%]	Isc (mA)			Isc Promedio (mA)
			A	b	c	
Cero	0	0	378.1 ± 0.1	377.5 ± 0.1	376.4 ± 0.1	377 ± 1
Uno	4.97E10	30	379.1 ± 0.1	378.2 ± 0.1	377.2 ± 0.1	378 ± 1
Dos	1.11E11	30	375.0 ± 0.1	375.8 ± 0.1	376.5 ± 0.1	376 ± 1
Tres	3.18E11	30	375.2 ± 0.1	376.6 ± 0.1	378.3 ± 0.1	377 ± 2
Cuatro	4.91E11	30	376.0 ± 0.1	374.9 ± 0.1	375.0 ± 0.1	375 ± 1
Cinco	2.07E12	30	374.0 ± 0.1	374.5 ± 0.1	376.3 ± 0.1	375 ± 2

Tabla 5.16. Corriente de cortocircuito para distintos valores de fluencia de protones de 10MeV. La temperatura de la muestra durante la irradiación y la medición fue de 80 °C.

Nombre Archivo	Fluencia [p^+/cm^2]	Error Fluencia [%]	Pmax (mW)			Pmax Promedio (mW)
			a	b	c	
Cero	0	0	624 ± 2	624 ± 2	623 ± 2	623 ± 3
Uno	$4.97E10$	30	624 ± 2	623 ± 2	621 ± 2	623 ± 3
Dos	$1.11E11$	30	622 ± 2	627 ± 2	620 ± 2	623 ± 4
Tres	$3.18E11$	30	617 ± 2	620.0 ± 2	622 ± 2	620 ± 4
Cuatro	$4.91E11$	30	615 ± 2	614 ± 2	615 ± 2	615 ± 2
Cinco	$2.07E12$	30	604 ± 2	612 ± 2	612 ± 2	610 ± 5

Tabla 5.17. Potencia máxima para distintos valores de fluencia de protones de 10 MeV. La temperatura de la muestra durante la irradiación y la medición fue de 80 °C.

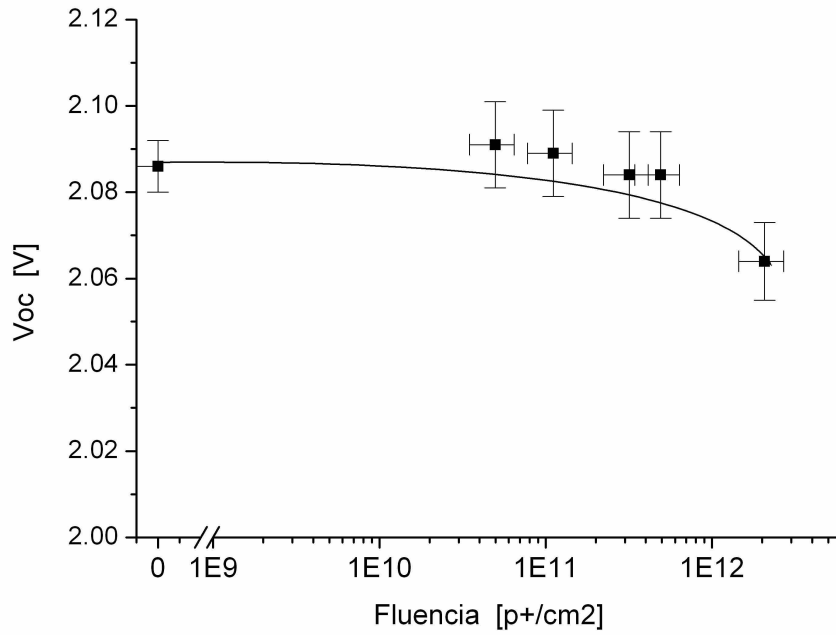


Figura 5.27. Voltaje a circuito abierto en función de la fluencia de protones de 10 MeV.

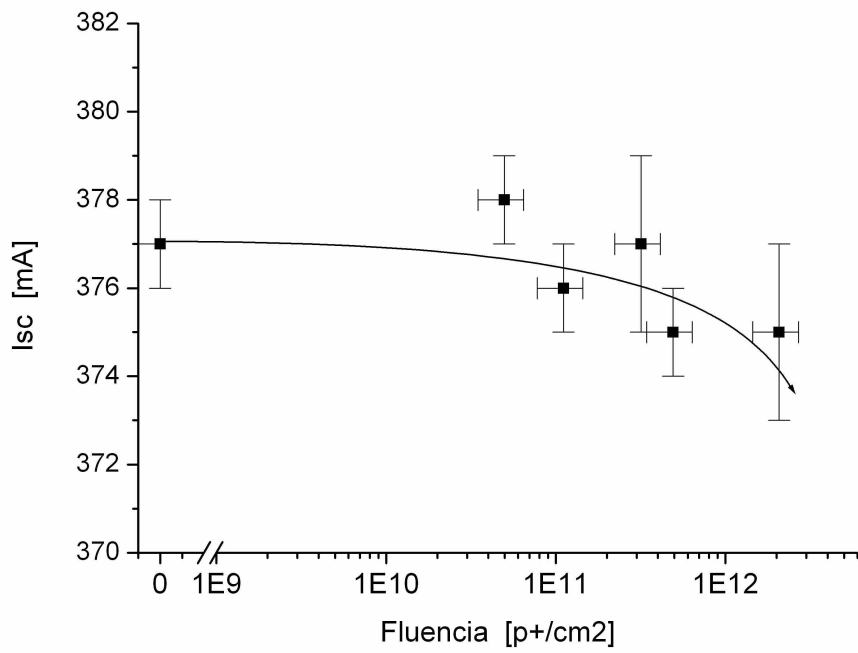


Figura 5.28. Corriente de cortocircuito en función de la fluencia de protones de 10 MeV.

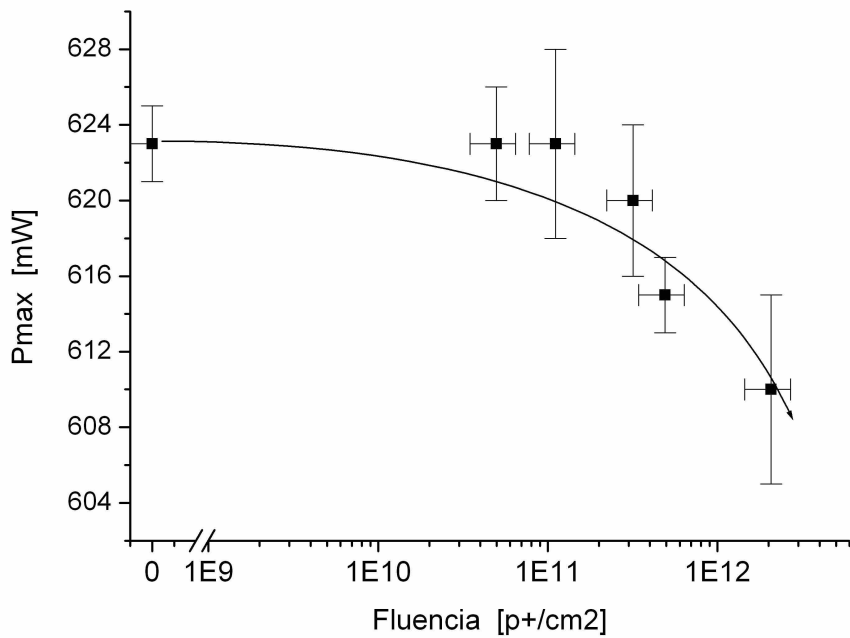


Figura 5.29. Potencia máxima en función de la fluencia de protones de 10 MeV.

Análisis de mediciones con simulador:

Las mediciones con simulador solar muestran reducciones en los parámetros fotovoltaicos.

En la tabla 5.18 se muestra una comparación entre las tasas de reducción de los parámetros Voc, Isc y Pmax en la condición EOL respecto a los mismos valores en la condición BOL. Para facilitar la visualización de resultados, todos los valores fueron normalizados a sus valores BOL correspondientes y se muestran en la tabla 5.19.

Para los parámetros Isc y Pmax, se observa que el daño producido por irradiación con protones es más relevante cuanto menor es la temperatura de la celda. La excepción es el valor de Voc, que muestra un daño levemente mayor a temperatura ambiente que a baja temperatura.

Temperatura de irradiación y medición	Parámetro medido	BOL	EOL	Fluencia para EOL [error 30%]
Tamb	Voc	2,605 ± 0,006	2,464 ± 0,006	$4,55 \cdot 10^{11}$ p ⁺ /cm ²
	Isc	408 ± 2	401 ± 2	
	Pmax	860 ± 4	796 ± 4	
Baja T	Voc	3,607 ± 0,006	3,562 ± 0,006	$5,0 \cdot 10^{11}$ p ⁺ /cm ²
	Isc	363 ± 2	336 ± 2	
	Pmax	1113 ± 8	1015 ± 6	
Alta T	Voc	2,086 ± 0,006	2,084 ± 0,006	$4,9 \cdot 10^{11}$ p ⁺ /cm ²
	Isc	377 ± 1	375 ± 1	
	Pmax	623 ± 2	618 ± 2	

Tabla 5.18. Valores extraídos de las tablas presentadas 5.15, 5.16 y 5.17, que corresponden a los tres parámetros Voc, Isc y Pmax para las condiciones BOL y EOL. Las temperaturas son Tamb= 28 °C, Alta T = 80 °C y Baja T = -140 °C.

Parámetro medido	Condición BOL	Condición EOL	Temperatura
Voc	1	99,9 %	Alta T
		94,6 %	Tamb
		98,7 %	<i>Baja T</i>
Isc	1	99,5 %	Alta T
		98,2 %	Tamb
		92,6 %	<i>Baja T</i>
Pmax	1	98,6 %	Alta T
		92,6 %	Tamb
		91,1 %	<i>Baja T</i>

Tabla 5.19. El valor BOL corresponde al valor medido a la temperatura correspondiente antes de comenzar la irradiación. Las temperaturas son Tamb= 28 °C, Alta T = 80 °C y Baja T = -140 °C. La condición EOL corresponde al valor medido a la temperatura correspondiente luego de

llegar a las siguientes fluencias: $4,55 \cdot 10^{11} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ para Tamb, $5,0 \cdot 10^{11} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ para Baja T y $4,9 \cdot 10^{11} \text{ p}^+/\text{cm}^2$ para Alta T, y fue normalizada a su respectivo valor en condición BOL. El error en la medición de las fluencias es de 30%. La temperatura corresponde a temperatura de medición y de irradiación.

Para complementar estos datos y facilitar su visualización, incluimos aquí una tabla que muestra las mediciones hechas iluminando con dicroica y compara los resultados obtenidos irradiando a 28°C con los obtenidos irradiando a 80°C . Se tomaron los valores más cercanos al valor EOL ($1,04 \cdot 10^{12} \text{ p}^+/\text{cm}^2$) de las tablas 5.2 a 5.7. Esta comparación se muestra en la tabla 5.20. Se puede ver que la irradiación a alta temperatura fue menos dañina que la irradiación a temperatura ambiente.

Parámetro medido	28°C	80°C
	Valor a Fluencia= $1,7 \cdot 10^{11} \text{ p}^+/\text{cm}^2$	Valor a Fluencia= $1,9 \cdot 10^{11} \text{ p}^+/\text{cm}^2$
Voc	95 %	94 %
Isc	88 %	99 %
Pmax	82 %	93 %

Tabla 5.20. Comparación entre los resultados obtenidos irradiando a 28°C y los obtenidos irradiando a 80°C . Iluminación con lámpara dicroica. Se muestra el valor porcentual del parámetro a la fluencia indicada respecto a su valor a fluencia cero (BOL).

El diseño de las celdas ATJ se hace considerando que la celda que más se daña es la del medio (Ref. 54). Es por ello que esta celda está sobredimensionada para que en la condición EOL la corriente que genera se equipare con la de la celda superior (Ref. 26). La celda inferior, que es la de germanio, también está sobredimensionada para que en la condición EOL la corriente que aporta no sea la limitante del conjunto (Ref. 55). En la condición BOL, la celda que limita la corriente es la superior. Comparando las reducciones en los parámetros Voc, Isc y Pmax medidas con dicroica y con simulador, se observa una mayor reducción en las mediciones con dicroica.

El espectro de luz de la lámpara dicroica tiene menor componente relativa en las frecuencias altas, que son las que aprovecha la celda superior. Iluminando con dicroica se activa relativamente más la celda superior. Como esta celda es la que limita la corriente, esto podría sugerir que al medir la degradación con lámpara dicroica, se observa más el daño producido en la celda superior.

5.2.3. Resumen de resultados y comparación con datos de EMCORE. Calificación de celdas ATJ.

Las diferencias entre nuestras mediciones y las de Emcore son básicamente dos:

1. Utilizamos protones en lugar de electrones
2. Irradiamos y medimos a 80°C , en tanto que Emcore irradia a temperatura ambiente y luego de cada irradiación sube la temperatura a 80°C para obtener coeficientes de variación con la

temperatura (Ref. 54). (no figuran datos de esta variación al reducir la temperatura por debajo de la ambiente).

En la sección precedente (medición con dicróica), se compararon los valores de los parámetros medidos a temperatura ambiente con los medidos a alta temperatura y luego se mostró que irradiando y midiendo a alta temperatura se observa menos daño que irradiando y midiendo a temperatura ambiente.

En este trabajo observamos que la irradiación con protones produce una reducción en el voltaje máximo entregado, con una pequeña reducción de la corriente y una más relevante reducción de potencia.

La degradación es menos pronunciada en el caso de irradiación a elevada temperatura.

Para el modelado del comportamiento del panel solar durante la misión, actualmente se utiliza un índice de degradación por irradiación independiente de la temperatura.

Como para las órbitas seleccionadas por CONAE el panel solar se encuentra la mayor parte del tiempo iluminado y a alta temperatura, esto significa que la degradación de la potencia del panel solar durante la misión será menor que la predicha.

5.3. Experimentos usando el LINAC del CAB

5.3.1. Experimentos realizados

En esta sección se describe la metodología utilizada para caracterizar el daño producido por electrones en las celdas solares EMCORE modelo ATJ. Como se mencionó anteriormente, estas celdas son las utilizadas en los paneles solares de los satélites en construcción.

La vida útil nominal del satélite es de tres o cinco años, según la misión particular. La vida útil real en operación puede llegar a los ocho años, pero el valor de cinco años es el que se utiliza para el cálculo de amortización del capital y rentabilidad del satélite puesto en órbita (Ref. 4).

Como se mencionó en la sección 3.1.3, para simular el daño acumulativo a producirse durante la vida útil del satélite, se tomó como referencia que para la dosis de electrones esperable los valores de fluencia equivalente total para electrones de 1 MeV estarían por debajo de $1,46 \cdot 10^{14} \text{ e}^-/\text{cm}^2$ para una duración de 3 años y por debajo de $1,77 \cdot 10^{14} \text{ e}^-/\text{cm}^2$ para una duración de 5 años. Se utilizaron electrones de 3 MeV porque el LINAC no provee electrones de 1 MeV y porque con 3 MeV estamos produciendo ligeramente más daño que con 1 MeV y entonces estamos del lado seguro en cuanto a la evaluación del daño. En la curva superior izquierda de la figura 3.4 se pueden ver las curvas de degradación de la potencia de una celda de GaAs/Ge, parecida a la que irradiamos, para irradiaciones con protones y electrones. Se puede ver que los protones dañan más cuanto menor es su energía en el rango indicado. Lo contrario sucede con los electrones. Los electrones de 2,4 MeV producen ligeramente más daño que los de 1 MeV. El acelerador Linac tiene una energía de diseño de 2,6 MeV, pero mediciones realizadas por Igor Prario indicaron una energía de 3 MeV (Ref. 56) y este es el valor que tomamos como válido.

5.3.2. Resumen y análisis de resultados. Calificación de ATJ con electrones

En las tablas 5.21, 5.22 y 5.23 se muestran los valores de tensión a circuito abierto, corriente de cortocircuito y potencia máxima (V_{oc} , I_{sc} y P_{max}) medidos a 30 °C en función de la dosis recibida. Los valores promedio de las tablas se grafican en las figuras 5.30, 5.31 y 5.32 respectivamente. Las curvas indican una degradación en el desempeño de la celda a medida que aumenta la fluencia acumulada. El valor de la dosis se obtuvo midiendo la corriente de electrones con una copa de Faraday removible que se intercaló periódicamente en el camino del haz antes de impactar sobre la celda.

Nombre Archivo	Fluencia [e^-/cm^2]	Error Fluencia [%]	Voc [V]			Voc Promedio [V]
			a	b	C	
Cero	0	0	2.439 ± 0,005	2.401 ± 0,005	2.402 ± 0,005	2.41 ± 0.03
Uno	1,46E11	30	2.413 ± 0,005	2.401 ± 0,005	2.445 ± 0,005	2.42 ± 0.03
Dos	1,26E12	30	2.402 ± 0,005	2.398 ± 0,005	2.404 ± 0,005	2.40 ± 0.01
Tres	1,24E13	30	2.389 ± 0,005	2.390 ± 0,005	2.406 ± 0,005	2.39 ± 0.02
Cuatro	1,24E14	30	2.312 ± 0,005	2.316 ± 0,005	2.329 ± 0,005	2.32 ± 0.02
Cinco	8,84E14	30	2.172 ± 0,005	2.156 ± 0,005	2.126 ± 0,005	2.15 ± 0.03
Seis	1,65E15	30	2.057 ± 0,005	2.078 ± 0,005	2.104 ± 0,005	2.08 ± 0.03
Siete	3,02E15	30	1.997 ± 0,005	1.998 ± 0,005	2.018 ± 0,005	2.00 ± 0.02
Ocho	3,02E15	30	2.025 ± 0,005	2.025 ± 0,005	2.033 ± 0,005	2.03 ± 0.01

Tabla 5.21. Voltaje a circuito abierto para distintos valores de dosis de electrones de 3 MeV. La temperatura de la muestra durante la irradiación y la medición fue de 30 °C.

Nombre Archivo	Fluencia [e ⁻ /cm ²]	Error Fluencia [%]	Isc [mA]			Isc Promedio [mW]
			a	b	c	
Cero	0	0	204 ± 0,1	205 ± 0,1	201 ± 0,1	203 ± 3
Uno	1,46E11	30	202 ± 0,1	204 ± 0,1	205 ± 0,1	204 ± 2
Dos	1,26E12	30	202 ± 0,1	206 ± 0,1	207 ± 0,1	205 ± 3
Tres	1,24E13	30	206 ± 0,1	206 ± 0,1	205 ± 0,1	206 ± 1
Cuatro	1,24E14	30	204 ± 0,1	205 ± 0,1	202 ± 0,1	204 ± 2
Cinco	8,84E14	30	200 ± 0,1	202 ± 0,1	205 ± 0,1	202 ± 3
Seis	1,65E15	30	200 ± 0,1	202 ± 0,1	202 ± 0,1	201 ± 2
Siete	3,02E15	30	197 ± 0,1	198 ± 0,1	197 ± 0,1	197 ± 1
Ocho	3,02E15	30	198 ± 0,1	198 ± 0,1	198 ± 0,1	198 ± 1

Tabla 5.22. Corriente de cortocircuito para distintos valores de dosis de electrones de 3 MeV. La temperatura de la muestra durante la irradiación y la medición fue de 30 °C.

Nombre Archivo	Fluencia [e ⁻ /cm ²]	Error Fluencia [%]	Pmax [mW]			Pmax Promedio [mW]
			a	b	c	
Cero	0	0	427 ± 2	418 ± 2	414 ± 2	420 ± 7
Uno	1,46E11	30	417 ± 2	421 ± 2	427 ± 2	422 ± 6
Dos	1,26E12	30	417 ± 2	422 ± 2	424 ± 2	421 ± 4
Tres	1,24E13	30	418 ± 2	422 ± 2	422 ± 2	421 ± 3
Cuatro	1,24E14	30	400 ± 2	404 ± 2	401 ± 2	402 ± 3
Cinco	8,84E14	30	359 ± 2	359 ± 2	357 ± 2	359 ± 2
Seis	1,65E15	30	333 ± 2	340 ± 2	345 ± 2	339 ± 7
Siete	3,02E15	30	312 ± 2	313 ± 2	312 ± 2	312 ± 2
Ocho	3,02E15	30	320 ± 2	318 ± 2	319 ± 2	319 ± 2

Tabla 5.23. Potencia máxima para distintos valores de dosis de electrones de 3 MeV. La temperatura de la muestra durante la irradiación y la medición fue de 30 °C.

La irradiación se realizó aumentando la dosis de manera progresiva. Cada valor de dosis es un orden de magnitud superior al anterior, comenzando en 10¹¹ e⁻/cm².seg. y terminando con la dosis máxima a la cual se deseaba llegar. En estas mediciones se llegó a una dosis acumulada máxima de 3 x 10¹⁵ e⁻/cm².seg. Antes de comenzar la irradiación y luego de cada irradiación incremental se midió la curva característica. Durante la irradiación no se iluminaron las celdas.

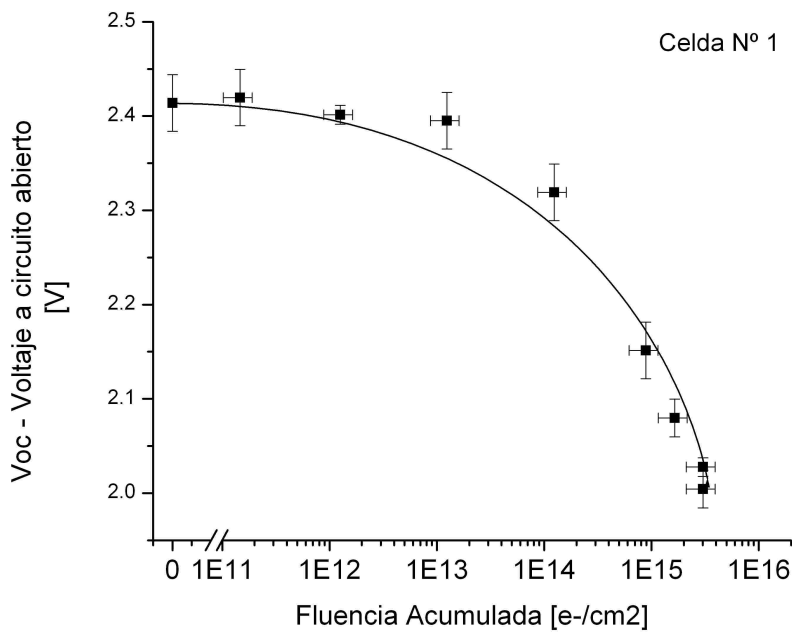


Figura 5.30. Tensión a circuito abierto en función de la dosis de electrones de 3 MeV aplicada a una celda Emcore ATJ. Cada punto es un promedio de tres mediciones.

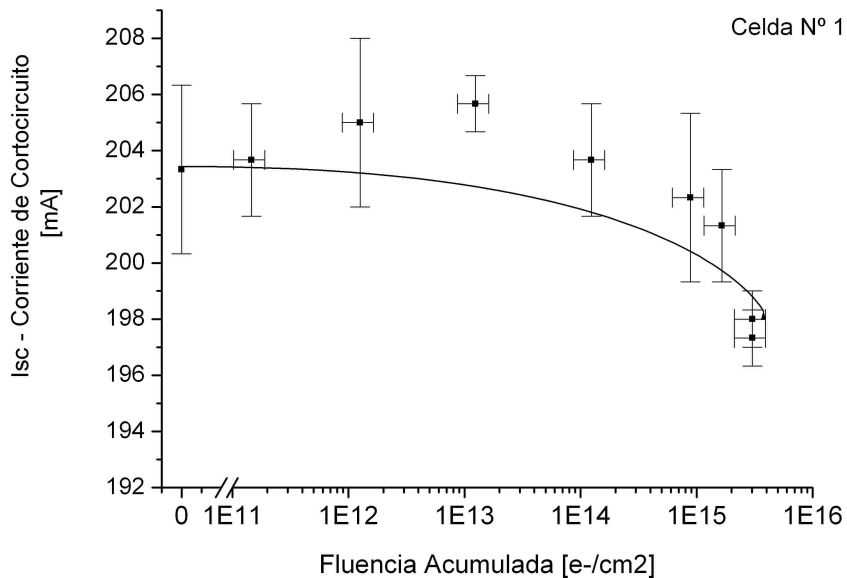


Figura 5.31. Corriente de cortocircuito en función de la dosis de electrones de 3 MeV aplicada a una celda Emcore ATJ. Cada punto es un promedio de tres mediciones.

En este trabajo observamos que por la irradiación con electrones se produce una reducción en la potencia máxima entregada, con una leve reducción de la corriente y una más relevante reducción de voltaje.

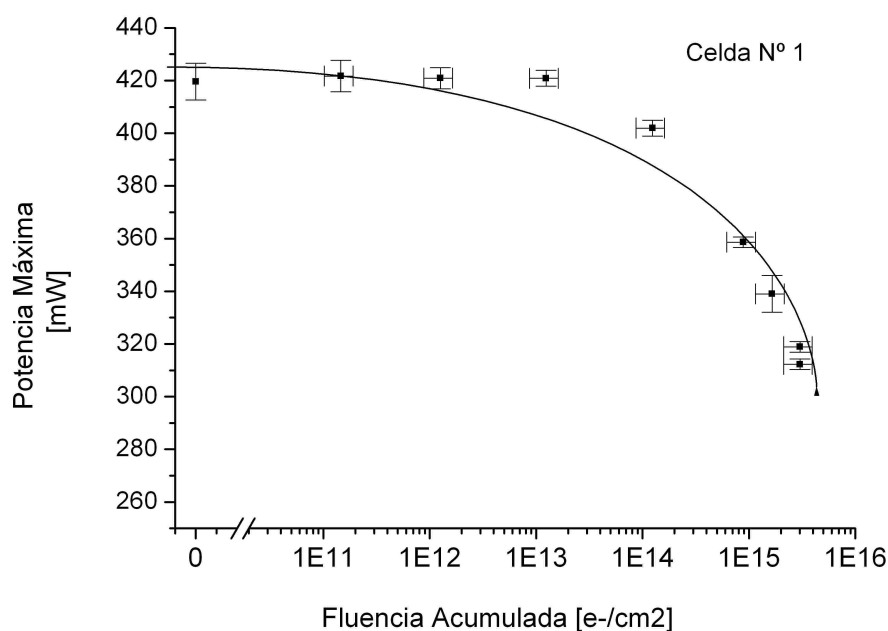


Figura 5.32. Potencia máxima en función de la dosis de electrones de 3 MeV aplicada a una celda Emcore ATJ. Cada punto es un promedio de tres mediciones.

Se irradiaron dos celdas adicionales pero en estos dos casos no se llegó al valor de fluencia de $3 \cdot 10^{15} \text{ e}^-/\text{cm}^2$.

En la tabla 5.24 se muestran los valores EOL de los parámetros Voc, Isc y Pmax medidos para las tres celdas irradiadas y referidos a la condición BOL. Para hacer la comparación se tomó el valor de fluencia más cercano a $1,77 \cdot 10^{14} \text{ e}^-/\text{cm}^2$, que es la condición EOL descrita en la sección 3.3.1 para una misión de 5 años).

A modo de comparación, para la única celda que fue irradiada hasta $3 \cdot 10^{15} \text{ e}^-/\text{cm}^2$, los valores EOL/BOL de Voc, Isc y Pmax fueron 0,83, 0,97 y 0,75 respectivamente.

Parámetro medido	Condición BOL	Celda 1	Celda 2	Celda 3	Valor Promedio
		Fluencia $1,24 \cdot 10^{14} \text{ e}^-/\text{cm}^2$	Fluencia $1,34 \cdot 10^{14} \text{ e}^-/\text{cm}^2$	Fluencia $1,19 \cdot 10^{14} \text{ e}^-/\text{cm}^2$	
Voc	1	0,96	0,94	0,96	0,95
Isc	1	0,99	0,94	0,99	0,97
Pmax	1	0,96	0,93	0,97	0,95

Tabla 5.24. Valores de Voc, Isc y Pmax referidos a la condición BOL para las tres celdas irradiadas con electrones de 3 MeV. En cada columna se muestran los datos correspondientes a una celda y la fluencia a la cual fueron medidos. Hay ligeras diferencias entre los valores de fluencia porque son mediciones realizadas por separado. El error en la medición de la fluencia es del 30 %. La temperatura de medición y de irradiación es la temperatura ambiente (28 °C).

Se observa que la reducción en el valor de Isc es menor que las reducciones en Voc y Pmax. Esto concuerda con lo observado para la irradiación con protones.

5.4. Resumen general y comparación de resultados entre TANDAR y LINAC

En este trabajo se irradiaron celdas ATJ Emcore con protones de 10 MeV. Se tomaron los valores de degradación predichos en un trabajo anterior (ver Apéndice 3), que predecían para Voc, Isc y Pmax, considerando un período de misión de 5 años y un nivel de confianza de 99,9%, valores finales de degradación calculados respecto a BOL de 94,4%, 99,8% y 94,2% respectivamente.

Los valores EOL/BOL para Voc, Isc y Pmax medidos en este trabajo fueron:

	Temperatura	Voc [%]	Voc predicha por JPL	Isc [%]	Isc predicha por JPL	Pmax [%]	Pmax predicha por JPL
Electrones de 3 MeV	28 °C	95		97		95	
Protones de 10 MeV	80 °C	99.9		99.5		98.6	----
	28 °C	94.6	94.4**	98.2	99.8**	92.6	94.2**
	-140 °C	98.7		92.6		91.1	----

Tabla 5.25. Resumen de valores de degradación de Voc, Isc y Pmax medidos en este trabajo. La temperatura indicada es de irradiación y medición. Los valores porcentuales están referidos a los correspondientes valores BOL. Datos tomados de las tablas 5.19 y 5.24. Se indican también los valores predichos por el método JPL para mediciones a temperatura ambiente. (**) Corresponde a electrones de 1 MeV (ver tabla A3-4 en el Apéndice 3 para más detalles).

Para la Pmax, los valores de reducción a alta temperatura son mejores para protones que los predichos por JPL a temperatura ambiente (98,6 % comparado con 94,2 %). Para Voc, los valores medidos a alta temperatura también son mejores que los predichos a temperatura ambiente (99,9 % comparado con 94,4 %). Los valores de Isc medidos a alta temperatura son comparables con los predichos a temperatura ambiente (99,5 % comparado con 99,8 %).

Pero los valores medidos a temperatura ambiente y baja temperatura son ligeramente peores para todos los parámetros, excepto para Voc e Isc a temperatura ambiente, donde son comparables.

Para la órbita considerada, el panel solar se encuentra iluminado permanentemente durante 8 meses y durante los otros 4 meses tiene un eclipse diario con una duración máxima de 19 minutos (Ref. 57). En el trabajo de la mencionada referencia, fueron simuladas las órbitas de los dos satélites; SAOCOM y SAC-D. La diferencia entre uno y otro es el mes en que ocurren los eclipses. El eclipse máximo ocurre en diciembre para el SAOCOM y en junio

para el SAC-D. Esto significa que el panel solar se encontrará como mínimo un 94 % del tiempo de la misión a alta temperatura, condición en la cual la degradación medida para protones es menor a la medida a temperatura ambiente y baja temperatura y también menor a la predicha por la modelización JPL.

Dado que no conocemos los factores de conversión de daño con protones a daño con electrones para la celda Emcore ATJ, para calcularlos se compararon las fluencias que producen una reducción equivalente en los parámetros Voc, Isc y Pmax utilizando las mediciones realizadas a temperatura ambiente en el presente trabajo. Para poder comparar resultados se tomaron las mediciones con protones a temperatura ambiente utilizando iluminación dicróica, ya que las mediciones con electrones fueron realizadas únicamente con este tipo de iluminación. Para encontrar valores dentro de los rangos de medición en todas las curvas consideradas (figuras 5.30 a 32 para electrones y figuras 5.11 a 13 para protones), se tomó una reducción del 98% en todos los parámetros. El valor obtenido para la relación de fluencia de electrones de 3 MeV a fluencia de protones de 10 MeV para Voc es aproximadamente 1000. Debido a que las barras de error en las curvas son demasiado grandes, para los otros parámetros (Isc y Pmax) no se obtuvieron valores razonables y no se presentan.

CAPÍTULO VI

- 6. Otras condiciones del ambiente espacial. Descripción general.
 - 6.1. Vacío. Ciclado de vacío. Generalidades
 - 6.2. Ciclado térmico
 - 6.2.1. Cámara de ciclado. Descripción. Protecciones
 - 6.2.2. Sistema de vacío y elementos accesorios
 - 6.2.3. Sistema de control de temperatura y adquisición de datos
 - 6.2.4. Portamuestras
 - 6.2.4.1. Sistema de ciclado por resistencia calefactora y flujo
 - 6.2.4.2. Sistema de ciclado por contacto
 - 6.2.5. Experimentos de ciclado térmico realizados sobre componentes satelitales. Resumen de resultados obtenidos. Calificación de celdas solares

6. Otras condiciones del ambiente espacial. Descripción general.

En los capítulos anteriores la descripción se concentró en los efectos producidos por la irradiación con protones y electrones. En este capítulo se presenta por separado el estudio de los efectos de otros factores presentes en el medioambiente espacial. Estos factores fueron mencionados en la sección 2.1, y también pueden afectar a los materiales y dispositivos de uso satelital. Más precisamente nos concentraremos en los efectos del alto vacío y de las fluctuaciones térmicas.

6.1. Vacío. Ciclado de vacío. Generalidades

Además de estar sometido a dosis de radiación, como se describió en capítulos anteriores, los satélites en órbita están sometidos a alto vacío y variaciones de temperatura. En las próximas secciones referiremos los experimentos realizados para calificar las celdas respecto a estas dos fuentes potenciales de daño. El vacío en el espacio interestelar está en el orden de 10^{-11} Pa ó 10^{-13} mbares (Ref. 58). El vacío en órbitas LEO es mejor que 10^{-8} mbares (Ref. 59). El máximo vacío al que se pudo someter a las celdas y componentes ensayados fue de 10^{-6} mbar. En estas condiciones no se ha observado ningún efecto de daño o deterioro atribuibles al ciclado de vacío. Dada la ínfima “diferencia de presión” o de esfuerzos mecánicos entre 10^{-6} y 10^{-8} mbar, se puede esperar que no se produzca tampoco ningún efecto por ciclado de vacío en órbitas tipo LEO.

6.2. Ciclado térmico

6.2.1. Cámara de ciclado. Descripción. Protecciones

El satélite en órbita experimenta cambios de temperatura al pasar de posiciones de sombra a posiciones iluminadas por el sol. Estas variaciones se conocen con suficiente detalle como para estimar con antelación tanto la temperatura del panel como la potencia esperable del mismo durante el tiempo que durará la misión, si es que está definida la órbita a utilizar. Las variaciones de temperatura tienen períodos que en general se asemejan al período orbital. Durante su vida útil un satélite volando en órbitas de baja altura experimenta decenas de miles de ciclos de temperatura y si hay que simular en el laboratorio un dispositivo con ese número de ciclos, se requeriría cerca de un año de ensayos si el período de un ciclo fuera del orden de 25 minutos. Para realizar los ensayos de ciclado en tiempos razonables, es necesario reducir al máximo el período de ciclado (Ref. 60).

Las opciones que se han implementado en otros laboratorios incluyen el uso de dos cámaras a diferentes temperaturas (Ref. 61). Una es un horno y la otra es una cámara frigorífica o recinto frío. El portamuestras se mueve entre uno y otro recinto. Se calienta por radiación infrarroja o convección y se enfría por convección o por inmersión en un líquido. En este último caso, las temperaturas mínimas están limitadas por la temperatura de solidificación del fluido del baño, que está en las pocas decenas de grados bajo cero. Hay un sistema automático de apertura y cierre de las compuertas de entrada al pasar de una cámara a otra. Estos métodos son lentos.

Otro método existente y que hemos implementado, consiste en calentar y enfriar sucesivamente el portamuestras. La desventaja de este método es que el portamuestras tiene adosada la masa del aditamento calefactor y la masa del aditamento refrigerador. Todas estas masas tienen que ser calentadas y enfriadas juntas, con lo cual la inercia térmica del conjunto es grande y los tiempos de ciclado también. Un segundo método de ciclado que hemos implementado es el de ciclado por contacto, en el cual solo se calienta y enfría el portamuestras.

En las siguientes secciones se describe la implementación de dos sistemas para ensayar térmicamente celdas solares y/o componentes electrónicos bajo condiciones similares a aquellas presentes durante la operación del satélite en el medio ambiente espacial, así como la construcción de una cámara para llevarlos a cabo. El primer sistema realiza el calentamiento por medio de una resistencia calefactora y el enfriamiento por flujo de nitrógeno líquido. El segundo sistema enfría y calienta por contacto con masas de cobre a temperaturas adecuadas. El primer sistema de ciclado térmico puede operar dentro de una cámara de alto vacío. El segundo sistema de ciclado térmico opera dentro de una cámara con atmósfera seca para evitar la condensación de agua en las superficies enfriadas con nitrógeno líquido. Opera a presión de una atmósfera de nitrógeno gaseoso, o bajo atmósfera controlada si esto fuese necesario. La ventaja del primer sistema es que puede operar en vacío en tanto que la ventaja del segundo sistema es su mayor velocidad. Como comparación, el tiempo de ciclado con el portamuestras vacío para un ciclo completo $-100^{\circ}\text{C} / +100^{\circ}\text{C} / -100^{\circ}\text{C}$ es de 10 minutos para el ciclado por flujo y de 5 min.15 s. para el ciclado por contacto.

El consumo de nitrógeno líquido en ambos sistemas es aproximadamente igual; un tanque de 140 litros cada día y medio de operación continua. La diferencia está en el período de ciclado y en el número de ciclos que se pueden realizar con cada método.

Cámara para ciclados térmicos:

Se construyó una cámara para realizar ciclados térmicos en dispositivos y componentes. La cámara se construyó a partir de elementos de una cámara existente que se utilizaba para realizar recubrimientos superficiales por evaporación. El recinto interior de la cámara tiene forma de cilindro recto con un diámetro interior de 29.5 cm. y una altura de 49.5 cm. En la figura 6.1 se muestra un esquema de la misma. La tapa es un disco removible y el cuerpo cilíndrico tiene conectado en su parte lateral inferior un tubo transversal de 22 cm. de diámetro por el cual se hace vacío dentro de la misma.

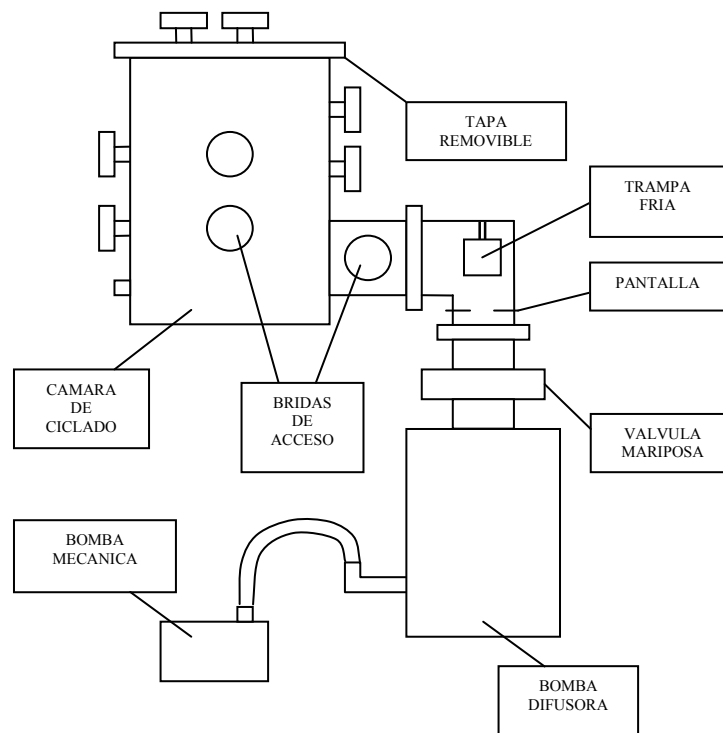


Figura 6.1. Esquema simplificado de la cámara de ciclado térmico.

Los trabajos de reciclado y acondicionamiento de la cámara incluyeron:

- La construcción y acondicionamiento de un armazón de soporte metálico para la cámara de ciclado, la bomba difusora y los elementos auxiliares.
- La limpieza, pulido, reciclado y reacondicionamiento de la cámara central, la bomba difusora, la válvula mariposa y la válvula de triple vía.
- El proyecto, diseño y construcción de componentes faltantes: codo de conexión principal entre la cámara y la difusora, adaptadores para tuberías, tubos de interconexión con sus bridas correspondientes, bocas de entrada para medidores de vacío, trampa fría, bridas y adaptadores para conectores eléctricos y electrónicos.

- El diseño y construcción del tablero eléctrico de control y protecciones.
- La implementación de un sistema de adquisición de datos.
- La construcción de un sistema de circulación automatizada de nitrógeno líquido y de aire comprimido en combinación con el calentamiento eléctrico del portamuestras.

En la operación normal de la cámara, se obtiene un vacío estable de 10^{-6} mbar, apto para ensayos de componentes de uso satelital.

6.2.2. Sistema de vacío y elementos accesorios

La cámara está fabricada íntegramente en acero inoxidable 304 y tiene 12 bridas de acceso Varian que admiten tanto el uso de O'Rings de elastómero como de anillos rígidos de Teflon. Todas las bridas tienen el mismo diámetro y están distribuidas del siguiente modo: tres bridas en la tapa removible, una brida en la base fija, seis bridas en la parte cilíndrica y dos bridas en el tubo horizontal de acceso. Estas últimas tienen cada una un pasante de vacío de alta potencia. Hay tres bridas con vidrio de tipo borosilicato que funcionan como ventanas de visión óptica hacia el interior de la cámara. En la figura 6.2 se puede ver una imagen de la cámara.



Figura 6.2: Fotografía de la cámara de ciclado térmico. Se ve el taque de nitrógeno líquido a la izquierda, el panel con los instrumentos de control a la derecha y el dispositivo de movimiento montado en el frente de la cámara propiamente dicha.

El tubo horizontal está conectado a través de un codo de 6 pulgadas de diámetro a una bomba difusora Cindovac modelo SBE. Se utiliza una bomba mecánica de dos etapas Edwards E2M28 de $28 \text{ m}^3/\text{hora}$ para efectuar el vacío primario de la difusora. Una válvula mariposa separa la cámara, el tubo

horizontal y el codo de la bomba difusora, permitiendo abrir la cámara sin tener que apagar y enfriar la difusora. Para ello una válvula manual de triple vía permite hacer las operaciones sin romper el vacío en la bomba difusora y sin dejarla desconectada de la bomba mecánica. La bomba difusora empleada tiene un diámetro de boca de 27 cm. y una altura de 60 cm., sin contar el bafle refrigerado con agua circulante ubicado sobre la boca de entrada. La difusora fue cargada con 500 ml. de aceite de siliconas Dow Corning DC704.

En el codo se ha instalado una trampa fría. Esta trampa es un recinto metálico cilíndrico que se llena con nitrógeno líquido desde la parte superior a través de un tubo. Rodeando al recinto cilíndrico hay una pantalla con forma de anillo metálico que evita que en régimen de flujo molecular, las moléculas de aceite o gas pasen alrededor del recinto de la trampa (ver figura 6.1).

Se ha construido un adaptador para conectar a la cámara la brida de diámetro 4 1/2" con un conector DB25 apto para alto vacío. Se ha construido un adaptador para poder conectar una de las bridas de 4 y 1/2 " con las bridas tipo Conflat de entrada a la cámara de ciclado térmico, que son de 1 y 1/2" de diámetro.

Circuito cerrado para enfriar la bomba difusora:

Se instaló un sistema de ciclo cerrado para enfriar la bomba difusora que usa agua deionizada para el serpentín de enfriamiento de la bomba. De este modo se extiende la vida útil de la difusora reduciendo el problema de corrosión interna en las tuberías y la deposición de sales u óxidos en el interior de los tubos.

El agua deionizada se enfría en un intercambiador de calor que consta de un recipiente plástico de polietileno conteniendo 200 litros de agua deionizada que circula a través de la difusora impulsada por una bomba de agua. En el recipiente del intercambiador están sumergidas tres serpentinas de tubos de cobre de diámetro 5/8" por las que a su vez circula agua común enfriada en una columna de enfriamiento exterior al edificio.

En la figura 6.3 se muestra un esquema del mencionado circuito de enfriamiento. La difusora está protegida térmicamente por un sensor de flujo de agua intercalado en el circuito de agua deionizada.

Pasantes multicontacto:

Se han adquirido dos bridas marca MDC con pasantes eléctricos multicontacto aptos para ultra-alto vacío (10^{-9} mbar). Estas bridas son del tipo Conflat, de diámetro 4 1/2" y tienen un conector DB-25 de 25 contactos cada una. Siendo componentes costosos, se ha optimizado su uso construyendo adaptadores para que los dos pasantes puedan ser utilizados en ambas cámaras indistintamente y según la necesidad.

Medición del grado de vacío:

El grado de vacío se mide con un cabezal de vacío marca BOC Edwards modelo Active WRG de rango extendido capaz de medir presiones entre una atmósfera y 10^{-9} mbares.

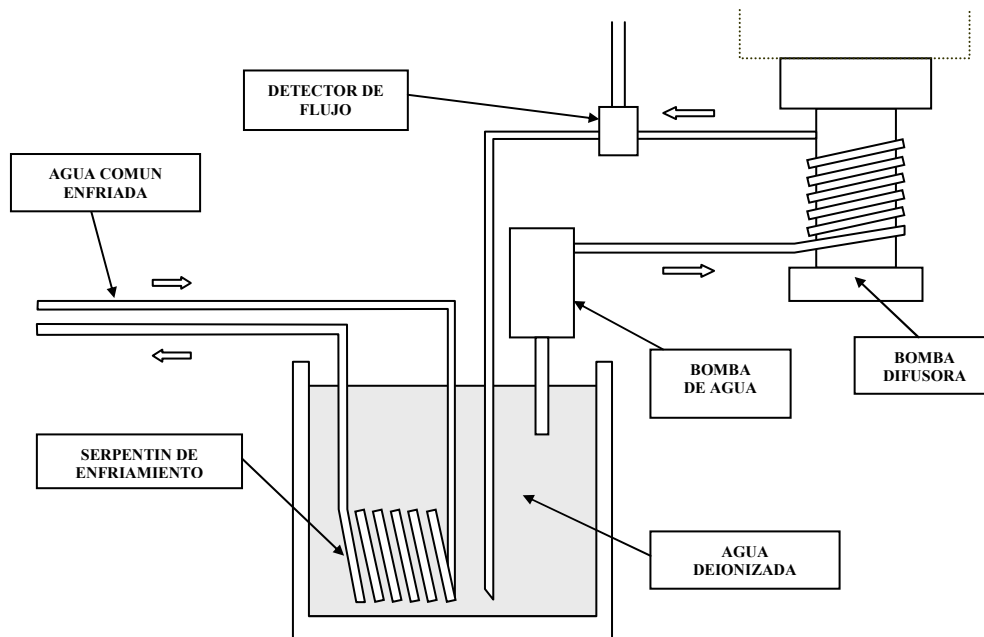


Figura 6.3. Esquema del circuito de enfriamiento para el agua deionizada circulante por la bomba difusora. El agua común se enfría en la torre de enfriamiento del Tandar

6.2.3. Sistema de control de temperatura y adquisición de datos

Para medir las temperaturas se utilizan sensores Pt-100 consistentes en un resistor de platino encapsulado en una matriz cerámica de pequeño tamaño (5 x 2 x 0.5 mm). Este sensor tiene una resistencia de 100 ohms a temperatura ambiente y se comporta como una resistencia de variación lineal con la temperatura en el rango de -200 °C hasta 500 °C. Esto se debe a que la resistividad del platino cambia linealmente con la temperatura en el rango mencionado. Midiendo la resistencia conocemos la temperatura del sensor y de la superficie a la cual está adosado.

El ciclo térmico se controla mediante un regulador de temperatura PID Novus N1100 que utiliza un Pt-100 para monitorear la temperatura sobre el portamuestras. Para controlar la temperatura se utiliza un controlador (Proporcional Integrador Derivador) que, mediante un actuador, es capaz de mantener una variable o proceso en un punto deseado dentro del rango de medición del sensor. Es uno de los métodos de control más frecuentes y precisos dentro de la regulación automática. (Ref. 62). El regulador NOVUS permite realizar secuencias de rampas de temperatura lineales ascendentes y descendentes, mantener un valor determinado y hacer escalones de temperatura. El regulador controla la entrada de potencia a las resistencias calefactoras mediante un relé de estado sólido. Se utiliza un autotransformador de salida variable (VARIAC) como fuente de potencia para alimentar las resistencias. Los conductores pasan a través del relé de estado sólido, con lo cual el control es del tipo On-Off. Para aislar las muestras de una posible interferencia electromagnética, se desacopla la corriente que llega al portamuestras mediante un transformador que actúa como aislación

electromagnética. En la figura 6.4 se observa un esquema del montaje experimental para el control de temperatura.

El monitoreo de la temperatura sobre las muestras o sobre el portamuestras se realiza utilizando Pt-100 ubicados convenientemente. Mediante un Data Logger NOVUS V2.OX y su software de adquisición correspondiente (Ref. 63), se adquieren las lecturas de estos sensores, que permiten medir entre $-199\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $+500\text{ }^{\circ}\text{C}$. El Data Logger tiene capacidad para monitorear 8 canales de entrada de señal que pueden provenir de termocuplas de diverso tipo, Pt-100s, señales de voltaje (mV) o de corriente (4-20 mA). La comunicación con la PC se realiza vía RS-485. El Data Logger toma lecturas secuencialmente de todos los canales habilitados. Con sensores Pt-100, el intervalo mínimo entre una medida y la subsiguiente es de 250 ms. La velocidad de muestreo utilizada en los ciclados fue de una lectura cada 5 segundos en todos los canales usados en cada caso. La precisión de las lecturas de temperatura en el rango utilizado es de $\pm 1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ y es la suma cuadrática de la precisión de los Pt-100 que es $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y de la precisión del controlador o del Data Logger que son ambas de $\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

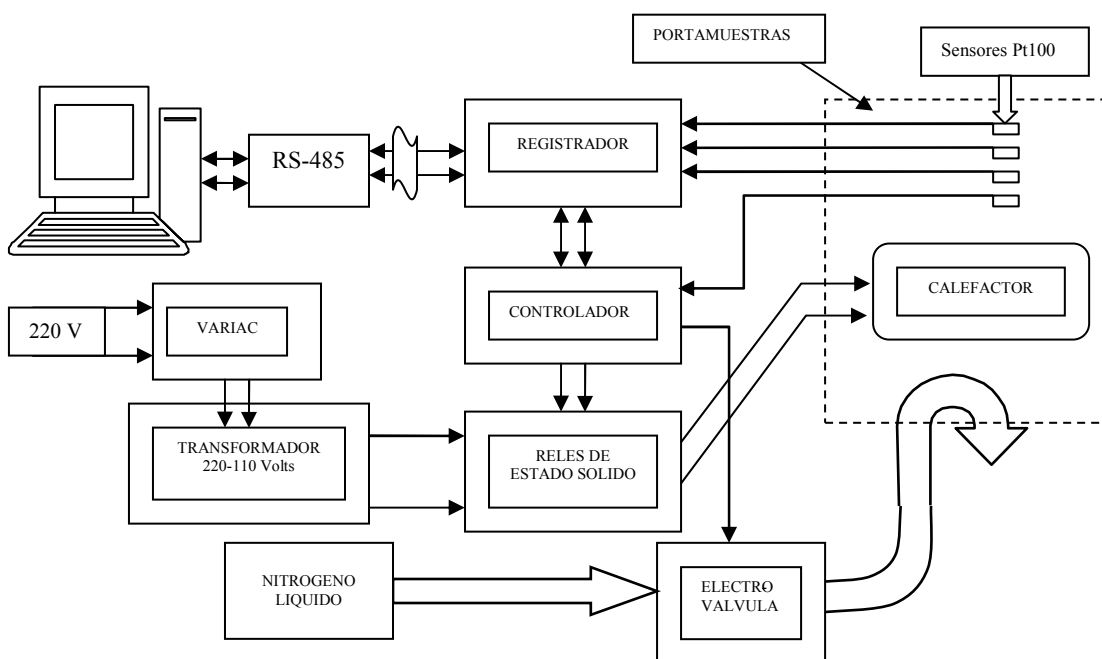


Figura 6.4. Esquema del circuito de adquisición de datos y control de temperatura del portamuestras.

6.2.4. Portamuestras y Sistemas de ciclado

Cada sistema de ciclado utiliza un tipo diferente de portamuestras. Ambos se describirán a continuación.

6.2.4.1. Sistema de ciclado por resistencia calefactora y flujo

El sistema de ciclado por resistencia calefactora y flujo tiene un portamuestras que está colocado sobre dos placas superpuestas. Una placa es un calefactor eléctrico plano y la otra es una placa con un serpentín de cobre por donde circula nitrógeno líquido. Alternando el funcionamiento de estos dos sistemas, se puede calentar o enfriar el portamuestras y de este modo simular los ciclos térmicos que se producen en el ambiente espacial. En la figura 6.5 se muestra un esquema del portamuestras de ciclado térmico por flujo.

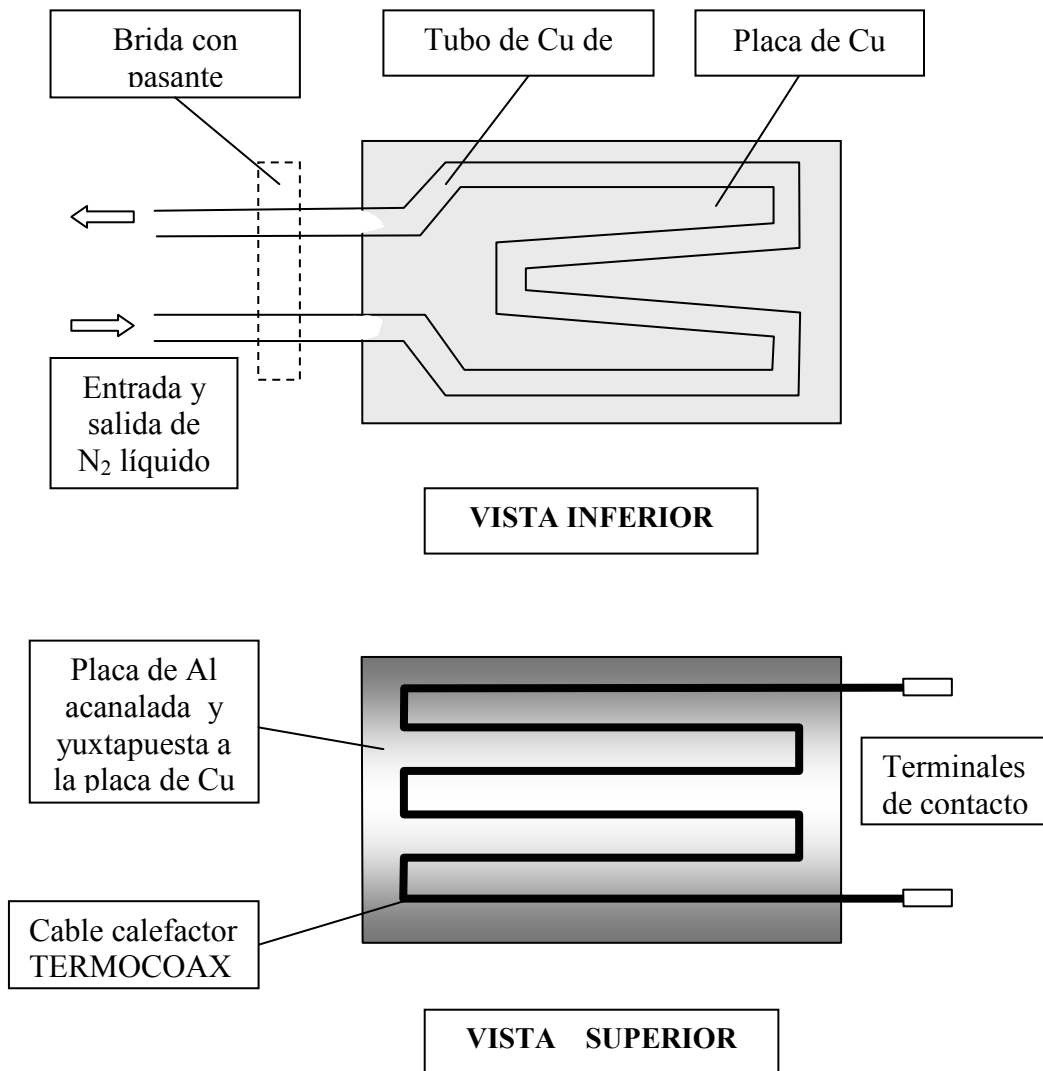


Fig. 6.5 Esquema del dispositivo de ciclado térmico por flujo. Se muestran los conductos de nitrógeno líquido y los terminales de contacto eléctrico para el calefactor.

Dispositivos refrigerante y calefactor:

El portamuestras es una superposición de una platina calefactora montada sobre una placa refrigerante. La placa refrigerante está formada por un serpentín de tubo de cobre de diámetro 1/4" soldado con estaño-plomo

sobre una placa de cobre de 16 cm x 8 cm y 1.5 mm de espesor. Sobre esta placa está situada la platina calefactora. Mediante numerosos tornillos se logra un adecuado contacto térmico entre la platina calefactora y la placa refrigerante. El tubo de cobre está doblado de forma tal que la entrada y la salida están del mismo lado de la placa y funcionan a su vez como soporte mecánico para fijarlo a la pared de la cámara.

La platina calefactora fue construida con una placa de aluminio de 8 cm x 16 cm x 1,3 cm (área = 128 cm²). Por su elevada conductividad térmica se logra una temperatura homogénea en toda la superficie de la platina disponible para montar los dispositivos a ser ciclados. La platina esta compuesta por tres piezas de aluminio en las cuales se tallaron surcos para ubicar las resistencias calefactoras, que constituyen la fuente de calor para calentar la placa de Al. Se utilizaron resistencias de Cr-Ni entubada en vaina de acero inoxidable, de 1,5 mm de diámetro y con aislamiento mineral de óxido de magnesio MgO marca Thermocoax tipo 1Nc apto para vacío (Ref. 64). La geometría coaxial ayuda a evitar la inserción de ruido en la electrónica de medición. La potencia máxima que admite este cable es de 100 W/m, la temperatura máxima admisible es de 700 °C y el voltaje máximo entre conductor central y vaina es de 110 Volts.

La placa calefactora se encuentra físicamente entre la superficie utilizable del portamuestras y la serpentina, de modo tal que la potencia térmica suministrada por las resistencias calefactoras se utiliza en parte para incrementar la temperatura de la muestra y en parte para contrarrestar la fuente fría.

Monitoreo y Control de la Temperatura:

El calentamiento se controla con el controlador de procesos Novus N1100 PID (Ref. 63) y con sensores Pt100 en contacto térmico con el portamuestras para monitorear la temperatura. El enfriamiento se controla con un flujo de nitrógeno líquido/gaseoso habilitando una electroválvula apta para bajas temperaturas. La electroválvula se abre cuando un sensor de temperatura activa una alarma en el controlador. El flujo de N₂ líquido se controla abriendo manualmente un robinete del tanque de nitrógeno y se ajusta cada dos o tres horas. De este modo el enfriamiento se realiza con una potencia solo controlable manualmente, en tanto que el calentamiento se controla electrónicamente. De este modo, la combinación de ambos permite controlar semiautomáticamente la temperatura. La figura 6.6 es un esquema del sistema de monitoreo y control automático.

La cámara de ciclado térmico está operando satisfactoriamente y se lograron realizar exitosamente series de ciclados térmicos entre +100 °C y -100 °C, con períodos completos de 10 minutos para el portamuestras vacío y de 50 minutos para el portamuestras con carga cercana a la máxima carga que admitirá, que consiste en un fragmento de panel solar. El panel solar está conformado por una estructura honeycomb ubicada entre dos láminas de aluminio y sobre la cual se pega con adhesivo de uso espacial una lámina compuesta de fibra de carbono. Sobre esta lámina se pega un film de Kapton y sobre este una celda solar ATJ.

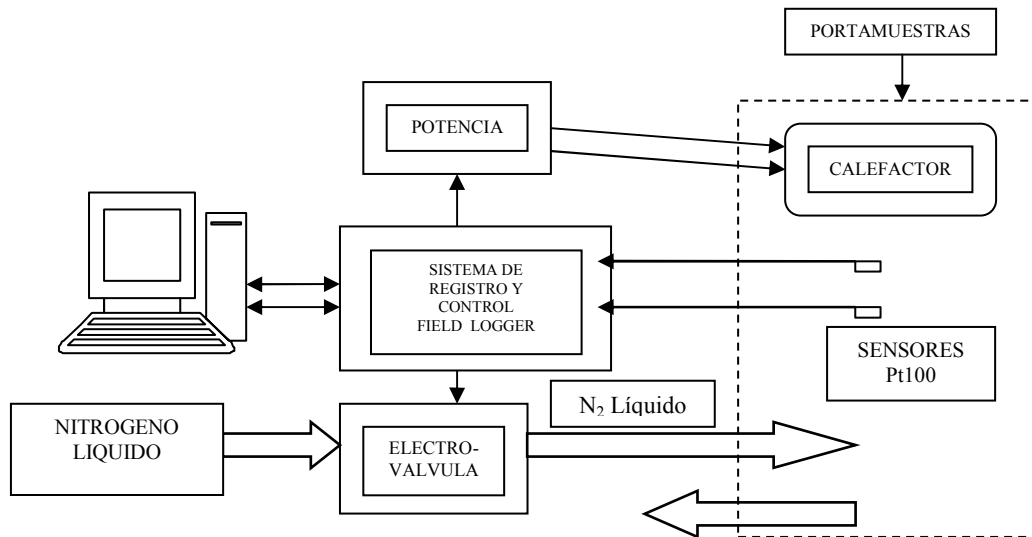


Figura 6.6: Esquema simplificado del sistema de control de temperatura y la fuente de potencia que alimenta al calefactor del portamuestras.

Todos los materiales utilizados en el proyecto fueron optimizados desde el punto de vista de la conductividad y capacidad térmicas más convenientes.

En la figura 6.7 se muestra una curva de medición y control que se obtuvo con el sistema de ciclado térmico por flujo. En esta figura se ven dos curvas con forma sinusoidal, que corresponden a las temperaturas del portamuestras y de la muestra. El portamuestras siempre tiene una excursión térmica mayor que la muestra, ya que debe transferir o quitar calor a la misma y para ello se necesita una diferencia de temperatura. El controlador toma como testigo la temperatura de la muestra para cambiar el ciclo de enfriamiento a calentamiento cuando se llega al extremo de temperatura superior o inferior prefijado. La línea segmentada que se observa es el set point, que es el valor que se le asigna como meta al calefactor en cada instante. La forma compleja que presenta fue buscada por prueba y error hasta encontrar la secuencia de set points que minimicen el período de ciclado total.

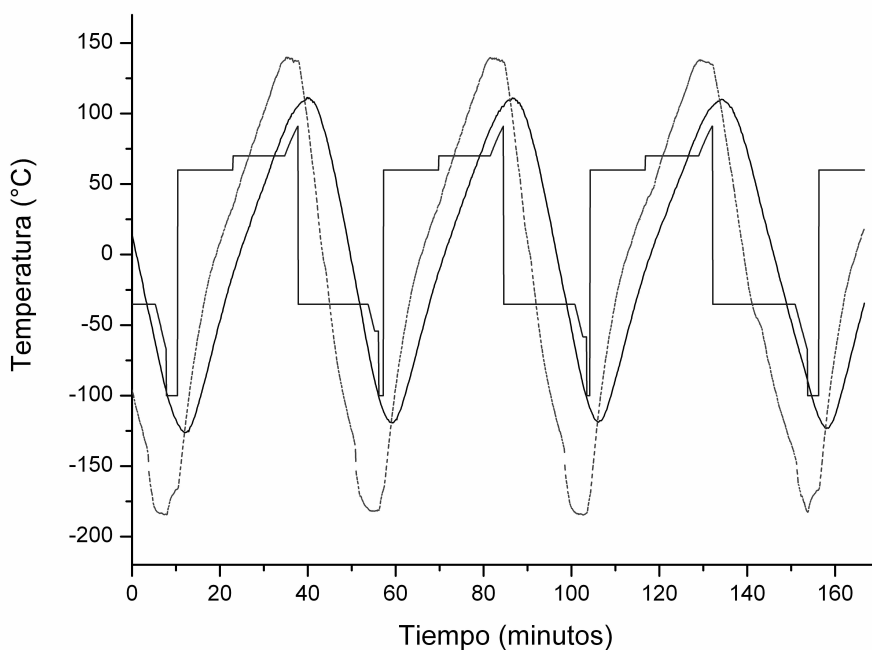


Figura 6.7. Temperatura del portamuestras (.....) y de la muestra (—), obtenidas durante un ensayo de ciclado térmico usando el sistema con resistencia y flujo de LN₂. La línea continua quebrada es la referencia (set point) del controlador. La celda solar estaba montada sobre soporte de fibra de carbono y honeycomb de aluminio.

6.2.4.2. Sistema de ciclado por contacto

Para poder realizar en tiempos razonables los miles de ciclos que requieren los ensayos de validación para celdas, materiales asociados, soldaduras y componentes electrónicos de uso satelital es necesario tener un ciclador térmico suficientemente rápido.

Para reducir el período de ciclado térmico del sistema de ciclado por resistencia calefactora y flujo, se desarrolló un nuevo sistema de ciclado.

El nuevo dispositivo permite modificar la temperatura del portamuestras de -100 °C a +100 °C en dos minutos y medio, con lo cual un ciclo completo se realiza en cinco minutos. De todos modos, cuando se coloca una muestra, el período se extiende, dependiendo del tipo de acoplamiento térmico entre la muestra y el portamuestras. En el caso de celdas montadas sobre soporte de fibra de carbono llega a los 8 minutos. Considerando una prueba de 5000 ciclos por ejemplo, con un período de 8 minutos se necesitarían 40.000 minutos, es decir, 667 horas o aproximadamente 28 días de operación continua sin interrupción.

El sistema de ciclado por contacto está formado por dos bloques de cobre macizo con forma de paralelepípedo rectangular. Uno de los bloques se mantiene permanentemente a alta temperatura (aproximadamente 150 °C) y el otro bloque permanentemente a baja temperatura (aproximadamente -180 °C), cercana a la temperatura normal de equilibrio del nitrógeno líquido que es de -196 °C. Cada bloque tiene una de sus caras mayores perfectamente plana

y pulida a espejo. A estas superficies las denominaremos superficies térmicas. Los bloques están apoyados sobre aislantes cerámicos uno al lado del otro de modo tal que sus superficies térmicas están coplanares. El cobre se utilizó por tener una elevada conductividad térmica. El cobre es fácilmente soldable aunque difícil de mecanizar, ya que es dúctil y maleable.

El portamuestras es una delgada placa rectangular de cobre, de unos 3 milímetros de espesor, montada sobre un bastidor deslizante que al desplazarse lo obliga a hacer contacto con la superficie térmica de uno u otro bloque alternativamente. Un mecanismo que se describirá más adelante, permite hacer esto de manera automática. En la figura 6.8 se muestra esquemáticamente el funcionamiento del dispositivo de ciclado térmico por contacto. El espesor de la lámina de cobre del portamuestras resulta como compromiso entre una razonable rigidez mecánica y una baja masa térmica.

Haciendo contacto alternativamente con el bloque frío y el bloque caliente, se logra el calentamiento y el enfriamiento del portamuestras de un modo cíclico. El tiempo de ciclado se reduce porque tanto el dispositivo calefactor como el refrigerador se encuentran separados físicamente del portamuestras. Para poder ciclar térmicamente el portamuestras de un modo veloz, se construyó en cobre para que tenga gran conductividad térmica y de pequeño espesor para reducir su masa térmica. Un sistema de fines de carrera, relés con retención y sensores de temperatura controla el movimiento de modo tal que se realiza automáticamente.

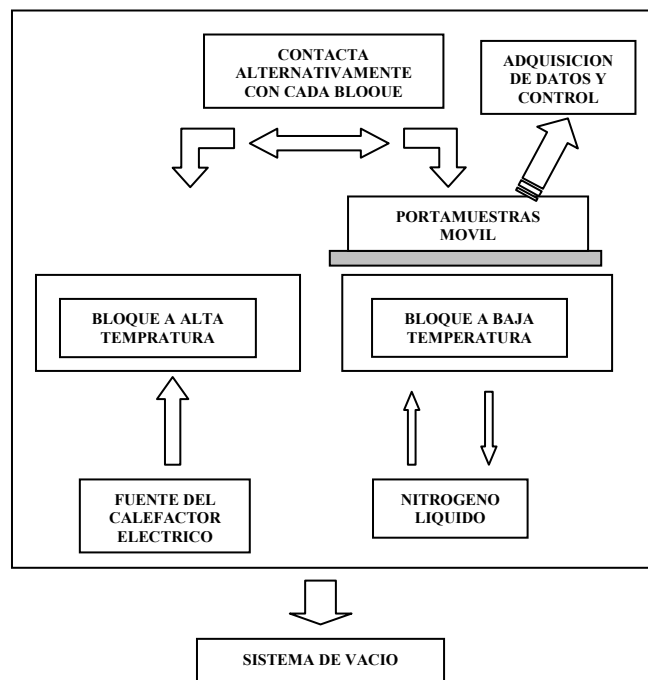


Figura 6.8. Esquema de funcionamiento del dispositivo de ciclado térmico por contacto

Para ejercer presión sobre el portamuestras sin tocar las muestras colocadas sobre su superficie, hay una estructura de soporte encima del mismo. A través de largos pernos con un sistema de resortes ubicados cerca de los vértices se transmite la presión al portamuestras. Los pernos atraviesan y deslizan a través de las esquinas de un bastidor, que se encuentra entre el portamuestras y la sombrilla y es el que desplaza todo el conjunto de un bloque

al otro. La presión se hace con un brazo basculante que alternativamente presiona la sombrilla cuando esta se ubica sobre una u otra superficie térmica. En la figura 6.9 puede verse una fotografía del portamuestras y de su sistema de soporte.

Un mecanismo con motor de CC con reducción, piñones y cadena coordina el movimiento basculante del brazo con el desplazamiento del portamuestras, de modo tal que el brazo hace presión sobre el portamuestras justo en el momento en que se posiciona sobre la superficie térmica correspondiente. Fines de carrera, relés con retención y sensores de temperatura controlan el movimiento de modo tal que se realiza automáticamente controlado por los sensores de temperatura. En la figura 6.10 se muestra el motor con el sistema de fines de carrera conectado a un eje pasante que ingresa a la cámara de ciclado.

Un sistema de control y de adquisición de datos permite realizar ensayos de larga duración sin la necesidad de un operador.

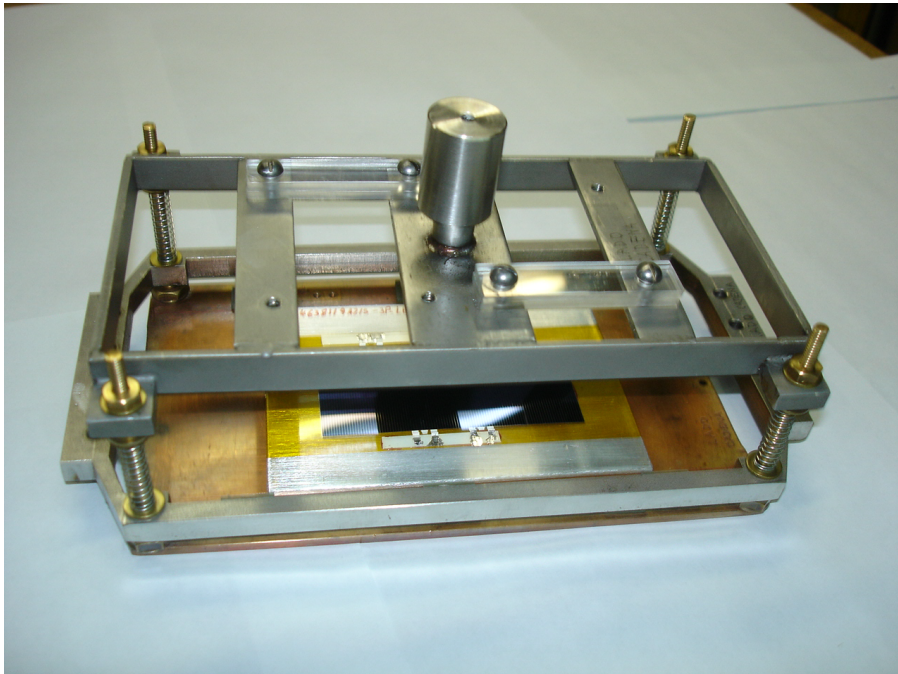


Figura 6.9: Esquema del soporte del portamuestras y del bastidor que le sirve de soporte. Se ven los resortes en las cuatro esquinas. Hay una celda ATJ montada sobre el portamuestras.

Este sistema fue diseñado para operar dentro de la cámara. Pero en una primera etapa se construyó una caja estanca de plástico transparente para alojar todo el sistema y poder probar su funcionamiento. Esta caja permitió operar en atmósfera controlada. Se utilizó nitrógeno seco. En la figura 6.11 se muestra el dispositivo en funcionamiento dentro de la caja de plástico estanca. Posteriormente se descartó este modo de operar, ya que al no ser perfectamente estanca la condensación de vapor de agua dificultaba la operación. Se colocó el sistema dentro de la cámara de vacío y de ese modo pudo operar satisfactoriamente. La figura 6.12 es un ejemplo de una medición obtenida con el ciclado térmico por contacto.

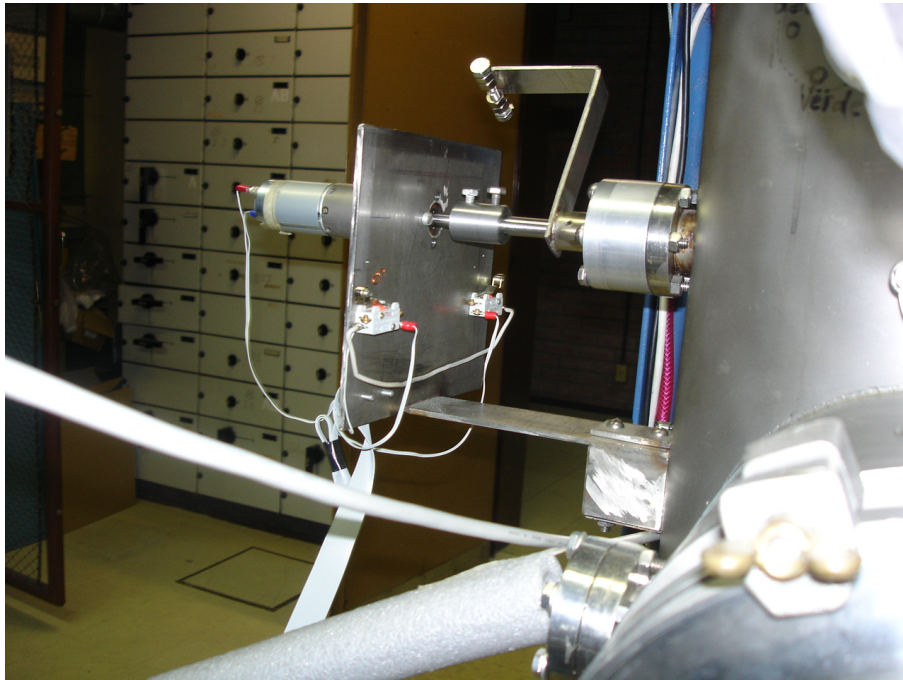


Figura 6.10: Motor de accionamiento para el ciclador térmico por contacto. Se muestra el motor conectado con un eje pasante que ingresa a la cámara de ciclado. Se ve el sistema de fines de carrera.



Figura 6.11: Imagen del dispositivo de ciclado térmico por contacto en funcionamiento fuera de la cámara. El sistema es autoportante y puede operarse tanto fuera como dentro de la cámara.

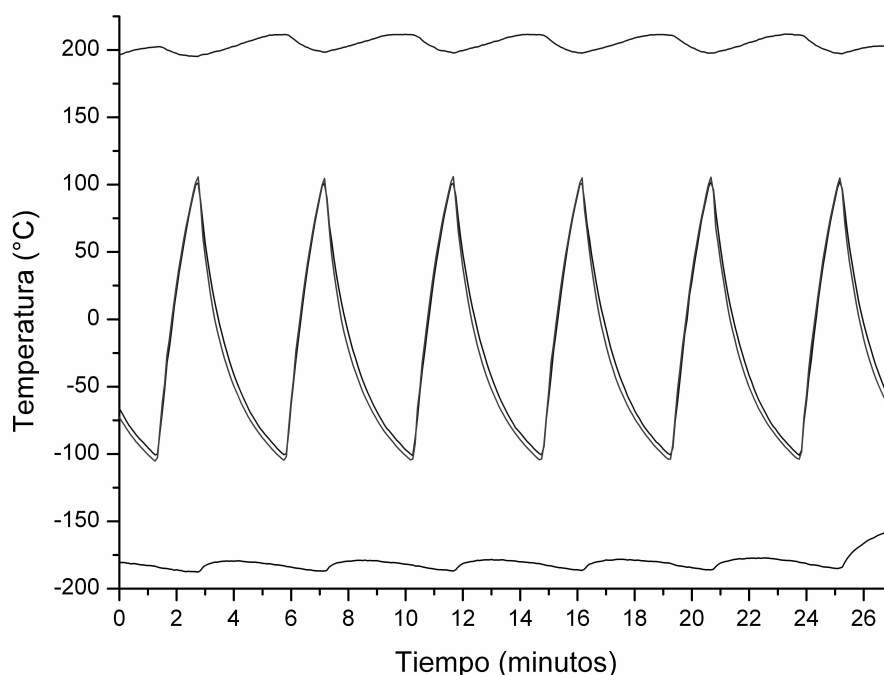


Figura 6.12: Evolución de la temperatura del portamuestras obtenida en un ensayo del dispositivo de ciclado por contacto. Las curvas centrales corresponden al portamuestras y a la muestra que varía entre -100 °C y +100 °C. Las curvas superior e inferior son las temperaturas de los bloques caliente y frío que en este caso fueron fijadas a 200 °C y -180 °C respectivamente.

Con este sistema se realizaron exitosamente 1030 ciclos entre +100 °C y -100 °C en un arreglo de cuatro celdas Emcore ATJ pegadas sobre un soporte de fibra de carbono. Las celdas estaban conectadas del modo en el cual lo harán en el panel solar. De este modo se ensayó la resistencia al ciclado de las celdas, los interconectores, las soldaduras, el pegamento y el sustrato de fibra de carbono. No se han observado daños en el arreglo luego de esta serie de ensayos de ciclado térmico. El tiempo total efectivo de trabajo para realizar los 1030 ciclos fue de aproximadamente 30 días de 16 horas cada uno.

6.2.5. Experimentos de ciclado térmico realizados sobre componentes satelitales. Resumen de resultados obtenidos. Calificación de celdas solares.

Se realizaron dos series de experimentos de ciclado con mil ciclos cada uno de una subcadena de celdas solares formada por cuatro celdas ATJ Emcore interconectadas en serie y pegadas a un sustrato de fibra de carbono con adhesivo RTV 566 (ver sección 2.2.1). El objetivo fue evaluar la resistencia al ciclado de los interconectores entre celdas, del pegado al sustrato de fibra de carbono, del pegado de los vidrios protectores dopados con cerio a las celdas, de las soldaduras entre las celdas y los diodos de paso y de los conectores extremos de la subcadena (Ref. 62).

La primera serie se realizó usando el sistema con resistencia y flujo de nitrógeno líquido en dos etapas; un ensayo de ciclado térmico de 264 ciclos entre $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ y otro ciclado de 745 ciclos entre $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Estos ciclos se realizaron con una presión entre 5×10^{-5} y 2×10^{-5} mbar y con una temperatura en la pared de la cámara de $22 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Ref. 66).

Originalmente se colocó la celda sobre la lámina de carbono y esta a su vez sobre un honeycomb de aluminio. Pero el período era muy grande (50 minutos) como para hacer ensayos de ciclado de esa forma. En la figura 6.13 se muestra un ejemplo de esta serie, que fue realizada durante varios días. Luego se decidió remover el honeycomb, ya que esa estructura metálica no necesitaba ser validada. Al ciclar la celda sobre la lámina de carbono, el período se redujo a unos 15 minutos, como se puede ver en la figura 6.14. De este modo se realizó la primera serie.

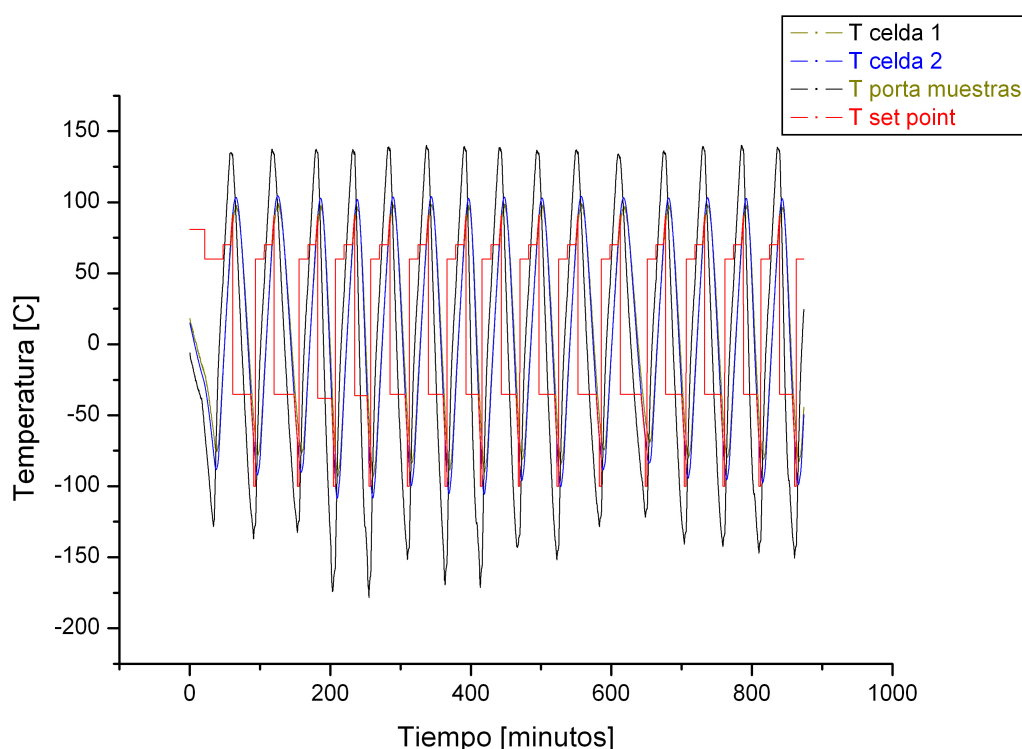


Figura 6.13. Medición de temperatura del portamuestras, de la superficie del sustrato de fibra de carbono y de la superficie de la celda durante el ciclado térmico, obtenidas usando el sistema con resistencia y flujo de LN_2 . El sustrato de fibra de carbono está pegado sobre una placa honeycomb de aluminio (ver sección 2.2.1). La temperatura de la superficie de la celda es la que gobierna el ciclo y la que determina cuando se cambia de calentamiento a enfriamiento y viceversa. La temperatura del portamuestras se extiende más allá de los límites de $\pm 100\text{ }^{\circ}\text{C}$. El set point tiene una forma extraña porque tiene que acomodar la potencia del calefactor con el enfriamiento del nitrógeno líquido que tiene una potencia no constante y se fija manualmente.

Como se indicó anteriormente, el set point es el que gobierna la potencia que se le entrega al calefactor. La superficie de contacto se untó con grasa de vacío marca Dow Corning para mejorar el contacto térmico. Para

ejercer presión contra el portamuestras se colocaron cinco broches elásticos laterales y dos soportes en los extremos superior e inferior que ejercían una leve presión sobre el sustrato de fibra de carbono. Durante la medición se iluminaron las celdas constantemente con una lámpara de 12 Volts y 10 W alimentada por una fuente estabilizada. La presión en la cámara varió ligeramente durante cada ciclo debido a que durante el enfriamiento se produce una condensación de vapores residuales en la parte fría del portamuestras y durante el calentamiento se produce un desgase de estos. Se observa una variación de la tensión de salida que está en correlación con la variación de temperatura de las celdas, cuya eficiencia se reduce al aumentar la temperatura. Esto se indica en la figura 5.14 que muestra simultáneamente curvas de medición de temperatura y la medición de la corriente medida mediante el voltaje en una resistencia de 10 ohms para una resistencia de carga total de 110 ohms conectada a la subcadena de celdas. Esta medición de corriente es un parámetro para indicar si la subcadena sigue funcionando correctamente.

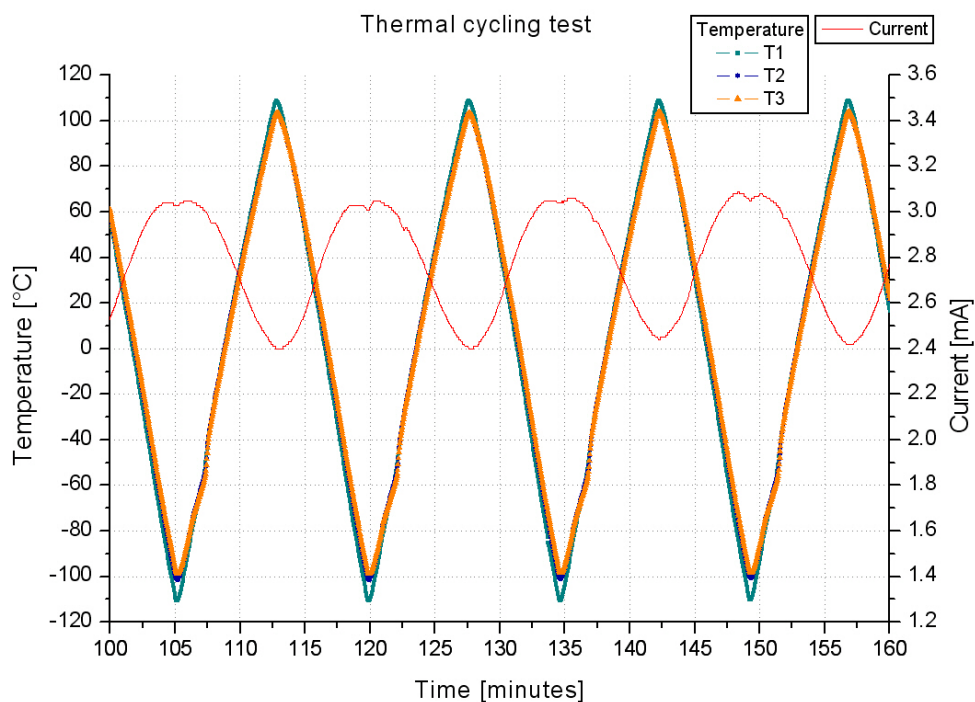


Figura 6.14. Curvas de la medición de temperatura durante el ciclado térmico obtenidas usando el sistema con resistencia y flujo de LN₂, que incluyen la medición de la corriente producida por las celdas. Aquí el período de ciclado es menor porque se removió el honeycomb de aluminio.

La segunda serie se realizó con el sistema de ciclado térmico por contacto en una sola etapa y consistió en un ensayo de ciclado térmico de 1030 ciclos entre -100 °C y 100 °C. Estos ciclos se realizaron en atmósfera de nitrógeno libre de vapor de agua con una presión de una atmósfera. En la figuras 6.15 se muestra un ejemplo de esta serie, que fue realizada durante varios días.

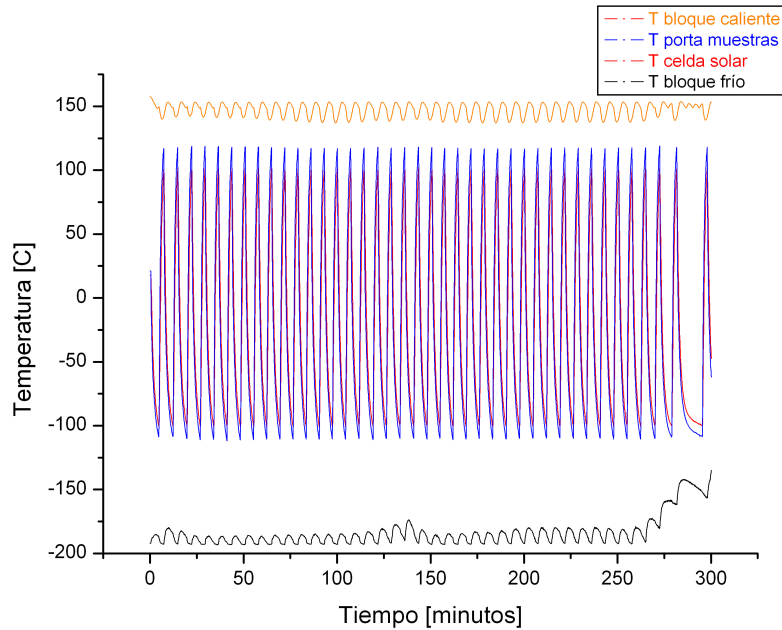


Figura 6.16: Curvas de la medición de temperatura del sustrato de fibra de carbono y de la superficie del portamuestras durante el ciclado térmico. Se incluye la medición de las temperaturas de los bloques caliente y frío. Hacia el final de este segmento se acabó el nitrógeno y la temperatura del bloque frío comienza a aumentar. También se incrementa el tiempo de ciclado. Aquí se interrumpe el ciclado para reemplazar el tanque de suministro.

La superficie de contacto se untó con grasa de vacío marca Dow Corning para mejorar el contacto térmico. Los soportes son de Pertinax y se ajustan al portamuestras de cobre con tornillos de bronce. Durante la medición se iluminaron las celdas constantemente con una lámpara de 220 Volts y 12 W. Se tomó una medida de tensión entre los bornes de la subcadena para indicar si continúa funcionando correctamente durante el ciclado.

El sistema es satisfactorio y permite realizar largos ciclos de variación de temperatura en forma automatizada y con solo control periódico que se puede robotizar.

En ningún caso se observaron defectos o daño atribuibles al ciclado térmico. Hasta el orden de 1000 ciclos el resultado permite calificar las celdas ATJ Emcore como válidas para ser usadas en vuelo desde el punto de vista del ciclado térmico, incluyendo el método de montaje que es usado para los paneles del SAOCOM.

A continuación se resumen ventajas y desventajas y los períodos de ciclado obtenibles con ambos sistemas.

El primer sistema permite ensayar muestras planas de dimensiones iguales o menores que 150 x 80 mm. Tiene como ventaja que puede ser operado en vacío y como desventajas que es más lento que el segundo sistema y su operación requiere supervisión permanente.

El segundo sistema permite ensayar muestras planas de dimensiones iguales o menores que 170 x 90 mm. Tiene como ventajas su mayor velocidad de ciclado y su operación automática y como desventaja que no puede ser operado en vacío.

Los valores de períodos de ciclado para un ciclo completo +100 °C/ - 100 °C/+100 °C y para diversas cargas en el portamuestras:

Sistema de ciclado por resistencia calefactora y flujo:

Período con celda + lámina de fibra de carbono + honeycomb de Al	50 min.
Período con celda + lámina de fibra de carbono	15 min.
Período con portamuestras solo (estimado de la curva)	10 min.

Sistema de ciclado por contacto:

Período con celda + lámina de fibra de carbono	7 min. 45 seg.
Período con portamuestras solo (estimado de la curva)	5 min. 15 seg.

CONCLUSIONES ENERALES Y CERTIFICACION DE CELDAS EMCORE ATJ

En el presente trabajo se contribuyó significativamente a la construcción y puesta en operación de una cámara de irradiación, de la línea de irradiación asociada a ella y de una segunda cámara dedicada a ciclos térmicos. Fue ideado y construido un nuevo sistema de ciclo térmico.

Con esta infraestructura se ensayaron componentes satelitales. El objetivo de los ensayos es calificar componentes y procesos de fabricación para su uso en los paneles solares que el Grupo Energía Solar de la CNEA está construyendo para la CONAE en el marco del Plan Espacial Argentino.

Los factores del medio ambiente espacial que se han ensayado incluyen el efecto del vacío, el ciclo térmico y el daño por radiación con protones y electrones.

En la primera cámara se irradiaron con protones de 10 MeV celdas solares de triple junta Emcore ATJ a diversas temperaturas. Se han utilizado dos modos de iluminación: lámpara dicróica y simulador solar. Las irradiaciones con electrones de 3 MeV se realizaron con iluminación dicróica a temperatura ambiente en el acelerador lineal LINAC del CAB.

En la cámara de ciclo térmico se realizaron ensayos de ciclo con dos métodos de ciclo diferentes y abarcando un rango de temperaturas de -100 °C a +100 °C. El efecto del vacío se ensayó en ambas cámaras.

El máximo vacío al que se pudo someter a las celdas y componentes ensayados fue de 10^{-6} mbar. En estas condiciones no se ha observado ningún efecto de daño o deterioro atribuibles al ciclo de vacío. Dada la ínfima "diferencia de presión" o de esfuerzos mecánicos entre 10^{-6} y 10^{-8} mbar, se puede esperar que no se produzca tampoco ningún efecto por ciclo de vacío en órbitas tipo LEO.

En ningún caso se observaron defectos o daño atribuibles al ciclo térmico. Hasta el orden de 1000 ciclos el resultado permite calificar ATJ como válidas para ser usadas en vuelo desde el punto de vista del ciclo térmico, incluyendo el método de montaje que es usado para los paneles del SAOCOM.

Como punto de referencia, para comparar la degradación de los parámetros fotovoltaicos, se tomaron en cuenta los valores de degradación predichos en un trabajo anterior (ver Apéndice 3), que predicen para Voc, Isc y Pmax, considerando un período de misión de 5 años y un nivel de confianza de 99,9%, valores finales de degradación calculados respecto a BOL de 94,4%, 99,8% y 94,2% respectivamente. Estos valores de degradación se obtuvieron utilizando JPL, que solo predice a temperatura ambiente.

Para la Pmax, los valores de reducción a alta temperatura son mejores para protones que los predichos por JPL a temperatura ambiente (98,6 % comparado con 94,2 %). Para Voc, los valores medidos a alta temperatura

también son mejores que los predichos a temperatura ambiente (99,9 % comparado con 94,4 %). Los valores de Isc medidos a alta temperatura son comparables con los predichos a temperatura ambiente (99,5 % comparado con 99,8 %).

Pero los valores medidos a temperatura ambiente y baja temperatura son ligeramente peores para todos los parámetros, excepto para Voc e Isc a temperatura ambiente, donde son comparables.

Dado que para la órbita considerada, el panel solar se encuentra iluminado permanentemente durante 8 meses y durante los otros 4 meses tiene un eclipse diario con una duración máxima de 19 minutos, esto significa que el panel solar se encontrará como mínimo un 94 % del tiempo de la misión a alta temperatura, condición en la cual la degradación medida para protones es menor a la medida a temperatura ambiente y baja temperatura y también menor a la predicha por la modelización JPL utilizada como referencia.

El presente trabajo permite calificar las celdas Emcore ATJ ensayadas como aptas para la misión SAOCOM propuesta, desde el punto de vista del daño por radiación producido en el ambiente espacial de órbitas LEO.

Al momento de presentación de este libro de tesis, y con el propósito de complementar desde la base de una simulación teórica el estudio experimental realizado, se continúa con la simulación de daño producido por protones en celdas solares EMCORE ATJ. En ese estudio se está considerando una incidencia isotrópica de partículas incidentes y se otorga énfasis a la estimación del daño para las primeras capas, que son las de mayor sensibilidad, de acuerdo a lo explicado en el Apéndice 4. Los resultados de estas simulaciones serán publicados cuando se complete y consolide la información a obtener.

APENDICE 1

SRIM/TRIM

El código SRIM (por Stopping and Range of Ions in Matter), es un grupo de programas que calculan el poder de frenado y el rango de iones (hasta el 2 GeV / amu para la versión 2000 y las siguientes) en la materia (Ref. A1-1). Los cálculos en estos programas se realizan muy eficientemente mediante el uso de algoritmos estadísticos que permiten a los iones realizar saltos entre las colisiones calculadas y luego promediar los resultados de las colisiones en la trayectoria de ese ión. Para una comparación exhaustiva y actualizada de este y otros códigos conocidos (ver Ref. A1 2).

El código SRIM se basó en los trabajos originales de J. P. Biersack en algoritmos de cálculo para alcance de iones (Ref. A1-5) y en el trabajo de J. F. Ziegler sobre teoría de frenado (Ref. A1-6). El código original de Biersack y Ziegler, de 1983, era un programa en fortran VII. Luego se desarrolló una versión en Basic. Se pueden ver las diversas versiones de SRIM en Ref. A1-7.

El programa TRIM (por Transport of Ions in Matter) es el más completo de los programas que se incluyen en el código SRIM.

TRIM es un programa que utiliza la técnica Monte Carlo para calcular la interacción de iones energéticos con blancos amorfos. El programa posee una eficiencia computacional elevada, manteniendo la precisión. Esto lo logra por dos razones principales. En primer lugar utiliza una fórmula analítica para calcular las colisiones entre átomos, la llamada "Fórmula Mágica" desarrollada por Biersack (Ref. A1-3) y luego desarrolla el concepto de "Camino Libre Medio" entre colisiones, de manera tal que solo las colisiones significativas son evaluadas.

Durante el choque, el ión y el átomo tienen una colisión coulombiana apantallada (ver Apéndice 2 para detalles sobre la física de la interacción ión-materia) incluido el intercambio y las interacciones de correlación entre capas electrónicas superpuestas. El ión tiene interacciones de largo alcance, y crea excitaciones electrónicas dentro del blanco. Estas se describen incluyendo una descripción de la estructura electrónica colectiva y de la estructura de ligaduras interatómicas cuando se lanza el cálculo (se proveen tablas de valores nominales). El estado de carga del ión dentro del blanco se describe utilizando el concepto de carga efectiva, que incluye un estado de carga dependiente de la velocidad y un apantallamiento de largo alcance debido al efecto colectivo del mar de electrones del blanco. Este método se puede aplicar a una amplia gama de energías, desde 0,1 keV hasta varios MeV, dependiendo de las masas involucradas. El programa permite definir el ángulo de incidencia del haz entre 0 y 89 ° respecto a la normal a la superficie de impacto.

Una descripción detallada de los cálculos se puede encontrar en el libro "***The Stopping and Range of Ions in Solids***" (Ref. A1-4). Este libro presenta la física de la penetración de iones en sólidos, el código fuente en su versión en FORTRAN, la precisión de los cálculos SRIM y varias aplicaciones

Como se mencionó anteriormente, los blancos en TRIM son simulados como amorfos, es decir que no importa la dirección cristalográfica en la que incide el haz de partículas sobre la muestra. El blanco puede estar formado por una o varias capas planas, hasta un máximo de ocho, y cada una de ellas puede tener un espesor diferente. Cada capa puede estar formada por un solo elemento o por una combinación arbitraria de elementos. Se pueden incluir los 92 elementos de la tabla periódica hasta el uranio inclusive en cualquier combinación que se desee. Incluso hay una opción en la cual se pueden ingresar materiales comerciales de uso común.

TRIM calcula tanto la distribución final de los iones en 3D como todos los fenómenos cinéticos asociados con la pérdida de energía del ión. Hay una opción en el programa que permite simular la fase colisional en detalle. Solo simula materiales amorfos y utiliza la aproximación de colisiones binarias.

Los programas están hechos de modo tal que se pueden interrumpir en cualquier momento y luego ser continuados. Se pueden grabar archivos que incluyen el rango de los iones, los iones retrodispersados, los iones transmitidos incluyendo los retrocesos, los iones extraídos de la muestra y detalles de todas las colisiones. Se pueden grabar gráficos de los cálculos y editarse posteriormente.

En el presente trabajo se utilizó la versión SRIM-2003 para PC.

Referencias

- A1-1. <http://www.srim.org>
- A1-2. "Status of ion beam data análisis and simulation software", E. Rauhala, N.P. Barradas, S. Fazinic, M. Mayer, E. Szilágyi and M. Thompson, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 244, Issue 2, March 2006, pp. 436-456.
- A1-3. J. P. Biersack and L. Haggmark, Nucl. Instr. and Meth., vol. 174, 257, (1980)
- A1-4. "**The Stopping and Range of Ions in Matter**", volumes 2 - 6, Pergamon Press, 1977-1985)
- A1-5. Archivo SRIM/VERSION en <http://www.srim.org>
- A1-6. Archivo TRIMoutputs2.doc, incluido en el paquete TRIM, que se puede descargar de la referencia A1-1.
- A1-7. "**The Stopping and Range of Ions in Solids**", by J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, Pergamon Press, New York, 1985 (new edition in 2009)

APENDICE 2

Interacción de la radiación con la materia

- A2.1 Introducción
- A2.2 Interacción de partículas cargadas con la materia
- A2.3 Interacción de partículas beta con la materia
- A2.4 Interacción de protones con la materia
- A2.5 Cascadas de Desplazamiento

A2.1 Introducción

Las radiaciones ionizantes interactúan con la materia. La materia está constituida por átomos y la radiación ionizante interactúa con los núcleos y los electrones de los mismos con una probabilidad de ocurrencia que depende del tipo y energía de la radiación, así como también de la naturaleza del medio material. En todos los casos los resultados de la interacción de la radiación con la materia son la excitación y/o la ionización de los átomos del medio material. Con energías suficientes para sobrepasar la barrera coulombiana del núcleo se producen reacciones nucleares con activación radioactiva.

Los tipos de radiación ionizante de interés son:

- a) Electromagnética (rayos gamma, X y UV) ; masa = 0 No tienen carga eléctrica.
- b) Neutrones ; masa $\neq 0$ No tienen carga eléctrica.
- c) Radiación beta (electrones negativos y positivos) ; masa $\neq 0$ Tienen carga eléctrica.
- d) Partículas pesadas (protones, deuterones, partículas alfa y otros iones pesados) masa $\neq 0$ Tienen carga eléctrica.

Estos cuatro tipos de radiación presentan características marcadamente diferentes en sus formas de interactuar con la materia. Las partículas con carga eléctrica interactúan en forma directa con el medio material a través de las fuerzas coulombianas (fuerzas de atracción o repulsión entre cargas eléctricas) y existe un espesor tal que las frenará totalmente (Ref. A2-1).

En este trabajo utilizamos haces de electrones negativos y de protones debido a su prevalencia en el medio ambiente espacial (Ref. A2-2). En la siguiente sección se describirán los aspectos principales de los efectos de las partículas cargadas en la materia. En las secciones posteriores se describirán por separado las interacciones de electrones y de protones y el fenómeno del daño por desplazamiento.

A2.2 Interacción de partículas cargadas con la materia

Las partículas cargadas interactúan con los núcleos o los electrones orbitales de los átomos del medio material mediante colisiones (choques). Estas colisiones podrán ser elásticas cuando se mantiene constante la energía cinética del conjunto, o inelásticas, cuando una parte de la energía cinética

inicial se transforma en algún otro tipo de energía, por ejemplo en estados excitados del núcleo o del átomo. Este caso incluye a los protones e iones pesados.

La probabilidad de que una partícula cargada interactúe mediante uno u otro mecanismo es determinada por la energía de la partícula incidente y el medio absorbente. La diferenciación en el tratamiento para partículas beta (electrones) y partículas cargadas más pesadas como protones, radica en que estas últimas, por su mayor masa, interactúan preponderantemente por ionización y excitación, siendo su trayectoria prácticamente rectilínea hasta su frenamiento definitivo. Para las partículas beta, su masa pequeña hace que, por el contrario, sufran fuertes aceleraciones convirtiendo su trayectoria en un recorrido tortuoso, siendo significativas las pérdidas de energía por radiación (Ref. A2-1).

A continuación definiremos el poder de frenado (stopping power) y la dispersión estadística en energía (straggling).

Poder de frenado:

Como se mencionó anteriormente, al atravesar la materia, la partícula cargada interactúa con numerosos electrones y con los núcleos de los átomos de la red. De acuerdo a la distancia de interacción, el proyectil puede producir la excitación del electrón o su extracción del átomo al cual pertenecía (ionización). En ambos casos pierde energía. El alcance es la distancia promedio necesaria para detener la radiación.

El poder de frenado expresa la cantidad de energía perdida por la partícula en su trayectoria, y se define como la energía perdida por unidad de profundidad:

$$S(E) = -\frac{dE}{dx} \quad (\text{ec. A2.1})$$

donde $S(E)$ es el poder de frenado o “stopping power” y E es la energía cinética de la partícula. El poder de frenado es función de la densidad del material. Puede ser electrónico (S_e) o nuclear (S_n) (Ref. A2-3).

A altas energías domina el stopping power electrónico. Para un ión desnudo:

$$\frac{S_n}{S_e} = Z_2 \left(\frac{m_e}{m_1} \right) \ll 1 \quad (\text{ec. A2.2})$$

A bajas energías domina el stopping power nuclear (S_n). El proyectil tiende a neutralizarse por la captura de electrones, haciendo que la contribución dominante sea debida a las colisiones entre núcleos (Ref. A2-4).

Se utilizan distintos modelos de interacción según la energía del proyectil. Se separa el rango de energías en tres regiones diferenciadas. La que interesa en este trabajo es la región de bajas energías

Para bajas energías, se utiliza la fórmula de Lindhard-Scharff (que es utilizada por el código TRIM) o el modelo de Firsov (utilizado por el código Marlowe – Ref. A2-5).

Para altas energías, se utiliza la fórmula de Bethe-Bloch y para energías intermedias, se utilizan aproximaciones semiempíricas, especialmente la de Biersack (Ref. A2-4).

En la referencia A2-6 se revisa y analiza en detalle el estado del arte actualizado al año 2006 de los modelos y algoritmos utilizados por los códigos más importantes disponibles para simular la interacción de haces de iones con la materia en la región de energías donde no se producen reacciones nucleares. Se revisan y comparan doce códigos diferentes disponibles públicamente, algunos de uso gratuito y otros no. Se analizan y comparan las bases de datos de stopping power y secciones eficaces de scattering utilizadas, la física involucrada, los modelos y los algoritmos utilizados. En el estudio comparado está incluido el TRIM, que fue el código que se utilizó en este trabajo.

Dispersión estadística en energía:

Cuando una partícula ingresa a un medio, pierde energía a través de una gran cantidad de colisiones independientes. Como las colisiones son estadísticas, su energía final estará dada por una función de distribución denominada dispersión estadística en energía (DEE) o “straggling”. También se produce una dispersión en el alcance.

La causa principal de DEE son las colisiones con electrones, y se requiere por esto un tratamiento cuántico del problema. En la práctica se utiliza el modelo de Bohr, debido a que en general el número de colisiones es grande, la fracción de energía del ión transferida en cada evento es muy pequeña y cada colisión es un proceso independiente. El modelo de Bohr predice una distribución gaussiana cuya varianza va a estar dada por

$$\sigma_B^2 = s^2 \Delta x \quad (\text{ec. A2.3})$$

donde

$$s^2 = 4\pi(Z_1 e^2)^2 N Z_2 \quad (\text{ec. A2.4})$$

Donde N: densidad atómica del material, Z_1 : número atómico del ión incidente y Z_2 : número atómico del ión blanco. La teoría de Bohr predice una varianza que es independiente de la energía del ión (Ref. A2-4).

A2.3 Interacción de partículas beta con la materia

Las partículas beta negativas o positivas, de origen nuclear, tienen velocidades que pueden llegar a ser cercanas a la velocidad de la luz. Pese a ello sus energías son menores, en general, a las de las partículas alfa de origen nuclear, que tienen energías entre 3 y 9 MeV. Las partículas beta en su

mayoría no alcanzan los 4 MeV, pero debido a su pequeña masa estas energías corresponden a velocidades que obligan a tratar a la radiación beta en forma relativista.

Las partículas beta son mucho más penetrantes. Para tener una idea comparativa, una partícula alfa de 3 MeV tiene un alcance en aire de 2,8 centímetros y produce alrededor de 4000 pares iónicos por milímetro de recorrido, mientras que una partícula beta de igual energía tiene un alcance en aire de más de 100 centímetros, y sólo produce 4 pares iónicos por milímetro.

Son varios los procesos de interacción por los cuales electrones de alta energía pueden interactuar con la materia al atravesarla, los más importantes son (Ref. A2-1):

- Frenamiento radiativo
- Dispersión elástica
- Dispersión inelástica

Las probabilidades relativas para la interacción por algunos de estos tres procesos varían con gran dependencia de la energía del electrón incidente y, en menor medida, con la naturaleza del medio absorbente.

Frenamiento radiativo

Cuando un electrón colisiona con un núcleo atómico por interacción coulombiana se pueden producir bruscas aceleraciones, y de acuerdo con las leyes de la electrodinámica, estas aceleraciones darán lugar a la emisión de radiación electromagnética de espectro continuo. Dado que las mayores aceleraciones ocurren sobre electrones energéticos atravesando el campo eléctrico de núcleos con cargas elevadas, el frenamiento radiativo es el proceso más importante en interacción con elementos de Z alto.

Dispersión elástica

Un electrón puede ser dispersado elásticamente en el campo coulombiano de un átomo. Como el átomo es mucho más pesado que el electrón, no hay prácticamente transferencia de energía, si bien puede tener lugar un cambio significativo en la dirección. El efecto es importante por hacer que la trayectoria efectiva se acorte al ser tortuoso el camino de frenado.

Dispersión inelástica (ionización y excitación)

El electrón en su desplazamiento puede excitar o ionizar por interacción coulombiana los átomos del material que atraviesa. Por este medio, la energía es depositada en el material a lo largo de la trayectoria. Este es el proceso dominante de pérdida de energía por debajo de los límites para el frenamiento por radiación. Si se denomina E_c a la energía cinética del electrón incidente, el poder de frenado se expresa según:

$$-\left(\frac{dE_c}{dx_T}\right) = \left(\frac{dE_c}{dx_D}\right) + \left(\frac{dE_c}{dx_R}\right) + \left(\frac{dE_c}{dx_N}\right) \quad (\text{ec. A2.5})$$

donde los subíndices indican T: total, D: dispersión inelástica, R: radiación y N: nuclear. O sea, si no se tiene en cuenta el efecto de las transformaciones nucleares, el poder de frenado total es la suma del término correspondiente a la dispersión inelástica más el de radiación. La relación entre ambas formas de pérdida de energía es proporcional a E_C y Z .

$$\frac{\left(\frac{dE_C}{dx_R}\right)}{\left(\frac{dE_C}{dx_D}\right)} = \left(\frac{E_C Z}{80}\right) \quad (\text{ec. A2.6})$$

A partir de esta expresión, se deduce la importancia del efecto de Bremsstrahlung para materiales pesados y energías elevadas. Por ejemplo, para un elemento como el plomo ($Z=82$) la pérdida de energía por radiación resulta importante incluso para energías de 1 MeV. En cambio en el aluminio ($Z=13$), la radiación de frenado consume sólo un pequeño porcentaje de la energía de la partícula. Por esta razón no se emplea plomo para blindar fuentes beta de alta actividad. Mientras que el aluminio, donde la radiación pierde gran parte de su energía en choques inelásticos con los electrones orbitales produciendo ionización, resulta ser un blindaje adecuado para este tipo de radiación.

Desarrollo de la interacción para un electrón que ingresa al medio absorbente

Cuando los electrones de alta energía ingresan en el medio absorbente primero pierden una parte de ésta por frenamiento radiativo, luego una serie de colisiones inelásticas provocan una elevada ionización, como así también una excitación de átomos a lo largo de su trayectoria. Para electrones con bajas energías ocurre gran cantidad de dispersiones elásticas con trayectorias cortas para finalmente ser capturados. Estadísticamente, algunos electrones frenados tienen trayectorias más largas que otros, antes de ser capturados, dando lugar a una penetración más profunda. Este fenómeno de dispersión en el alcance, como se describió anteriormente, es el "Straggling".

La ley de transmisión a través del absorbente depende de la fuente emisora. Para haces de electrones mono energéticos obtenidos por un acelerador, la penetración es prácticamente lineal, como se observa en la Figura A2.1. El alcance se determina por el valor de la abscisa correspondiente al punto de extrapolación de la recta.

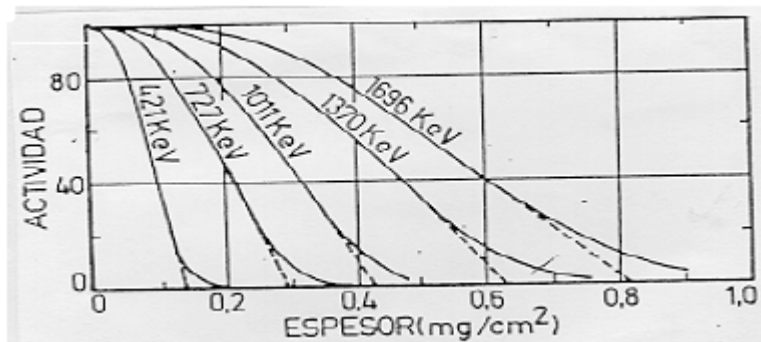


Figura A2.1. Transmisión de partículas beta en función del espesor del absorbente

Es posible determinar el alcance en un dado material a partir del conocimiento del alcance en otro medio. Para ello se utiliza una regla empírica que relaciona los alcances en diferentes medios, estableciendo que el producto del alcance de la partícula por la densidad del medio es independiente de este. De manera análoga resulta entonces que en una primera aproximación:

$$R_1 = \frac{(R_0 \rho_0)}{\rho_1} \quad (\text{ec. A2.7})$$

A2.4 Interacción de protones con la materia

Como se mencionó anteriormente, cuando un protón atraviesa la materia, interactúa con numerosos electrones y con los núcleos de los átomos de la red. En esta sección describiremos primero la interacción con los electrones de la red y luego la interacción con los núcleos.

Cuando un protón interactúa con un núcleo puede darse una colisión elástica o inelástica. Cuando se acerca el protón al núcleo, puede haber pérdidas de energía, además de la pérdida de energía mecánica que ocurre por la simple colisión elástica. A esta pérdida de energía inelástica se la denomina Q, y es aproximadamente fija y depende del elemento blanco, del proyectil y de su energía.

Por debajo de la barrera coulombiana (ver el título final de esta sección), el protón puede pasar por efecto túnel o su campo puede poner a vibrar algún nucleón que luego pierde energía por desexcitación emitiendo un fotón gamma. También puede haber fusión subcoulombiana o transferencia. La barrera coulombiana no tiene un corte abrupto en energías.

Por encima de la barrera coulombiana puede haber dipping elastic reactions, en las cuales un nucleón es golpeado o sacado de su posición. Con energías mayores se producen otras reacciones como la fragmentación del núcleo (spallation).

Cuando no hay pérdida de energía inelástica (Q=0), es caso del scattering clásico de Rutherford, que coincide con la primera aproximación cuántica. Es elástico y sólo se pierde energía por el efecto mecánico del choque. El núcleo blanco se considera como una carga puntual.

La energía transmitida y su máximo valor, para una colisión elástica, en el sistema de referencia del laboratorio, es:

$$T = E_2(t = \infty) = 4 \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} E_1 \cos^2 \theta \quad (\text{ec. A2.8})$$

$$T_M = E_2^{\max} = 4 \frac{m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} E_1 \quad (\text{ec. A2.9})$$

La sección eficaz de Rutherford, en el sistema de referencia del centro de masas, es (Ref. A2-7):

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_C = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E_C \text{sen}^2 \left(\frac{\Theta_C}{2} \right)} \right)^2 \quad (\text{ec. A2.10})$$

Donde Z_1 y Z_2 son los números atómicos del proyectil y el blanco, e es la carga del electrón ($e=4,80 \cdot 10^{-10}$ statC), E_c es la energía cinética del proyectil inmediatamente antes de la colisión y θ_c es el ángulo de scattering respecto a la trayectoria incidente. Esta fórmula es válida también en el sistema de referencia del laboratorio pero solo para $m_1 \ll m_2$. Para el caso general, la transformación de la ecuación A2-10 desde el sistema centro de masas al sistema de laboratorio, es (Ref. A2-7):

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) = \left(\frac{Z_1 Z_2 e^2}{4E} \right)^2 \frac{4}{\text{sen}^4 \Theta} \frac{\left\{ \left[1 - \left((m_1 / m_2) \text{sen} \Theta \right)^2 \right]^{1/2} + \cos \Theta \right\}^2}{\left[1 - \left((m_1 / m_2) \text{sen} \Theta \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (\text{ec. A2.11})$$

Donde θ es el ángulo de scattering respecto a la trayectoria incidente y E es la energía cinética del proyectil inmediatamente antes de la colisión. Como la sección eficaz de Rutherford varía con la inversa de la cuarta potencia del seno del ángulo delantero, la probabilidad del choque elástico para ángulos delanteros es mucho mayor que para ángulos traseros.

En la tabla A2-1 se muestran todos los elementos que entran en la composición de una celda solar ATJ Emcore (Ref. A2-8). Se indican los valores de masa atómica, número atómico y el porcentaje máximo de la energía del protón incidente que puede ser transferida al núcleo respectivo.

Barrera Coulombiana

Se define como barrera coulombiana a la máxima energía del proyectil para la cual no se producen reacciones nucleares con los núcleos blancos. Dado que el radio nuclear es proporcional a $m^{1/3}$, su expresión en el sistema del laboratorio estará dada por:

$$BC(MeV) = k \frac{Z_1 Z_2}{(m_1^{1/3} + m_2^{1/3})} \left(1 + \frac{m_1}{m_2} \right) \quad (\text{ec. A2.12})$$

donde k es una constante que equivale a e^2/R_0 , siendo R_0 el radio nuclear unitario que vale 1,4 fm/u.m.a.. El valor de k es 0,9 (Ref. A2-4).

Elemento	Masa atómica	Número atómico	Máximo porcentaje de energía incidente transferible [%]
O	16	8	22.1
F	19	9	19.0
Mg	24	12	15.4
Al	27	13	13.8
Si	28	14	13.3
P	31	15	12.1
Ti	48	22	8.0
Cu	63	29	6.2
Zn	64	30	6.1
Ga	69	31	5.6
Ge	74	32	5.3
As	75	33	5.2
Ag	107	47	3.7
In	115	49	3.4
Au	197	79	2.0

Tabla A2-1. Elementos que en mayor o menor medida están presentes en una celda ATJ Emcore. Se indican sus masas atómicas y sus números atómicos. Se ordenan en función del número atómico creciente. Se indica el máximo porcentaje de la energía del protón incidente transferible en una colisión. Los elementos más abundantes se muestran sombreados.

En la figura A2-2 se indican las barreras coulombianas para distintos tipos de partículas (protones, deuterones, helio3 y helio4) en función del del número atómico Z del núcleo blanco (Ref. A2-9).

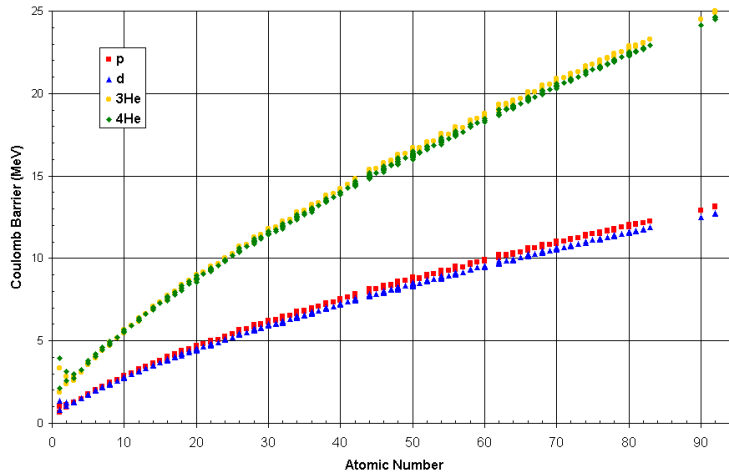


Figura A2-2. Barrera Coulombiana en MeV para todos los núcleos estables para reacciones inducidas por protones, deuterones, helio-3 y helio-4 en función del número atómico Z del núcleo blanco (Ref. A2-9).

A2-5 Cascadas de Desplazamiento

Para facilitar la comprensión, describiremos primero los fenómenos fundamentales que se producen en una cascada y luego describiremos su desarrollo en el orden temporal en el que se producen.

El campo eléctrico de la partícula incidente influye al átomo excitando orbitales electrónicos.

Cuando la partícula incidente colisiona con un átomo, si tiene energía suficiente, lo desplaza de su posición en la red (se generan PKA's). Hay una energía de desplazamiento mínima E_d para romper las ligaduras de un átomo a la red. También hay una barrera de potencial entre la posición original y la posición intersticial a la cual va a parar el átomo desplazado. La energía transferida por el proyectil al átomo está entre 0 y T_{max} (ver ecuación A2-9). El número total de átomos desplazados, en la aproximación simplificada de Kinchin-Pease el número de desplazamientos calculados $N_d(E)$, es proporcional a la energía del proyectil y está dado por (Ref. A2-10)

$$N_d(E_k) = 0 \quad \text{para } E_k < E_d \quad (\text{ecs. A2.13})$$

$$N_d(E_k) = 1 \quad \text{para } E_d < E_k < 2E_d$$

$$N_d(E_k) = \frac{E_k}{2E_d} \quad \text{para } E_k > 2E_d$$

Donde E_k es la energía incidente, N_d es el número de desplazamientos calculados, E_d es la energía media necesaria para formar un par de Frenkel y E_{max} es la máxima energía transmisible en una colisión.

La función de daño verdadero tiene que ver con la eficiencia (ξ^0) de los desplazamientos para producir pares de Frenkel

$$v(E) = \xi^0 N_d(E) \quad (\text{ec. A2.14})$$

Siendo $v(E)$ la función de daño “verdadero”.

La energía transferida por el PKA a sus vecinos puede ser lo suficientemente alta para desplazarlos y estos a su vez desplazar a otros átomos produciendo sucesivos procesos de desplazamientos (cascada de desplazamientos).

Los desplazamientos atómicos se propagan a grandes distancias del origen de la cascada vía colisiones de re-emplazamiento o por propagación como crowdion. El crowdion es la inclusión de un átomo en una hilera de átomos a lo largo de una línea cristalográfica (viene del inglés “crowd-in one more”).

Los átomos auto intersticiales (Self Interstitial Atoms o SIAs), se distribuyen en una zona difusa alrededor del borde de las cascadas y de su núcleo.

Las vacancias se concentran en una zona al final del recorrido del PKA, donde está en núcleo de la cascada o “depleted zone” (Ref. A2-11).

El tamaño y forma de la cascada depende de la energía del PKA y del Z del material. Z pequeños dan rangos de los PKA extendidos y cascadas difusas. Z grandes dan rangos de los PKA cortos y cascadas compactas localizadas y bien definidas (Ref. A2-12).

Pico Térmico o Thermal Spike:

Durante el proceso de desaceleración de los átomos energéticos en un sólido, la energía cinética del movimiento de los iones es parcialmente transferida a los átomos de la red por las colisiones elásticas. Los átomos impactados a su vez, transfieren parte de su energía a otros átomos y así sucesivamente. De este modo evoluciona una cascada que resulta en la formación de una región muy alterada y muy caliente en el interior del sólido. Este fenómeno, que es bien conocido en el caso de la implantación de iones, se llama “pico térmico” o “thermal spike”. Se puede considerar como la fusión local de corto plazo de la región afectada por la implantación. Esta fusión es seguido por un rápido enfriamiento de la fase líquida para formar una zona dañada y amorfa o no en la estructura del sólido (algunas aleaciones amortizan; los metales puros no). El tiempo de vida de los termal spikes es del orden de los picosegundos.

Evolución temporal del daño por desplazamiento:

En la tabla A2-2 se indican esquemáticamente las fases, los fenómenos involucrados y los tiempos característicos del daño por desplazamiento (Refs. A2-12 y A2-13). En la cascada de daño, la etapa inicial es la cascada de colisiones propiamente dicha (fases 1 y 2). La siguiente es la etapa térmica o de spike (fases 3 a 6).

FASE	SUCESO	RESULTADO	TIEMPO [ps]
1°	<ul style="list-style-type: none"> - Colisión - Transferencia de energía de retroceso 	<ul style="list-style-type: none"> - Se genera el Primary Knock on Atom (PKA) 	10 ⁻⁶
2°	<ul style="list-style-type: none"> - Generación de una cascada - Detención del PKA 	<ul style="list-style-type: none"> - Átomos desplazados - Vacancias - Subcascadas 	10 ⁻⁶ - 0,2
3°	<ul style="list-style-type: none"> - Formación del spike 	<ul style="list-style-type: none"> - Zona fundida de baja densidad (gotita) - Frente de Choque (SOC front) 	0,2 – 0,3
4°	<ul style="list-style-type: none"> - Relajación del spike – eyección de intersticiales - Transición gota caliente a líquido subenfriado 	<ul style="list-style-type: none"> - SIA's estables (Self Interstitial Atoms) - Desorden atómico 	0,3 – 3
5°	<ul style="list-style-type: none"> - Solidificación y enfriamiento del núcleo 	<ul style="list-style-type: none"> - Núcleo de la cascada (depleted zone) - Zona desordenada - Zona amorfa - Colapso de las vacancias 	3 – 10
6°	<ul style="list-style-type: none"> - Recombinación intracascada activada térmicamente - Escape de SIA's y vacancias de las cascadas - Recombinación fuera de las cascadas 	<ul style="list-style-type: none"> - Defectos supervivientes - Flujo estable de defectos escapando de la cascada y migrando hacia sumideros - Crecimiento-eliminación de aglomerados de vacancias y SIA's (lazos de dislocaciones) - Segregación de impurezas disueltas - Formación de defectos complejos - Decoración de defectos (agrupación de impurezas en ellos) 	10 [∞]

Tabla A2-2 Descripción cualitativa de las fases de una cascada de daño. Estas descripciones están basadas en observaciones de microscopía electrónica de alta resolución (HRTEM) y experimentos de simulación aplicando dinámica molecular (Ref. A2-12).

Referencias:

- A2-1. <http://200.0.198.11/Prog-cur/T%E9cnicos/2004/MANUAL/02-03.PDF>
- A2-2. "Space, Atmospheric and Terrestrial Radiation Environments", J. L. Barth, C. S. Dyer, and E. G. Stassinopoulos, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 50, NO. 3, JUNE 2003.
- A2-3. "Irradiation effects in crystalline solids", John Gittus, Applied Science Publishers Ltd., England, 1978.
- A2-4. "Interacción Ión-Materia: Métodos de caracterización de la composición química y de la estructura de defectos", Martín.A. Alurralde, Tesis de Doctorado, Instituto Balseiro, (1995).
- A2-5. www.marlowe-code.de
- A2-6. "Status of ion beam data analysis and simulation software", E. Rauhala, N.P. Barradas, S. Fazinic, M. Mayer, E. Szilágyif,

- M. Thompson, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 244, Issue 2, (March 2006), pp. 436-456.
- A2-7. "Backscattering Spectrometry", Wei-Kan Chu, James W. Mayer and Marc A. Nicolet, Academic Press Inc. (1978)
- A2-8. www.emcore.com
- A2-9. http://users.ugent.be/~kstrykmn/nuclear/Coul_bar.html
- A2-10. "The Displacement of Atoms in Solids by Radiation", G.H. Kinchin, R.S. Pease, Rep. Prog. Phys, 18, I, (1955).
- A2-11. "Displacement Cascades, Dynamics and Atomic Structure", D.N. Seidman, R.S. Averback, K. Benedek, Physica Status Solidi (B), Vol. 144, Issue 1, pp.85-104 (2006).
- A2-12. <http://bacterio.uc3m.es/docencia/profesores/teresa/matavan/3.pdf>
- A2-13. "Daño por Radiación", Módulo de la Maestría en Ingeniería de Materiales, Instituto Sábato, Argentina, (Noviembre 2004).

APÉNDICE 3

Facilidad SPENVIS

Spenvis es una interfase disponible en internet y está patrocinada por la ESA (European Space Agency). Permite acceder a modelos del ambiente espacial y sus efectos, incluidos los cinturones de radiación naturales, las partículas solares energéticas, los rayos cósmicos, plasmas, gases y micro partículas (Ref. A3-1).

El uso de Spenvis es gratuito y sólo se requiere registrarse como usuario. Para utilizar Spenvis, primero hay que definir la trayectoria del vehículo espacial o definir una grilla de coordenadas para luego obtener uno o más de los siguientes resultados:

- coordenadas geomagnéticas.
- flujos de protones y electrones atrapados. Fluencias de protones solares.
- dosis de radiación (ionizante y no ionizante) para objetos de geometrías simples.
- dosis de radiación calculadas con análisis por sectores para geometrías complejas.
- fluencias para daño equivalente para celdas solares de Si, GaAs y multicapas.
- Análisis usando Geant4 Monte Carlo para calcular dosis en blindajes planos y esféricos.
- LET de iones y (flux spectra). Tasas de eventos singulares.
- anisotropía del flujo de protones.
- densidades y temperaturas atmosféricas e ionosféricas.
- profundidades de erosión generadas por bombardeo de oxígeno.

Con Spenvis se pueden trazar las líneas de campo magnético, como así también se pueden generar mapas de campo magnético terrestre con dependencia en altura. También se puede acceder a modelos actuales de atmósfera neutra y de la ionosfera.

Spenvis también dispone de modelos para la generación de carga eléctrica, tanto superficial como interna, en los artefactos utilizados en el espacio.

Con una herramienta del software se pueden visualizar datos satelitales y generar gráficos de valores medidos experimentalmente en combinación con índices geomagnéticos y solares.

También contiene modelos de cálculo para micrometeoros y basura espacial.

Actualmente (Marzo de 2008) se está desarrollando un módulo de análisis de riesgos de impacto para la basura espacial.

A continuación se detalla el cálculo hecho con SPENVIS, con la cual se ha calculado la dosis equivalente para dos duraciones de misión: 3 y 5 años. Este cálculo fue realizado en un trabajo previo y se utilizó como dato de entrada para el presente trabajo de tesis (Ref. A3-2). Spenvis utiliza el método JPL (ver sección 3.1).

Las características de la órbita modelada son las siguientes:

Características de la misión:

Número de segmentos de la misión:	1
Inicio:	14/07/2009 15:30:00
Término:	13/07/2014 15:30:00
Duración:	1825.00 días (5.00 años)

La radiación atrapada se modeló del siguiente modo:

Eje satelital:	coincide con el vector velocidad.
----------------	-----------------------------------

Datos específicos de la órbita:

Tipo de órbita:	heliosincrónica
Apogeo:	657,0 km
Perigeo:	657,0 km
Inclinación:	98,01°
Ascensión Recta del Nodo Ascendente:	202,24°
Argumento del perigeo:	0,00°
Anomalía verdadera:	0,00°
Período:	1,63 hs
Número de órbitas:	14,71
Duración:	1 día
Inicio:	14/07/2009 15:30:00
Término:	15/07/2009 15:30:00
Final del segmento:	13/07/2014 15:30:00
Longitud del segmento:	1825,00 días
Semi latus rectum:	7035,17 km
Semi eje mayor:	7035,17 km
Excentricidad:	0,00
Movimiento medio:	92,44 rad/día
Intervalo de integración:	0,50°

GLOSARIO DE TÉRMINOS:

- Apogeo: punto de la órbita con la máxima distancia al centro de la Tierra
- Perigeo: punto de la órbita con la mínima distancia al centro de la Tierra
- Inclinación: ángulo formado entre el plano de la órbita y el plano de la órbita de la Tierra.
- Ángulo del Nodo Ascendente: nodo ascendente es el punto en el que la órbita intercepta el plano ecuatorial cuando el satélite se mueve de sur a norte. El nodo es descendente en el caso opuesto. La línea de los nodos une los dos nodos.
- Ascensión Recta del Nodo Ascendente: Es el ángulo entre la línea definida por el centro de la tierra y el punto en que el satélite cruza el plano ecuatorial y la línea definida por el centro de la tierra y el punto en que el Sol cruza ese mismo plano en el equinoccio de primavera (21 de Marzo).
- Argumento del perigeo: es el ángulo entre el plano ecuatorial y el eje mayor de una órbita elíptica.

- Anomalía verdadera: para una órbita elíptica, es el ángulo entre la posición del perigeo y la posición actual, medido en el sentido de giro del satélite.
- Semi latus rectum: es la distancia entre el foco de una elipse y la elipse propiamente dicha, medida perpendicularmente al eje mayor.
- Semi eje mayor: la mitad del eje mayor
- Excentricidad ε : si a =semieje mayor y b = semieje menor,

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

Los modelos empleados para simular el campo de radiación fueron los siguientes:

Modelo para protones atrapados: AP-8 MAX (Ref. A3-3):

Modelo para campo magnético interno: GSFC 12/66 120 Term actualizado 1970.0

Modelo para campo magnético externo: Ninguno

Modelo para electrones atrapados: AE-8 MAX (Ref. A3-3):

Modelo para campo magnético interno: Jensen & Cain 1960 actualizado 1960.0

Modelo para campo magnético externo: Ninguno

Las variaciones debidas a la hora local no se tomaron en cuenta

Probabilidad de que los flujos no serán excedidos (AE-4): 50%

Modelo para anisotropía del campo de radiación:

Modelo UPMAX

Número de direcciones a evaluar: 180

Modelo para protones solares: Como las tormentas solares son eventos estadísticos, se emplearon dos intervalos de confianza. Uno con el 95 y otro con el 99.9% de probabilidad de que la fluencia no exceda el valor calculado.

Fluencia total en condición ESP. ESP es un modelo de protones solares apropiado para energías menores a 10 MeV y es apto para modelar daño en celdas solares (Ref. A3-5).

Protección geomagnética: se utilizó la fórmula de Størmer para magnetosfera turbulenta (Ref. A2-1).

Período de predicción: 3,00 y 5,00 años (3,00 y 5,00 años en el máximo solar, 0,00 años en el mínimo solar, dentro de un ciclo solar).

Hipótesis referidas a la celda solar:

Como Spenvis no incluye datos para celdas Emcore ATJ, para obtener la fluencia equivalente para electrones de 1 MeV, se utilizó la celda Spectrolab 3J EOL porque ambas están diseñadas para el mismo segmento de mercado.

Los coeficientes de conversión de protones de 10 MeV a electrones de 1 MeV para celdas Spectrolab 3J EOL son:

Pmax: 870,0 Voc: 1020,0 Isc: 565,0

Se introdujeron parámetros de blindaje sugeridos por el Dr. Kevin Crist (Ref. A3-4). Asumiendo que la superficie frontal está cubierta por una capa de 100 μm de vidrio CMG100-AR de Thales (Ref. A3-6) los blindajes tienen las siguientes densidades lineales:

Panel trasero = $0,21 \text{ g/cm}^2$
 Cobertura frontal = $0,022 \text{ g/cm}^2$

Se asume que la pérdida de energía en g/cm^2 es independiente de la composición. En todos los casos los valores fueron interpolados linealmente entre los valores proporcionados por el código Spenvis.

Resultados para misión de 3 años:

En las tablas A3-1 a 4 se indican las fluencias equivalentes [cm^{-2}] para electrones de 1 MeV

Espesor de Cubierta de Vidrio		Fluencia Total para cada parámetro (para nivel de confianza del 95.0 %)			Fluencia Total para cada parámetro (para nivel de confianza del 99.9 %)		
g cm^{-2}	μm	P_{max}	V_{oc}	I_{sc}	P_{max}	V_{oc}	I_{sc}
0.0000	0.00	1.378E+15	1.615E+15	1.832E+15	1.352E+15	1.585E+15	1.765E+15
0.0056	25.41	1.169E+14	1.370E+14	1.103E+14	1.635E+14	1.916E+14	1.341E+14
0.0168	76.36	5.080E+13	5.948E+13	4.275E+13	1.049E+14	1.229E+14	7.647E+13
0.0335	152.27	2.816E+13	3.294E+13	2.176E+13	7.820E+13	9.162E+13	5.312E+13
0.0671	305.00	1.606E+13	1.878E+13	1.143E+13	5.778E+13	6.770E+13	3.682E+13
0.1120	509.09	1.034E+13	1.209E+13	6.965E+12	4.453E+13	5.217E+13	2.725E+13
0.1675	761.36	7.110E+12	8.310E+12	4.244E+12	3.504E+13	4.106E+13	1.969E+13
0.3350	1522.73	4.254E+12	4.975E+12	2.333E+12	2.393E+13	2.804E+13	1.274E+13

Tabla A3-1. Fluencias equivalentes [cm^{-2}] para P_{max} , V_{oc} e I_{sc} para electrones de 1 MeV. Duración de la misión : 3 años. Se indican los valores para distintos espesores de cobertura de vidrio y dos niveles de confianza.

	Fluencia para cada parámetro (95.0 % confidence level)			Fluencia para cada parámetro (99.9 % confidence level)		
	P_{max}	V_{oc}	I_{sc}	P_{max}	V_{oc}	I_{sc}
Cara trasera	6.02E+012	7.02E+012	3.50E+012	3.10E+013	3.64E+013	1.71E+013
Cara delantera	4.04E+013	4.72E+013	3.28E+013	9.36E+013	1.10E+014	6.64E+013
Fluencia Total [cm^{-2}]	4.64E+013	5.42E+013	3.63E+013	1.25E+014	1.46E+014	8.35E+013
Fluencia Total [$\text{p}^+/\text{cm}^{-2}$] (E=10 Mev)**	5.33E+010	5.31E+010	6.42E+010	1.44E+011	1.43E+011	1.48E+012
Degradación [%]	96.9	96.7	99.8	95.0	94.8	99.8

Tabla A3-2. Fluencias equivalentes totales [cm^{-2}] para electrones de 1MeV y protones de 10 MeV para P_{max} , V_{oc} e I_{sc} y una misión de 3 años. Además del valor de fluencia total se e indican los valores para electrones de 1 MeV en las caras delantera y trasera de la celda. Todos los valores se indican para dos niveles de confianza. La celda es la Spectrolab 3J.

Resultados para misión de 5 años:

Fluencias equivalentes [cm^{-2}] para electrones de 1 MeV

Espesor de Cubierta de Vidrio		Fluencia Total para cada parámetro (para nivel de confianza del 95.0 %)			Fluencia Total para cada parámetro (para nivel de confianza del 99.9 %)		
g cm^{-2}	μm	P_{max}	V_{oc}	I_{sc}	P_{max}	V_{oc}	I_{sc}
0.0000	0.00	2.238E+15	2.623E+15	2.989E+15	2.196E+15	2.575E+15	2.901E+15
0.0056	25.41	1.733E+14	2.030E+14	1.637E+14	2.189E+14	2.564E+14	1.850E+14
0.0168	76.36	7.454E+13	8.726E+13	6.248E+13	1.277E+14	1.496E+14	9.370E+13
0.0335	152.27	4.153E+13	4.858E+13	3.180E+13	9.182E+13	1.075E+14	6.143E+13
0.0671	305.00	2.418E+13	2.827E+13	1.701E+13	6.835E+13	8.006E+13	4.254E+13
0.1120	509.09	1.590E+13	1.858E+13	1.057E+13	5.373E+13	6.294E+13	3.203E+13
0.1675	761.36	1.114E+13	1.302E+13	6.581E+12	4.322E+13	5.062E+13	2.373E+13
0.3350	1522.73	6.825E+12	7.981E+12	3.704E+12	3.050E+13	3.574E+13	1.587E+13

Tabla A3-3: Fluencias equivalentes [cm^{-2}] para P_{max} , V_{oc} e I_{sc} para electrones de 1 MeV. Duración de la misión : 5 años. Se indican los valores para distintos espesores de cobertura de vidrio y dos niveles de confianza.

	Fluencia para cada parámetro (para nivel de confianza del 95.0 %)			Fluencia para cada parámetro (para nivel de confianza del 99.9 %)		
	P_{max}	V_{oc}	I_{sc}	P_{max}	V_{oc}	I_{sc}
Cara trasera	9.50E+012	1.11E+013	5.48E+012	3.86E+013	4.52E+013	2.08E+013
Cara delantera	5.93E+013	6.96E+013	4.81E+013	1.12E+014	1.32E+014	7.92E+013
Fluencia Total [$\text{e}^-/\text{cm}^{-2}$]	6.88E+013	8.07E+013	5.36E+013	1.51E+014	1.77E+014	1.00E+014
Fluencia Total [$\text{p}^+/\text{cm}^{-2}$] (E=10 Mev)**	7.90E+010	7.91E+010	9.49E+010	1.73E+011	1.73E+011	1.77E+011
Degradación [%]	96.6	96.0	99.8	94.2	94.4	99.8

Tabla A3-4. Fluencias equivalentes totales [cm^{-2}] para electrones de 1MeV y protones de 10 MeV para P_{max} , V_{oc} e I_{sc} y una misión de 5 años. Además del valor de fluencia total se indican los valores para electrones de 1 MeV en las caras delantera y trasera de la celda. Todos los valores se indican para dos niveles de confianza. La celda es la Spectrolab 3J.

De estos cálculos se deduce que el parámetro más afectado fue V_{oc} , seguido de P_{max} . La corriente I_{sc} prácticamente no fue afectada por la radiación. Al final de los periodos estudiados, todos los parámetros por encima del 96 ó 94% de los valores BOL, para niveles de confianza de 95 y 99.9% respectivamente. Los valores de fluencia para protones de 10 MeV se obtuvieron usando los coeficientes de conversión de protones de 10 MeV a electrones de 1 MeV para celdas Spectrolab 3J EOL.

Referencias:

- A3-1. <http://www.spennis.oma.be>.
- A3-2. Documento interno convenio CONAE-CNEA "Cálculo de la Degradación Celdas Emcore ATJ para tres y cinco años

utilizando el método JPL”CAC-PSE-ENV-01400A-IN (Octubre 2007).

- A3-3. “Handbook of Radiation Effects”, Andrew Holmes-Siedle & Len Adams.
- A3-4. Dr. Kevin Crist, Comunicación personal, Emcore Corp.
<http://www.emcore.com>
- A3-5. <http://www.spervis.oma.be/spervis/help/background/flare/flare.html>
- A3-6. <http://www.thalescomponents-us.com>

APENDICE 4

TRABAJO EN CURSO Y FUTURO

Al momento de presentación de este libro de tesis y con el propósito de complementar desde la base de una simulación teórica el estudio experimental realizado, se continúa con la simulación de daño producido por protones en celdas solares EMCORE ATJ. En ese estudio se está considerando una incidencia isotrópica de partículas incidentes y se otorga énfasis a la estimación del daño para las primeras capas, que son las de mayor sensibilidad (ver explicación al final de la sección 5.2.2).

Se está trabajando en la simulación del daño con protones utilizando como blanco una simplificación de la celda Emcore ATJ. La celda cuya estructura aproximada se muestra en la tabla 2.1 se simuló con un blanco formado por dos capas. La primera capa simula la celda superior con su back surface field (BSF) y su juntura túnel. Este primer conjunto se aproximó con una sola capa de 0,68 μm de espesor de composición InGaP. La segunda capa simula la celda intermedia con su BSF, su capa buffer y su juntura túnel. Este segundo conjunto se aproximó con una sola capa de 3,53 μm de espesor de composición GaAs.

Para simular el efecto del espectro espacial, incluyendo el efecto del ángulo de incidencia producido por la irradiación isotrópica, se simuló este blanco aproximado con catorce energías diferentes (3,8 – 4,7 – 5,45 – 6,15 – 7,4 – 8,5 – 9,5 – 10,4 – 11,3 – 12,1 – 12,8 – 13,6 – 14,3 – y 15 MeV) y para cada una de estas energías se simularon cinco ángulos de incidencia distintos (0, 20, 40, 60 y 80 grados). El número de protones simulados para cada energía fue proporcional a la intensidad del espectro espacial para el correspondiente valor de energía. El número de protones simulados varió entre 2000 y 22700 según la energía considerada. El espectro espacial utilizado fue el Spenvis AP8, que se muestra en la figura 3.8.

Este blanco aproximado se simuló con el TRIM en uno de los siete modos disponibles en el código, que se denomina “layer by layer”. En este modo de ejecución, el programa guarda información sobre cada colisión individual simulada en un archivo denominado “collison.txt”. Procesando luego este archivo, se puede sacar información sobre la distribución de energías PKA's.

Este modo de ejecución es muy lento, ya que se guarda información que en otros modos de ejecución no se guarda, y esto debe hacerse para un gran número de protones incidentes para tener estadística suficiente. Para hacer más eficientes las corridas, hay que especificar la zona del blanco en la que se quiere guardar información detallada sobre las colisiones. En este blanco simulado hay dos zonas de interés en las cuales se quiere evaluar el daño. Una es la primera capa (desde la superficie hasta 0,68 μm de profundidad), correspondiente a la primera subcelda y otra es la segunda capa (desde 0,68 μm hasta 3,53 μm de profundidad), correspondiente a la segunda subcelda. En este segundo caso, el blanco se debe simular completo, ya que

los protones deben llegar a la segunda capa luego de haber colisionado e interactuado con los átomos de la primera capa.

Se concluyeron las simulaciones TRIM correspondientes a las dos capas, que fueron almacenadas en dos conjuntos de 70 archivos cada uno. El paso siguiente deberá ser la elaboración de este conjunto de archivos para sacar información sobre la distribución de energías PKA's. Los resultados de estas simulaciones serán publicados cuando se complete y consolide la información a obtener.

REFERENCIAS

1. http://www.conae.gov.ar/prensa/6to_aniversarioSAC-C.pdf
2. http://www.asi.it/CosmoSkymed/About_COSMO-SkyMed.htm
3. <http://www.rionegro.com.ar/arch200301/s24g03.html>
4. <http://www.conae.gov.ar>
5. "Fabricación y ensayo de paneles solares para uso espacial; módulo de ingeniería para la misión AQUARIUS/SAC-D", en Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 9, 2005 (ISSN 0329-5184).
6. http://www.nasa.gov/centers/wstf/laboratories/hypervelocity/index_prt.htm
7. "Spacecraft Power Technologies", A.K. Hyder, R.L. Wiley, G. Halpert, D.J. Flood & S. Sabripour, Imperial College Press (2000).
8. "Space, Atmospheric and Terrestrial Radiation Environments", J.L. Barth, C.S. Dyer and E.G. Stassinopoulos, IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 50, N° 3, (June 2003).
9. "Handbook of Radiation Effects", Andrew Holmes-Siedle & Len Adams.
10. <http://www.ll.mit.edu/ST/sbv/saa.html>
11. http://www.fas.org/spp/military/docops/army/ref_text/chap07f.htm
12. "Radiation assurance for the space environment", J.L. Barth, K.A. LaBel and Ch. Poivey, IEEE International Conference on Integrated Circuit Design and Technology, pp. 323-33, (2004).
13. Sophie Duzzelier, Comunicación personal, ONERA (The French Aerospace Organization) duzzelier@oncert.fr
14. "Introduction to ultrahigh energy cosmic ray physics", Pierre Sokolsky, Addison-Wesley Publishing Co., Inc., (1989).
15. "Cosmic Rays", R.A. Mewaldt, Macmillan Encyclopedia of Physics of 1996.
16. "The space radiation environment for electronics", Stassinopoulos, E.G., IEEE Proceedings, 76, 1423-42, (1988).
17. "The radiation environment", E.J. Daly, en ESA (1989)
18. http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/126/htm/sec_8.htm
19. Martín Alurralde, comunicación personal, Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina, alurrald@cnea.gov.ar
20. "Displacement damage effects in mixed particle environments for shielded spacecraft CCDs", IEEE Transactions on Nuclear Science, NS-38, 1628-37, (1991).
21. "The effects of radiation on electronic systems", Messenger, G.C. and Ash, M.S., 2nd. Ed., Van Nostrand Reinhold, New York (1992).
22. http://www.inetdaemon.com/tutorials/telecom/satellite/satellite_subsystems.shtml.

23. "Desarrollo, fabricación y ensayo de paneles solares para uso espacial en la CNEA", C.G. Bolzi et al., Reunión CORENDE 2005, Neuquén, Argentina.
24. Curso de Postgrado "Energías Renovables", Instituto Sabato, Universidad Nacional de San Martín, (2006).
25. Informe Interno grupo GES-CNEA, Juan Plá, (2006).
26. Juan Plá, comunicación personal, Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina, jpla@tandar.cnea.gov.ar
27. "The influence of the InGaP window layer on the optical and electrical performance of GaAs solar cells", J. Plá, M. Barrera y F. Rubinelli, *Semicond. Sci. Technol.* 22, pp.1122–1130, (2007).
28. "Simulación numérica de celdas solares de GaAs", M. Barrera, J. Plá y F. Rubinelli, en *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 11, 2007, ISSN 0329-5184.
29. http://www.emcore.com/product/space_photovoltaic.php
30. "Modelling solar cell degradation in space: A comparison of the NRL displacement damage dose and the JPL equivalent fluence approaches", S.R. Messenger, G.P. Summers, E.A. Burke, R.J. Walters and M.A. Xapsos, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS-49, 2690 (2002).
31. H.Y. Yada, J.R. Carter, B.E. Anspaugh and R.G. Downing, *The Solar Cell Radiation Handbook*, 3rd ed., JPL Publication 82-69.
32. "Application of displacement damage dose analysis to low-energy protons on silicon devices", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol 49, N° 6, December 2002.
33. M. Alurralde, *Journal of Applied Physics*, Vol. 95, N° 71, "Method using the primary knock-on atom spectrum to characterize electrical degradation of monocrystalline silicon solar cells by space protons", pp 3391-3396, (2004).
34. "AP8 Trapped Proton environment for solar maximum and solar minimum", D.M. Sawyer and J.I. Vette, NASA Publication NSSCE 76-06, (1976).
35. "The AE-8 Trapped Electron model environment", J.I. Vette, NASA Publication NSSDC91-24, (1991).
36. E.A. Burke, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS-33, 1276 (1986).
37. H.S. Sandhu, J. M. Cameron and W.F. McGill, *Nucl. Phys. A* 169, 600 (1971).
38. A.E. Glassgold, W.B. Cheston, M.L. Stein and G.W. Erikson, *Phys. Rev.* 106, 1207 (1957).
39. T. Okino, *Solid State Phenomenom.* 71, 1 (2000).
40. Documento interno convenio CONAE-CNEA N° CAC-PSE-ENV-00610A-IN, "Degradación de celdas Emcore 3ATJ para 3 y 5 años en órbita tipo SAC-D".

41. <http://www.spennis.oma.be>
42. "Next generation radiation environment models", J. Barth, Proc. 4th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Application. Tsukuba. Octubre 11-13, (2000), pp 139-50.
43. "Probability model for worst-case solar event fluences", M.A. Xapsos, G.P. Summers, J.L. Barth, E.G. Stassinopoulos and E.A. Burke, IEEE Transactions on Nuclear Science, NS-46, pp. 1481-85.
44. Programa PKA_anal_h.exe, Visual BASIC, Martín Alurralde, CAC-CNEA-2004.
45. "A compact setup for In Situ solar cells degradation", A. Filevich et al., IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 50, N° 6, (December 2003).
46. "Modelling solar cells degradation in space: A comparison of the NRL displacement damage dose and the JPL equivalent fluence approaches", Progr. Photovoltaics. Res. Applicat., Vol. 9, pp. 103-121, (2001).
47. Documento interno convenio CONAE-CNEA N° CAC-PSE-ENV-00410A-IN, "Primera prueba de la cámara de irradiación EDRA con un haz de protones de 15 MeV".
48. Documento interno convenio CONAE-CNEA N° CAC-PSE-ENV-00800A-IN, "Prueba del sistema de medición de corriente para la cámara EDRA".
49. www.edmundoptics.com
50. www.ltinus.com
51. "Photovoltaic characterization facilities development", G. Asaron, C. Bruno, L. Dawidowsky and A. Frigerio, Proceedings Workshop on Materials Science and Physics of Non-Conventional Energy Sources, Buenos Aires, p. 246 (1992).
52. Manual de Uso, Simulador Solar Sciencetech modelo SS1kW.
53. "Computer Simulation of Ion-Solid interactions", W. Eckstein, Springer Series in Materials Science 10, Springer-Verlag (1991) pp.10-14.
54. Datos provistos por el fabricante Emcore al comprador (CONAE).
55. "The development of >28% efficient triple-junction space solar cells at Emcore Photovoltaics", M.A. Stan, D.Aiken, P.R. Sharps, J. Hills, B. Clevenger and N.S. Fatemi, paper que figura en la página de Emcore.
56. "Medición de energía de los electrones del Linac (acelerador lineal - C. A. B.)" Documento interno convenio CONAE-CNEA N° CAC-PSE-ENV-00700A-IN.
57. "Design and Simulation of the Power Subsystems for two Argentine Satellites", presentado en el 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference.
58. and Exhibition, Milán, Italia (2007).
59. "Chemistry, Molecules, Matter and Change", P. Atkins and L. Jones, 3rd. Ed. W.H. Freeman, New York, (1997).

60. "Synergy of combining microfabrication technologies in orbit", G.H. Chapman, N. Pfeiffer, J.S. Johnson, Proceedings Spacebound 200, (June 2000).
61. "Misión satelital AQUARIUS/SAC-D: diseño preliminar del panel solar y simulaciones del comportamiento del subsistema de potencia", E.M. Godfrin, D. Fernandez Slezak, J.C. Durán, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 9 (2005), Impreso en la Argentina ISSN 0329-5184.
62. <http://www.aero.org/publications/crosslink/fall2005/04.html>
63. http://es.wikipedia.org/wiki/Proporcional_integral_derivativo
64. www.novus.com.br
65. www.thermocoax.com
66. Documento interno convenio CONAE-CNEA N° CAC-PSE-ENV-02000A-MA, "Manual de operación del sistema de ciclado térmico en vacío" (Agosto 2005).
67. Documento interno convenio CONAE-CNEA N° CAC-PSE-ENV-02100A-PR, "Ensayos de ciclado térmico en vacío" (Agosto 2005).

ÍNDICE

1	Capítulo I	Introducción	Pág. 4 y 5
2	Capítulo II	El ambiente espacial	Pág. 6 a 27
2.1.		Fuentes potenciales de daño	
2.1.1.		Daños de diverso origen	
2.1.2.		Radiación existente en las diferentes órbitas	
2.1.3.		Efectos de la radiación en los materiales	
2.2.		Elementos principales de un satélite	
2.2.1.		Materiales que requieren ensayos. Paneles solares	
2.2.2.		Celdas solares	
2.2.2.1.		Semiconductores. Juntura p-n	
2.2.2.2.		Celdas	
3.	Capítulo III	Técnicas de simulación de degradación por radiación	Pág. 28 a 48
3.1.		Simulación directa	
3.2.		Simulación indirecta (método CAC)	
3.3.		Simulaciones realizadas en el presente trabajo	
3.3.1.		Simulaciones directas realizadas	
3.3.2.		Fluencias y condiciones recomendadas para ensayos	
3.4.		Simulaciones realizadas para diseñar el degradador	
4.	Capítulo IV	Técnicas usadas en ensayos experimentales	
4.1.		Generalidades, haces de partículas con y sin carga. Posibilidades de producir daño	Pág. 49 a 68
4.2.		Aceleradores de partículas	
4.2.1.		Acelerador Van de Graaf (TANDAR). Descripción, línea experimental, óptica iónica, cámara, haces y energías alcanzables, trabajos para implementar la cámara EDRA.	

4.2.2.	Degradación de energía. Su necesidad o conveniencia. Descripción del degradador construido. Problemas con la uniformidad de dosis. Jaula de Faraday múltiple. Sistema de adquisición de datos. Uniformidad de dosis.	
4.2.3.	Barrido del haz. Sistema de visualización. Mediciones.	
4.2.4.	Acelerador lineal de electrones del CAB (LINAC). Descripción, línea experimental, calibración de energía y fluencia.	
5.	Capítulo V	Estudios experimentales
5.1.	Generalidades. Descripción básica de experimentos con haces de partículas	Pág. 69 a 107
5.2.	Experimentos usando el TANDAR	
5.2.1.	Experimentos usando el degradador. Resultados. Análisis	
5.2.2.	Irradiación de celdas solares con protones	
5.2.2.1.	Mediciones con lámpara dicróica a diferentes temperaturas	
5.2.2.2.	Mediciones con simulador solar a diferentes temperaturas	
5.2.3.	Resumen de resultados y comparación con datos de Emcore. Calificación de celdas Emcore ATJ	
5.3.	Experimentos usando el LINAC del CAB, métodos de irradiación, medición de fluencia, jaula de Faraday	
5.3.1.	Experimentos realizados	
5.3.2.	Resumen y análisis de resultados. Calificación de ATJ con electrones	
5.4.	Resumen general y comparación de resultados entre TANDAR y LINAC. Calificación de celdas Emcore ATJ	
6.	Capítulo VI	Otras condiciones del ambiente espacial. Descripción general
6.1.	Vacío. Ciclado de vacío. Generalidades	Pág. 108 a 126
6.2.	Ciclado térmico	
6.2.1.	Cámara de ciclado. Descripción. Protecciones	
6.2.2.	Sistema de vacío y elementos accesorios	

6.2.3.		Sistema de control de temperatura y adquisición de datos	
6.2.4.		Portamuestras	
6.2.4.1.		Sistema de ciclado por resistencia calefactora y flujo	
6.2.4.2.		Sistema de ciclado por contacto	
6.2.5.		Experimentos de ciclado térmico realizados sobre componentes satelitales. Resumen de resultados obtenidos. Calificación de celdas solares Emcore ATJ	
7	Conclusiones Generales		Pág. 127 a 128
8	Apéndice 1	APENDICE 1: Programas TRIM/SRIM (descripción, precisión, posibilidades de que se dispone, ejemplos)	Pág. 129 a 130
9	Apéndice 2	APENDICE 2: Interacción de la radiación con la materia	Pág. 131 a 142
10	Apéndice 3	APENDICE 3: Facilidad SPENVIS (descripción, posibilidades de que se dispone, ejemplo de aplicación)	Pág. 143 a 148
11	Apéndice 4	APENDICE 4: Trabajo en curso y futuro	Pág. 149 a 150
12	Referencias		Pág. 151 a 154

AGRADECIMIENTOS

Agradezco

A mis directores de tesis Dr. Alberto Filevich y Dr. Martín Alurralde, por haberme dado la oportunidad de realizar este trabajo, por sus continuas sugerencias, consejos y recomendaciones; por su paciencia y porque al fin y al cabo aprendí a escribir (o al menos, eso creo).

A mis compañeros del grupo EDRA Igor Prario, Cristian Nigri y Félix Palumbo, por su gran ayuda y colaboración; por haber compartido estos años de trabajo y de esfuerzo y además, por haberme tenido paciencia.

Al Dr. Julio Durán y a todos los integrantes del Grupo Solar, por haber provisto gran parte de los fondos necesarios para equipar el laboratorio y porque este trabajo se hizo dentro del marco del Proyecto Paneles Solares que llevan adelante.

A Juan Plá por las valiosas discusiones sobre celdas solares.

A Elena Godfrin por haberme ilustrado sobre las modelizaciones de las condiciones de iluminación y temperatura de los satélites en vuelo.

A Marcela Barrera, Mónica Martínez Bogado, Mariana Tamasi, Claudio Bolzi y Javier Fernández Vázquez por su asistencia en la preparación de las celdas solares medidas.

A Domingo Simoncelli y a los técnicos Carlos Piñeyro y Hugo Zárate por su invaluable colaboración para fabricar muchas de las piezas y componentes que han hecho posible construir las dos cámaras y reacondicionar la línea de irradiación.

A Andrés Salares por su valiosísima colaboración para encontrar fugas y pérdidas de vacío y por prestarnos varias piezas e instrumentos en las primeras etapas de la construcción.

A Dante Peix Y Bernardo Romero por haber colaborado en las etapas iniciales del reciclado y reacondicionamiento de la cámara de ciclado térmico.

A Pedro Cabot y Alberto Moglioni por haber realizado la compleja soldadura del bloque de cobre para la cámara de ciclado térmico.

A Gonzalo Porta por realizar con precisión el laminado de las planchas de aluminio del degradador.

A José del Bianco por los trabajos de carpintería y las piezas de madera que tan industriosamente ha realizado.

A Juan Carlos Sanchez por proveer todo el nitrógeno líquido con el que se hicieron las mediciones a baja temperatura.

A José María Keske por su permanente disposición a colaborar.

Al grupo de operadores del acelerador de iones TANDAR.

A los operadores del acelerador LINAC de Bariloche, Max Schnibli y Marcelo D'Avanzo.

A Carlos Jiménez por haberme rescatado varias veces de la angustiosa y desesperante situación de “computadora colgada”.

A Flavio Conde por proveernos del tan necesario soporte informático.

A Roberto De Luca y Luis Remez del grupo FRED por proveernos el otro soporte informático, también muy necesario.

A Guillermo Márcora, Juan Carlos Rufino y Oscar (Toto) Romanelli del laboratorio de electrónica.

A Ana María Llois de la Comisión de Doctorado.

A Ana María Kurcin del Instituto Sábató.

A las secretarías Silvia Dominguez, Graciela Mastrogiacomo y Teresita Gilabert por su invaluable asistencia.

Al Dr. Carlos Lasorsa y al Dr. Raúl Versaci por su apoyo y disposición a colaborar.

Al Dr. Miguel Ipohorski por haberme aconsejado desde siempre que termine la tesis de doctorado.

A mis padres y hermanos y a mis amigos por haberme acompañado y motivado durante estos años.

Al Arq. Eduardo Sosa por su inestimable ayuda en la mejora estética del presente libro.

Al Dr. Amilcar Rossini por su apoyo incondicional.

También a todos los ciudadanos de la República Argentina que con sus impuestos financian las instituciones que le han dado soporte a este trabajo: el CONICET, la CNEA y la CONAE.

A todos, muchas pero muchas gracias

Publicaciones realizadas durante la tesis doctoral:

1. *“An Irradiation Facility to Simulate the Space Environment”*, M. Alurralde, A. Filevich, I. Prario and A. Vertanessian, RADECS 2004 Conference (Radiation Effects on Components and Systems) 22-24 September, Madrid, Spain.
2. *“Cámaras Para Simular Condiciones Espaciales En Ensayos de Componentes Aeroespaciales”*, M. A. Alurralde, J. C. Durán, A. Filevich, I. S. Prario and A. Vertanessián, Reunión anual de la AFA (Asociación Física Argentina), Bahía Blanca, 20-23 de Septiembre de 2004.
3. *“Development of Photovoltaic Modules for Space Applications in Argentina”*, M. Alurralde, M. Barrera, C.G. Bolzi, C.J. Bruno, J.C. Durán, J. Fernández Vázquez, A. Filevich, E.M. Godfrin, V. Goldbeck, A. Iglesias, M.G. Martínez Bogado, E. Mezzabolta, S.L. Nigro, J. Plá, I. Prario, M.C. Raffo Calderón, S.E. Rodríguez, M.J.L. Tamasi, A. Vertanessian, F. Antonuccio, P. Cabot, E. Carella, C.D. Franciulli, A. Moglioni, G. Berbeglia, D. Fernández Slezack, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 6-10 June 2005, Barcelona, Spain.
4. *“Desarrollo, Fabricación y Ensayo de Paneles Solares para Uso Espacial en la CNEA”*, C.G. Bolzi, C.J. Bruno, P. Cabot, E. Carella, J.C. Durán, J. Fernández Vázquez, E.M. Godfrin, V. Goldbeck, M.G. Martínez Bogado, A. Moglioni, J.C. Plá, S.E. Rodriguez., M.J.L. Tamasi, M. Alurralde, F. Antonuccio, M. Barrera, J Di Santo, A. Filevich, C.D. Franciulli, A. Iglesias, E. Mezzabolta, S.L. Nigro, I. Prario, M.C. Raffo Calderon, A. Vertanessian, Presentado en la Reunión CORENDE (ensayos no destructivos), Noviembre de 2005, Neuquén, Argentina.
5. *“Development of Photovoltaic Modules for Space Applications in Argentina”*, M. Alurralde, M. Barrera, C.G. Bolzi, C.J. Bruno, J.C. Durán, J. Fernández Vázquez, A. Filevich, E.M. Godfrin, V. Goldbeck, A. Iglesias, M.G. Martínez Bogado, E. Mezzabolta, S.L. Nigro, J. Plá, I. Prario, M.C. Raffo Calderón, S.E. Rodríguez, M.J.L. Tamasi, A. Vertanessian, F. Antonuccio, P. Cabot, E. Carella, J. Di Santo, C.D. Franciulli, A. Moglioni, G. Berbeglia and D. Fernández Slezack, 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 6 al 10 de junio 2005, Barcelona, España. Artículo publicado en los Proc. de la conferencia.
6. *“Paneles Solares para uso Espacial: Desarrollos Fabricación y Ensayos Realizados en la CNEA”*, Bolzi C.G., Bruno C.J., Cabot P., Carella E., Durán J.C., Fernández Vázquez J., Godfrin E.M., Goldbeck V., Martínez Bogado M.G., Moglioni A., Plá J., Rodriguez S.E., Tamasi M.J.L., Alurralde M., Antonuccio F., Barrera M., Di Santo J., J. Filevich A., Franciulli C.D., Iglesias A., Mezzabolta E., Nigro S.L., Prario I., Raffo Calderón M.C. y Vertanessian A. , Presentado en la reunión

HIDRÓGENO Y FUENTES SUSTENTABLES DE ENERGÍA, HYFUSEN 2005, 8 - 10 de junio de 2005, Bariloche.

7. *“Fabricación y Ensayo de Paneles Solares para uso espacial, módulo de ingeniería para la misión AQUARIUS/SAC-D”*, M. Alurralde, F. Antonuccio, M. Barrera, C.G. Bolzi, C.J. Bruno, P. Cabot, E. Carella, J. Di Santo, J.C. Durán, J. Fernández Vázquez, A. Filevich, C.D. Franciulli, E.M. Godfrin, V. Goldbeck, A. Iglesias, M.G. Martínez Bogado, E. Mezzabolta, A. Moglioni, S.L. Nigro, J. Plá, I. Prario, M.C. Raffo Calderón, S.E. Rodríguez, M.J.L. Tamasi y A. Vertanessian, Presentado en la reunión anual de la ASADES- Noviembre 2005 y publicado en Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 9, 2005 (ISSN 0329-5184).
8. *“A Radiation Damage Test Facility at TANDAR”*, M. Alurralde, J. Durán, A. Filevich, C. Nigri, I. Prario, F. Palumbo, G.E. Sager, R. Velazco and A. Vertanessian, Presentado en la 7th Latin American Test Workshop, Bs. As., Argentina, 26-29 de Marzo de 2006.
9. *“Advances in the Development of Photovoltaics for Space Applications in Argentina”*, M. Alurralde, M. Barrera, C.G. Bolzi, C.J. Bruno, P. Cabot, E. Carella, J. Di Santo, J.C. Durán, J. Fernández Vázquez, A. Filevich, C.D. Franciulli, E.M. Godfrin, V. Goldbeck, A. Iglesias, M.G. Martínez Bogado, E. Mezzabolta, A. Moglioni, C. Nigri, S.L. Nigro, F. Palumbo, J. Plá, I. Prario, M.C. Raffo Calderón, S.E. Rodríguez, H. Socolovski, M.J.L. Tamasi and A. Vertanessian, 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 3-7 September 2007, Milan, Italy.
10. *“Desarrollo, Fabricación y Ensayo de Paneles Solares para las misiones satelitales SAOCOM y SAC-D”*, Alurralde M., Barrera M., Bolzi C.G., Bruno C.J., Cabot P., Carella E., Di Santo J., Durán J.C., Fernández Vázquez J., Filevich A., Franciulli C.D., Godfrin E.M., Goldbeck V., Iglesias A., Martínez Bogado M.G., Mezzabolta E., Moglioni A., Nigri C., Nigro S.L., Palumbo F., Plá J., Prario I., Raffo Calderón M.C., Rodríguez S.E., Socolovsky H., Tamasi M.J.L. y Vertanessian A., Presentado en la XXXIV Reunión anual de la AATN, Noviembre de 2007, Buenos Aires, Argentina.