

Trabajo Final:
DETECTOR Y ALARMA DE CRITICIDAD

Curso de Postgrado (2008):
ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES
Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE

Alumno: ***Ing. Julio Zsolt Egey***
Director del Trabajo Final: Dr. Emilio Matatagui



UNSAM
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

CONTENIDO

Trabajo Final del curso Postgrado Reactores Nucleares y su Ciclo de Combustible (Instituto Dan Beninson, CNEA – UNSAM), año lectivo 2008, autor: Julio Z Egey.

Comprende los estudios realizados sobre los siguientes temas:

- A. La naturaleza de los accidentes de criticidad y la estadística de tales accidentes ocurridos en el mundo hasta la fecha.
- B. Las normas internacionales pertinentes que definen el accidente de criticidad, las circunstancias que requieren el uso de un Sistema de Alarma de Criticidad y establecen las características que esos sistemas deben reunir (ANSI, ISO, IEC).
- C. Sistemas de Alarmas de Criticidad en uso actual en diferentes países (Francia, GB, USA, Hungría).
- D. Sistema de Alarma de Criticidad prototipo desarrollado en la Argentina por SOLYDES, incluyendo estudios teóricos y ensayos de laboratorio.
- E. Compilación de la bibliografía disponible en el mundo sobre el tema.

SUMMARY

Final work corresponding to the post-grade course Nuclear Reactors and their Fuel Cycle (Dan Beninson Institute, National Atomic Energy Commission & University of San Martín, Buenos Aires, Argentina), year 2008, author: Julio Z Egey.

This work includes studies performed on the following topics:

- A. The nature of criticality accidents and the pertinent statistics world wide up to date.
- B. The applicable international standards that define the criticality accident, the circumstances that require the use of a Criticality Alarm System and establish the specifications of such systems.
- C. Criticality Alarm Systems being used at present in different countries (France, USA, GB, Hungary).
- D. The prototype Criticality Alarm System developed in Argentina by SOLYDES, including theoretical analysis and laboratory testing.
- E. Compilation of the bibliography available on the subject world wide.

INDICE

1. Introducción
 - A. Antecedentes y Marco de Referencia
 - B. Objetivo de la Tesina.
2. Desarrollo
 - A. La naturaleza de los accidentes de criticidad y la estadística de tales accidentes ocurridos en el mundo hasta la fecha.
 - B. Las normas internacionales pertinentes que definen el accidente de criticidad, las circunstancias que requieren el uso de un Sistema de Alarma de Criticidad y establecen las características que esos sistemas deben reunir (ANSI, ISO, IEC).
 - C. Sistemas de Alarmas de Criticidad en uso actual en diferentes países (Francia, GB, USA, Hungría).
 - D. Sistema de Alarma de Criticidad prototipo desarrollado en la Argentina por SOLYDES, incluyendo estudios teóricos y ensayos de laboratorio.
 - E. Compilación de la bibliografía disponible en el mundo sobre el tema
3. Conclusiones

1. INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES Y MARCO DE REFERENCIA

Definición del Accidente de Criticidad: Es la liberación de energía como consecuencia de producir accidentalmente una reacción en cadena auto sostenida o divergente.

Antecedentes:

Estadística mundial de accidentes de criticidad: Entre 1945 y 1999 se han producido unos 60 accidentes de criticidad, 40 de ellos en reactores experimentales y conjuntos críticos y 20 en procesos del ciclo de combustible, a un costo de 20 fatalidades.

Estudios sobre criticidad: Se han realizado numerosos ensayos y estudios sobre criticidad de sistemas acuosos moderados en Francia, principalmente en el reactor SILENE y también numerosos experimentos en conjuntos críticos no moderados en USA, GB y USSR.

Estos experimentos han permitido evaluar la exposición de los operadores, identificar los medios eficientes de detección y entender el comportamiento a largo plazo de los conjuntos críticos y las consecuencias de la emisión de productos de fisión. En resumen, han aportado información útil para prevención, planes de intervención y manejo de crisis.

Como resultado de los estudios arriba mencionados, quedó bien establecida la necesidad de utilizar un **Sistema de Alarma de Criticidad** en numerosas instalaciones del ciclo de combustible.

Asimismo su utilización y fabricación esta reglamentado en las normas ANSI, ISO e IEC.

OBJETIVO DE LA TESINA

El objetivo principal es la puesta en marcha y caracterización del Sistema de Alarma de Criticidad prototipo desarrollado en SOLYDES por encargo de la CNEA.

Lo arriba enunciado incluye los estudios previos necesarios así como los ensayos de laboratorio específicos y la verificación del grado de cumplimiento de las normas aplicables.

2. DESARROLLO DEL TRABAJO

A. ACCIDENTES DE CRITICIDAD – SU ESTADÍSTICA

Definición de accidente de criticidad: Es la liberación de energía como consecuencia de producir accidentalmente una reacción en cadena autosostenida o divergente (Ver definición cuantitativa en la Norma ANSI 8.3-97).

Estadística mundial de accidentes de criticidad: Entre 1945 y 1999 se han producido unos 60 accidentes de criticidad, 40 de ellos en reactores experimentales y conjuntos críticos y 20 en procesos del ciclo de combustible, a un costo de 20 fatalidades. (Ref.1)

Estudios sobre criticidad: Se han realizado numerosos ensayos y estudios sobre criticidad de sistemas acuosos moderados en Valduc, Francia, unos 70 en la instalación CRAC, entre 1967 y 1972 y más de 2000 en el reactor SILENE a partir de 1974.(Ref. 2-3).

Asimismo se han realizado numerosos experimentos en conjuntos críticos no moderados en USA en los conjuntos críticos GODIVA, KEWB, SPERT y VIPER (GB).

Estos experimentos han permitido evaluar la exposición de los operadores, identificar los medios eficientes de detección y entender el comportamiento a largo plazo de los conjuntos críticos y las consecuencias de la emisión de productos de fisión.

En resumen, han aportado información útil para prevención, planes de intervención y manejo de crisis.

Los experimentos en el reactor SILENE, han cubierto rangos amplios de operación, criticidades desde unos pocos centavos hasta 8 dólares, trabajando con concentraciones de nitrato de uranilo entre 20 y 240 g/l.

Como valor ilustrativo, para el caso de 10^{17} fisiones durante el primer pico en el reactor SILENE, se han medido las siguientes dosis absorbidas a 1 m del núcleo (40 l de nitrato de uranilo):

Neutrones:	Dosis absorbida (kerma tejido)	20 Gy	Dosis equivalente	300 Sv
Gamma:	Dosis absorbida	25 Gy	Dosis equivalente	25 Sv

La fenomenología de estas excursiones de criticidad se ilustra en fig. 1 y 2 y una representación modelizada del proceso en la fig.3.

Asimismo el esquema del reactor SILENE y su disposición para estudios de Intercomparación de dosímetros se muestra en las figuras 4 y 5.

Referencias:

- 1.- A Review of criticality accidents. 2000 revision (USA/ Rusia)
- 2.- A Review of the SILENE criticality excursion experiments (France)
- 3.- Criticality accident studies and research performed in the Valduc criticality laboratory (France).

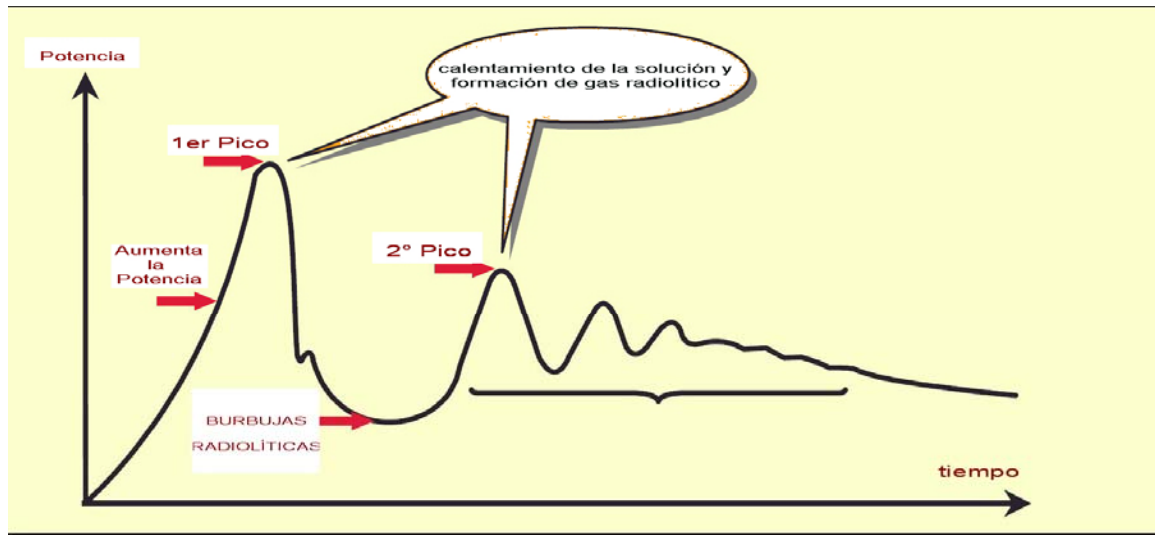


Fig.1 - Típico accidente de criticidad en una solución físil

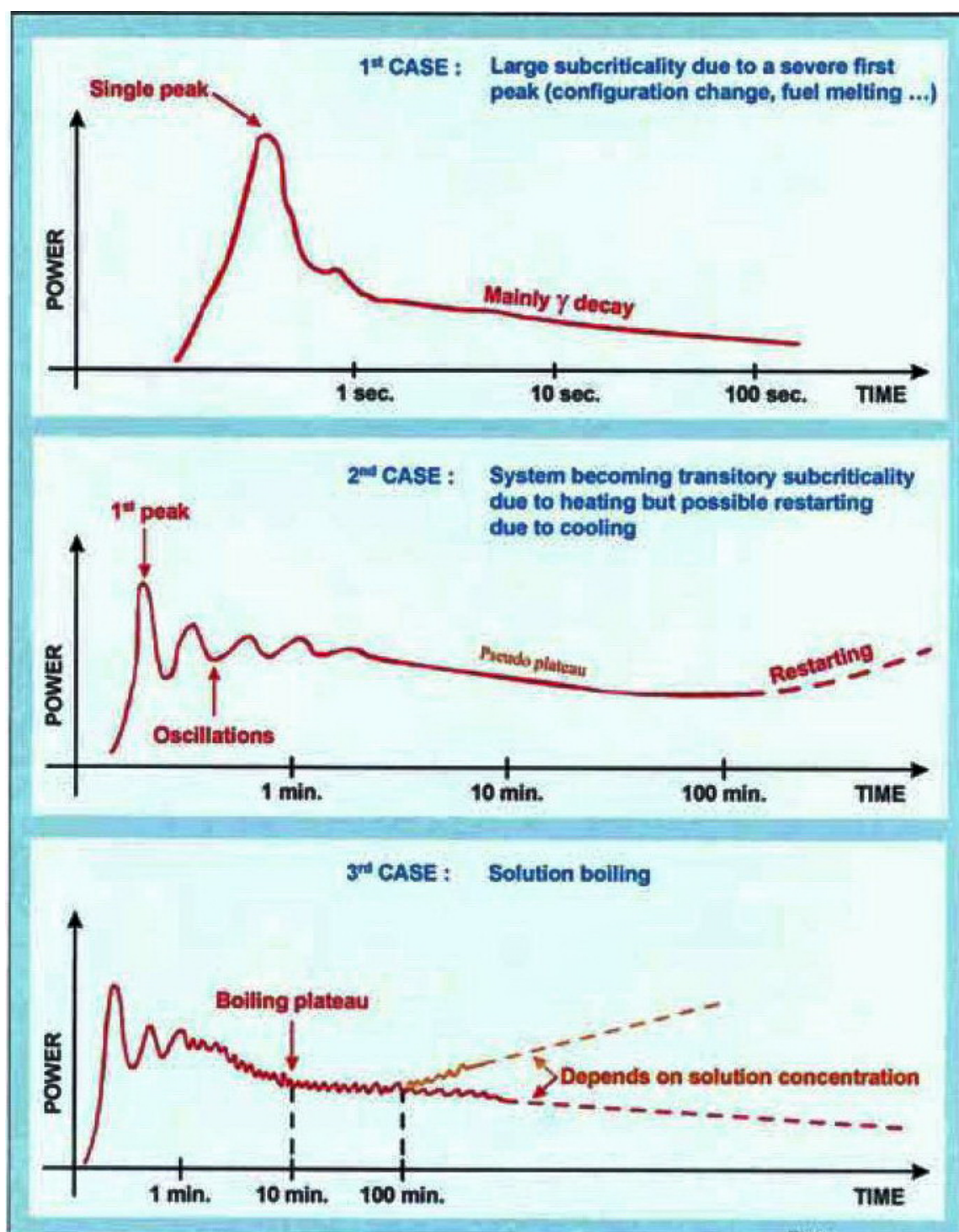


Fig. 2 - Casos de evolución de un accidente de criticidad

DIAGRAMA DE FLUJO DE UN ACCIDENTE DE CRITICIDAD

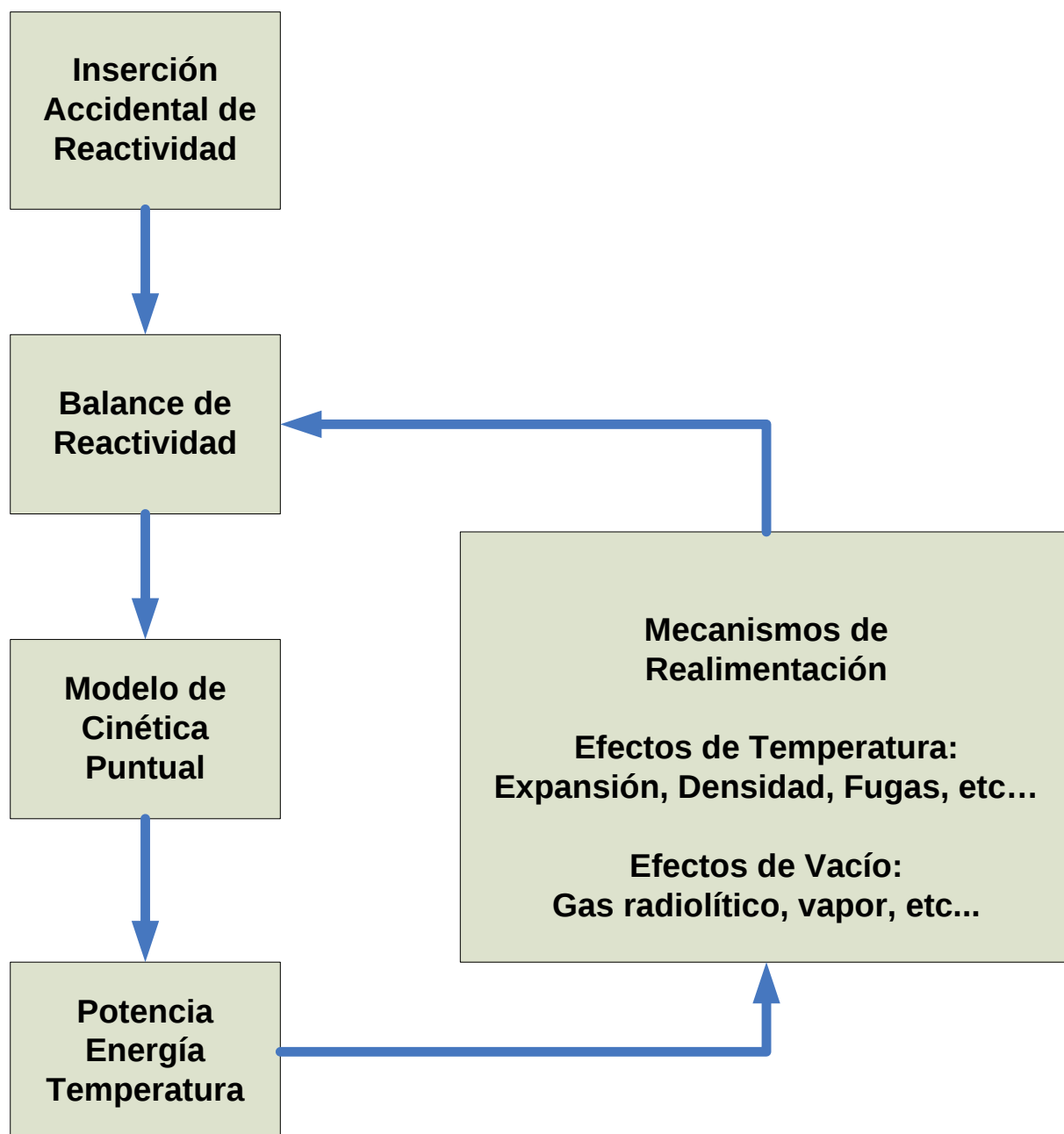
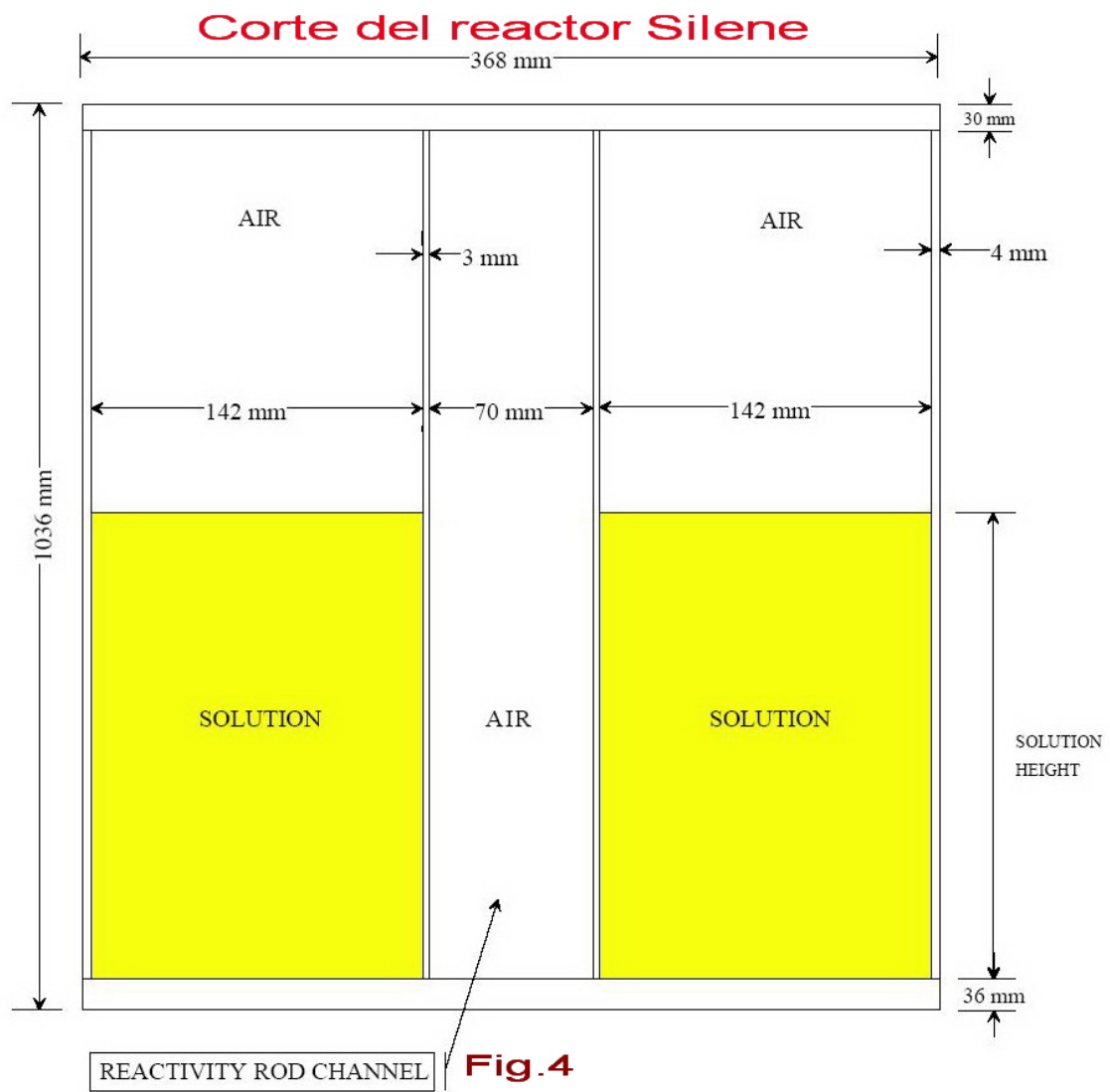


Fig. 3



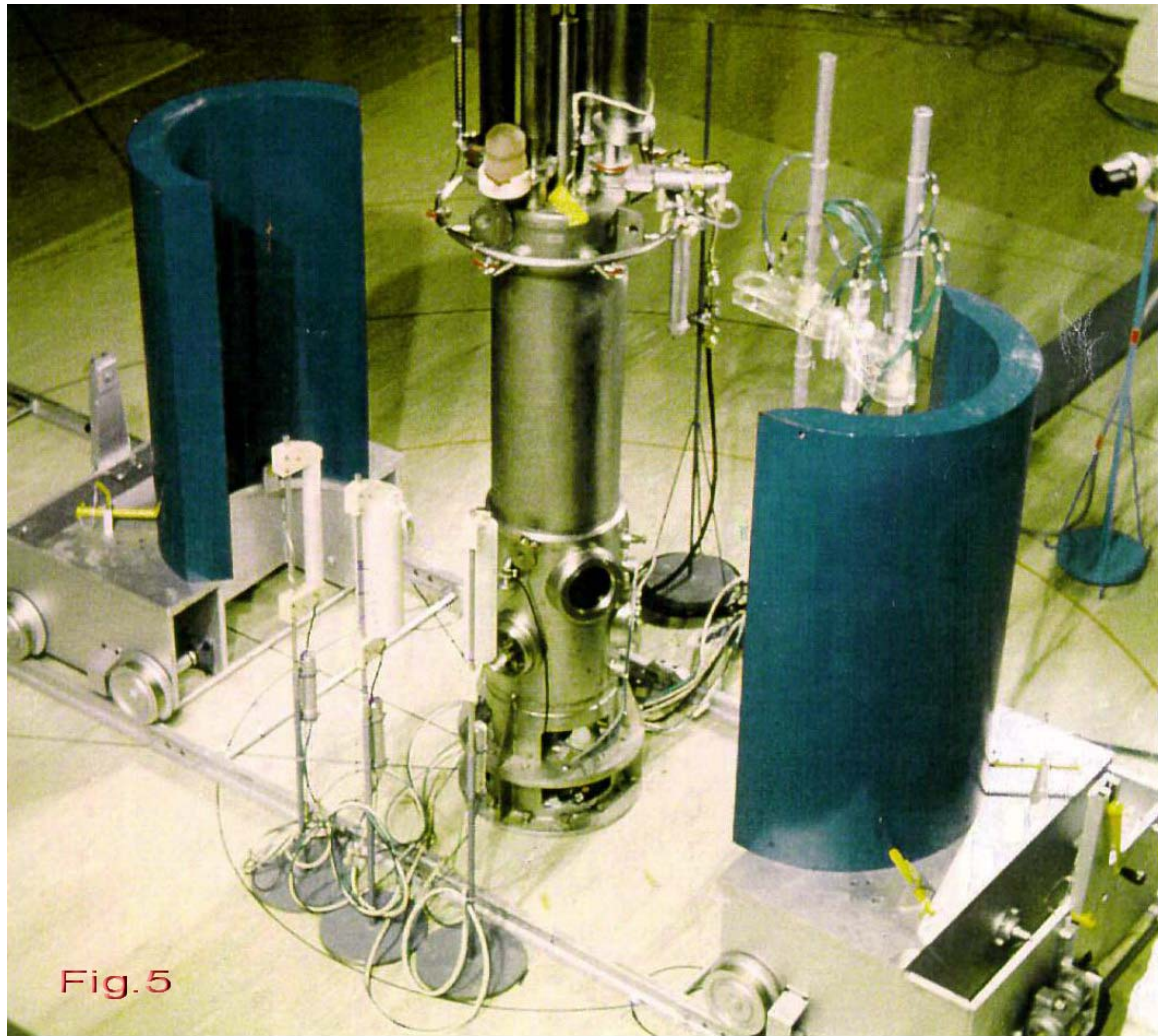


Fig.5

El reactor SILENE con blindajes y experimentos de dosimetría

B. NORMAS EXISTENTES

Se tomarán en cuenta las tres normas:

- 1.- **ANSI/ANS 8.3 (1997)** Criticality alarm system.
- 2.- **ISO 7753 (1997)** Nuclear energy – Performance and testing requirements for criticality detection and alarm systems.
- 3.- **IEC 60860 (1987)** Warning equipment for criticality accidents.

1.- ANSI/ANS 8.3 – 1997. Resumen:

Definiciones y especificaciones:

- Dosis de radiación excesiva: 0.12 Gy en aire.
- Accidente mínimo de interés: es el menor accidente en términos de rendimiento de fisión y tasa de dosis, que el equipo debe detectar.
- Aplicación: Un sistema de alarma es obligatorio siempre que las siguientes cantidades de material fisil estén presentes:
 ^{235}U : 700 g, ^{233}U 500 g., ^{239}Pu 450 g.
- En caso que se utilice un moderador o reflector más eficiente que el agua liviana, deberá efectuarse una evaluación especial de esas cantidades.
- Se requiere un sistema de alarma de criticidad cada vez que el personal pueda ser expuesto a una dosis excesiva de radiación (0.12 Gy en aire).
- El máximo rendimiento de fisión integrado sobre la duración del accidente, se supone inferior a 2×10^{19} fisiones.
- La parte de audio del sistema de alarma deberá proveer una presión acústica de 75 db como mínimo y 10 db por encima del ruido de fondo, pero menor que 115 db.
- El tiempo de respuesta del sistema de alarma de criticidad debe ser igual o menor que 0.5 seg.
- El mínimo accidente de interés entrega una tasa de dosis de 0.2 Gy/ min en aire a 2 m de distancia.
- Sensibilidad: el primer pico de menor duración a ser detectado es de 1 ms

2.- ISO 7753 -1997. Resumen:

No requiere instrumentación adicional en reactores o conjuntos críticos cuando la instrumentación existente cumpla con los propósitos.

Para una guía detallada sobre instrumentación remite a la Norma IEC.

Se aplica principalmente al sistema de detección de gamma, aunque menciona la posibilidad de integración con sistemas de detección de neutrones.

Definiciones:

- Accidente de criticidad: Liberación de energía resultante de la producción accidental de una reacción en cadena autosostenida o divergente.
- El accidente mínimo de interés es el accidente menor que el sistema debe detectar.
- Sistema de alarma de criticidad (SAC=CAS,CIDAS, EDAC): Se requiere cada vez que se manipula materia físil en cantidades superiores a 700g ^{235}U , 520 g ^{233}U , 450g ^{239}Pu , o combinación de ellos.
- Los procesos que utilicen material moderador o reflector más eficiente que el agua liviana requieren especial atención.
En ese contexto se pueden considerar áreas separadas, si la separación es mayor a 10cm y no hay intercambio de material, asimismo si la densidad superficial del material físil es menor que 50 g/m².
- No se requiere CAS si la dosis accidental previsible es menor que 0.12 Gy en aire.
- Para el propósito de esta norma se acepta que el rendimiento máximo en un accidente de criticidad fuera de un reactor es menor que 2×10^{19} fisiones.
- Cuando el CAS es requerido se deberá implementar la detección de dosis o tasa de dosis excesivas.

Alarma:

- La señal acústica deberá ser única y suficiente.
- El punto de disparo deberá ser suficientemente alto para evitar disparo por fuentes de radiación que no sean de criticidad y por otra parte, suficientemente bajo como para detectar el mínimo accidente de interés de criticidad.
- Una vez disparada la alarma, deberá seguir sonando hasta que sea apagado con el reset manual.

- Las áreas con alto ruido de fondo deberán tener alarmas luminosas.

Confiabilidad:

- Se deben evitar las falsas alarmas.
- Se aconseja implementar lógica 2 de 3 o similar.
- Debe tener indicación de falla.
- Debe tener previsión para el ensayo del sistema (sin evacuación).
- Se aconseja utilizar UPS para la alimentación.
- Deberá dispararse la alarma y mantenerse sonando si la tasa de dosis es superior a 1000 Gy/h.

Diseño:

- Criterio de detección: Debe detectar al accidente mínimo de interés (dosis absorbida por gamma y neutrones en aire = 0.2 Gy a 2 m en los primeros 60 s. y sin blindaje).
- El sistema debe responder incluso al pico inicial con duración mínima de 1 ms.
- Debe haber indicación sobre cuáles son los canales que han provocado el disparo.
- El emplazamiento de los detectores debe evitar la interposición de blindajes masivos.

Ensayos:

- Deben ensayarse periódicamente los detectores de cada canal (como mínimo una vez por mes), llevando un registro de los ensayos.
- El ensayo del sistema completo también es requerido periódicamente (con notificación al personal)
- Si se detectan fallas del sistema, la acción correctiva debe seguir de inmediato.

Anexo A:

Caracterización del accidente mínimo de interés:

- Este fue especificado en base a los datos históricos de accidentes, suplementado con consideraciones sobre el mecanismo de los accidentes:
Dosis absorbida en aire a 2 m = 0.2 Gy en los 60 s iniciales, suponiendo sólo blindaje nominal
- Mecanismo considerado: Adición de reactividad a un conjunto subcrítico por medio de la adición de materia fisil, agregado de moderador o reflector o cambio de geometría tal que minimice la fuga de neutrones.
- Se analizan 9 accidentes pasados, siendo el número de fisiones entre 10^{14} y 10^{18} , el número de spikes entre 1 y 4 y dosis absorbida alrededor de 10 Gy a 2 m. Las personas en las proximidades (distancia < 2 m) recibieron dosis fatales. La extrapolación de las dosis absorbidas a partir del número de fisiones no es directa.
- Teniendo en cuenta la información disponible, se acepta que la definición del accidente mínimo de interés es apropiada aún para accidentes pequeños con soluciones acuosas con exceso de reactividad de unos pocos centavos. No obstante excursiones muy lentas (resultados del SILENE) pueden no ser detectados.

Anexo B:

Cálculos sobre el radio de detección vs. nivel de disparo:

Se estipulan:

- Mediciones de rayos gamma.
- Transitorio rápido no moderado (conjunto metálico o reacción sostenida en sistema moderado)
- Respuesta del detector al transitorio rápido < 1/2500 de la tasa de dosis real (ancho de pulso ≥ 1 ms.)
- Intensidad gamma proporcional a $1/d^2$, factor de atenuación en aire = 3.
- Relación de dosis neutrón /gamma = 12 para sistema no moderado (0.2 Gy a 2 m = 0.185 Gy de neutrones + 0.015 Gy de gamma)
- Relación de dosis neutrón/ gamma = 0.3 para sistema moderado (0.2 Gy a 2 m = 0.047 Gy de neutrones + 0.153 Gy de gamma),
número de fisiones = 2×10^{15} , aprox. para ambos.
- Radio de cobertura del detector (m) para nivel de disparo 5×10^{-4} Gy/h:
Transitorio no moderado: 240 m
Transitorio moderado: 766 m
Críticidad sostenida, moderado: 156 m.

Anexo C:

Planes de emergencia:

- Evacuación
- Puntos de reunión
- Conteo del personal
- Capacitación y ensayos
- Disponibilidad de atención médica
- Dosimetría personal
- Monitoreo de radiación postaccidente.

3.- IEC 60860 -1987

Equipo de alarma para accidentes de criticidad:

Contenido:

- Equipo detector de criticidad
- Disparo de la alarma con retraso mínimo
- Alta confiabilidad.
- Nivel de disparo
- Tiempo de respuesta
- Falsa alarma
- Dependencia angular
- Fallas
- Ensayo de calificación y aceptación.

Criterio de detección:

0.2 Gy a 2 m en aire durante los 60 s iniciales.

Excursiones muy lentas no serán cubiertas.

Excursiones de sistemas no moderados serán más rápidos.

Características deseables:

- Facilidad de descontaminación.
- Uso múltiple
- Interconectabilidad de cables
- Confiabilidad: proveer MTBF, indicar requerimiento de mantenimiento (debe ser mínimo)
- Ensayos periódicos
- Intercambiabilidad de módulos.

Subconjunto de detección (detector más circuitos auxiliares):

- Respuesta a gamma y/o neutrones apropiada para accidentes de criticidad
- No sea inhibido por sobredosis de gamma o neutrones (sobrecarga)
- No tenga ajuste accesible a personal no autorizado.

Lógica y condicionamiento de la señal:

- Información originada en los detectores de gamma o neutrones
- Falla de uno de los detectores debe ser de falla segura
- Ensayo periódico no riesgoso para la integridad del sistema

Alarmas:

- Especificaciones acústicas:
 - o intensidad necesaria,
 - o la señal debe ser continua hasta el reset manual en área externa,
 - o actuación manual disponible
- Punto de disparo: debe ser ajustable pero inaccesible a personal no autorizado.

Test de aceptación:

- Deben estar encuadrados en las especificaciones de esta norma (Tablas 1, 2 y 3).
- Minimizar radiación de fondo (<10% de la lectura)
- Tener en cuenta las variaciones estadísticas, intervalo entre mediciones > 3x tiempo de respuesta.
- Fuentes de referencia: ^{252}Cf y ^{137}Cs
- Respuesta sobre rango de energías: debe ser tal que responda al accidente mínimo de interés.
- Requerimientos para detectores de gamma: la dosis medida sobre el rango 0.1 MeV a 3 MeV debe estar dentro de +/- 35% de la dosis real.
- Método de ensayo para detectores de gamma: su respuesta en función de la energía de los fotones incidentes, debe ser determinada con fuentes de referencia de gamma o rayos X según la norma ISO 4037 (dosimetría).
Como mínimo se debe ensayar en los siguientes rangos:
< 100 KeV, 100 KeV-1MeV, >1MeV.
En caso de cámara de ionización usar un pA- metro.
- Requerimiento para ensayo de detectores de neutrones: la respuesta debe ser determinada con fuente de ^{252}Cf y en caso de una instalación en un campo de neutrones moderados, deberá obtenerse su respuesta en esas condiciones.

La respuesta en función de la energía de los neutrones puede determinarse con una fuente de referencia ISO (neutrones mono energéticos producidos por un acelerador).

La respuesta a neutrones moderados puede determinarse usando una columna térmica de un reactor o conjunto crítico que tenga datos publicados.

Alternativamente puede obtenerse directamente con un campo de neutrones moderados de tasa de dosis conocida.

- El método de ensayo de los detectores de neutrones en función de la energía debe determinarse usando fuentes de neutrones de referencia ISO, como mínimo en los siguientes rangos: 0.1 MeV – 0.2 MeV, 0.2 MeV – 1 MeV, 1 MeV – 10 MeV.

- Tiempo de respuesta: Debe actuar como máximo en 300 ms cuando expuesto a una dosis o tasa de dosis doble al nivel de disparo.

El tiempo de respuesta debe ser determinado en un ensayo usando un pulso de radiación de rise time corto en comparación al tiempo de respuesta y el tiempo se mide a partir del instante en que la dosis o tasa de dosis supera el 10% del nivel de disparo.

- Nivel de disparo: Debe ser tal que detecte y actúe al ser expuesto a una dosis absorbida total de gamma y neutrones de 0.2 Gy en aire a 2 m dentro de los primeros 60 s.

Método de ensayo: deberá determinarse con una fuente pulsada de radiación, la duración de los pulsos deberá estar en el rango de 1 ms -3 s

- Dependencia angular: deberá determinarse para el subconjunto detector.

Método de ensayo: usando una fuente de referencia, colocada a una distancia $\geq$ que 10x el tamaño del conjunto detector deberá rotarse el equipo en incrementos de 30° alrededor de un eje vertical y de un eje horizontal que pasen por el conjunto detector. Graficar los resultados en un gráfico polar.

- Característica de sobrecarga: para dosis o tasa de dosis superior a la especificada para disparar la alarma, el equipo deberá activarse (disparar y sonar la alarma) y permanecer activo hasta tanto se lo apague con el reset manual. El subconjunto detector deberá ensayarse a una tasa de dosis de al menos 1000 Gy/h.

Método de ensayo: deberá realizarse usando como fuente un reactor pulsado u otra fuente apropiada. La señal de alarma deberá quedar sonando hasta tanto se lo apague con el reset manual.

- Características eléctricas:

- o El nivel de disparo no deberá correrse en más del 20% después de 500 h de operación.

Método de ensayo: se podrá utilizar una fuente de referencia o inyectando una señal de corriente.

- o Fuente de alimentación: deberá poder operar con CA o CC dentro de los límites de tolerancia de voltaje especificados por la IEC pub. 293 y IEC pub. 38.
 Voltaje standard: I) 220 V, II) 120 V y/o 240 V.
 Cuando opere con una fuente de CA deberá poder funcionar con variaciones de voltaje de +10% / -12% y variaciones de frecuencia de 47-51 Hz (57-61 Hz en USA)
 Las indicaciones y nivel de disparo no deberán variar más que +/- 10% dentro de esos rangos.
 Par el caso de alimentación de CC deberá poder operar con variaciones de voltaje de + 15% y -11%.
- o Alimentación de emergencia: deberá ser implementada en forma automática. El tiempo de reconexión no deberá modificar la operación. En caso de usar baterías deberá mantener el equipo operando sin señal de alarma por 16 h y luego del cual, al disparar la alarma, esta deberá sonar por lo menos 30 m.
- Características mecánicas:
 - o Nivel sonoro de la alarma: 90 dbA – 100dbA a 1 m. (deberá comprobarse con un instrumento que cumpla con lo requerido en IEC pub. 651)
 - o Resistencia mecánica: deberá soportar una aceleración de 1g en cualquier dirección.
- Características ambientales:
 - o Temperatura: rango de operación = -10°C - 40°C ,
 En ese rango, el nivel de disparo no debe variar más de +/- 10%
 Método de ensayo: Deberá usarse una caja climatizada, duración del ensayo de 4 h en cada extremo y registrando los parámetros durante los últimos 30 min. Se deberá ciclar a través del punto de rocío por lo menos una vez. Este ensayo se podrá separar en dos:
 - a) conjunto detector con fuente de radiación de referencia
 - b) electrónica con inyección de señal de corriente.
 - o Humedad relativa: variación del nivel de disparo < +/- 10% en el rango 40% - 90% .
 Ensayo a realizarse a 35°C en forma similar que en los puntos a) y b) precedentes y como mínimo un ciclo a través del punto de rocío.
 - o Presión atmosférica: sólo influye en caso de detectores abiertos que utilizan el aire (cámara de ionización), deberá consultarse al fabricante sobre el rango de operación.

- o Efecto de campo electromagnético externo: puede afectar la operación, acordar límites y método de ensayo con el fabricante.
- o Temperatura de almacenamiento: -25°C – 50°C. Se deberá prestar atención a condiciones de transporte aéreo a temperatura y presión bajas.
- o Temperatura: rango de operación = -10°C - 40°C ,
En ese rango, el nivel de disparo no debe variar más de +/- 10%

Documentación: (debe cumplir con IEC pub. 278)

A proveer y entregar junto con el equipo:

- Nombre del fabricante y marca.
- Tipo, modelo y número de serie
- Fecha de fabricación
- Tipo de radiación que detecta
- Tipo de detector
- Nombre del auditor independiente y fecha de los ensayos pertinentes
- Tipo de material que rodea la volumen sensible y la masa específica de cada uno (mg/cm^2).
- Rango del nivel de disparo
- Respuesta en función del ángulo de incidencia de la radiación
- Manual de operaciones y mantenimiento: deberá entregarse junto con el equipo y contener la siguiente información:
 - A. Diagrama de circuitos y lista de partes
 - B. Detalles operacionales y procedimiento de mantenimiento.

TABLE I

Reference and standard test conditions

Influence quantities	Reference conditions (unless otherwise indicated by manufacturer)	Standard test conditions (unless otherwise indicated by manufacturer)
Reference radiation sources	^{252}Cf and ^{137}Cs	^{252}Cf and ^{137}Cs
Warm-up time	To be specified by manufacturer	To be specified by manufacturer
Relative humidity	65%	55% to 75%
Ambient temperature	20°C	18°C to 22°C
Atmospheric pressure	101.3 kPa	86 kPa to 106 kPa
Power supply voltage	Nominal power supply voltage U_n	Nominal power supply $U_n \pm 1\%$
Power supply frequency	Nominal frequency	Nominal frequency $\pm 1\%$
Power supply waveform	Sinusoidal	Sinusoidal with total harmonic distortion lower than 5%
Angle of incidence of radiation	Calibration direction given by manufacturer	Direction given $\pm 10^\circ$
Electromagnetic field of external origin	Negligible	Less than 0.5 times the lowest value that causes interference
Magnetic induction of external origin	Negligible	Less than twice the value of the induction due to the earth's magnetic field
Orientation of assembly	To be stated by the manufacturer	Stated orientation $\pm 10^\circ$
Assembly control devices	Set for normal operation	Set for normal operation
Contamination by radioactive elements	Negligible	Negligible
Background noise level	Less than 60 dBA	Less than 60 dBA

TABLE II

Tests performed under standard test conditions

Characteristics under test	Requirements (sub-clause)	Test method description (sub-clause)
Energy response	19.1.1	19.1.2
Time-to-alarm	19.2.1	19.2.2
Alarm set point	19.3.1	19.3.2
Angular dependence	19.4.1	19.4.2
Radiation overload	19.5.1	19.5.2

TABLE III

Tests performed with variation of influence quantities

Influence quantities	Requirements (sub-clause)	Test method description (sub-clause)
Temperature	22.1.1	22.1.2
Relative humidity	22.2.1	22.2.2
External electromagnetic fields	22.5.1	As prescribed by manufacturer

IEC 860, Tablas II y III, página 37

C. SISTEMAS DE DETECCIÓN Y ALARMA DE CRITICIDAD EXISTENTES

PROPÓSITO DE UN DETECTOR Y ALARMA DE CRITICIDAD:

Es reducir el riesgo asociado en las operaciones con material físil.

Alertando al personal sobre una excursión de criticidad y proveyendo un sistema eficiente y rápido de evacuación, tal sistema tiene el efecto de reducir significativamente las dosis absorbidas, incluyendo las potencialmente letales.

DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS EXISTENTES:

1.- EDAC 21 Camberra/Francia.

(Ensamble de detección et d'alarme de criticité)

Características sobresalientes:

- Detecta gamma + neutrones
- Cumple con IEC 860 ed 87, ISO 7753 ed 87, ANSI/ANS 8.3 -1997.
- Certificado por EEC
- Activa la alarma de evacuación en 300ms.
- Alta confiabilidad
- Auto test continuo
- 2 – 4 detectores por área
- Supervisión remota
- Cualificado en excursiones de criticidad reales en el reactor SILENE.

Descripción:

- + de 1000 unidades entregadas y en operación
- Adquisición de datos continua para análisis y manejo de accidentes
- Sistema:
 - o Monitorea de 2 – 4 detectores distantes hasta 200 m del gabinete
 - o Autotest sin interrupción de funciones
 - o Alarma acústica y luminosa

- o Fuente de poder asegura 16 h de autonomía para monitoreo y 30 min de alarma
 - o Luces indicadoras de status
 - o Lógica 2 de n, $n=2 - 4$
- Detectores:
 - o Respuesta espectral balanceada en una mezcla de gamma y neutrones.
 - o Señal de alarma en dos fases: dosis = 25×10^{-6} Gy, tasa de dosis = 10×10^{-3} Gy/ h. (n+gamma)
 - o Respuesta lineal y no saturación entre 10^{-3} Gy/ h. y 10^2 Gy/ h.
 - o Posibilidad de detectar accidentes con cinética muy lenta correspondiente a reactividades muy bajas
 - o Radio de monitoreo = 30 m en aire, para un umbral de 250×10^{-6} Gy
 - o Medición continua de los tiempos de duplicación de dosis
 - o Estimación de la tasa de dosis ambiental
 - o Dimensiones: longitud 510mm, diámetro 100 mm
 - o Masa 2 kg
- Supervisión remota a 1 km de distancia
- Validación: todo el sistema es calibrado antes de la entrega. Opcionalmente validado en el reactor SILENE.
- Asesoramiento sobre el emplazamiento de los detectores: disponible.

Especificaciones:

- Cumple con y excede lo requerido por las normas IEC 860 ed 87, ISO 7753 ed 87, ANSI/ANS 8.3 -1997.
- Redundancia: paralelo de circuitos de procesamiento, circuitos de emergencia, convertidores de CC/CC, comunicaciones y supervisión.
- Confiabilidad: excelente debido a selección de componentes y redundancias, MBTF > 7 años.
- Mantenimiento: reemplazo de componentes sin cortar la alimentación.
- Supervisión: información en tiempo real sobre:
 - o Status de los detectores
 - o Parámetros de los detectores
 - o Cronología de los eventos
- Alarma:
 - o sirena de dos tonos (800Hz y 1000Hz) entregando 100db a 1m
 - o luminosa: 2 luces intermitentes con potencia de 5 Joule.

- Dimensiones de gabinete: 600 x 250 x 600 mm (sin detectores)
- Peso: 25 kg
- Fuente de alimentación: 12 V CC +/- 15%
- Baterías: 12 V, carga con AC, 110 V / 3A, 230V / 1.5^a, 50 – 60 Hz
Capacidad: 3 Ah; dimensiones: 400x 500 x200 mm; peso 30 kg.

Referencias:

The EDAC system and the new developments under consideration at the CEA for criticality accident detection.

2.- CIDAS Mk X Gran Bretaña – (BIL / BNFL)

(Criticality Incident Detection and Alarm System)

Criterios de detección (BNFL):

- Rendimiento de incidente de criticidad: $10^{15} - 2 \times 10^{19}$ fisiones.
- Duración potencial del incidente: 1 ms – 60 s
- Característica del incidente: moderado o no moderado.
- Presencia o ausencia de blindaje.
- Objetivo: detectar el incidente antes que pudiera entregar a un operador de planta una dosis absorbida de 100 mGy
- Tipo de servicio: 24 h x 365 días durante 30 años.
- Calidad: cumplimiento de ISO 9000
- Cumplimiento de las normas internacionales: IEC 860, ISO 7753, ANSI/ANS 8.3
- Criterios de diseño: Ref. 6

Especificaciones:

- Detectores de gamma (Geiger- Müller)
- Tiempo de respuesta: 200ms
- Tiempo muerto fraccional (FDT) $< 10^{-4}$
- Falsas alarmas: 1 cada 10 años
- Tolerancia sísmica de acuerdo con la base de diseño de la planta
- Inmunidad a interferencia por RF: según BSEN 55022
- Fuente de poder: triple backup con baterías, UPS > 2 h
- Lógica de votación: 2 de 3 con conformidad a la IEC 61598, nivel de integridad 1 – 3, (Ref.5)

- Conformidad con ANSI/ ANS 8.3, ISO 7753, IEC 860.

Descripción:

- Varios tubos GM conectados en serie (daisy chain) en 3 anillos independientes.
- Lógica de votación: 2 de 3
- Can-link bus conecta a los detectores al panel central para diagnóstico y autotest
- Tests automáticos con fuente incorporada
- No se ha utilizado software en la generación de la alarma
- El panel central incluye:
 - o Módulo lógico (conforme a Ref.5)
 - o Fuente de poder y UPSs
 - o Sistema de audio duplicado para evacuación
 - o Señal pip-pop indicando autotest y normalidad
 - o Control de alarmas luminosas en áreas con alto nivel de ruido de fondo
 - o Control de advertencia de no entrada en área evacuada
 - o Control remoto en área segura.
- A fin de verificar cumplimiento del requisito de sobrecarga estipulado en las normas ISO 7753, IEC 860, el equipo CIDAS fue sometido a pruebas de exposición a 1000 Gy/ h en el reactor pulsado VIPER. Como resultado de esos ensayos, fue modificado el diseño (eliminando convertidores CC/CC) y se determinó que las distancias seguras para emplazamiento de los componentes del sistema son:
 - o Subconjunto detector: 1 m
 - o Panel con electrónica de control 20 m

Referencias:

- 1.- ANSI/ANS 8.3
- 2.- ISO 7753
- 3.- IEC 860
- 4.- BSEN 55022 limits and method on measurement of RF disturbances
- 5.- IEC 61508 Functional safety of electronic safety related systems
- 6.- Design criteria of CIDAS: H.J. Dellafield, J.J. Clifton, UKEAEA (GD) 1984
- 7.- Radiation tolerance assessment of CIDAS

Lista de abreviaturas

ANSI	American National Standards Institute
ANS	American Nuclear Society
ISO	International Standards Organization
IEC	International Electrotechnical Commission
BNFL	British Nuclear Fuels plc
EEC	Enterprise Electronic Corporation
EEC	Eurocontrol Experimental Centre
EDAC	Ensamble de detection et d'alarme de criticité
CIDAS	Criticality Incident Detection and Alarm System

D. DETECTOR Y ALARMA DE CRITICIDAD **“SOLYDES”**

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO:

Este equipo tiene como misión primordial detectar la criticidad y sonar la alarma de evacuación a fin de minimizar la exposición del personal.

Como función secundaria, entrega señales representativas de la tasa de dosis a un instrumento de panel ubicado en el modulo digital y a una PC para adquisición de datos.

1) DIAGRAMA EN BLOQUES:

Consta de 3 detectores de rayos gamma (cámaras de ionización), c/u de ellos alimenta de señal a su respectivo amplificador logarítmico, cubriendo así un rango dinámico de corriente de entrada amplio (10^{-13} A– 10^{-3} A).

Los 3 amplificadores logarítmicos conforman al módulo analógico.

Cada amplificador logarítmico entrega dos salidas lógicas SL1 y SL2 (a la salida de los comparadores respectivos U103A y U103B) al módulo digital.

Este último utiliza una lógica de votación (dos de tres) para el disparo de la alarma de evacuación. Asimismo, está provisto de luces indicadoras (LEDs) en su panel frontal, que permiten el monitoreo del status de cada canal y de un botón de “reset” manual.

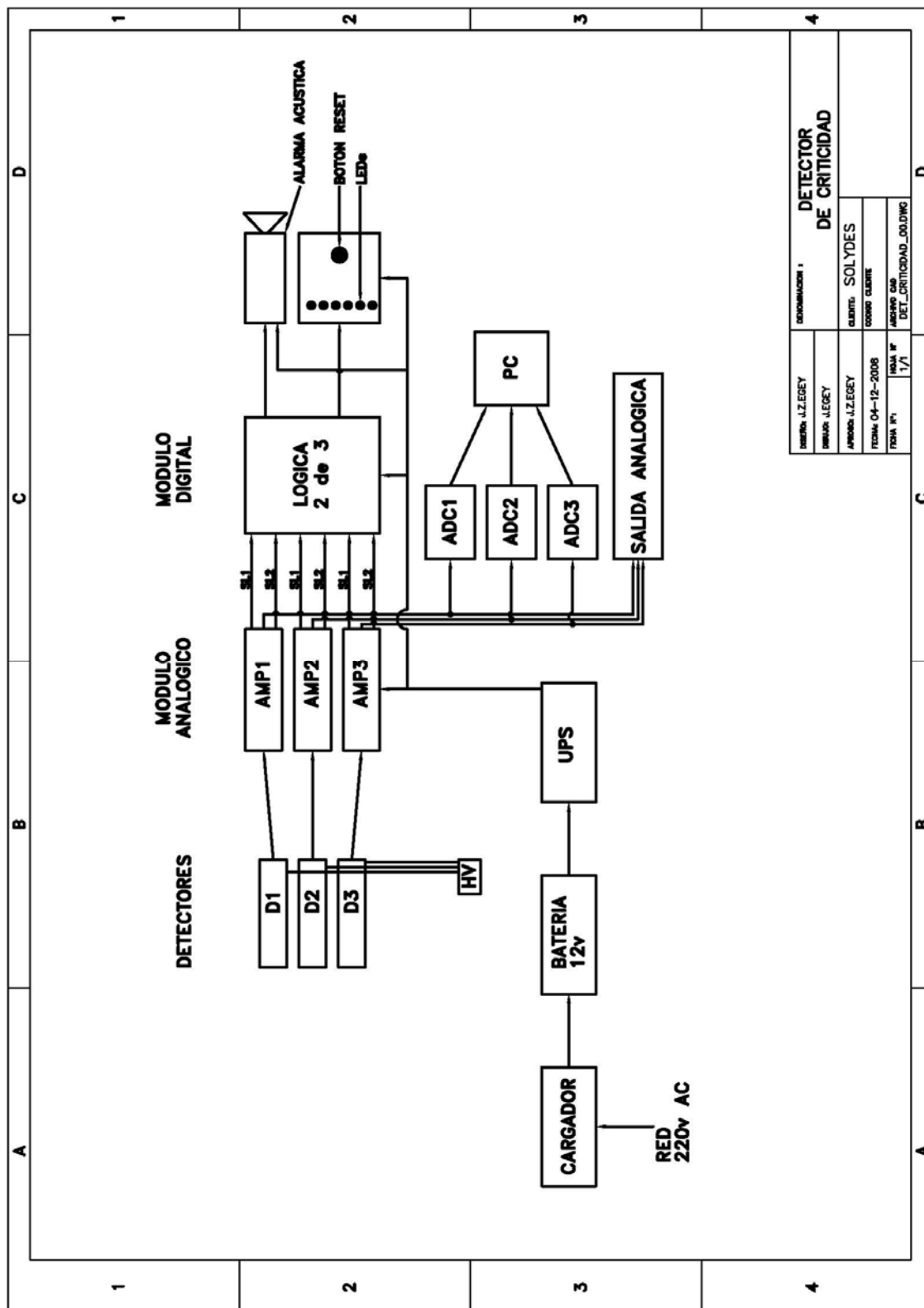
Los tres detectores más los tres amplificadores logarítmicos conforman los tres canales que alimentan al modulo digital.

Luz verde corresponde a normalidad, amarillo a falla de canal y rojo a alarma.

Para que se dispare la alarma se requiere que al menos 2 canales indiquen alarma (SL2) y una vez que se ha disparado solo se apaga con el botón de reset manual, aunque haya terminada la excursión transitoria.

La falla de uno o más canales por otra parte, se refleja en los LEDs amarillos del panel frontal del módulo digital, avisando así al operador de la necesidad de mantenimiento.

El equipo está provisto de una UPS y batería de 12V, de manera que la operación no se interrumpe ante un corte de suministro de la red de 220V AC.



2) DESCRIPCIÓN DE LOS MÓDULOS:

- **DETECTORES:** Cámaras de ionización (Solydes): diámetro 89 mm, longitud 320 mm, longitud sensible 220 mm, sensibilidad: 0.82×10^{-9} A/(R/h).
- **MÓDULO ANALÓGICO:** Está constituido por 3 amplificadores logarítmicos, uno para cada canal.
Los amplificadores logarítmicos están diseñados en torno a un circuito integrado de respuesta logarítmica (U101, AD8304 de Analog Devices).
Este integrado permite cubrir un rango dinámico de corriente de entrada amplio (10^{-13} A– 10^{-3} A), siendo la salida una tensión (0 – 4V).
A fin de monitorear el buen funcionamiento de los canales, en forma permanente, se inyecta al amplificador logarítmico una corriente pequeña ($\sim 0.3 \times 10^{-12}$ A) que resulta en una salida de ~ 0.4 V, constituyendo un “cero vivo eléctrico”.
Asimismo, para controlar el buen funcionamiento del equipo ante niveles de señal de entrada altos, equivalentes a una señal de alarma, cada amplificador logarítmico dispone de un botón de “Test”, que al ser oprimido inyecta una corriente de 10^{-9} A, siendo ese el nivel de disparo de alarma actualmente implementado.
Cabe notar que tanto el nivel del cero vivo, como el nivel de disparo, tienen la posibilidad de ser modificados, aunque los ajustes no están exteriormente disponibles para los operadores.
Durante operación normal: luz verde encendida (ausencia de luz amarilla y roja) en el panel frontal del módulo analógico, tanto SL1 como SL2 están en nivel lógico alto (5.5V).
Ante la falla de un canal: SL1 cambia a nivel lógico bajo (0.5V).
Ante una señal de alarma proveniente de un detector (u oprimiendo el botón “Test” del canal correspondiente), la salida lógica SL2 cambia a nivel lógico bajo (0.5V).
La falla de un canal se refleja en el panel frontal del módulo analógico mediante el apagado de la luz verde y el encendido de la luz amarilla, mientras que la alarma se refleja en el apagado de la luz verde y el encendido de la luz roja.
Todo lo dicho arriba está implementado por triplicado en el módulo analógico.
Los detalles del circuito analógico se observan en el diagrama de circuito adjunto “Críticidad Analógica”.

- **MÓDULO DIGITAL:**

El módulo digital que recibe como entradas las 6 salidas lógicas del módulo analógico, está diseñado en torno a una memoria programable EEPROM (U102, Hitachi HN462716 o INTEL 2716).

Las 6 entradas se alimentan a las entradas de la EEPROM, a través de unos inversores “buffer” como una dirección de memoria y esta entrega las salidas programadas correspondientes a las distintas combinaciones de entradas. Las salidas pueden ser: aviso, advertencia o alarma.

Las 4 salidas utilizadas se combinan a través de cuatro compuertas OR y un inversor para alimentar a un circuito integrado de potencia (Darlington array U05, ULN2001) que es el encargado de manejar a los bobinados de los relés que activan a la alarma y de encender las luces indicadoras en el panel frontal del módulo digital.

Luz verde corresponde a operación normal, luces amarillas indican la falla de uno, dos o tres canales o alarma en un solo canal y luz roja indica alarma en al menos dos canales.

Todas las combinaciones de las seis entradas lógicas del módulo digital y sus correspondientes salidas se observan en la “tabla de verdad” adjunta.

Los detalles del circuito digital se observan el diagrama de circuito adjunto “Alarma de Criticidad”.

RESUMEN DE LOS ESTADOS

V	-+--+	Seguridad Optima	LED Verde
A	x+x+A	AVISO al operador – Falla un canal	LED Amarillo y aviso por PC
A	x+x+R	AVISO al operador – Falla un canal	LED Amarillo y aviso por PC
A	x+A+A	ADVERTENCIA 1 – La seguridad esta muy comprometida por la degradación del sistema. Se aconseja detener la operación y llevar el proceso a estado seguro.	LED Amarillo, bocina interna suave y aviso por PC
A	A+A+A	ADVERTENCIA 2 – No se tiene ningún canal de medición o la información de los mismos es inconsistente. El proceso debe detenerse y llevado a estado seguro.	LED Amarillo, bocina interna fuerte y aviso por PC
A	x+A+R		
R	x+R+R	ALARMA – Se deberá EVACUAR LA PLANTA considerando que no se tienen las condiciones de seguridad necesarias para este evento.	LED Rojo, bocina externa y bocina interna fuerte
R	A+A+R		
R	A+R+R		
R	R+R+R		

Nota: La señal verde indica la ausencia de las otras dos.

TABLA DE VERDAD DEL MÓDULO DIGITAL

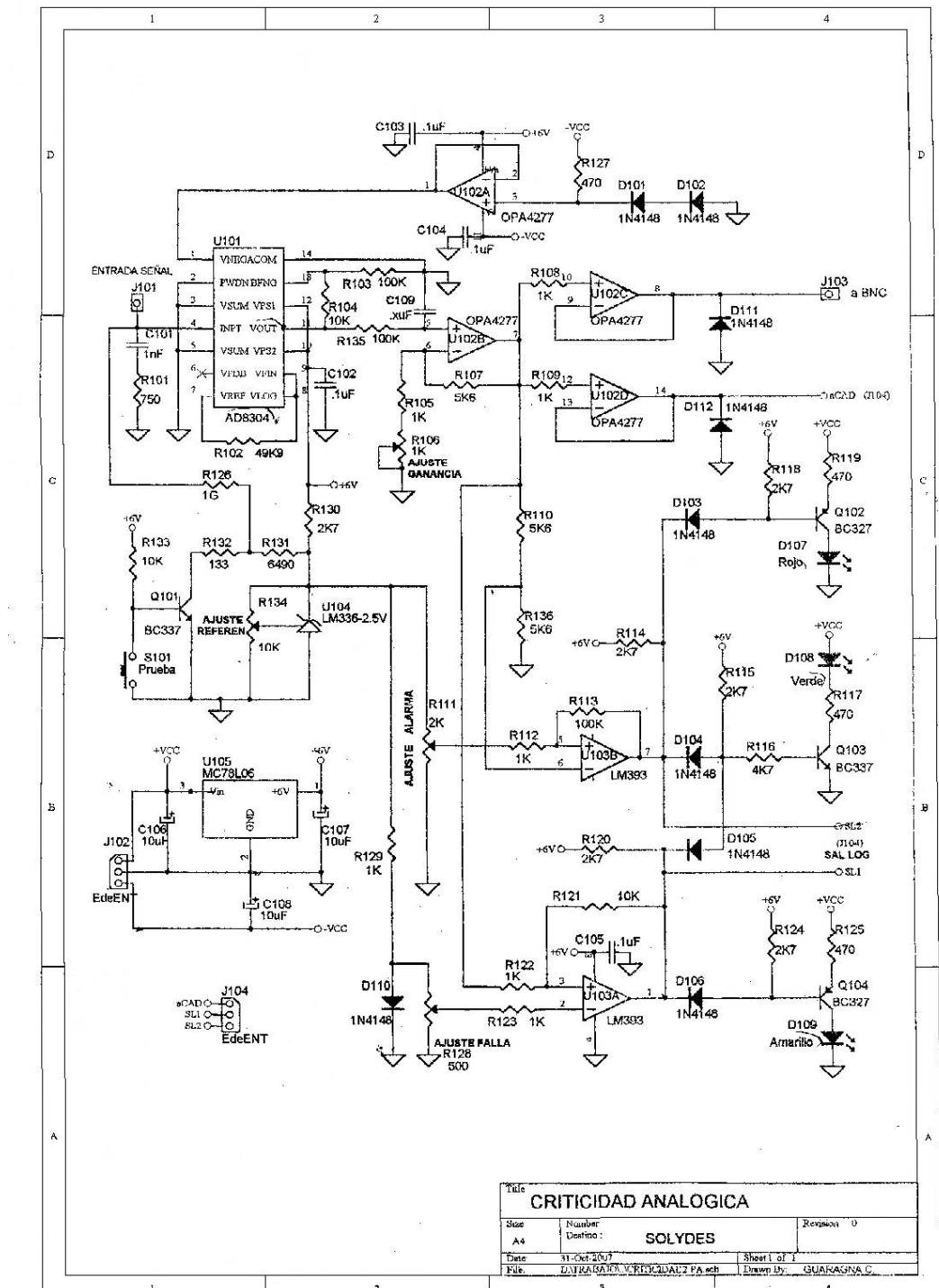
CN1	CN2	CN3	COD	P	DESCRIPCIÓN	SAL
R A	R A	R A				
0 0	0 1	0 1	110	3:	ADVERTENCIA	2
0 0	0 1	1 0	210	2:	ADVERTENCIA	4
0 0	0 1	1 1	210	2:	ADVERTENCIA	4
0 0	1 0	0 1	210	2:	ADVERTENCIA	4
0 0	1 1	0 1	210	2:	ADVERTENCIA	4
0 1	0 0	0 1	110	3:	ADVERTENCIA	2
0 1	0 0	1 0	210	2:	ADVERTENCIA	4
0 1	0 0	1 1	210	2:	ADVERTENCIA	4
0 1	0 1	0 0	110	3:	ADVERTENCIA	2
0 1	0 1	0 1	111	2:	ADVERTENCIA	4
0 1	1 0	0 0	210	2:	ADVERTENCIA	4
0 1	1 1	0 0	210	2:	ADVERTENCIA	4
1 0	0 0	0 1	210	2:	ADVERTENCIA	4
1 0	0 1	0 0	210	2:	ADVERTENCIA	4
1 1	0 0	0 1	210	2:	ADVERTENCIA	4
1 1	0 1	0 0	210	2:	ADVERTENCIA	4

CN1	CN2	CN3	COD	P	DESCRIPCIÓN	SAL
R A	R A	R A				
0 0	0 0	0 0	000	5:	-----	0
0 0	0 0	0 1	100	4:	AVISO	1
0 0	0 0	1 0	200	4:	AVISO	1
0 0	0 0	1 1	200	4:	AVISO	1
0 0	0 1	0 0	100	4:	AVISO	1
0 0	0 1	0 1	110	3:	ADVERTENCIA	2
0 0	0 1	1 0	210	2:	ADVERTENCIA	4
0 0	0 1	1 1	210	2:	ADVERTENCIA	4
0 0	1 0	0 0	200	4:	AVISO	1
0 0	1 0	0 1	210	2:	ADVERTENCIA	4
0 0	1 0	1 0	220	1:	ALARMA	8
0 0	1 0	1 1	220	1:	ALARMA	8
0 0	1 1	0 0	200	4:	AVISO	1
0 0	1 1	0 1	210	2:	ADVERTENCIA	4
0 0	1 1	1 0	220	1:	ALARMA	8
0 0	1 1	1 1	220	1:	ALARMA	8
0 1	0 0	0 0	100	4:	AVISO	1
0 1	0 0	0 1	110	3:	ADVERTENCIA	2
0 1	0 0	1 0	210	2:	ADVERTENCIA	4
0 1	0 0	1 1	210	2:	ADVERTENCIA	4
0 1	0 1	0 0	110	3:	ADVERTENCIA	2
0 1	0 1	0 1	111	2:	ADVERTENCIA	4
0 1	0 1	1 0	211 -	1:	ALARMA	8
0 1	0 1	1 1	211 -	1:	ALARMA	8
0 1	1 0	0 0	210 -	2:	ADVERTENCIA	4
0 1	1 0	0 1	211 -	1:	ALARMA	8

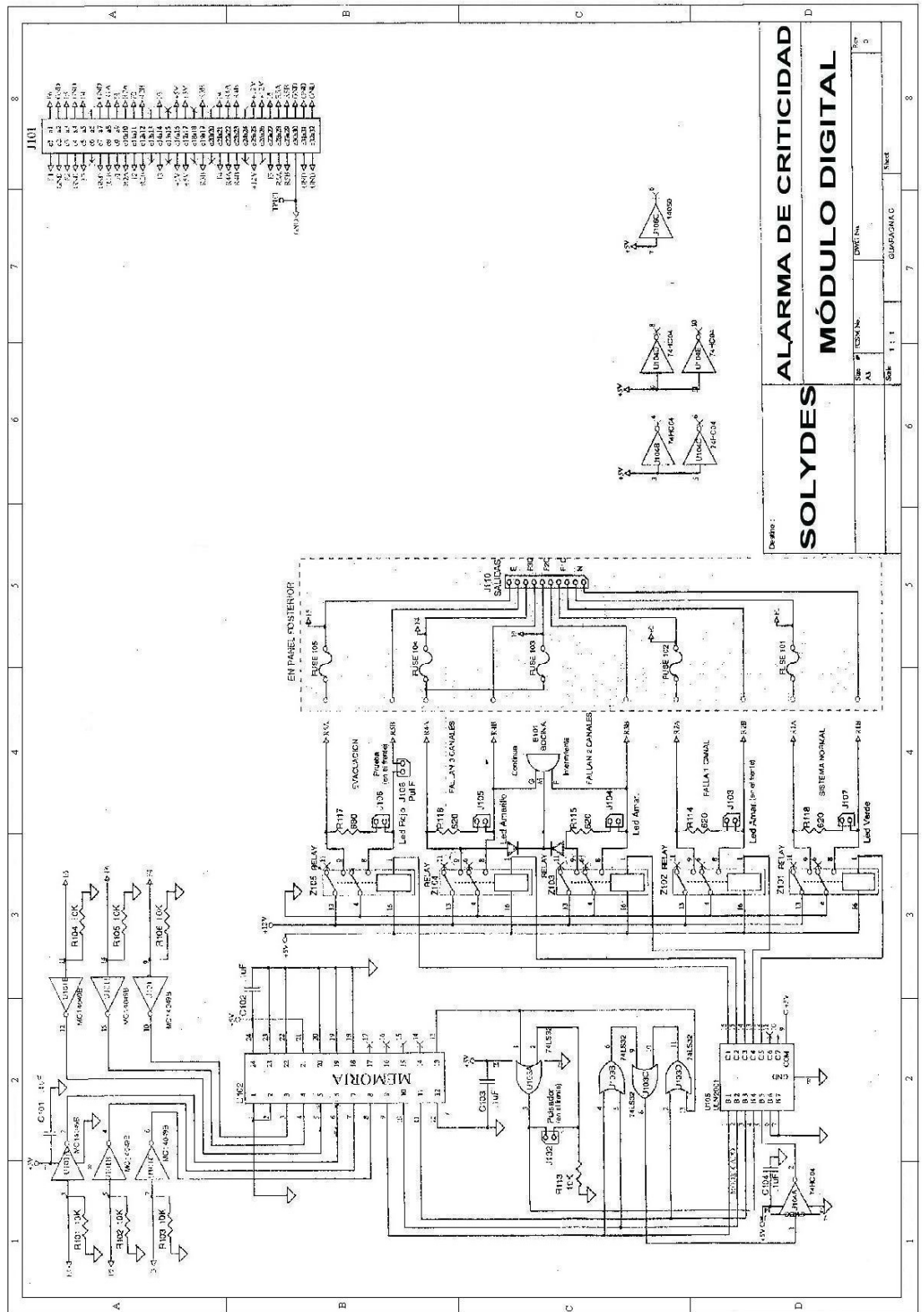
0 1	1 0	1 0	221	1:	ALARMA	8
0 1	1 0	1 1	221	1:	ALARMA	8
0 1	1 1	0 0	210	2:	ADVERTENCIA	4
0 1	1 1	0 1	211	1:	ALARMA	8
0 1	1 1	1 0	221	1:	ALARMA	8
0 1	1 1	1 1	221	1:	ALARMA	8
1 0	0 0	0 0	200	4:	AVISO	1
1 0	0 0	0 1	210	2:	ADVERTENCIA	4
1 0	0 0	1 0	220	1:	ALARMA	8
1 0	0 0	1 1	220	1:	ALARMA	8
1 0	0 1	0 0	210	2:	ADVERTENCIA	4
1 0	0 1	0 1	211	1:	ALARMA	8
1 0	0 1	1 0	221	1:	ALARMA	8
1 0	0 1	1 1	221	1:	ALARMA	8
1 0	1 0	0 0	220	1:	ALARMA	8
1 0	1 0	0 1	221	1:	ALARMA	8
1 0	1 0	1 0	222	1:	ALARMA	8
1 0	1 0	1 1	222	1:	ALARMA	8
1 0	1 1	0 0	220	1:	ALARMA	8
1 0	1 1	0 1	221	1:	ALARMA	8
1 0	1 1	1 0	222	1:	ALARMA	8
1 0	1 1	1 1	222	1:	ALARMA	8
1 1	0 0	0 0	200	4:	AVISO	1
1 1	0 0	0 1	210	2:	ADVERTENCIA	4
1 1	0 0	1 0	220	1:	ALARMA	8
1 1	0 0	1 1	220	1:	ALARMA	8
1 1	0 1	0 0	210	2:	ADVERTENCIA	4
1 1	0 1	0 1	211	1:	ALARMA	8
1 1	0 1	1 0	221	1:	ALARMA	8
1 1	0 1	1 1	221	1:	ALARMA	8
1 1	1 0	0 0	220	1:	ALARMA	8
1 1	1 0	0 1	221	1:	ALARMA	8
1 1	1 0	1 0	222	1:	ALARMA	8
1 1	1 0	1 1	222	1:	ALARMA	8
1 1	1 1	0 0	220	1:	ALARMA	8
1 1	1 1	0 1	221	1:	ALARMA	8
1 1	1 1	1 0	222	1:	ALARMA	8
1 1	1 1	1 1	222	1:	ALARMA	8

CN1	CN2	CN3				
R A	R A	R A	COD	P	DESCRIPCIÓN	SAL
0 0	0 0	0 1	100	4:	AVISO	1
0 0	0 0	1 0	200	4:	AVISO	1
0 0	0 0	1 1	200	4:	AVISO	1
0 0	0 1	0 0	100	4:	AVISO	1
0 0	1 0	0 0	200	4:	AVISO	1
0 0	1 1	0 0	200	4:	AVISO	1
0 1	0 0	0 0	100	4:	AVISO	1
1 0	0 0	0 0	200	4:	AVISO	1
1 1	0 0	0 0	200	4:	AVISO	1

CIRCUITO DEL MÓDULO ANALÓGICO



CIRCUITO DEL MÓDULO DIGITAL



Detector de Criticidad SOLYDES

Fuentes de
alta tensión

Módulos
Analógicos

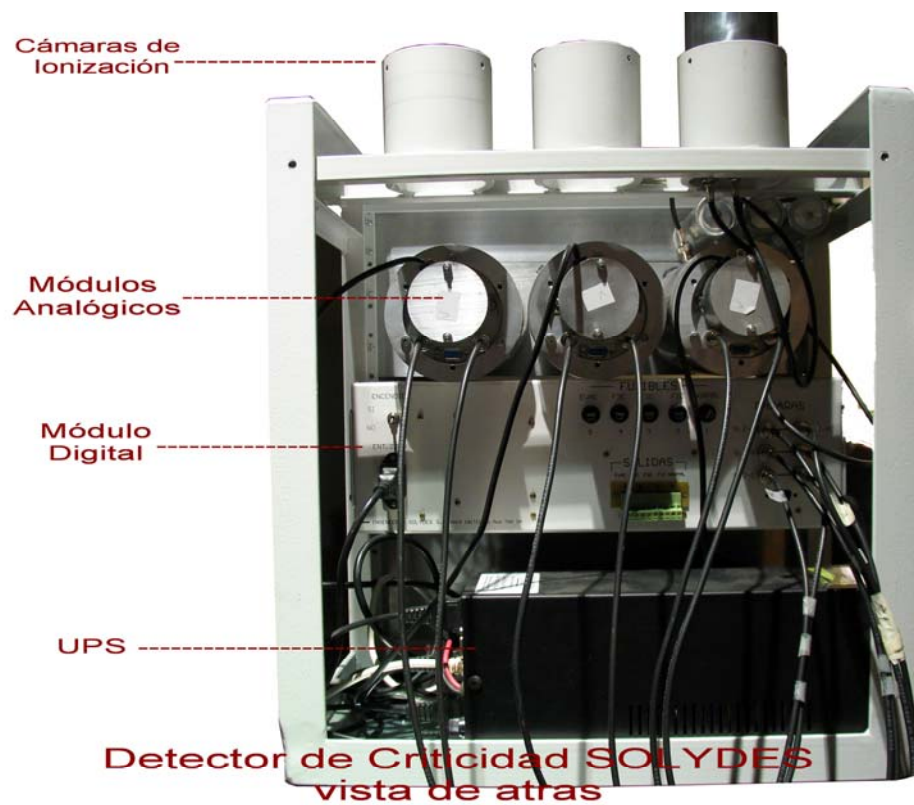
Módulo
Digital y
Fuente de
Poder

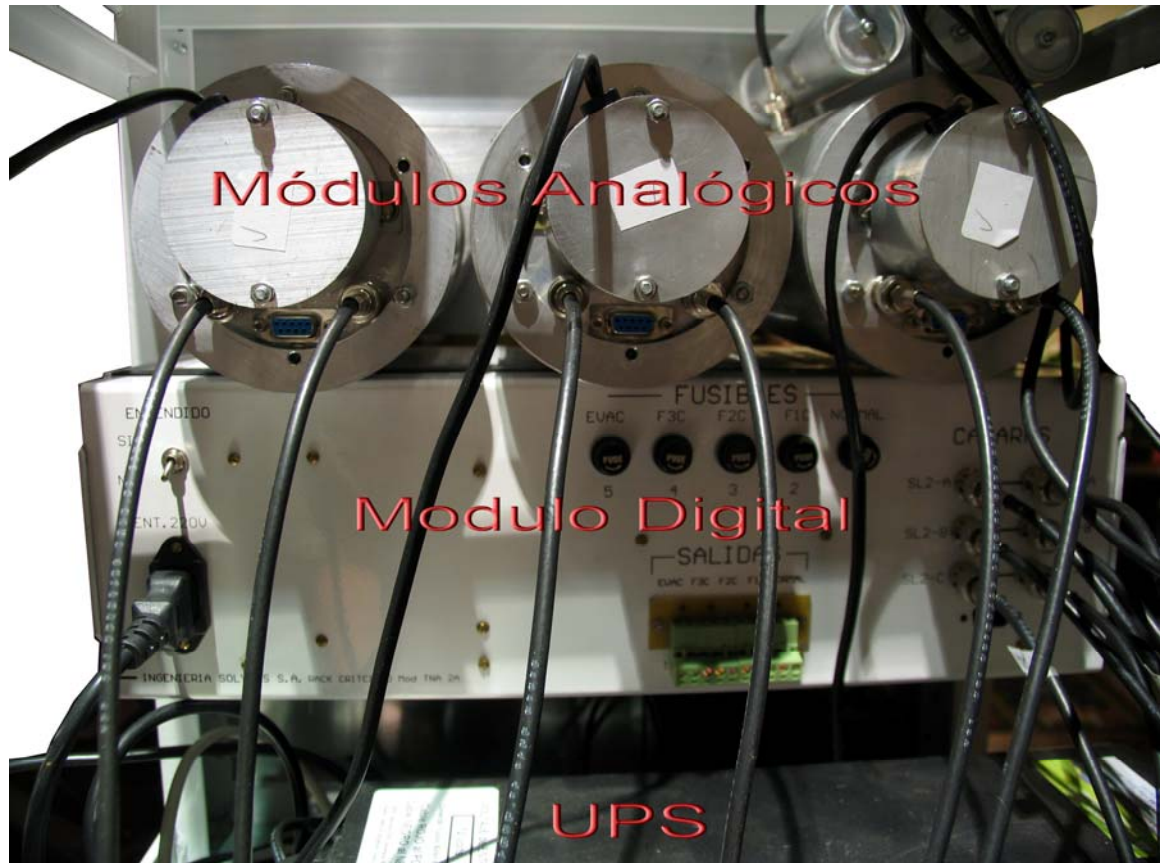


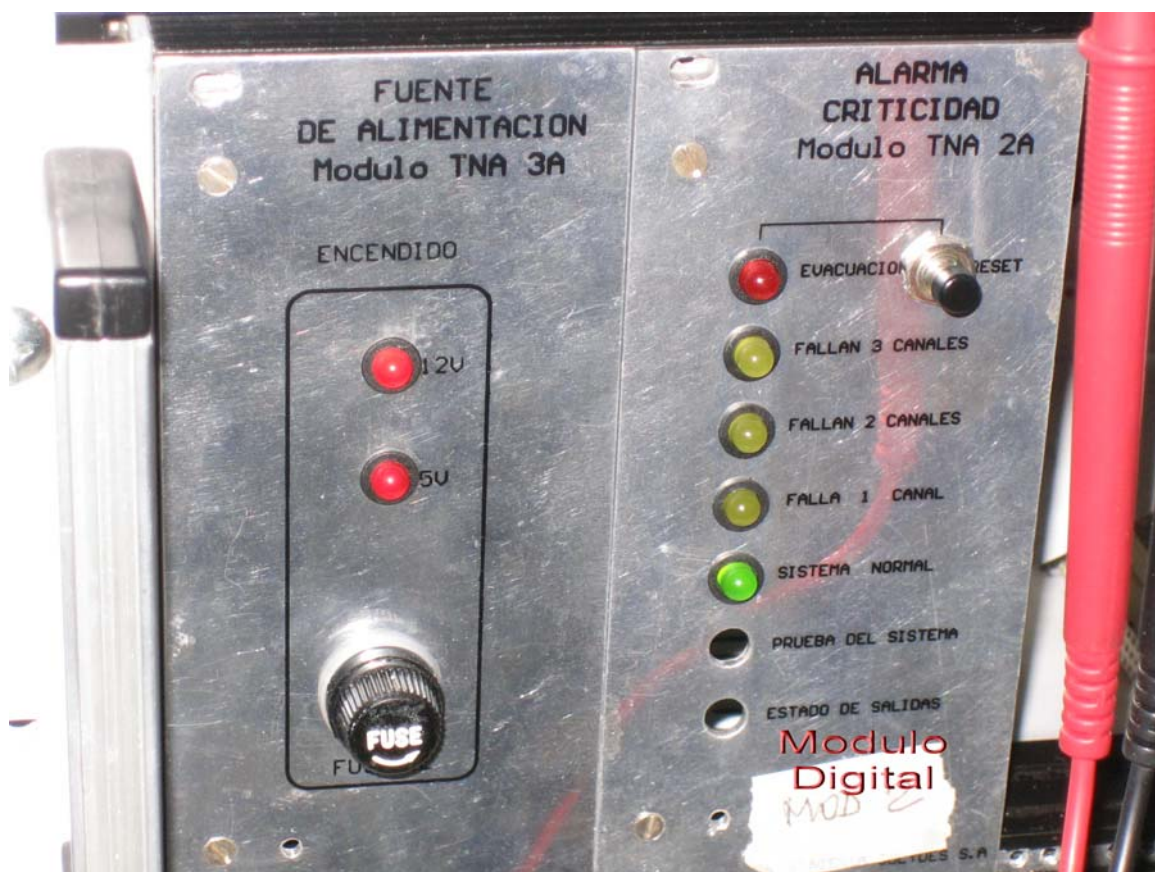


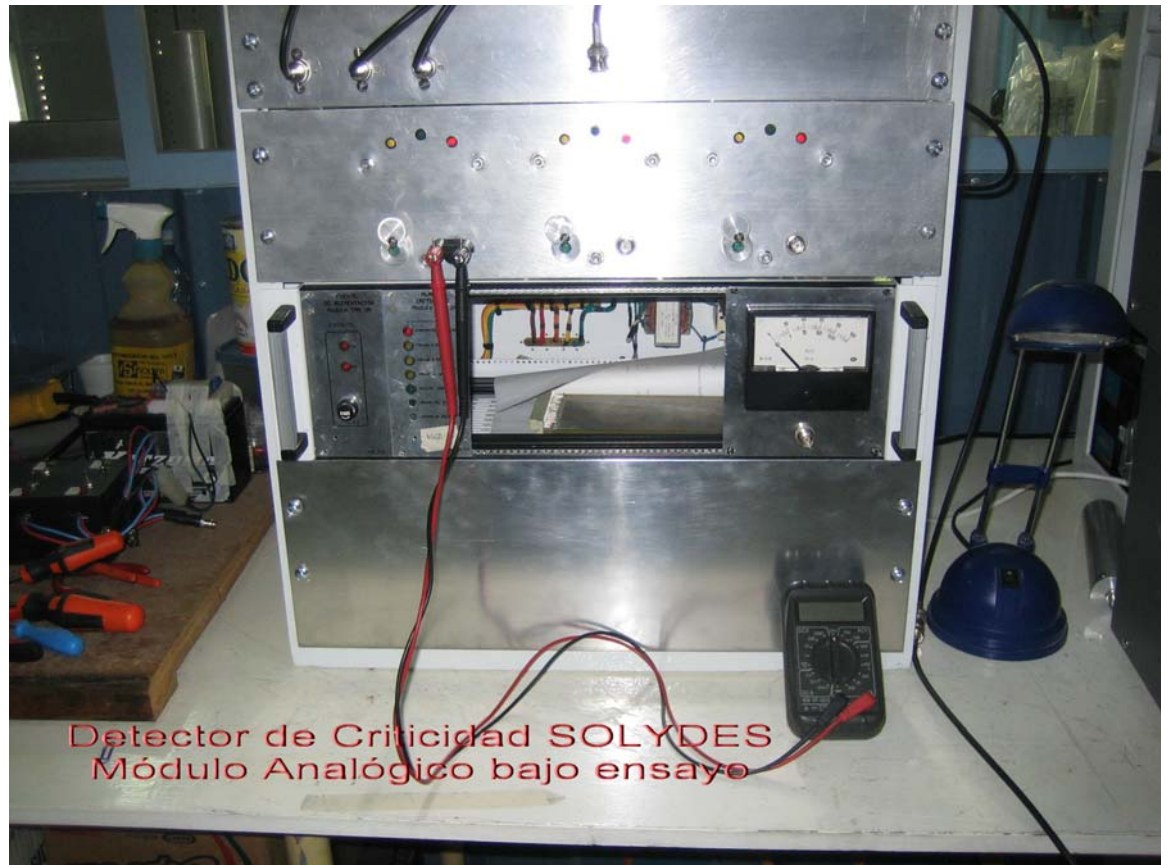
Detector de Criticidad SOLYDES













Injectando la corriente de prueba
"Alarama" en el módulo analógico

3) CALIBRACIONES Y MEDICIONES DE RESPUESTA:

I) ENSAYOS FUNCIONALES CUALITATIVOS

- a) Se ha verificado la respuesta de las cámaras de ionización utilizando una fuente de ^{241}Am (~ 10 mCi) en contacto. Se midió la salida con un electrómetro de laboratorio Keithley-610, ver Tabla 1 abajo.
- b) Se han calibrado los amplificadores logarítmicos, levantando la curva Tensión de Salida (V) vs Corriente de Entrada (A). Se utilizó una fuente de corriente de laboratorio Keithley-261. Ver Tabla 2 abajo y el gráfico presentado a continuación.
- c) Se ha controlado al respuesta de los conjuntos [Cámara de ionización + Amplificador Logarítmico] con una fuente de ^{241}Am (~ 10 mCi) en contacto, registrando también el “cero vivo electrico” en ausencia de la fuente, ver Tabla 3 abajo.
- d) Se ha realizado un ensayo funcional de los módulos analógico y digital interconectados, provocando el disparo de la alarma al inyectar 10^{-9} A al modulo analógico con la fuente de corriente Keithley-261.

Tabla 1.- Respuesta de las cámaras de ionización a una fuente de ^{241}Am en contacto (aprox. 10mCi), la salida medida con un electrómetro Keithley-610.

Nº de serie Detector		Respuesta
Gp 071 00705	12/2007	$0.47 \times 10^{-10} \text{ A}$
Gp 071 00704	12/2007	$0.46 \times 10^{-10} \text{ A}$
Gp 071 00703	12/2007	$0.46 \times 10^{-10} \text{ A}$
Gp 071 00706	12/2007	$0.45 \times 10^{-10} \text{ A}$
Ac 071 03	12/2007	$0.29 \times 10^{-10} \text{ A}$

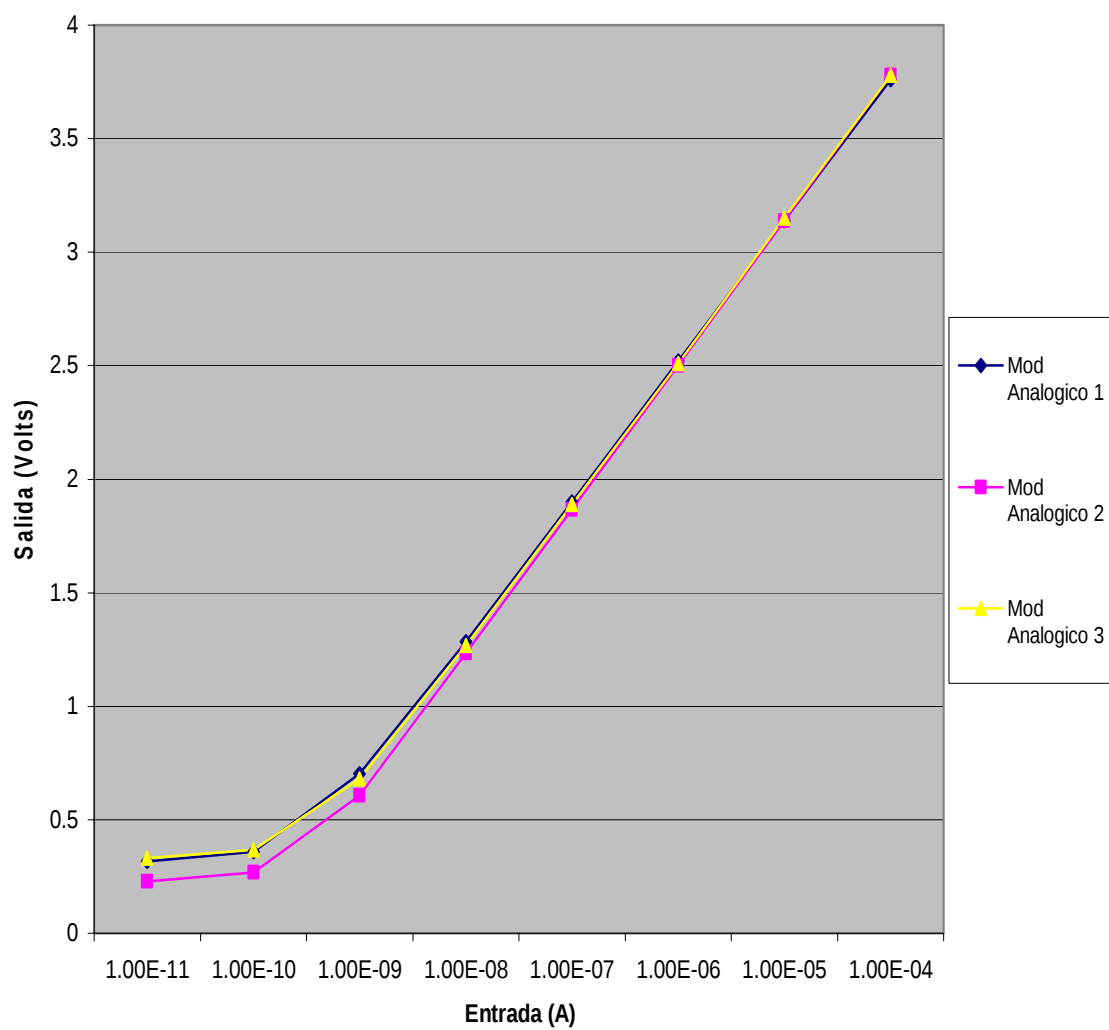
Tabla 2.- Control de la respuesta de los amplificadores logarítmicos alimentándolos con la señal de la fuente corriente variable Keithley-261

<u>Entrada [A]</u>	<u>Salida Canal 1[V]</u>	<u>Salida Canal 2[V]</u>	<u>Salida Canal 3[V]</u>
10^{-12}	0.317	0.230	0.330
10^{-11}	0.358	0.267	0.367
10^{-10}	0.703	0.607	0.681
10^{-9}	1.285	1.233	1.268
10^{-8}	1.899	1.865	1.889
10^{-7}	2.520	2.500	2.510
10^{-6}	3.140	3.140	3.150
10^{-5}	3.760	3.780	3.780

Tabla 3.- Respuesta de los conjuntos (cámara de ionización + amplificador logarítmico) a una fuente de ^{241}Am en contacto, midiendo la señal de salida del amplificador logarítmico.

<u>.</u>	<u>Cero vivo</u>	<u>Fuente en contacto</u>
Canal 1	0.421 V	0.620 V
Canal 2	0.317 V	0.540 V
Canal 3	0.457 V	0.625 V

Respuesta de los Amplificadores Logaritmicos

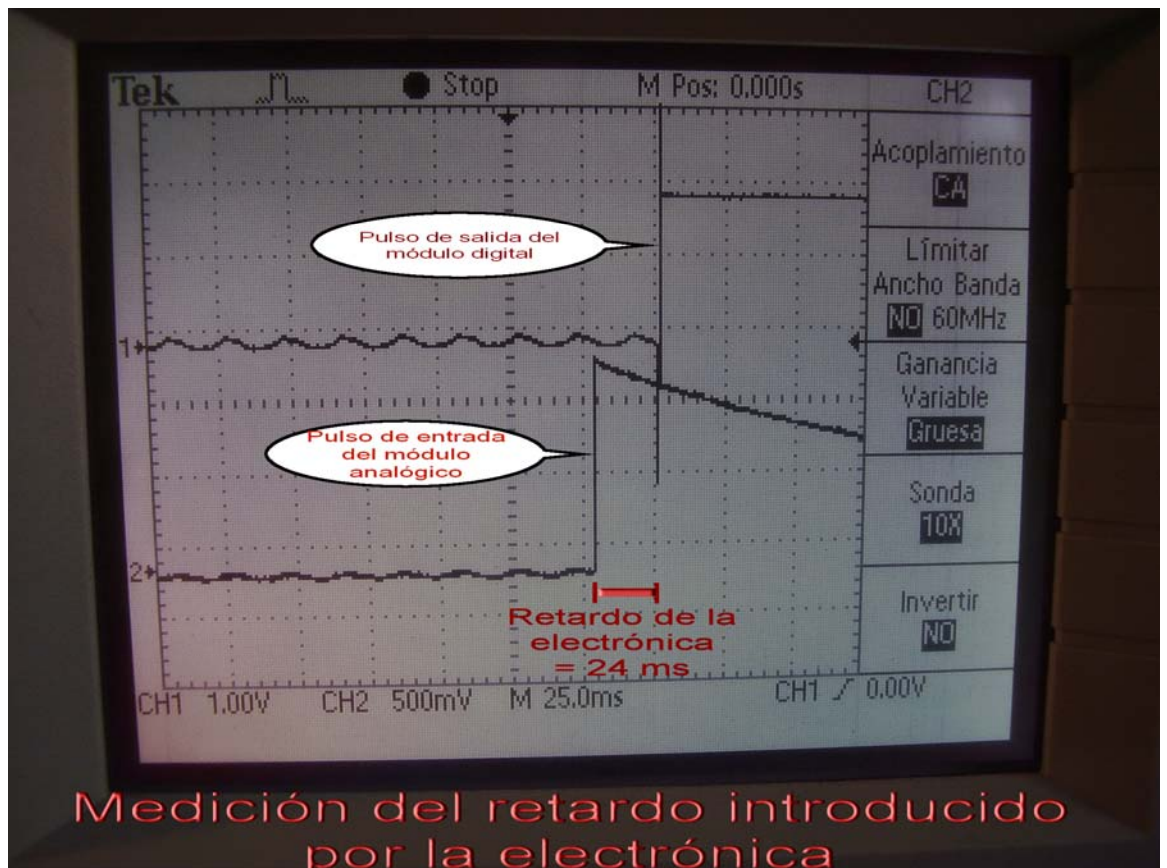


II) DETERMINACIÓN DEL RETARDO INTRODUCIDO POR LA ELECTRÓNICA

Alimentando la entrada de los módulos analógicos con un generador de pulsos (*), proveyendo una corriente de entrada superior a 10^{-9}A , provocando el disparo del sistema, se midió con un osciloscopio el retardo producido, a la salida del módulo digital.

El retardo introducido por toda la cadena de medición es de 24 ms, ver fotografía del arreglo instrumental y oscilograma presentados a continuación.

* Nota: se utilizó un generador de pulsos de tensión con una resistencia externa de 1 GOhm intercalado entre el generador y la entrada del módulo analógico, de modo de inyectar pulsos de corriente de $\sim 1\text{ nA}$.





III) CARACTERIZACIÓN DE LA CÁMARA DE IONIZACIÓN

Índice

1. Descripción, datos básicos.
2. Estudio de la respuesta ante una fuente de radiación constante.
 - a) Cálculo teórico de la sensibilidad.
 - b) Determinación experimental del plateau y de la sensibilidad.
 - c) Comparativa de valor experimental con el calculado.
3. Estudio de la respuesta ante una fuente de radiación pulsada.
 - a) Cálculo teórico de la respuesta temporal.
 - b) Determinación experimental, con verificación de los tiempos de subida y bajada (rise-time & fall-time).
 - c) Comparación de valores calculados vs experimentales.

1. Descripción y datos básicos.

- Geometría: cilíndrica con cuatro celdas concéntricas (ver esquema adjunto).
- Espaciamiento entre placas (gap) $d = 0.65 \text{ cm}$
- Espaciamiento efectivo para la geometría cilíndrica $h = 0.657 \text{ cm}$
 $h = [0.5(b^2 - a^2) \ln(b/a)]^{1/2}$ s/ref 1
- Longitud sensible $L_s = 22.8 \text{ cm}$
- Volumen sensible total $V_{s \text{ tot}} = 651.82 \text{ cm}^3$
- Gas de llenado Argon @ 8 atm abs (6080 mmHg)
- Tensión de polarización $V_0 = 100 \text{ Volts}$
- $E/p = 100 \text{ V} / 0.657 \text{ cm} / 6080 \text{ mmHg} = 0.025 \text{ (V / cm) / mmHg}$
- Velocidad de corrimiento (drift) electrones $w^- = 180000 \text{ cm/seg}$
se obtiene de la curva de $w^- = f(E/p)$ [Rossi & Staub, Price]
- Tiempo de colección de los electrones $t^- = h/w^- = 3.65 \mu \text{ s}$
- Movilidad iones de Argon $\mu^+ (1 \text{ atm}) = 1.3 \text{ cm}^2/\text{V.s}$
- Movilidad iones de Argon $\mu^+ (8 \text{ atm}) = (1/8)1.3 = 0.1625 \text{ cm}^2/\text{V.s}$
- Velocidad de corrimiento (drift) de los iones positivos
 $w^+ = \mu^+ \times E = 0.1625 [\text{cm}^2/\text{V} \times \text{s}] \times 100 [\text{V}] / 0.657 [\text{cm}] = 24.7 \text{ cm/s}$
donde μ^+ es la movilidad de los iones positivos.
- Tiempo de colección de los iones positivos
 $t^+ = h/w^+ = h^2/V \times \mu^+ = 0.0266 \text{ s} = 26.6 \text{ ms}$

Otros parámetros útiles:

- $w^+/h = 37.64 \text{ s}^{-1}$
- $w^-/h = 273972.6 \text{ s}^{-1}$
- Capacidad de la cámara de ionización $C = 2 \times \pi \times \epsilon_0 \times \kappa \times L / \ln(b/a)$,
 $\epsilon_0 = 10^{-9} / 36 \pi (\text{F/m})$, $\kappa_{\text{argon}} @ 8 \text{ bar} = 1.005$
Calculando la capacidad de cada celda y sumando, la capacidad total teórica es: $C_{\text{teórica}} = 140 \text{ pF}$
El valor medido de la capacidad es: $C_{\text{medida}} = 188 \text{ pF}$
- Constante de tiempo del circuito de adquisición (osciloscopio Tektronix TDS-200): $R_{\text{in}} = 1 \text{ M}\Omega$ en paralelo con 20 pF (osciloscopio) + 188 pF (Cámara de Ionización),
 $RC = 10^6 \Omega \times 208 \times 10^{-12} \text{ F} = 208 \times 10^{-6} \text{ s} = 208 \mu \text{ s} = 0.21 \text{ ms}$
 $1 \text{ RC} \sim 0.2 \text{ ms}$, $3 \text{ RC} \sim 0.6 \text{ ms}$

- La contribución de corriente iónica y electrónica para cada celda se calcula (s/ ref 2):

$$I^-/eN = 1/[2\ln(b/a)] - a^2/(b^2 - a^2)$$

$$I^+/eN = b^2/(b^2 - a^2) - 1/[2\ln(b/a)]$$

Estas fórmulas valen para electrodo interior (geometría cilíndrica) positivo.

En caso de electrodo interior negativo, las formulas se intercambian.

En nuestro caso tenemos una y otra situación en forma alternativa (ver diagrama) adjunto. Asimismo, las contribuciones de iones y electrones de cada celda se han ponderado con el volumen relativo de cada celda, es decir:

$$(I_0^-/eN)_i \times (Vol/Vol_{total})_i \text{ y } (I_0^+/eN)_i \times (Vol/Vol_{total})_i$$

Algunos de los parámetros básicos de cada celda de la cámara de ionización, así como los totales o los promedios ponderados, según sea el caso, se han volcado en la tabla que sigue.

celda	a	b	vol	vol/vol _{tot}	h _{efectivo}	I ⁻ /eN	I ⁺ /eN	I ⁻ /eN _p	I ⁺ /eN _p	C
Nº	mm	mm	cm ³	-----	mm	-----	-----	-----	-----	pF
1	1.5	8	44.23	0.07	7.19	0.26	0.74	0.02	0.05	8
2	10	16.5	123.38	0.19	6.57	0.42	0.58	0.11	0.08	26
3	18.5	25	202.53	0.31	6.52	0.45	0.55	0.14	0.17	44
4	27	33.5	281.68	0.43	6.51	0.47	0.53	0.23	0.20	62
Total	-----	-----	651.82	1	6.57 *	-----	-----	0.50 **	0.50 **	140

* promedio ponderado según volumen relativo

** contribución ponderada según volumen relativo

Simplificaciones adoptadas:

- Tratándose de gas Argón de alta pureza (59), se considera que no se forman iones negativos.
- Se desprecian los efectos de la difusión y recombinación.
- A fin de tener en cuenta los efectos de la geometría cilíndrica sobre la colección de los electrones e iones positivos, se utiliza un h_{efectivo} en vez del h_{real} (h: separación de placas).

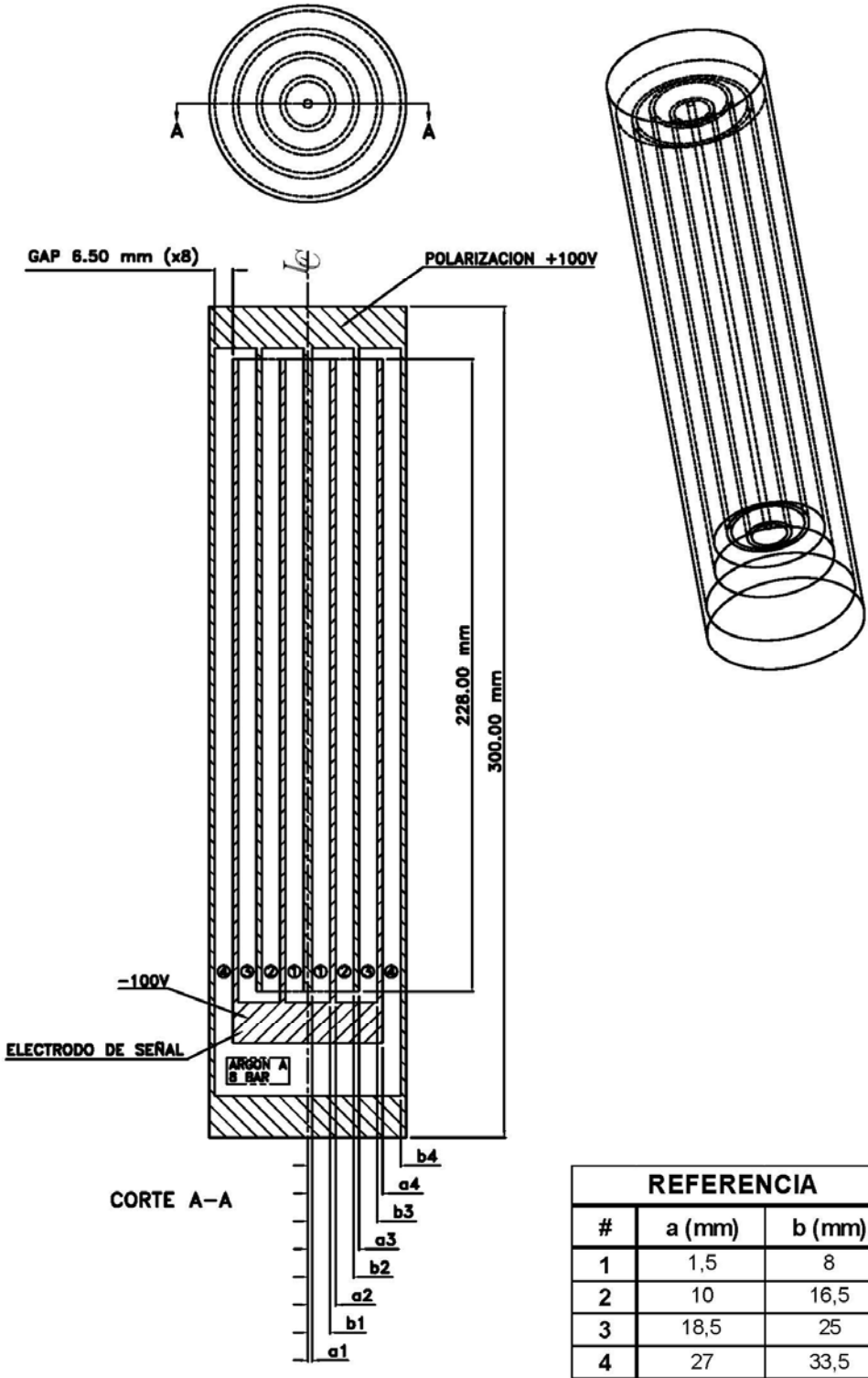
$$h_{real} = 0.65 \text{ cm}$$

$$h_{efectivo} = 0.657 \text{ cm}$$

Bibliografía de referencia:

- Ref 1: Boag J.W., Radiation Dosimetry, Vol II, F.Attix et al, Academic Press (1966), p.22
- Ref 2: Rossi B.B & Staub H.H., Ionization Chambers and Counters, McGraw Hill (1949), p.48

ESQUEMA CAMARA DE IONIZACION



2. Estudio de la respuesta ante una fuente de radiación constante.

a) Cálculo de la sensibilidad de la Cámara de Ionización.

Método 1(aproximado):

Teniendo en cuenta la definición de Röntgen (actualizando las unidades):

1 Röntgen = 2.58×10^{-4} Coulomb/Kg (1) [estrictamente, definición válida para aire]

Volumen de la Cámara = 0.652 litros

Presión interna = 8 Atm, $T \sim 300K$, $PM_{\text{Argón}} = 39.95$

Utilizando la Ec. de estado de los gases se obtiene el N° de moles = 0.212, y por ende la masa de gas sensible = 8.47 gramos de argón

Aplicando la definición de Röntgen (para aire, Ec. (1)), a la masa de gas sensible del detector :

1 R = 0.0218526×10^{-4} Coulomb

dividiendo miembro a miembro por 1 seg y reordenando, se obtiene:

1 R/H = 0.61×10^{-9} A

Teniendo en cuenta que: $W_{\text{Aire}} \div W_{\text{Argón}} = 34.5 \text{ eV} / 27 \text{ eV} = 1.28$

(donde W_{Aire} , $W_{\text{Argón}}$ son las energías necesarias para formar un par ion-electrón en aire y argón respectivamente)

y además que para fotones de 1.25 MeV ($\sim$ equivalente a los 2 fotones del Co-60 de 1.173 MeV y 1.332 MeV respectivamente):

$(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{Argón}} \div (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{Aire}} = 2.394 \times 10^{-2} \div 2.666 \times 10^{-2} = 0.890$

(donde $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{Argón}}$, $(\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{Aire}}$ son los coeficientes de absorción energéticos divididos por su densidad para argón y aire respectivamente) aplicando ambas correcciones, resulta:

1 R/h = $0.61 \times 10^{-9} \times 1.28 \times 0.89 = 0.70 \times 10^{-9}$ A, es decir, la sensibilidad de la Cámara de Ionización es: Sens = 0.70 nA/ R/h

Método 2 (según ref 2, el NRC Report #50):

$k_{\gamma} = C_1 \times [(\mu_{\text{tr}}/\rho)_{\text{Argón}} \div (\mu_{\text{tr}}/\rho)_{\text{Aire}}] \times (PV)_{\text{STP}}$

Formula que no tiene en cuenta los efectos de pared, siendo $C_1 = 0.164$ fA/(mR/h)-atm-litro.

Asimismo, el k_{γ} corregido que si tiene en cuenta a los efectos de pared (atenuación, buildup, etc.), se calcula con la fórmula:

$k_{\gamma} = 0.164 \times F(E, X, PV) \times (PV)_{\text{STP}}$

donde:

$$F(E,X,PV)=B_e \times B_g \times [(\mu_{tr}/\rho)_{\text{Argón}} \div (\mu_{tr}/\rho)_{\text{Aire}}] \times e^{-(\mu/\rho)X}$$

B_e y B_g son los coeficientes de “buildup” para electrones y rayos gamma

$(\mu_{tr}/\rho)_{\text{Argón}}$, $(\mu_{tr}/\rho)_{\text{Aire}}$ son los coeficientes de absorción de transferencia divididos por su densidad para argón y aire respectivamente

μ/ρ es el coeficiente de atenuación másico dividido por la densidad para el material de la pared (acero inoxidable en este caso)

X es el espesor de pared equivalente

La función $F(E,X,PV)$ está tabulada (ref 2), su valor para $E=1\text{MeV}$,

$X=2.5\text{g/cm}^2$ es:

$$F(1\text{ MeV}, 2.5\text{ g/cm}^2)=0.890$$

El volumen de la cámara de ionización es: $V=0.65$ litros

$$(PV)_{\text{STP}}= 8\text{atm} \times (273\text{K}/300\text{K}) \times 0.65\text{litr} = 4.73\text{ atm} \times \text{litr}, \text{ luego}$$

$$k_\gamma=0.164 \times [10^{-15}\text{A}/(\text{R/h})\text{-atm-litr}] \times 0.890 \times 4.73\text{ atm litr} = 0.69\ 10^{-9}\text{ A}/(\text{R/h})$$

La sensibilidad de la cámara calculada por este método es:

$$\text{Sens}=0.69\text{ nA}/(\text{R/h})$$

Bibliografía de referencia:

Ref 1: R.E. Lapp & H.L. Andrews, Nuclear Radiation Physics, Prentice Hall (1972), p.252

Ref 2: NRC Report #50, Environmental Radiation Monitoring, p.68

b) Determinación experimental del plateau y la sensibilidad.

Se utilizó una fuente de Co-60, disponible en el CAE, cuya tasa de dosis calibrada en aire a una distancia de 80 cm. es de 144.76 mGy/min.

Se colocó la cámara de ionización en dos posiciones:

Posición No. 1: a 290.1 cm de la fuente, obteniendo de esa forma irradiación uniforme de toda la cámara y se registró el plateau correspondiente que se adjunta.

En particular, con la fuente de polarización de 100V se obtiene una corriente de 58 nA, lo que se traduce en una sensibilidad de 5.27 nA/mGy/min (aproximadamente 0.82 nA/R/h).

Posición N. 2: Se colocó la cámara de ionización a 80 cm de la fuente, obteniéndose una irradiación más intensa pero parcial y localizada.

En esta posición se obtiene una corriente de 270 nA.

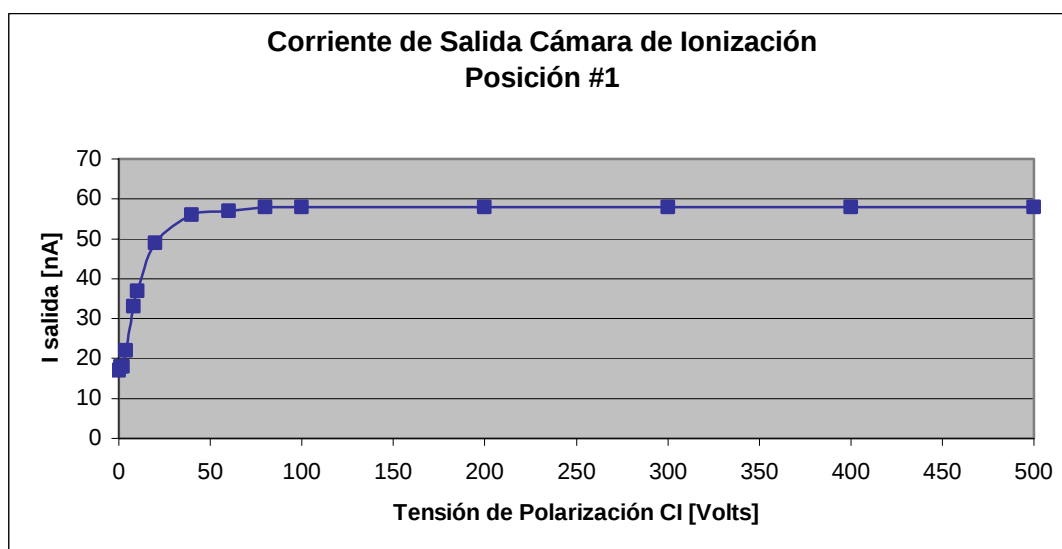
Ver plateau y fotos adjuntas.

b1) Determinación experimental del plateau de la Cámara de Ionización

Posición #1: Cámara de Ionización a 290.1 cm de la fuente de Co-60

Fecha: 6 Marzo 2009

Tensión de polarización	V	0	1	2	4	8	10	20	40	60	80	100	200	300	400	500
Corriente de salida	nA	17	18	18	22	33	37	49	56	57	58	58	58	58	58	58



Notas:

- La Cámara de Ionización a 290.1 cm de la fuente de Co-60 nos asegura Irradiación uniforme
- La corriente de la Cámara de Ionización se midió con un electrómetro Keithley 610
- La Tasa de Dosis entregada por la fuente de Co-60: 144.76 mGy/min @ 80 cm, según calibración efectuada el 25 Febr 2009 con Cámara de Ionización de referencia Nuclear Enterprise, Modelo 2571, n/s 2394, calibrado por la BIPM
- La sensibilidad resultante de la Cámara de Ionización es:
$$\text{Sens} = 58 \text{ nA} / \{144.76 \text{ mGy/min} \times (80\text{cm}/290.1\text{cm})^{**2}\} = 5.27 \text{ nA} / \text{mGy/min},$$

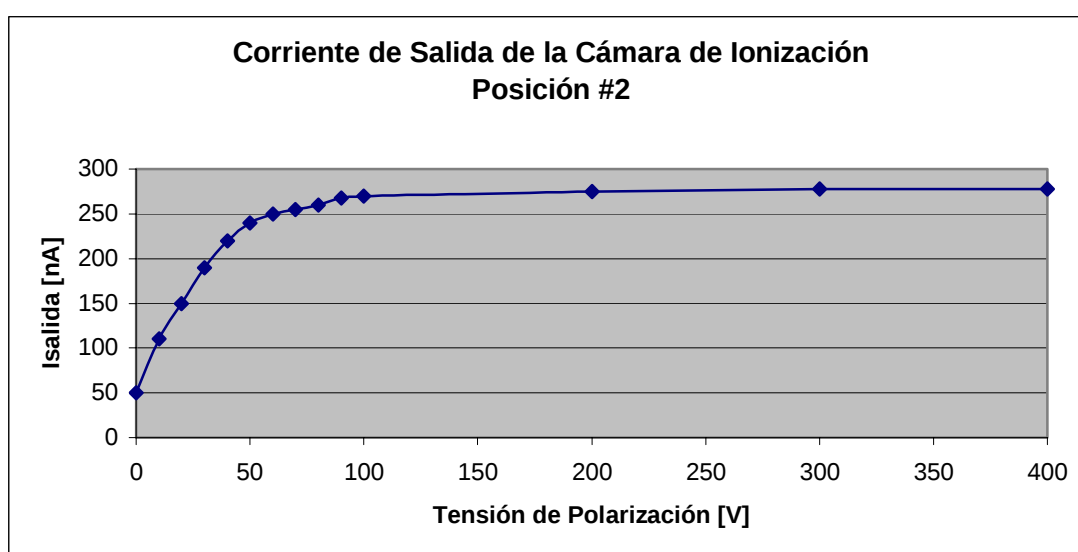
asumiendo que: 1 Gy en aire $\sim 107.185 \text{ R} \Rightarrow \text{Sens} \sim 0.82 \text{ nA} / \text{R/h}$

b2) Determinación experimental del plateau de la Cámara de Ionización

Posición #2: Cámara de Ionización a 80 cm de la fuente de Co-60

Fecha: 6 Marzo 2009

Tensión de polarización	V	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	200	300	400
Corriente de salida	nA	50	110	150	190	220	240	250	255	260	268	270	275	278	278



Notas:

- La Cámara de Ionización a 80 cm de la fuente de Co-60 produce una Irradiación parcial localizada intensa.
- La corriente de la Cámara de Ionización se midió con un electrómetro Keithley 610
- La Tasa de Dosis entregada por la fuente de Co-60: 144.76 mGy/min @ 80 cm, según calibración efectuada el 25 Febr 2009 con Cámara de Ionización de referencia Nuclear Enterprise, Modelo 2571, n/s 2394, calibrado por la BIPM

c) Comparativa cálculo vs valor experimental:

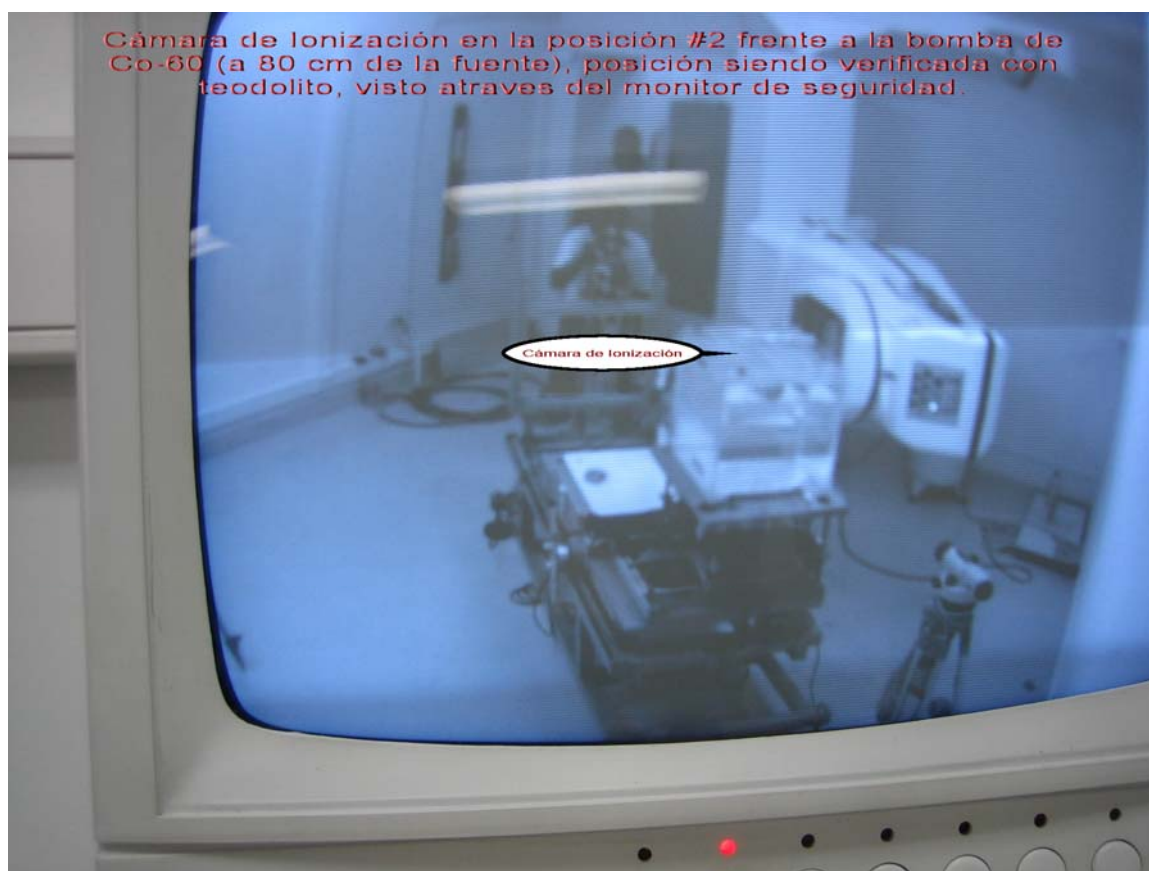
Determinación experimental:	Sens = 0.82 nA/ R/h
Cálculo teórico (aproximado):	Sens = 0.70 nA/ R/h
Cálculo teórico (metodología NRC):	Sens = 0.69 nA/ R/h

Disposición de la Cámara de Ionización frente a la bomba de Cobalto-60 - posición #1 a 290.1 cm de la fuente



Cámara de Ionización en la posición #1 frente a la bomba de Co-60 (a 290.1 cm de la fuente)









3. Estudio de la respuesta de la cámara de ionización ante una fuente de radiación pulsada.

a) **Cálculo teórico de la respuesta temporal: pulso de corriente en la cámara de ionización producido por un pulso de Rayos-X de 100 ms de duración.**

Corriente de iones positivos, flanco ascendente del pulso.

Expresión de la corriente de iones positivos en el flanco ascendente del pulso de corriente (según ref 1, pág 47):

$$\begin{aligned} I^+(t) &= (eNw^+ / h) (t - 0.5(w^+/h) t^2) & \text{para } t < h/w^+ \\ I^+(t) &= 0.5eN = I_0^+ & \text{para } t > h/w^+ \end{aligned}$$

Siendo :

$h = 0.657 \text{ cm}$: espaciado (gap) efectivo de las placas de la CI

$w^+ = 24.73 \text{ cm/s}$: velocidad de corrimiento (drift) de los iones positivos

$N = 0.63 \times 10^{14}$: número inicial de pares de iones

$e = 1.6021 \times 10^{-19} \text{ Coulomb}$: carga unitaria (ion o electrón)

$h/w^+ = 0.0266 \text{ s}$ (26.6 ms): tiempo de colección de los iones positivos

$w^+/h = 37.64 \text{ s}^{-1}$

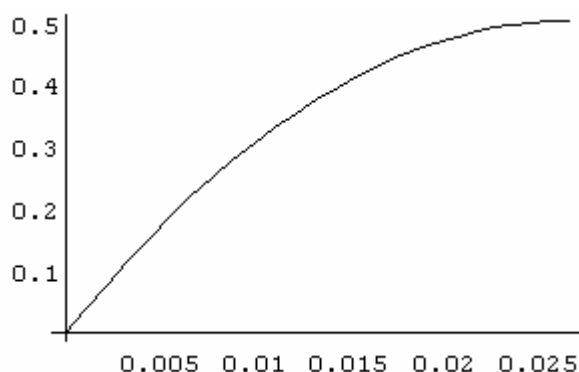
$I_0 = I_{\text{total, estado estacionario}} = 10^{-5} \text{ A}$ según calibración efectuada.

$I_0^+ = 0.5 \times I_0 = 0.5 \times 10^{-5} \text{ A}$

(para el flanco ascendente la abscisa al origen ($t=0$) está al inicio del pulso de Rx).

Gráfico y expresión de la corriente de iones positivos (valor relativo, referido a $I_0 = 10^{-5} \text{ A}$) en el intervalo $\{0, 0.0266 \text{ s}\}$.

Plot[$37.991(t-18.82 \cdot t^2)$, {t,0,0.0266}]



$$I_{ion^+}(t) / 10^{-5} A = 37.991 (t - 18.82 t^2) \quad \text{para } t < 0.0266 \text{ s}$$

$$I_{ion^+}(t) / 10^{-5} A = 0.5 \quad \text{para } t > 0.0266 \text{ s}$$

Unidades : [I] = A , [t] = s

$t_{coleccion\ de\ iones^+} = 0.0266 \text{ s (26.6 ms)}$

Corriente de electrones, flanco ascendente del pulso.

Expresión de la corriente de electrones en el flanco ascendente del pulso de corriente:

$$\begin{aligned} \Gamma(t) &= (eNw^- / h)(t - 0.5(w^-/h) t^2) & \text{para } t < h/w^- \\ \Gamma(t) &= 0.5eN = I_o^- & \text{para } t > h/w^- \end{aligned}$$

Siendo :

$h = 0.657 \text{ cm}$: espaciamiento (gap) efectivo de las placas de la CI

$w^- = 180000 \text{ cm/s}$: velocidad de corrimiento (drift) de los electrones

$h/w^- = 0.00000365 \text{ s (3.65 } \mu\text{s)}$: tiempo de colección de los electrones

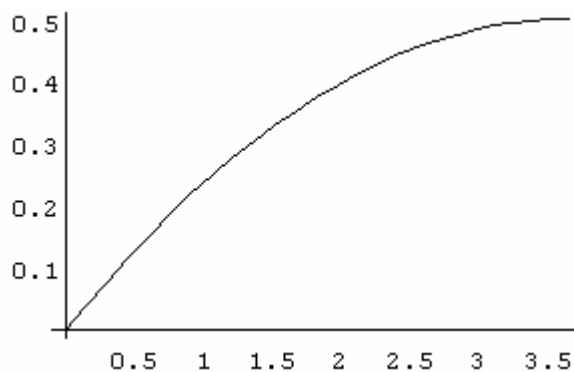
$w^-/h = 273972.6 \text{ s}^{-1}$

$I_o^- = 0.5 \times 10^{-5} \text{ A}$ según calibración efectuada

e, N : igual a los definidos en el párrafo precedente

Gráfico y expresión de la corriente de electrones (valor relativo, referido a $I_o = 10^{-5} A$) en el intervalo $\{0, 3.65 \mu\text{s}\}$.

Plot[276526.849(0.000001t-((10⁻¹²)*136986.3*t²)),{t,0,3.65}]



$$I_{electron}(t) / 10^{-5} A = 276526.849 (10^{-6} t - 136986.3 \times 10^{-12} t^2) \quad \text{p/ } t < 3.65 \mu\text{s}$$

$$I_{\text{electrones}}(t) / 10^{-5} \text{ A} = 0.5$$

$$\text{para } t > 3.65 \mu\text{s}$$

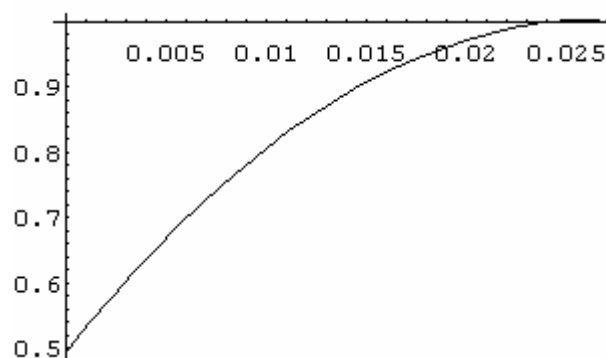
$$\text{Unidades : } [I] = \text{A} , \quad [t] = \mu\text{s}$$

$$t_{\text{colección de electrones}} = 3.65 \mu\text{s}$$

Corriente Total, flanco ascendente del pulso.

$$I_{\text{total}} = I_{\text{iones positivos}} + I_{\text{electrones}}$$

Gráfico y expresión de la corriente total (valor relativo, referido a $I_0 = 10^{-5} \text{ A}$) en el intervalo $\{0, 0.0266 \text{ s}\}$.



$$I_{\text{total}}(t) / 10^{-5} \text{ A} = (37.991 (t - 18.82 t^2)) + (276526.849(t - 136986.3 t^2))$$

$$\text{para } t < 0.00000365 \text{ s}$$

$$I_{\text{total}}(t) / 10^{-5} \text{ A} = 37.991 (t - 18.82 t^2) + 0.5$$

$$\text{para } 0.00000365 \text{ s} < t < 0.0266 \text{ s}$$

$$I_{\text{total}}(t) / 10^{-5} \text{ A} = 1$$

$$\text{para } t > 0.0266 \text{ s}$$

$$\text{Unidades : } [I] = \text{A} , \quad [t] = \text{s}$$

$$t_{\text{colección de iones positivos}} = 0.0266 \text{ s} (26.6 \text{ ms})$$

$$t_{\text{colección electrones}} = 0.00000365 \text{ s} (3.65 \mu\text{s})$$

Corriente de iones positivos, flanco descendente del pulso.

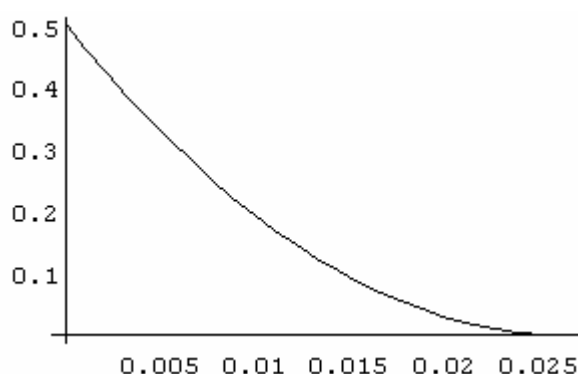
Expresión de la corriente de iones positivos en el flanco descendente del pulso de corriente (según ref 1, pág 47) :

$$\begin{aligned} I^+(t) &= eN (0.5 - (w^+/h) t + 0.5(w^+/h)^2 t^2) & \text{para } t < h/w^+ \\ I^+(t) &= 0 & \text{para } t > h/w^+ \end{aligned}$$

Siendo los parámetros los mismos del párrafo precedente dedicado al flanco ascendente, excepto que, para el flanco descendente la abscisa al origen ($t=0$) está al finalizar el plateau de estado estacionario.

Gráfico y expresión de la corriente de iones positivos (valor relativo, referido a $I_0 = 10^{-5} \text{ A}$) en el intervalo $\{0, 0.0266 \text{ s}\}$.

Plot[1.009(0.5-37.64t+708.3848*t^2),{t,0,0.0266}]



$$I_{\text{ion}^+}(t) / 10^{-5} \text{ A} = 1.009(0.5 - 37.64 t + 708.3848 t^2) \quad \text{para } t < 0.0266 \text{ s}$$

$$I_{\text{ion}^+}(t) / 10^{-5} \text{ A} = 0 \quad \text{para } t > 0.0266 \text{ s}$$

Unidades : $[I] = \text{A}$, $[t] = \text{s}$

$t_{\text{colección de iones}^+} = 0.0266 \text{ s} (26.6 \text{ ms})$

Corriente de electrones, flanco descendente del pulso.

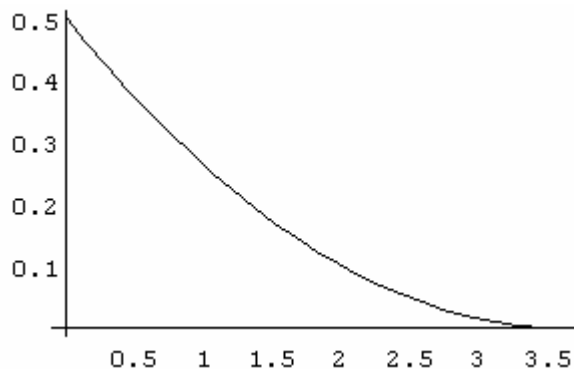
Expresión de la corriente de electrones en el flanco descendente del pulso de corriente (según ref 1, pág 47):

$$\begin{aligned} I^-(t) &= eN(0.5 - (w^-/h)t + 0.5(w^-/h)^2 t^2) & \text{para } t < h/w^- \\ I^-(t) &= 0 & \text{para } t > h/w^- \end{aligned}$$

Siendo los parámetros los mismos del párrafo precedente dedicado al flanco ascendente.

Gráfico y expresión de la corriente de electrones (valor relativo, referido a $I_0 = 10^{-5} \text{ A}$) en el intervalo $\{0, 3.65 \mu\text{s}\}$.

Plot[1.009(0.5-273972.6*10⁻⁶*t+3.753*10⁻²*t²),{t,0,3.65}]



$$I \text{ electrones}(t) / 10^{-5} \text{ A} = 1.009(0.5 - 273972.6 \times 10^{-6} t + 3.753 \times 10^{-2} t^2) \quad \text{Para } t < 3.65 \mu\text{s}$$

$$I \text{ electrones}(t) / 10^{-5} \text{ A} = 0 \quad \text{para } t > 3.65 \mu\text{s}$$

Unidades : $[I] = \text{A}$, $[t] = \mu\text{s}$

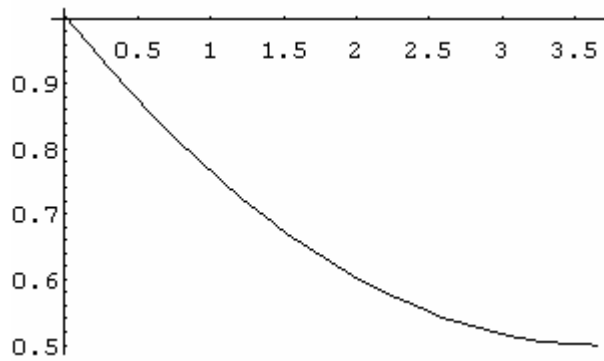
t colección de electrones = $3.65 \mu\text{s}$

Corriente Total, flanco descendente del pulso.

$I_{\text{total}} = I_{\text{iones positivos}} + I_{\text{electrones}}$

Gráfico y expresión de la corriente total (valor relativo, referido a $I_0 = 10^{-5} \text{ A}$) en el intervalo $\{0, 3.65 \mu\text{s}\}$.

Plot[(1.009(0.5-273972.6*10⁻⁶*t+3.753*10⁻²*t²)+0.5),{t,0,3.65}]



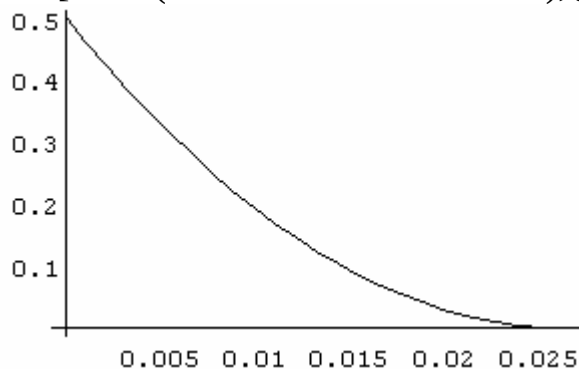
$$I_{\text{total}}(t) / 10^{-5} \sim 1.009(0.5 - 273972.6 \times 10^{-6} t + 3.753 \times 10^{-2} t^2) + 0.5$$

para $t < 3.65 \mu s$

Unidades : [I] = A , [t] = μs

Gráfico y expresión de la corriente total (valor relativo, referido a $I_0 = 10^{-5} A$) en el intervalo {0.00000365 s, 0.0266 s}.

Plot[1.009(0.5-37.64t+708.3848*t^2),{t,0,0.0266}]



$$I_{\text{total}}(t) / 10^{-5} A = I_{\text{ion}+}(t) / 10^{-5} = 1.009(0.5 - 37.64 t + 708.3848 t^2)$$

para $0.00000365 s < t < 0.0266 s$

$$I_{\text{total}}(t) / 10^{-5} A = 0 \quad \text{para } t > 0.0266 s$$

Unidades : [I] = A , [t] = s

t colección de iones+ = 0.0266 s (26.6 ms)

t colección electrones = 0.00000365 s (3.65 μs)

Bibliografía de referencia consultada:

- 1) Ionization chambers and counters – B.B. Rossi & H.H. Staub
- 2) Design of an improved ion chamber for the SNS – R.L. Witkover & D. Gassner
- 3) Nuclear radiation detection – W.J. Price
- 4) Radiation detection and measurement – G.F. Knoll
- 5) Nuclear radiation physics – R.E. Lapp & H.L. Andrews
- 6) Radiation Dosimetry, Vol II, J.W. Boag, F. Attix et al, Academic Press

b) Determinación experimental de los tiempos de subida y bajada t_R y t_F (rise time y fall time).

Se utilizó un equipo de Rayos-X pulsado (marca DINAN, modelo PAF-100, s/n 177) con los siguientes parámetros:

Voltajes de aceleración: 70, 80 y 100 KV

Corriente de tubo: 200 mA

Duración del pulso: 100 ms y 2 ms

Ver fotografías del equipo e informe de calificación del fabricante, adjuntos.

Irradiando la cámara de ionización con dichos pulsos, se obtuvieron los siguientes pulsos de tensión en la pantalla del osciloscopio Tektronix TDS-200 conectado a la cámara (ver oscilogramas adjuntos):

- Pulso de Rx de 100 ms de duración (70 KV, 200mA, polarización cámara = 100V): Altura del pulso de tensión = 9V, $t_R = 30$ ms, $t_{F20\%} = 10$ ms, $t_F = 45$ ms, Duración del estado estacionario de 9V = 80 ms.
- Pulso de Rx de 2 ms de duración (80KV, 200 mA, polarización cámara = 100V): Altura del pulso de tensión = 5.6 V, $t_R = 2$ ms, $t_{F20\%} = 1$ ms, $t_F(\text{total}) > 40$ ms, No se llega al estado estacionario.
- Pulso de Rx de 2 ms de duración (100KV, 200 mA, polarización cámara = 100V): Altura del pulso de tensión = 19 V, $t_R = 2$ ms, $t_{F20\%} = 1$ ms, $t_F(\text{total}) > 40$ ms No se llega al estado estacionario.

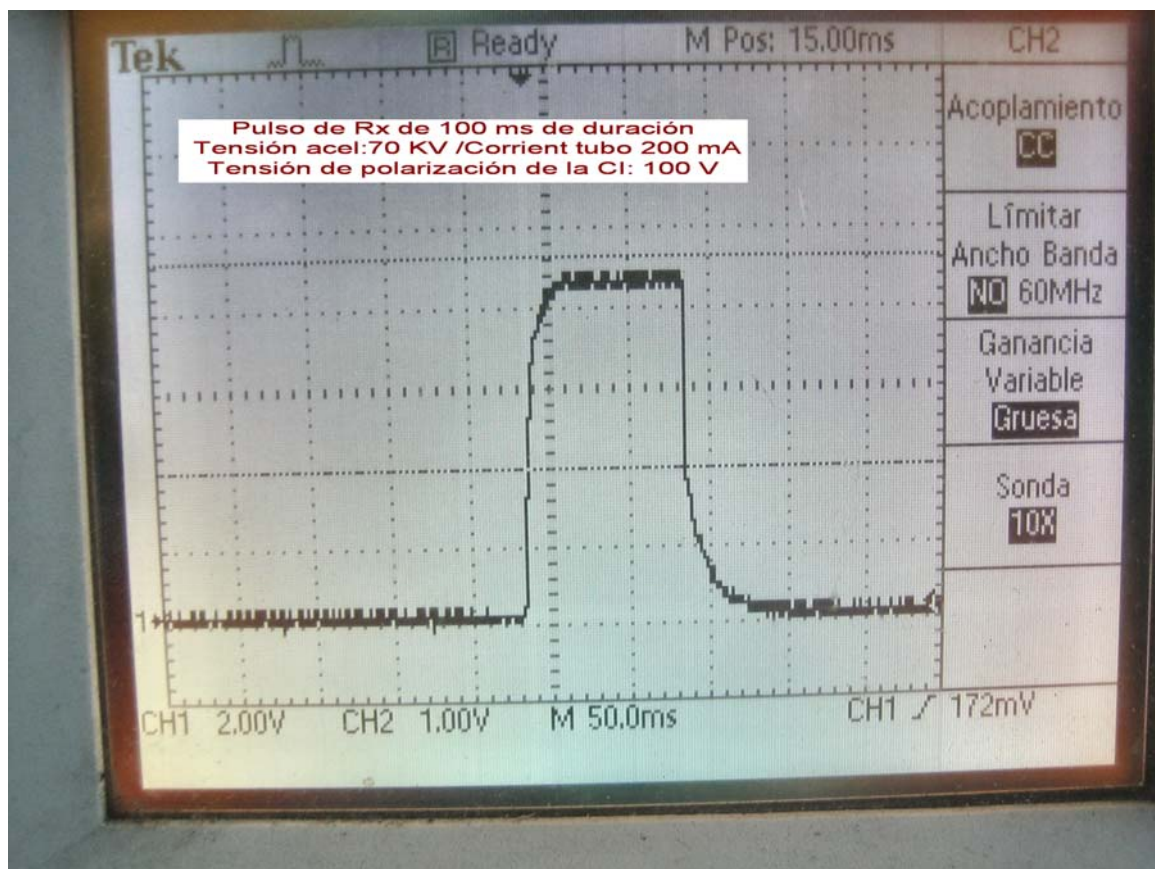
Nota: $t_{F20\%}$ es el tiempo de bajada al 20% del valor pico.

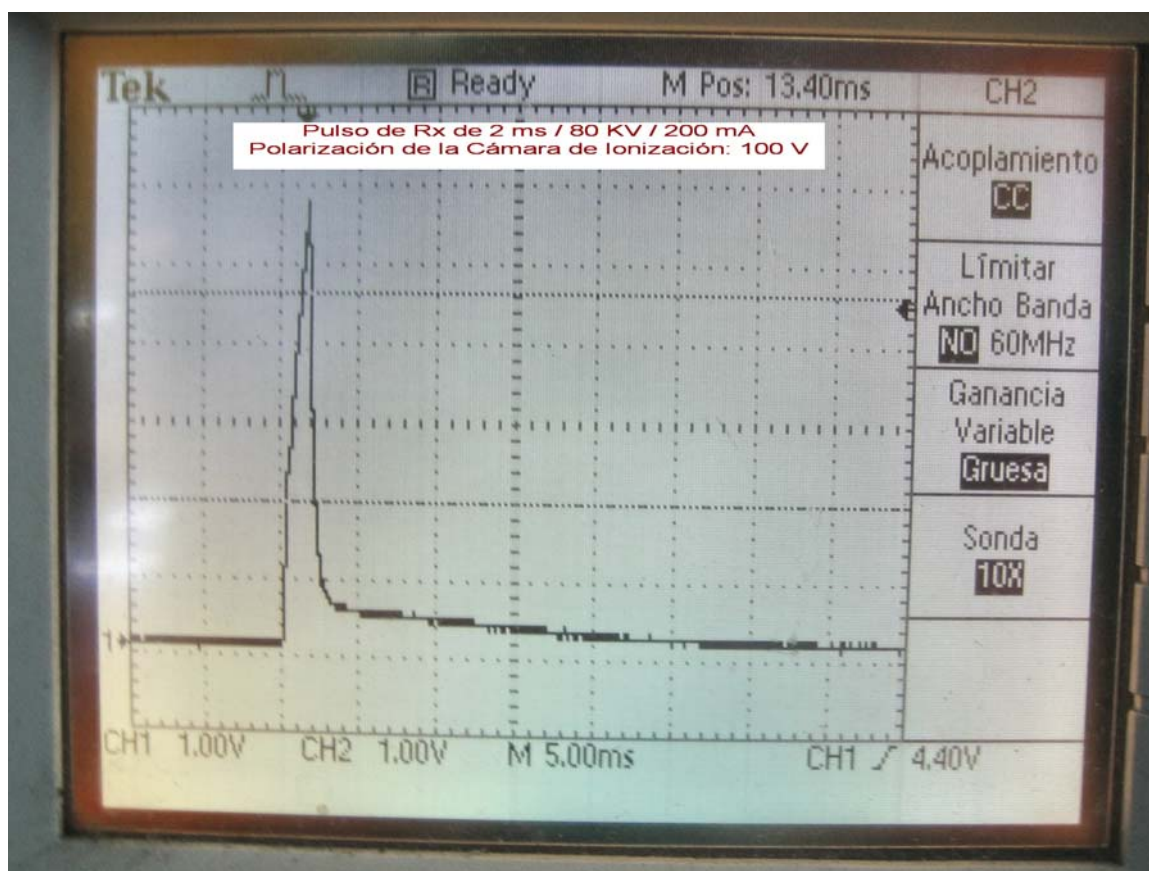
Calibración de las señales.

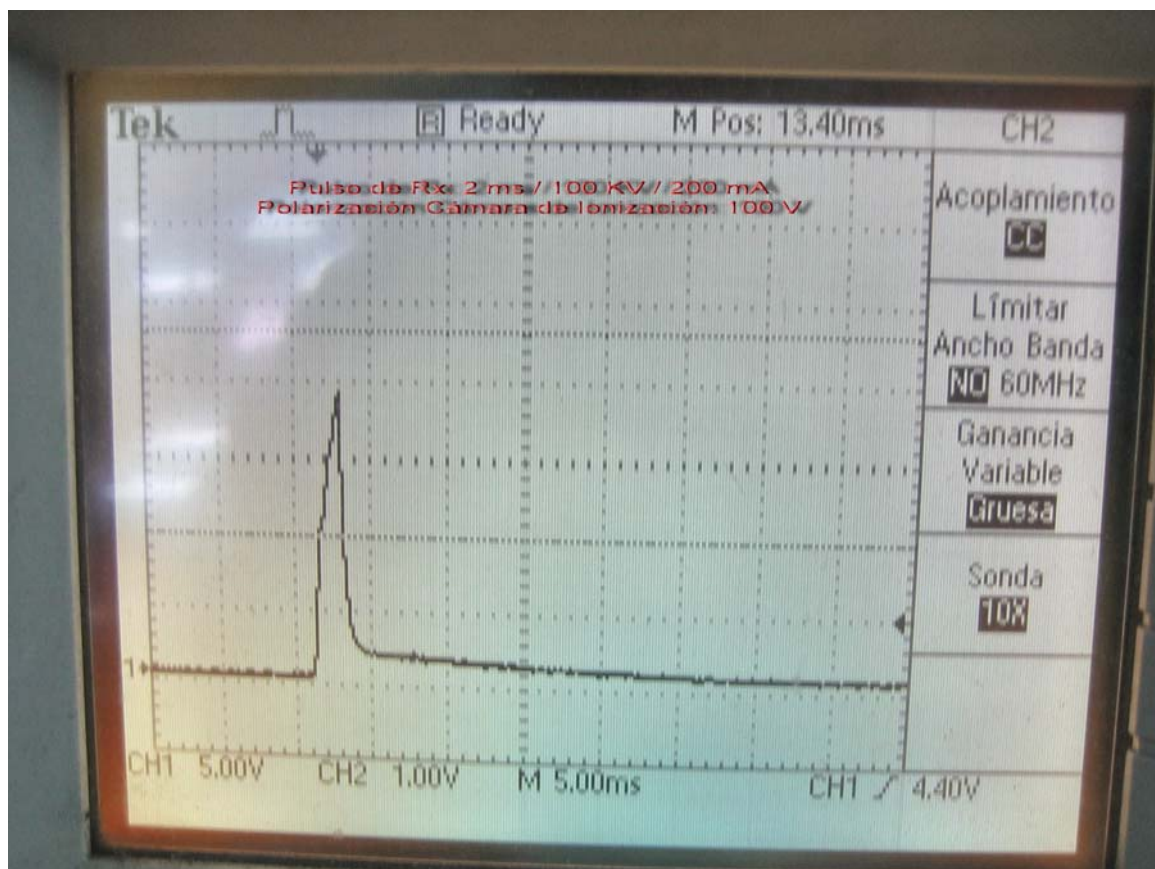
Se levantó la curva de calibración del osciloscopio Tektronix TDS-200 alimentado con escalones de corriente continua provistos por la fuente de corriente Keithley 261 (ver diagrama adjunto).

Se observa que a partir de 10^{-7} A, la tensión de salida aumenta linealmente 4V/década, correspondiendo ~ 9 V para 10^{-5} A.

Asimismo observando el pulso de tensión producido por el pulso de Rayos-X (70KV, 200mA) de 100ms de duración, se llega a un estado estacionario de valor constante de 9V, luego inferimos que la corriente de la cámara en este caso es de 10^{-5} A.



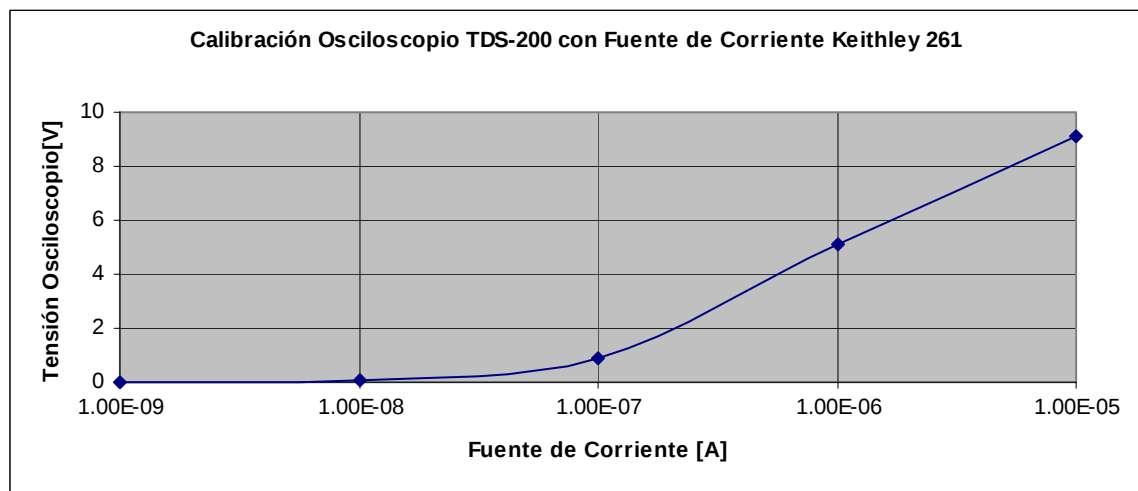




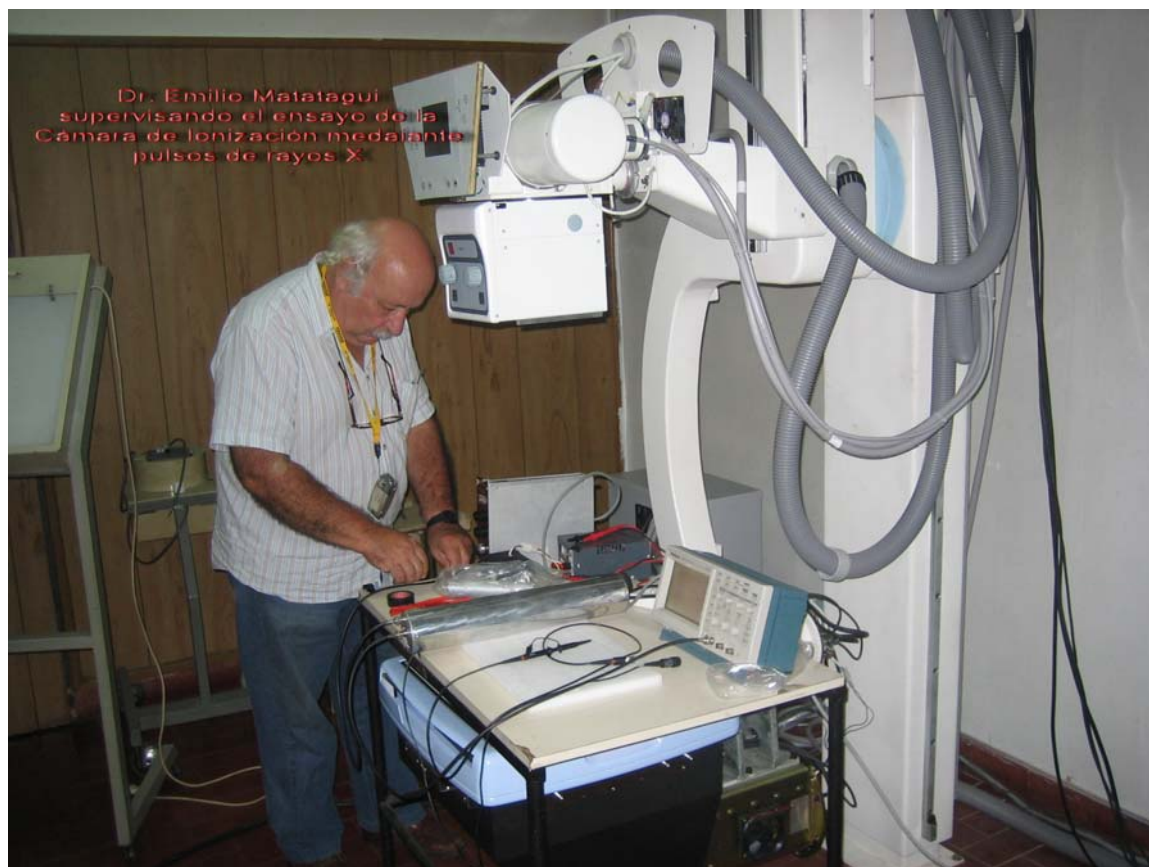
Calibración del Osciloscopio Tektronix TDS-200 con la fuente de corriente Keithley 261

I [A]	Keithley 261	1.00E-9	1.00E-8	1.00E-7	1.00E-6	1.00E-5
Tens[V]	TDS-2002B *	0.012	0.105	0.900	5.100	9.100

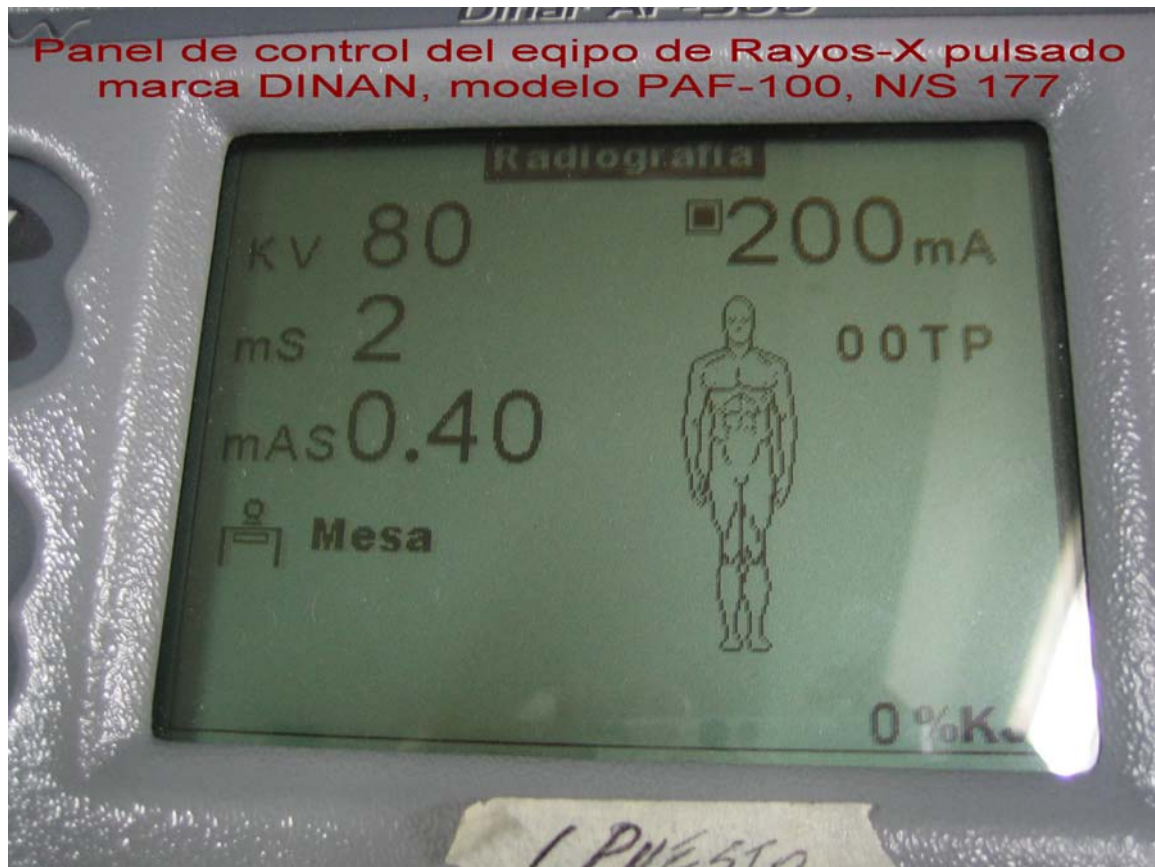
* Tektronix







Panel de control del equipo de Rayos-X pulsado
marca DINAN, modelo PAF-100, N/S 177



Análisis de los tiempos de respuesta:

Observando el pulso de Rx de 100 ms de duración y sabiendo que la sensibilidad de la cámara es de 5.27×10^{-9} A/mGy/min, para la corriente de 10^{-5} A tendremos una tasa de dosis en aire de 1.9 Gy/min.

La tasa de exposición correspondiente es de 12200 R/h aproximadamente. Se llega a este valor del estado estacionario (casi 10 veces superior al valor de disparo requerido por la norma ANSI 8.3-97 de 0.2 Gy/min) en algo menos de 30 ms.

Por otra parte, se alcanza el valor de disparo requerido ($0.2 \text{ Gy/min} \Leftrightarrow 10^{-6} \text{ A} \Leftrightarrow 5 \text{ V}$) en alrededor de 2 ms.

Recordemos que la electrónica del equipo introduce un retardo de 24 ms, llevando el retardo total a alrededor de 26 ms. En todo caso, aun duplicando los 2 ms correspondientes a la cámara de ionización, el retardo total es menor que 30 ms, mientras que el retardo máximo tolerado por la norma ANSI 8.3-97 es de 500 ms. Por lo tanto el tiempo de respuesta total del equipo ante un aumento brusco de tasa de dosis cumple ampliamente con lo requerido por la norma.

Asimismo, analizando la respuesta al pulso de Rx de 2 ms producido con 70KV, 200mA, tenemos: Observando el flanco ascendente, se llega al valor máximo de 5.6 V en 2 ms aproximadamente, sin alcanzar el estado estacionario; observando el flanco descendente, se tiene una caída de 5 V en 1 ms, se deduce de ello que el milisegundo extra que se tiene en el flanco ascendente, es introducido por el proceso de producción de los Rx (rampa de subida del equipo de Rx).

Por otra parte, el valor de disparo de 0.2 Gy/min requerido por la norma ANSI 8.3-97 se corresponde con una corriente de cámara de $\sim 10^{-6}$ A, que a su vez, se corresponde con un ΔV de ~ 5 V según la curva de calibración. Se concluye por lo tanto, que el requerimiento de disparo por un evento de 1 ms de duración es satisfecho también.

Esta afirmación se corrobora analizando un pulso de Rx de 2 ms producido con 100 KV, 200 mA, observando el flanco ascendente, se tiene un ΔV de 10 V en ~ 0.5 ms, con lo cual se excede el requerimiento de la norma ANSI para el caso del “accidente mínimo de interés”.

c) Comparativa de valores calculados y medidos:

Se presentan a continuación, tres hojas de cálculo con los valores tabulados y graficados de los pulsos de corriente de cámara de ionización calculados y medidos.

c₁) Respuesta dinámica de la cámara de ionización a un pulso de radiación de 100 ms de duración - Flanco ascendente, valores calculados vs valores medidos

t(ms)	I _{iones+} / 10 ⁻⁵ A	I _{total} / 10 ⁻⁵ A	I _{total} / 10 ⁻⁵ A	Observaciones
	Calculado	Calculado	Medido	
0	0	0	0	
0.0037	0.00014	0.50014	-	t _{colección electrones}
1	0.04	0.54	-	
5	0.17	0.67	0.58	
10	0.31	0.81	0.82	
15	0.41	0.91	0.88	
20	0.47	0.97	0.94	
26.6	0.5	1	0.98	t _{colección iones+}
30	0.5	1	1	

$$I_{\text{iones}+} / 10^{-5} = 37.991 (t - 18.82 \text{ t}^2) \quad \text{para } t < 0.0266 \text{ s}$$

$$I_{\text{iones}+} / 10^{-5} = 0.5 \quad \text{para } t > 0.0266 \text{ s}$$

$$I_{\text{electrones}} / 10^{-5} = 276526.849 (t - 136948.3 \text{ t}^2) \quad \text{para } t < 0.00000365 \text{ s}$$

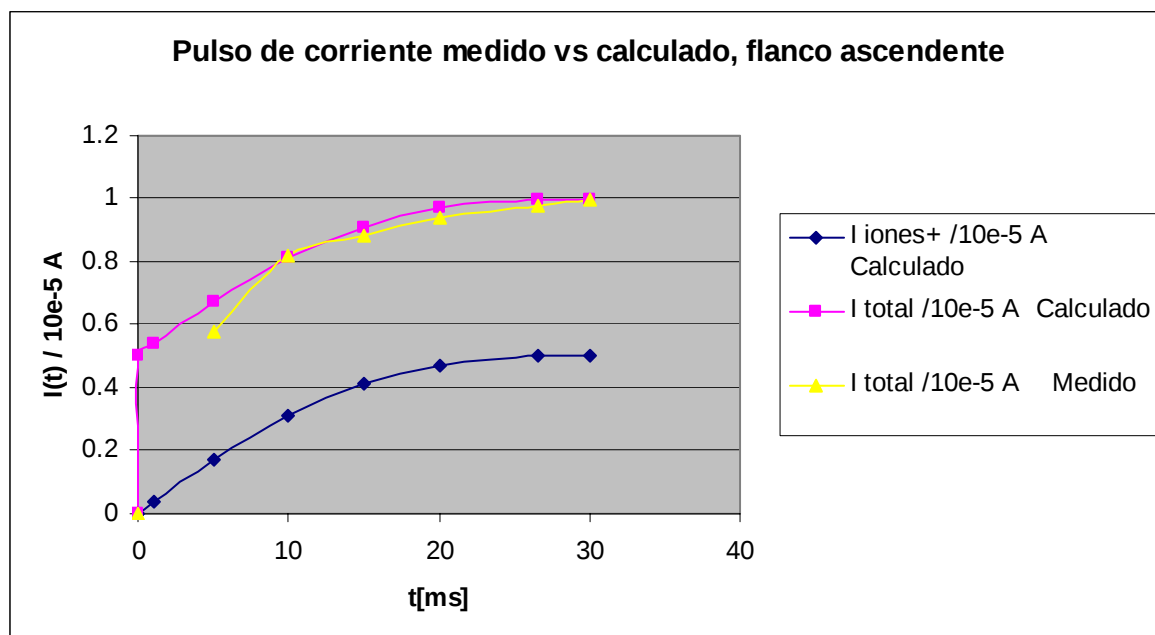
$$I_{\text{electrones}} / 10^{-5} = 0.5 \quad \text{para } t > 0.00000365 \text{ s}$$

$$I_{\text{total}} = I_{\text{iones positivos}} + I_{\text{electrones}}$$

Tiempo de colección de iones = 0.0266 s (26.6 ms)

Tiempo de colección de electrones = 0.00000365 s (3.65 us)

Unidades: [I] = A , [t] = s



c₂) Respuesta dinámica de la cámara de ionización a un pulso de radiación de 100 ms de duración
Flanco descendente, valores calculados vs valores medidos

t(ms)	I _{iones+} / 10 ⁻⁵ A	I _{total} / 10 ⁻⁵ A	I _{total} / 10 ⁻⁵ A	Observaciones
	Calculado	Calculado	Medido	
0	0.5	1	-	
0.0037	0.5	0.5	-	t _{colección electrones}
1	0.47	0.47	-	
5	0.33	0.33	0.36	
10	0.2	0.2	0.25	
15	0.1	0.1	0.09	
20	0.03	0.03	0.06	
26.6	0	0	0.03	t _{colección iones+}
30	0	0	0.02	

$$I_{\text{iones}+} / 10^{-5} = 1.009 (0.5 - 37.64 t + 708.3848 t^2) \quad \text{para } t < 0.0266 \text{ s}$$

$$I_{\text{iones}+} / 10^{-5} = 0 \quad \text{para } t > 0.0266 \text{ s}$$

$$I_{\text{electrones}} / 10E-5 = 1.009 (0.5 - 273972.6 t + 3.753 \times 10^{10} t^2) \quad \text{para } t < 0.00000365 \text{ s}$$

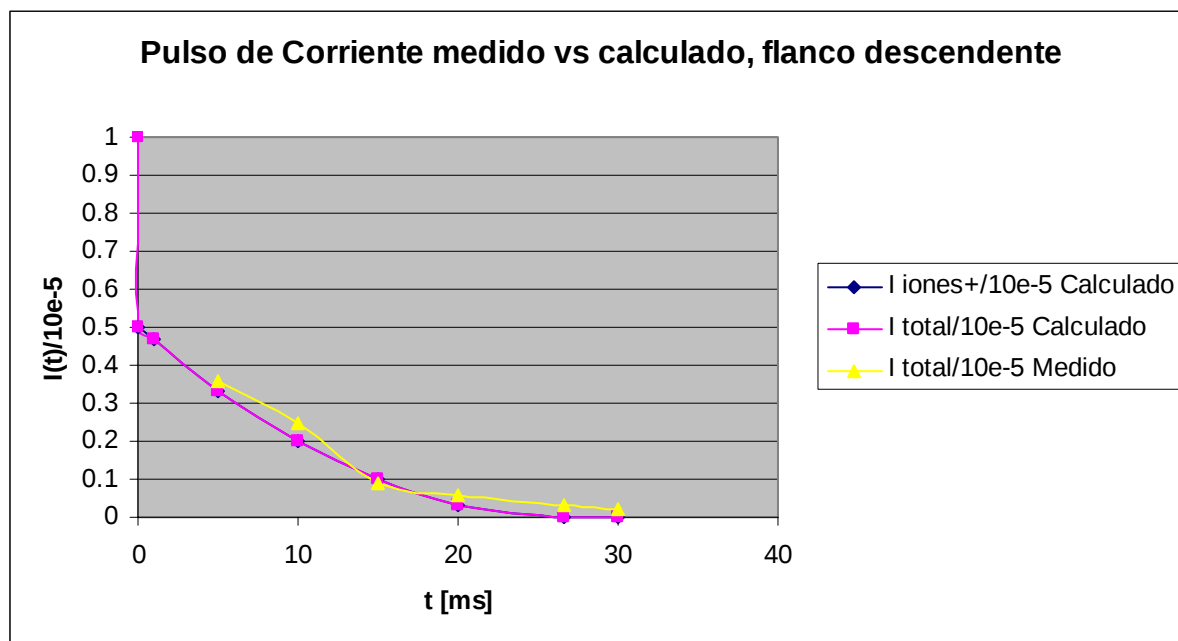
$$I_{\text{electrones}} / 10^{-5} = 0.5 \quad \text{para } t > 0.00000365 \text{ s}$$

$$I_{\text{total}} = I_{\text{iones positivos}} + I_{\text{electrones}}$$

Tiempo de colección de iones = 0.0266 s (26.6 ms)

Tiempo de colección de electrones = 0.00000365 s (3.65 us)

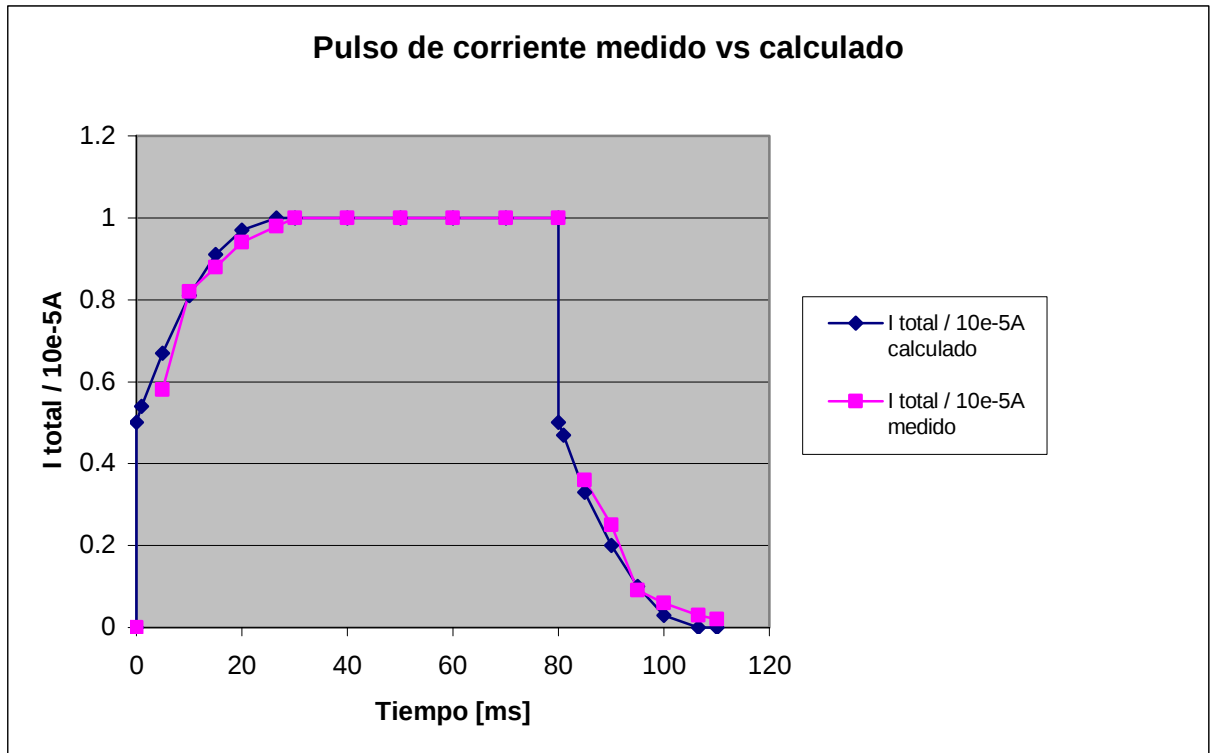
Unidades: [I] = A , [t] = s



c3) Respuesta dinámica de la cámara de ionización a un pulso de radiación de 100 ms de duración.

Pulso total, corriente total, valores calculados vs valores medidos.

t(ms)	$I_{\text{total}} / 10^{-5} \text{ A}$	$I_{\text{total}} / 10^{-5} \text{ A}$	Observaciones
	Calculado	Medido	
0	0	0	
0.0037	0.50014	-	t colección electrones
1	0.54	-	
5	0.67	0.58	
10	0.81	0.82	
15	0.91	0.88	
20	0.97	0.94	
26.6	1	0.98	t colección iones+
30	1	1	
40	1	1	
50	1	1	
60	1	1	
70	1	1	
80	1	1	
80.00365	0.5	-	t colección electrones
81	0.47	-	
85	0.33	0.36	
90	0.2	0.25	
95	0.1	0.09	
100	0.03	0.06	
106.6	0	0.03	t colección iones+
110	0	0.02	



**E. COMPILACIÓN DE LA BIBLIOGRAFÍA DISPONIBLE
EN EL MUNDO SOBRE EL TEMA**

COMPILACIÓN DE BIBLIOGRAFÍA SOBRE ACCIDENTES DE CRITICIDAD

-1-

Study on the Detection of the Criticality Accident Alarm Systems and Area Monitors

Yoshio SHIMIZU*, Tsutomu OKA

Tokai works, Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC), Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1194, JAPAN

-2-

Conservatism in SRS Criticality Alarm System 12 Rad Zone Calculations – How Much is Enough?

K. R. Yates, R. M. Mobley, S. D. Kahook, and P. Paul
Westinghouse Savannah River Company
Aiken, SC 29808

D. Biswas and T. A. Reilly
Westinghouse Safety Management Solutions
Aiken, SC 29803

This document was prepared in conjunction with work accomplished under Contract No. DE-AC09-96SR18500 with the U.S. Department of Energy.

-3-

TESTING OF THE Y-12 PLANT CRITICALITY ACCIDENT ALARM SYSTEM DETECTORS AT THE SANDIA PULSED REACTOR FACILITY

J. S. Baker, J. A. Smith

Nuclear Criticality Safety Department, Oak Ridge Y-12 Plant

D. T. Berry, Sandia Pulsed Reactor Facility, Sandia National Laboratories

January 6, 1994

-4-

CIDAS®Mk X

Criticality Incident Detection and Alarm System

BIL Solutions Ltd., Hinton House, Risley, Warrington WA3 6AS UK

-5-

[Nuclear Plant Journal Editorial Archive](#)



Criticality Incident Detection & Alarm System

Created On: 03/03/2000 at 01:10 PM

Category: January-February 1999, Papers

By Thomas S. Nobes, BNFL.

-6-

EDAC21 The New Criticality Detection System

Authors: H. TOUBON¹, V. MASSE², D. MIJUN², J.P. LEMAITRE¹

**¹ AREVA/CANBERRA, 1 rue des Hérons,
78182 St Quentin-en-Yvelines Cedex, France**

htoubon@canberra.com

² CEA SACLAY

DEN/DANS/DM2S/SERMA/CP2C

91191 Gif-sur-Yvette, France

-7-

EDAC 21

System for detection, alarm and recording of criticality accidents

CANBERRA EURISYS S.A. CANBERRA INDUSTRIES INC.

4 av. des Frênes - 78067 St Quentin Yvelines Cedex - France 800 Research Parkway - MERIDEN CT06450 - USA

Tel.: 33 1 39 48 57 70 - Fax: 33 1 39 48 57 80 Tel.: (800) 243-3955 (Sales US) - (203) 238-2351 (Outside US)

www.canberraeurisys.com Fax: (203) 235-1347 - www.canberra.com

-8-

Fission Yield and Criticality Excursion Code

**D. Biswas and T. A. Reilly
Westinghouse Safety Management Solutions LLC
Aiken, SC 29803**

and

**R. E. Wilson
Department of Energy – RFFO
Aiken, SC 29808**

-9-

Criticality Alarm System NFA-01.05

REGTRON KFKI, Instrumentation and Measuring Co. Ltd.

H-1525, Budapest, PO Box 49, Hungary

-10-

RADIATION TOLERANCE ASSESSMENT OF CIDAS[®] MkX
CRITICALITY INCIDENT DETECTION & ALARM
SYSTEM

Stephen J. A. Bellamy

BIL Solutions

Thomson House

Birchwood Science Park, Risley,

Warrington, Cheshire WA3 6AT

United Kingdom

steve.ja.bellamy@bnfl.com

Andrew Cooper

British Nuclear Group

Hinton House, Risley

Warrington WA3 6AS

United Kingdom

Andrew.j.cooper@bnfl.com

-11-

**To Stay or to Go? Balancing the Risk of Reprocessing Plant Control Room
Evacuation Following a Criticality Alarm**

Suzanne LOVE^{1*}, David McCRINDLE¹, Neil HARRIS¹, Justin HAWORTH²

¹British Nuclear Fuels plc, Safety and Environmental Risk Management, Research and Technology,
Sellafield, Seascale, Cumbria CA20 1PG, United Kingdom

²British Nuclear Fuels plc, Criticality Dose Shielding Assessment, Research and Technology,
Risley, Warrington, Cheshire, WA3 6AS, United Kingdom

-12-

Integrating Criticality Safety into the Resurgence of Nuclear Power

Knoxville, Tennessee, September 19–22, 2005, on CD-ROM, American Nuclear Society, LaGrange Park, IL (2005)

SPEED OF RESPONSE OF SOME CRITICALITY DETECTORS

John McMahan*

Savannah River Site

Aiken, SC 29808

Johnwnim.mcmahan@srs.gov

-13-

CRITICALITY INCIDENT DETECTION

GEOFF DRUCE, UK.

-14-

**DRDC Ottawa Participation in the SILENE
Accident Dosimetry Intercomparison
Exercise**

June 10-21, 2002

L. Prud'homme-Lalonde, T. Cousins, D. Wilkinson, B. Ford,
and T. Jones

Defence R&D Canada - Ottawa

TECHNICAL MEMORANDUM, DRDC Ottawa TM 2002-136

November 2002

-15-

Slide Rule for Rapid Response Estimation of Radiological Dose

from Criticality Accidents

C. M. Hopper, B. L. Broadhead, R. L. Childs, and C. V. Parks

Oak Ridge National Laboratory,*

P. O. Box 2008, Oak Ridge, TN 37831-6370

-16-

Criticality Accident Studies and Methodology

Implemented at the CEA

Francis BARBRY¹, Patrick FOUILLAUD¹, Ludovic REVERDY² and Dominique MIJUN²

¹Commissariat à l'Energie Atomique, CE Valduc, 21120 Is-sur-Tille, France

²Commissariat à l'Energie Atomique, CE Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France

-17-

IAEA-CN-123/03/O/04

NUCLEAR KNOWLEDGE MANAGEMENT EXPERIENCE OF THE INTERNATIONAL CRITICALITY SAFETY BENCHMARK EVALUATION PROJECT

J. B. Briggs

Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, U.S.A

A. Nouri

OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France

V. A. F. Dean

Under subcontract to the Idaho National Engineering and Environmental Laboratory
Elgin, Arizona

United States of America

Email address of main author: bbb@inel.gov

-18-

Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 39, No. 6, p. 597-602 (June 2002)

Evaluation of Power History during Power Burst Experiments in TRACY by Combination of Gamma-Ray and Thermal Neutron Detectors

Hiroshi YANAGISAWA and Akio OHNO

Japan Atomic Energy Research Institute, Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195

-19-

International intercomparison of criticality accident dosimetry systems - SILENE 2002

R. Médioni¹, B. Asselineau³, I. Clairand¹, L. Roy¹, B. Verrey², F. Trompieri¹, C. Itié¹, C. Texier¹,
H. Muller³, G. Pelcot³, X. Jacquet², J.L. Pochat³, V. Buard¹, M. Delbos¹,
E. Gregoire¹, P. Voisin¹ and JF. Bottollier-Depois¹.

¹Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, 92262 Fontenay-aux-Roses Cedex, France

²Commissariat à l'Energie Atomique, centre de Valduc, 21120 Is-sur-Tille, France

³Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, 13115 Saint-Paul-Lez-Durance, France

-20-

P/283 United States of America

Reactor excursion behavior *

By W. E. Nyer,** G. O. Bright ** and R. J. McWhorter ***

-21-

Nuclear Science ISBN 92-64-02333-X

Reference Values for Nuclear Criticality Safety

Homogeneous and Uniform UO₂, “UNH”, PuO₂ and “PuNH”, Moderated and Reflected by H₂O

A demonstration study by an Expert Group of the Working Party on Nuclear Criticality Safety for the OECD/NEA Nuclear Science Committee

Final evaluation and report prepared by

D. Mennerdahl (EMS, Sweden), Leading participants

-22-

GN470072 - NUCLEAR CRITICALITY SAFETY

Subject Matter Expert: [Norman Schwerts](#); CA Counterpart: N/A

Contributors: [Ronald Knief](#), [Jeff Philbin](#), and [David C. Losey](#)

GN470072, Issue E, Revision Date: [March 26, 2007](#)

-23-

RADIOLOGICAL CONSEQUENCE OF A CRITICALITY ACCIDENT

Pierre Lecorche, Commissariat à l'Energie Atomique

Direction de la Protection et de la Sécurité Radiologiques

Service d'Études de Criticité and Robert L. Seale University of Arizona

-24-

OCDE/NEA

EXPERT GROUP ON CRITICALITY ACCIDENT ANALYSIS

SILENE PULSED EXPERIMENTS

SILENE-HEU-SOL-STEP, S1-300 / S2-300 / S3-300

-25-

International Accident Dosimetry

Intercomparison Exercise at Silene

(INTCOMPSILENE)

Final report (summary)

Contract No: FIRI-CT-2001-40156

Work performed as part of the European Atomic Energy Community's R&T specific programme Nuclear Energy, key action Nuclear Fission Safety, 1998-2002

Area: Radiation Protection

Directorate-General for Research

2003 Euratom, II

Project coordinator

Jean-François Bottollier-Depois, CEA (FR)

Project partners

B. Verrey, CEA (FR), T. Lazo, OECD (FR)

+ 60 participants from 29 countries

-26-

Report SRSC no 223- September 1994

SILENE Reactor

Results of selected typical experiment

Francis BARBRY

-27-

IAEA-CN-82/26

CRITICALITY ACCIDENT STUDIES AND RESEARCH PERFORMED IN THE VALDUC CRITICALITY LABORATORY, FRANCE

BARBRY, F., FOUILLAUD, P.

Service de Recherche en Sécurité et Criticité

Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (I.P.S.N.)
Département de Prévention et D'étude des Accidents
CEA Valduc – 21120 Is-sur-Tille, France
Fax: +33380235222; Email: francis.barbry@cea.fr

-28-

A Review of Criticality Accidents 2000 Revision

United States Authors: Thomas P. McLaughlin, Shean P. Monahan, Norman L. Pruvost*

Russian Federation Authors: Vladimir V. Frolov**, Boris G. Ryazanov***, Victor I. Sviridov†

LA-13638, Issued: May 2000

Los Alamos NATIONAL LABORATORY

Los Alamos, New Mexico 87545

3. CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

1) Estado de los equipos:

Hay en este momento dos prototipos completos, uno de los cuales, provisto de detectores de rayos gamma, está totalmente funcional en cuanto al propósito principal Detector–Alarma, faltando poner en funcionamiento la interfase con PC para adquisición de datos. El otro equipo necesita reparación del módulo digital y asimismo necesita ser provisto de detectores de neutrones.

2) Resumen del trabajo realizado:

- a) Reparación de fuentes de poder y módulo digital.
- b) Caracterización de las siguientes funcionalidades:
 - Respuesta de transferencia de los amplificadores logarítmicos del módulo analógico (V_{salida} vs I_{entrada})
 - Verificación de los niveles de disparo de los módulos analógico y digital, comprobándose que el equipo (con el nivel de disparo implementado actualmente), dispara con 1 nA que se corresponde con 1.22 R/h. [el nivel de disparo es modificable].
 - Se ha medido el retardo introducido por la electrónica, siendo ese de 24 ms.
 - Se ha calibrado una cámara de ionización, realizando los plateaus, determinando que la sensibilidad es de 0.82 nA/R/h.
 - Se ha formulado la expresión matemática de la respuesta de la cámara de ionización en régimen transitorio.
 - Se ha ensayado una cámara de ionización con un equipo de Rayos-X pulsado, comprobándose que la respuesta se ajusta al modelo matemático postulado y que el tiempo de retardo máximo introducido por el detector (CI) es de ~ 2 ms. Como consecuencia surge que el retardo total del equipo (CI + electrónica) es de ~ 26 ms. Asimismo se ha determinado en ese ensayo que el nivel de disparo requerido por la norma ANSI 8.3 (0.2 Gy/m) se alcanza en ~ 1 ms.

3) Grado de cumplimiento con las normas:

- a) En base a lo descrito en el apartado 2) precedente, se puede afirmar que el equipo cumple con creces los requerimientos de las normas ANSI, ISO e IEC en cuanto al retardo y nivel de disparo.
- b) No se han ensayado los siguientes requerimientos:
 - Resistencia a una sobrecarga de dosis de radiación de 1000 Gy/h.
 - Resistencia a la vibración (1 g en cualquier dirección).
 - Confiabilidad: aún no se ha determinado la MTBF. En efecto, con relación a la confiabilidad, solo podemos afirmar que el equipo funciona con una lógica de votación de 2 de 3 y si un canal falla, esa será una falla segura (sin riesgo).
 - Características acústicas de la alarma sonora.
 - Tiempo máximo de funcionamiento de la UPS en modos activo y pasivo.
 - Caracterización de la cámara de ionización en el espectro de energía completo (se ha determinado el plateau con fuente de Co-60 y se han hecho ensayos cualitativos Am-241 y Rx).

4) Trabajos futuros a realizar:

- a) Ensayo del equipo en condiciones simuladas de accidente.
- b) Puesta en funcionamiento del segundo equipo dotado de detectores de neutrones (el equipo #1 funciona en base a detectores de rayos gamma).
- c) Verificación del grado de cumplimiento de los requerimientos ANSI, ISO e IEC no investigados.

Agradecimientos

Agradezco a las siguientes personas que han ayudado y colaborado en la concreción de esta Tesina:

- 1) Emilio Matatagui, tutor de la Tesina, por sus consejos valiosos y apoyo permanente.
- 2) José Luis Regueiro por brindar las instalaciones de SOLYDES para los trabajos de laboratorio.
- 3) Marcelo Miller y Silvia Thorp por su colaboración con instrumental de laboratorio.
- 4) Margarita Saravi y Gustavo Montaña por brindar la bomba de cobalto para la calibración de los detectores.
- 5) Diego McMicking y la empresa Rayos-X DINAN por brindar el equipo de Rayos X pulsado para la determinación del tiempo de respuesta de los detectores.
- 6) Ana María Lerner y Adrián Daoud por su apoyo permanente durante todo el curso y la duración de la Tesina.
- 7) Silvia Makler por su colaboración valiosa con material bibliográfico.

Finalmente quiero mencionar a mi familia que me apoyó en todo momento para poder hacer este postgrado tan importante para mí. En especial a mi hijo Julio que ayudó con las fotografías y dibujos que están en la tesina y a mi esposa que colaboró en la impresión del documento.