

## Capítulo 3

# Diagnóstico de intercambio de carga

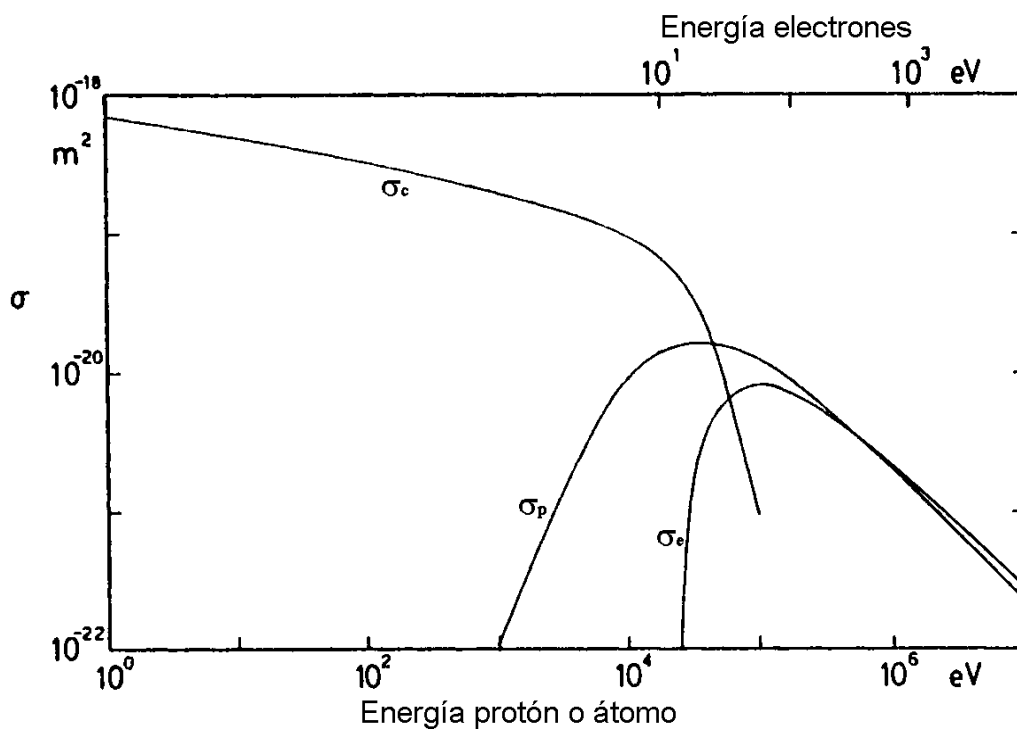
### 3.- Diagnóstico de intercambio de carga

#### 3.1.- Principio físico

Dentro de un plasma, a pesar de ser un gas ionizado, se pueden encontrar átomos neutros. Estos neutros provienen principalmente de impurezas de la pared, de la inyección de combustible y de neutros para el calentamiento adicional. De estas tres fuentes de neutros, las dos primeras proporcionan neutros de baja energía, del orden del electronvoltio.

Los neutros no interactúan con los campos magnéticos, con lo que pueden entrar en el plasma y sólo se ven afectados por las colisiones. Estas colisiones pueden producir tres tipos de reacciones:

- Ionización con electrones
- Ionización con otros iones
- Reacción de intercambio de carga



**Fig. 3.1.** Sección eficaz de las posibles reacciones en las colisiones de los neutros. *C* es la reacción de intercambio de carga; *P* es la de ionización con otros iones; y *e* es la ionización con electrones. Están dibujadas en función de la energía de los neutros. [Hut 94]

En el rango de energías de los neutros que entran en el plasma la reacción con mayor sección eficaz es la de intercambio de carga. Como puede verse en la figura 3.1, sólo a partir de energías muy altas los neutros pierden su electrón sin cedérselo a la partícula con la que han colisionado.

La reacción de intercambio de carga consiste en que un átomo colisiona elásticamente con un ion, en esta colisión el electrón que venía con el átomo pasa al ion, se han cambiado la carga. Si el ion con el que colisiona el neutro es un ion caliente del centro del plasma, el neutro secundario tendrá información de los iones del centro del plasma, con lo que analizando los neutros que escapan del plasma se podrán deducir propiedades de los iones del centro del plasma.

El flujo de neutros que escapan del plasma se puede escribir como [Wes 97]:

$$S(v_i) = n_i n_0 f_i(v_i) \int \sigma_{CX} |v_i - v_0| f_0(v_0) d^3 v_0 \quad (3.1)$$

Donde  $n$  es la densidad;  $f$  la función de distribución;  $v$  la velocidad; y  $\sigma_{CX}$  la sección eficaz de intercambio de carga. Los subíndices  $i$  y  $0$  corresponden a iones y neutros respectivamente. Esta ecuación puede escribirse respecto a la tasa media de reacciones de intercambio de carga y resulta:

$$S(v_i) = n_i n_0 \langle \sigma_{CX} v_i \rangle f_i(v_i) \quad (3.2)$$

La sección eficaz no varía demasiado en las regiones de interés para las máquinas de fusión, con lo que se puede considerar que  $S$  es aproximadamente proporcional a  $f_i(v_i)$ . El análisis del término fuente  $S$ , dará la función de distribución de iones y a partir de ella se podrán deducir otras magnitudes de interés.

### 3.2.- Medidas que realiza

El diagnóstico de intercambio de carga puede servir para medir las siguientes magnitudes dependiendo de las características del plasma y de otros datos que se tengan [Wag 82]

- Medida de la temperatura iónica.
- Determinación de la densidad de átomos de hidrógeno en el plasma.
- Balance de potencia de los iones.

- Medida de la relación entre los isótopos del hidrógeno.
- Contribución al estudio de la interacción plasma pared.

De todas las posibles medidas listadas anteriormente la principal es la medida de la temperatura iónica y se pasará a explicar a continuación.

### 3.2.1.- Medida de la temperatura iónica

Si se supone que la función de distribución de los iones del plasma es maxwelliana el flujo del espectro de energía por unidad de ángulo sólido del plasma viene dado por la siguiente expresión [Wag 82]:

$$\frac{d\phi}{dE} = \frac{E\sigma_{CX}(E)}{\pi(2\pi m)^{1/2}} \int_{-a}^a n_0(r)n_i(r) \frac{e^{-E/T_i}}{T_i(r)^{3/2}} \eta(r,E) dr \quad (3.3)$$

En esta ecuación  $E$  es la energía de los neutros que escapan;  $T_i$  la temperatura de los iones;  $m$  es la masa de los átomos que escapan; y  $\eta$  es el coeficiente de absorción de los neutros que se forman en el centro del plasma, que depende del punto en que se forma y de la energía de los neutros. La integral se calcula entre el punto de entrada y de salida del plasma de la línea de visión del diagnóstico.

Con el análisis del espectro de energía de los neutros para un plasma de baja densidad se puede conocer la temperatura del punto más caliente del plasma que ve la línea de visión de los detectores a partir de la pendiente del flujo. Si se desprecia el término de reabsorción de neutros, hipótesis válida en el caso de un plasma de baja densidad, se obtiene la siguiente [Wag 82]:

$$T_i^{-1} = - \lim_{E/T_i \rightarrow 1} \left[ \frac{d}{dE} \ln \left( \frac{d\phi/dE}{E\sigma_{CX}} \right) \right] \quad (3.4)$$

Para plasmas densos no se puede despreciar el término de reabsorción de neutros con lo que la temperatura que resulta es ligeramente inferior a la temperatura máxima que ve la línea de visión del diagnóstico. Otra corrección que debe hacerse al tratar los plasmas densos es en la cantidad

de neutros que provienen del centro. Debido a la dependencia del coeficiente de reabsorción con la energía (a menor energía mayor absorción de neutros) llega un mayor flujo de neutros de alta energía, así resulta que se calcula una temperatura más alta. Si se analizan los neutros a energías mucho más altas que la térmica resulta que las dos correcciones se cancelan con lo que el cálculo de la temperatura iónica a partir de la pendiente logarítmica del flujo de neutros es suficientemente preciso.

### **3.3.- Diagnóstico de intercambio de carga analizador de partículas neutras de TJ-II**

#### *3.3.1.- Analizador de intercambio de carga*

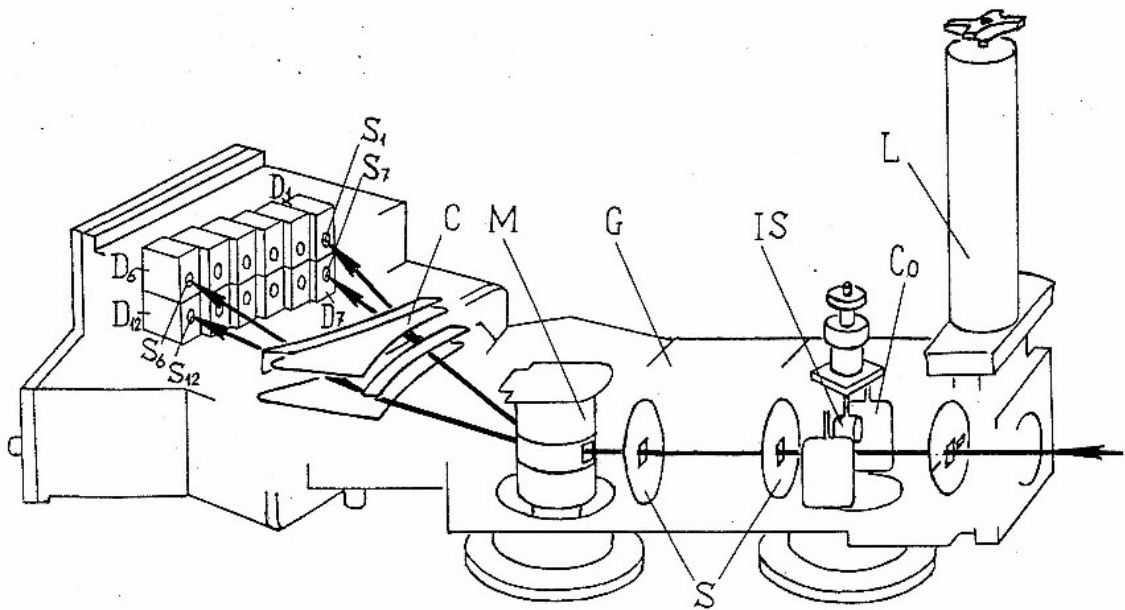
En el stellarator heliac flexible TJ-II se encuentra en operación un analizador de partículas neutras de intercambio de carga. Está formado por dos aparatos diferentes (analizadores de partículas neutras - NPA) en dos líneas de visión. Uno de ellos es un espectrómetro de 5 canales [Afr 75] capaz de medir neutros de 5 energías diferentes para un solo isótopo y el otro es un Acord12 [Izv 92] que puede medir dos isótopos diferentes (hidrógeno y deuterio) en 6 energías cada uno.

Los espectrómetros han sido diseñados y construidos en el *Ioffe Physico-Technical Institute* (Academia Rusa de Ciencias). Hay varios detectores similares en laboratorios de todo el mundo: Rusia, Alemania, USA, Japón...

Como el analizador está calibrado de modo absoluto, es posible saber los valores absolutos de los flujos de neutros, permitiendo mayores prestaciones que la medida de la temperatura de los iones.

## 3.3.2.- Propósito y principio de operación del dispositivo (Acord12)

El Acord12 es un dispositivo que permite barrer la energía y la distribución en masa de un flujo de átomos rápidos emitidos por el plasma. Separa dos tipos de isótopos (hidrógeno y deuterio) en seis energías diferentes cada uno. En este caso la energía varía desde 100 eV hasta 100 keV para el hidrógeno y de 100 eV a 50 keV para el deuterio.



**Fig 3.2.** Esquema del Acord12. *L* es la válvula de entrada; *C<sub>0</sub>* el condensador de limpieza; *IS* la fuente de iones para calibraciones; *S* la entrada y salida de la cámara de *stripping*; *G* la cámara de *stripping*; *M* el electroimán; *C* el condensador de análisis; *S<sub>1</sub>-S<sub>12</sub>* las entradas de los detectores; y *D<sub>1</sub>-D<sub>12</sub>* los detectores. [RAS 96]

El principio de operación puede verse esquemáticamente en la figura 3.2. Primero hay una rendija con tres posiciones diferentes que separa la cámara de vacío del analizador. Después se encuentra un condensador de limpieza que desvía las partículas cargadas y solo permite pasar las neutras. A continuación de este condensador hay la cámara de *stripping* donde un gas (nitrógeno) ioniza las partículas neutras entrantes para hacer posible el análisis magnético y eléctrico. El ion resultante pasa a través de un agujero de un electroimán y el campo magnético desvía los iones proporcionalmente a su momento, formando un abanico de partículas a su salida. Después de esto los iones entran en un condensador con su campo eléctrico paralelo al campo magnético del electroimán (análisis  $E \parallel B$ ). Este campo magnético proporciona una desviación de igual altura para iones de igual masa cuando intersecan el plano del detector. El plano del detector está

formado por dos líneas de seis detectores cada una con ventanas de entrada y conducción a través de condensadores.

Los detectores son electromultiplicadores (*channeltrons*) del tipo VEU-6. Estos electromultiplicadores tienen una puerta de entrada de 8 mm de diámetro y proporcionan una ganancia de  $10^8$  para una intensidad de partículas de hasta  $5 \cdot 10^5$  partículas/s en modo de conteo de pulso [RAS 96].

El analizador de 5 canales es muy similar al Acord12, en realidad el Acord12 es una mejora del analizador de 5 canales. El cuerpo principal del Acord12 es igual al de 5 canales, con lo que este último se puede convertir fácilmente en un Acord12. Las principales diferencias entre estos dos aparatos son las siguientes:

- Diferente sistema de análisis: en el de 5 canales es un análisis eléctrico doble, no hay separación de isótopos por su masa.
- Número de canales de energía: sólo tiene 5 canales.
- Diferente tipo de detectores.

Los detectores del analizador de 5 canales son electromultiplicadores de tipo VEU-2 [ASU 74]. Tienen una entrada mayor, de unos 25 mm.

### 3.3.2.1. Característica energética del analizador

La energía de detección de cada canal se determina por la corriente aplicada al electroimán y la relación energética entre los diferentes canales es fija. De este modo sólo es necesario fijar la energía en uno de los canales para fijar la de todos. El canal que se usa para fijar la energía es el séptimo, el menor de la línea de hidrógeno. La energía a la que se analizan los neutros de este canal se fija a partir de la corriente que circula por el electroimán.

<b>Canal</b>	<b>#1</b>	<b>#2</b>	<b>#3</b>	<b>#4</b>	<b>#5</b>	<b>#6</b>
$E_k/E_7$	0.5	0.69	1.01	1.39	2.2	4.03
<b>Canal</b>	<b>#7</b>	<b>#8</b>	<b>#9</b>	<b>#10</b>	<b>#11</b>	<b>#12</b>
$E_k/E_7$	1.0	1.42	2.04	2.94	4.82	8.74

**Tabla 3.1.** Relación de energía de los canales del Acord12. En la parte superior se encuentran los canales de deuterio y en la inferior los de hidrógeno.

Canal	#1	#2	#3	#4	#5
$E_k/E_1$	1	1.34	1.92	2.63	3.95

**Tabla 3.2.** Relación de energía entre los canales del analizador de 5 canales.

### 3.3.2.2. Calibración del analizador de partículas

El analizador se calibra en el *Ioffe Physical Technical Institute* de San Petersburgo (Rusia), usando haces neutros de hidrógeno y deuterio. También cuenta con una fuente de iones para comprobar la calibración y realizar otras pruebas.

Para operar la fuente de iones, un orificio realizado en una lámina de níquel se llena con una mezcla de igual peso molecular de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y un carbonato de un metal alcalino. Una vez el agujero está relleno, la mezcla se impregna con una gota de alcohol, entonces la fuente se inserta en la cámara y se precalienta en vacío antes de que el alcohol tenga tiempo de evaporarse completamente.

El calentamiento de la fuente de iones debe realizarse gradualmente. La intensidad del flujo de iones resulta suficientemente estable alrededor de 5 minutos después del ajuste final de la corriente de calentamiento [RSA 96].

Resultados de la calibración para medir la amplitud de energía de cada canal del espectrómetro de 5 canales se muestra en la tabla 3.3.

Canal	#1	#2	#3	#4
$\Delta E/E$	11.25%	13.75%	18.75%	17.75%

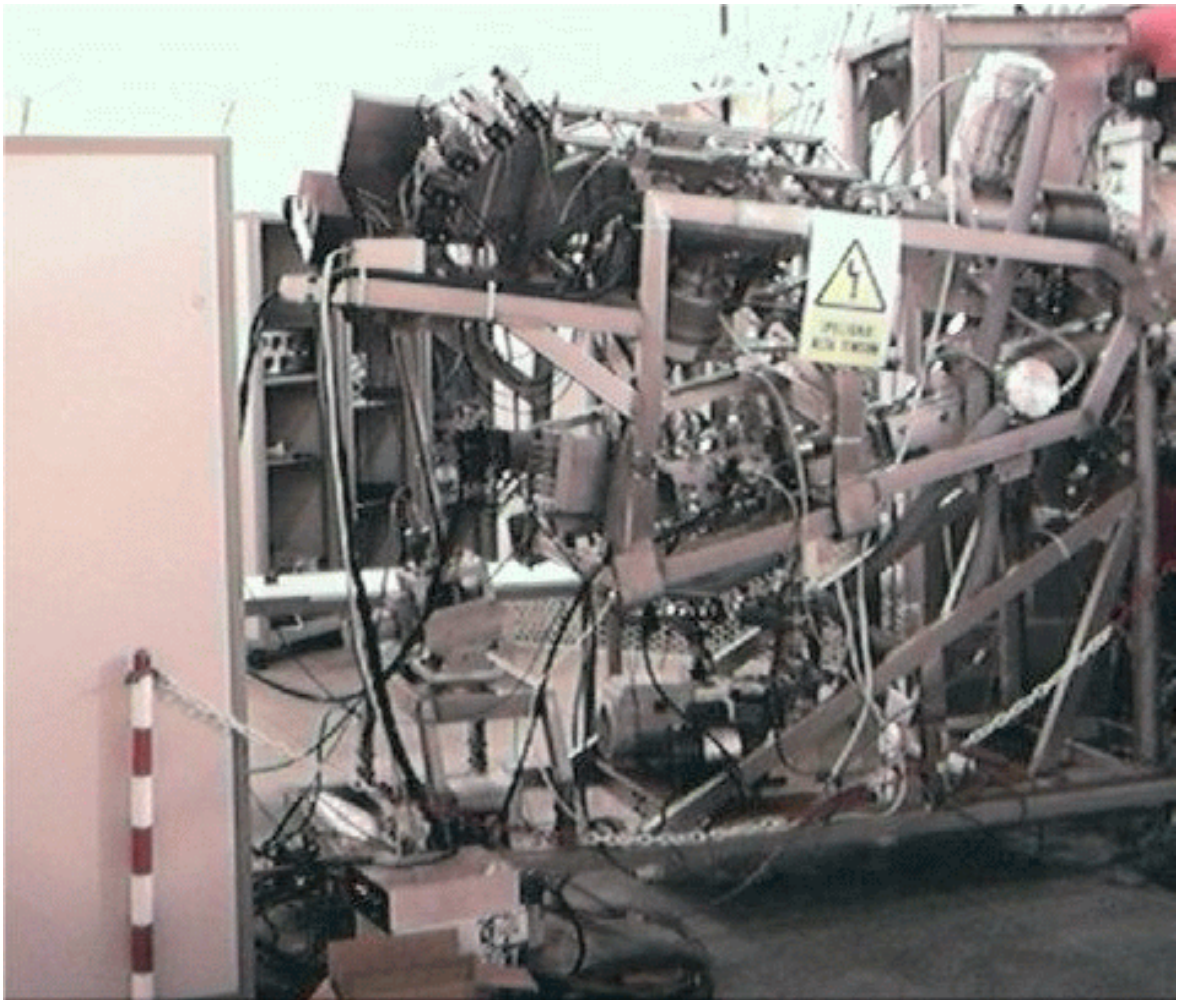
**Tabla 3.3.** Amplitud de energía de los canales del espectrómetro de 5 canales.



### 3.3.3.- Mecánica

#### 3.3.3.1. Estructura soporte

Ambos analizadores están fijados a la misma estructura, con el analizador de 5 canales en la parte superior y el Acord12 en la inferior. En la figura 3.3 puede verse una fotografía del analizador instalado en TJ-II. Se pueden apreciar claramente los dos espectrómetros con todos sus componentes, además del motor para su movimiento y el armario con toda su electrónica asociada.



**Fig. 3.3.** Fotografía del espectrómetro de intercambio de carga de TJ-II. En la parte superior se puede ver el analizador de 5 canales y en la inferior el Acord12.

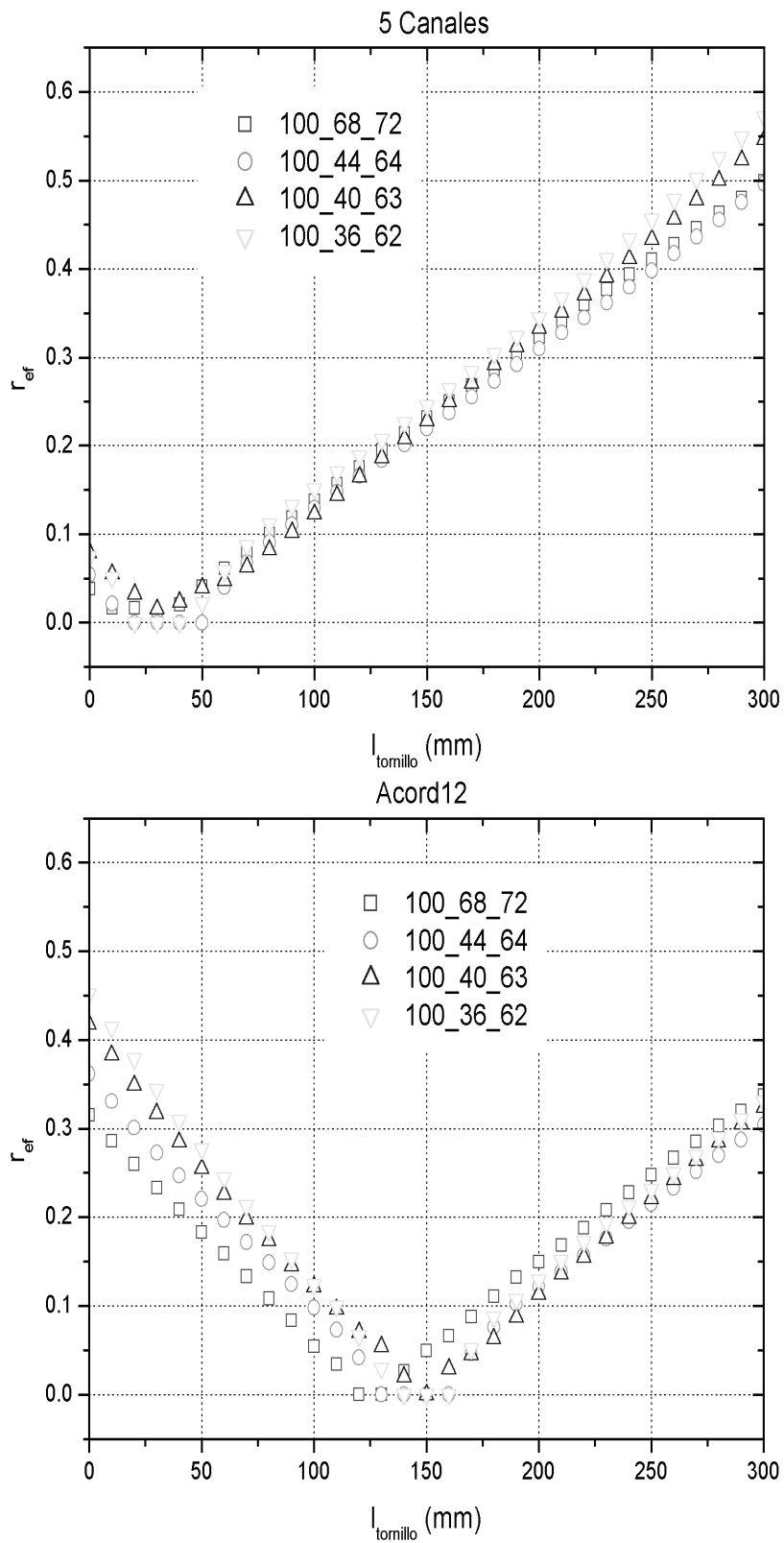
### 3.3.3.2. Movimiento

Tiene dos grados de libertad para el movimiento, se puede mover toroidalmente o poloidalmente. Para mover los analizadores toroidalmente se debe mover toda la estructura soporte. El movimiento poloidal es más sencillo. Los analizadores se mueven sobre un punto fijo, de esta manera la sección poloidal analizada se puede variar. El ángulo entre la línea de visión de los analizadores es fijo. El movimiento poloidal se realiza mediante un tornillo movido por un motor eléctrico. Este tornillo varía la altura de los analizadores, y por tanto la línea de visión. Este movimiento puede hacerse tanto localmente como remotamente, tiene una precisión de 0.1 mm y una altura máxima del tornillo de 700 mm. Con estas características el radio efectivo del plasma que puede ser analizado llega a  $\pm 0.5$  en las configuraciones de mayor volumen. Está previsto cambiar el tornillo por otro más largo para así poder analizar la sección completa del plasma.

### 3.3.3.3. Línea de visión

El diagnóstico de intercambio de carga recoge información sobre los iones de su línea de visión. El principal propósito de este diagnóstico es calcular la temperatura iónica. La temperatura iónica del elemento de volumen más caliente de la línea de visión se obtiene por la pendiente del espectro energético del flujo de neutros suponiendo que la distribución de los iones tiene una forma maxwelliana, como se ha dicho anteriormente en el apartado 3.2.1. El volumen de plasma más caliente siempre es el punto más cercano al eje magnético visto por los analizadores. Por tanto, dependiendo de la línea de visión la temperatura medida será de una parte u otra del plasma.

La línea de visión vista por el analizador se controla por la longitud del tornillo, y el punto más cercano al eje magnético del plasma visto por el analizador varía con la configuración magnética. En la figura 3.4 se muestra la región más cercana al eje magnético del plasma vista por cada analizador en función de la longitud del tornillo, para 4 configuraciones magnéticas diferentes.



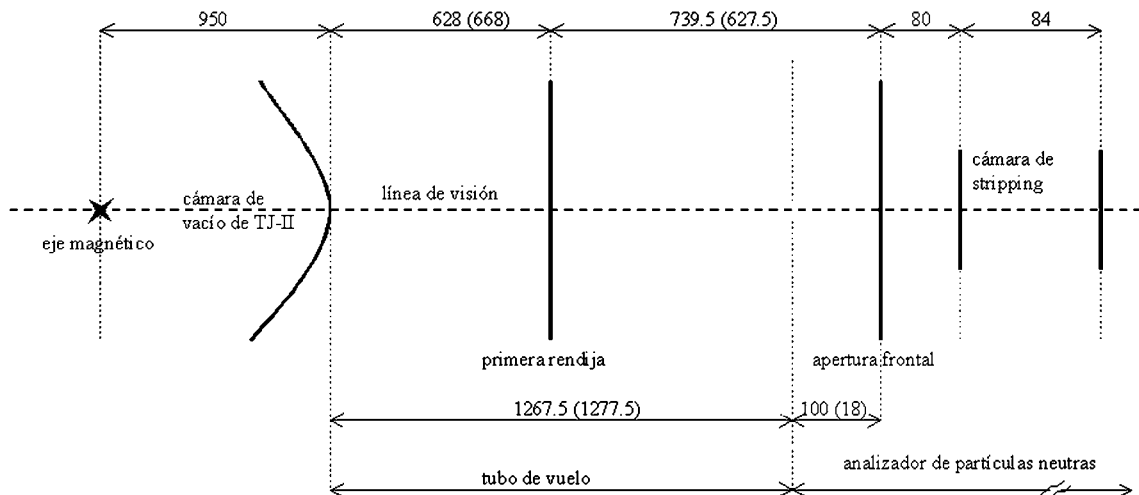
**Fig 3.4.** Punto más cercano al eje magnético del plasma en valor absoluto que ve cada uno de los analizadores en función de la longitud del tornillo, para 4 configuraciones diferentes.

3.3.3.4. Ángulo sólido

El ángulo sólido de la línea de visión es importante para calcular el valor absoluto de los flujos de partículas neutras. Para calcularlo se han de tener en cuenta las diferentes restricciones entre la cámara de vacío de TJ-II y los analizadores. En la figura 3.5 se muestra un esquema de las diferentes rendijas desde el plasma hasta la salida de la célula de *stripping*. Las dimensiones de las diferentes rendijas se resumen en la tabla 3.4.

Primera rendija	Apertura frontal	Entrada cámara <i>stripping</i>		Salida cámara <i>stripping</i>	
		5-Canal.	Acord12	5-Canal.	Acord12
Ambos NPA	Ambos NPA	5-Canal.	Acord12	5-Canal.	Acord12
30x5.5 mm <sup>2</sup>	10x10 mm <sup>2</sup>	2x15 mm <sup>2</sup>	2x2 mm <sup>2</sup>	3x15 mm <sup>2</sup>	3x2 mm <sup>2</sup>
20x4.0 mm <sup>2</sup>	10x1 mm <sup>2</sup>				
12x2.0 mm <sup>2</sup>	10x0.1 mm <sup>2</sup>				
25x2.5 mm <sup>2</sup>					

**Tabla 3.4.** Dimensiones de las rendijas de los analizadores (ancho x alto).



**Fig. 3.5.** Esquema de las rendijas entre la cámara de vacío de TJ-II (izquierda) y la salida de la cámara de “stripping” (derecha) del diagnóstico. Las distancias entre paréntesis corresponden al analizador de 5 canales, cuando son diferentes a las del Acord12. Todas las distancias están en milímetros. El dibujo no está a escala.

En la tabla 3.5 se señalan los valores del ángulo sólido para varias posiciones de las rendijas para ambos analizadores con una apertura frontal de 10x10 mm<sup>2</sup>.

Primera rendija	5 canales	Acord12
30x5.5 mm <sup>2</sup>	5.51·10 <sup>-9</sup> ster·m <sup>-2</sup>	1.58·10 <sup>-9</sup> ster·m <sup>-2</sup>
20x4.0 mm <sup>2</sup>	2.94·10 <sup>-9</sup> ster·m <sup>-2</sup>	7.66·10 <sup>-10</sup> ster·m <sup>-2</sup>
12x2.0 mm <sup>2</sup>	8.82·10 <sup>-10</sup> ster·m <sup>-2</sup>	2.30·10 <sup>-10</sup> ster·m <sup>-2</sup>
25x2.5 mm <sup>2</sup>	2.29·10 <sup>-9</sup> ster·m <sup>-2</sup>	5.98·10 <sup>-10</sup> ster·m <sup>-2</sup>

**Tabla 3.5.** Valores de los ángulos sólidos de los analizadores para diferentes valores de la primera rendija y apertura frontal de 10x10 mm<sup>2</sup>.

En el caso del espectrómetro de 5 canales si la apertura frontal es la de 10x1 mm<sup>2</sup> los valores del ángulo sólido se han de dividir entre 10, y si es la de 10x0.1mm<sup>2</sup> se deberá dividir entre 100. En el Acord12 para la apertura intermedia se ha de dividir el valor del ángulo sólido entre 2, y para el valor más pequeño entre 20.

### 3.3.4.- Vacío

#### 3.3.4.1. Bombas

Para conseguir el vacío requerido para operar el diagnóstico el dispositivo cuenta con varias bombas. En el Acord12 hay 3 bombas turbomoleculares, todas ellas conectadas a una bomba rotatoria. La rotatoria realiza el primer vacío. Una bomba turbomolecular se encuentra delante de la primera rendija para impedir la entrada de nitrógeno desde la cámara de *stripping* la cámara de vacío de TJ-II. Las otras dos turbobombas se encuentran en la entrada y en la salida de la cámara de *stripping* para determinar exactamente la longitud de la línea de nitrógeno, donde los neutros son ionizados.

El esquema en la línea del analizador de 5 canales es muy similar a la del Acord12. La única diferencia es que las dos bombas de la cámara de *stripping* se cambian por una bomba turbomolecular con dos entradas a la cámara.

<b>Bomba</b>	<b>Modelo</b>	<b>Capacidad</b>
Primera rendija Acord12	Varian Turbo-V 300 HT	300 l/s
Entrada camara <i>stripping</i> Acord12	Varian Turbo-V 300 HT	300 l/s
Salida camara <i>stripping</i> Acord12	Varian Turbo-V 300 HT	300 l/s
Primera rendija 5 canales	Varian Navigator TV 551	551 l/s
Cámara <i>stripping</i> 5 canales	Pfeiffer-Balzars	400 l/s

**Tabla 3.6.** Bombas operando en el diagnóstico de intercambio de carga.

#### 3.3.4.2. Cámara de *stripping* y realimentación de nitrógeno

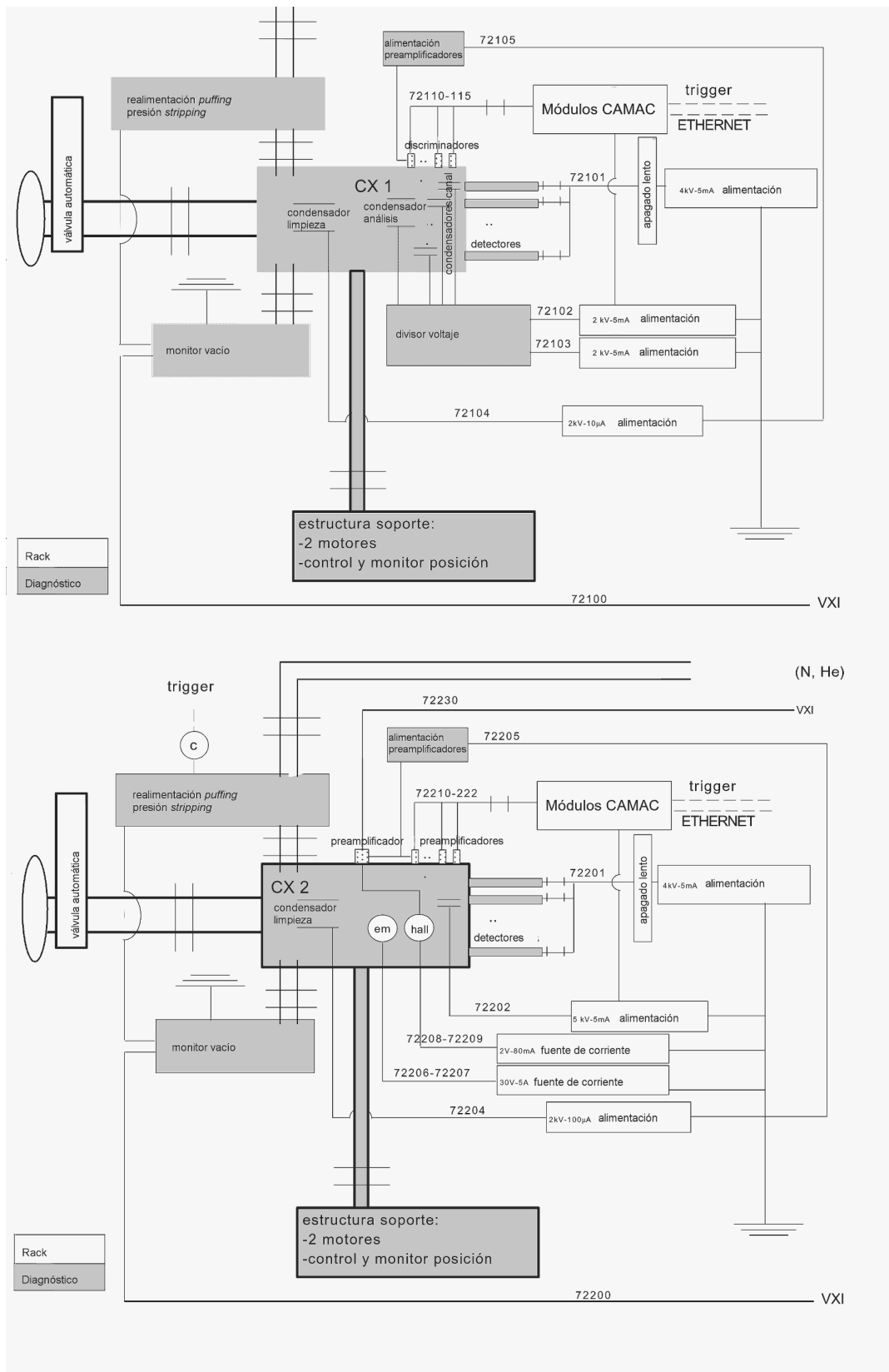
La cámara de *stripping* está llena de nitrógeno para producir el *stripping* de los neutros mediante colisiones elásticas entre el hidrógeno proveniente del plasma y el nitrógeno, es decir que los neutros que entren en esta cámara pierdan un electrón por colisiones elásticas con el nitrógeno. Así los iones resultantes podrán ser desviados por los campos magnéticos y eléctricos para determinar su energía.

La cámara de *stripping* debe estar a baja presión para asegurar colisiones únicas de los átomos. La cantidad de reacciones de *stripping* es lineal con la presión (para presiones de nitrógeno inferiores a  $8 \cdot 10^{-4}$  Torr), entonces la presión en la cámara de *stripping* tendrá que tenerse en cuenta en el análisis de los datos.

#### 3.3.5.- Electrónica

##### 3.3.5.1. Conexión

El esquema de las conexiones eléctricas de las dos líneas del diagnóstico se muestran en la figura 3.6.



**Fig. 3.6.** Esquema de las conexiones eléctricas de los dos analizadores. En la parte superior el de 5 canales y en la inferior el Acord12. [Fon 03]

### 3.3.5.2. Fuentes de alimentación

Las fuentes de alimentación del diagnóstico son siete Stanford Research Systems PS350, con un voltaje máximo de 5000 V y 25 W, y una Tektronikx PS2521G.

En el analizador de 5 canales hay cuatro de los PS350:

- Uno para alimentar el voltaje de los 5 electromultiplicadores ( $U_d$ , 4000V).
- Dos para alimentar los condensadores de los canales y el condensador de análisis ( $U_a$ , hasta 2000 V).
- Uno para alimentar el condensador de limpieza ( $U_{cc}$ , 1500V).

En el Acord12 las fuentes se utilizan para:

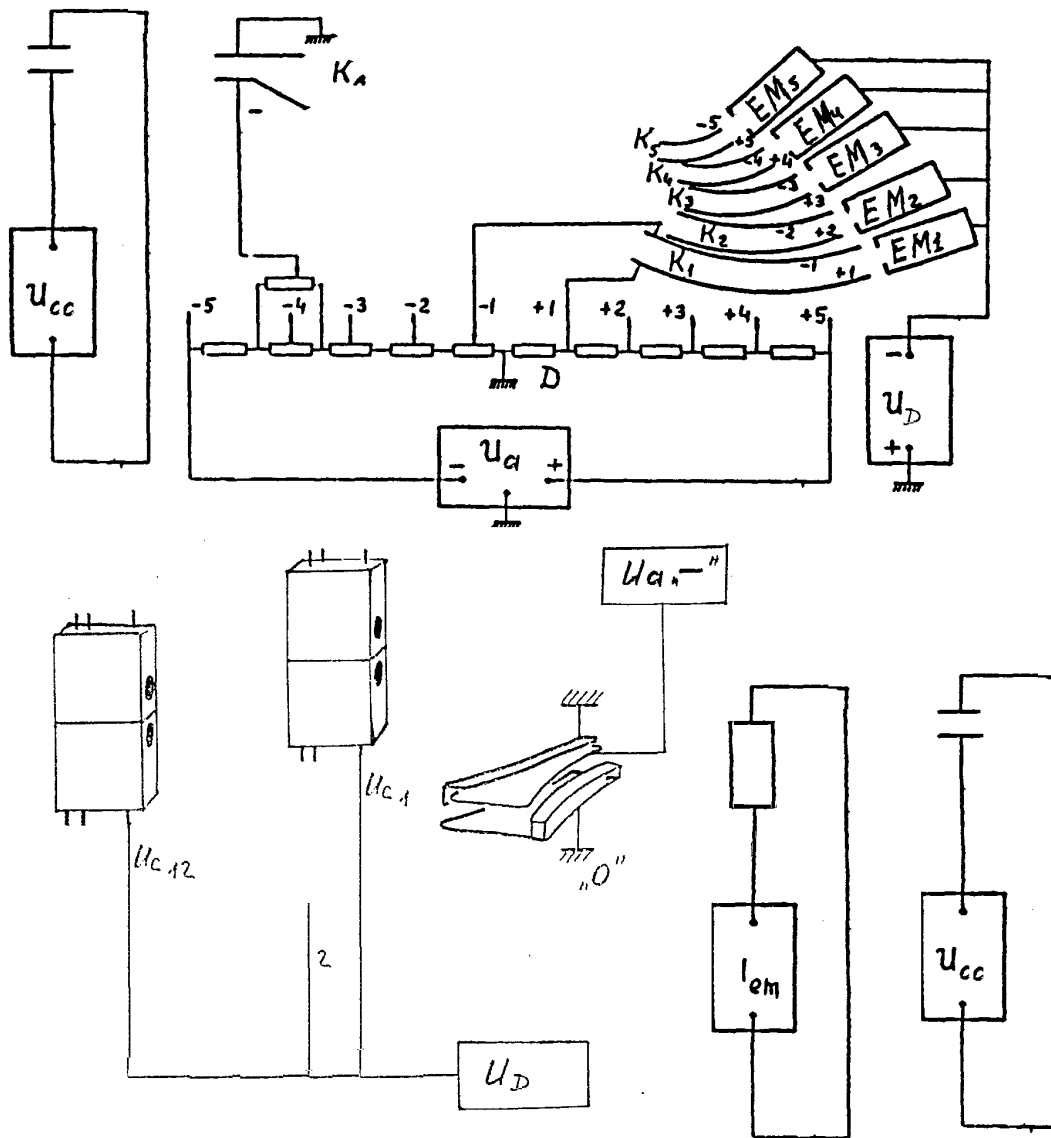
- Una para aplicar el voltaje a los detectores ( $U_d$ , 2800 V).
- Una para el voltaje de uno de los platos del condensador de análisis ( $U_a$ , hasta 5000 V), el otro plato está conectado a tierra.
- Una como fuente de alimentación del condensador de limpieza ( $U_{cc}$ , 1500V).
- La fuente Tektronikx para alimentar la corriente del electroimán ( $I_{em}$ , hasta 2 A) y la sonda Hall (80 mA, hasta 2V).

Un esquema de las fuentes de alimentación de ambos analizadores se puede ver en la figura 3.7.

### 3.3.6.- Campos magnéticos

Los campos magnéticos de la cámara de vacío de TJ-II pueden modificarse si los diagnósticos instalados se magnetizan. Para evitar este problema se debe asegurar que la magnetización del diagnóstico se mantiene por debajo de cierto valor. En la posición que ocupa el diagnóstico se puede tener como máximo, si se supone una susceptibilidad magnética de 3) un volumen magnético de  $0.17 \text{ m}^3$ . El valor del volumen magnético del diagnóstico se ha calculado y resulta un volumen de  $0.006 \text{ m}^3$  para uno de los dos analizadores. Este valor está muy por debajo del valor máximo permitido, por tanto se puede concluir que este diagnóstico no afecta el campo magnético de vacío de TJ-II.





**Fig. 3.7.** Esquema de la alimentación de los dos analizadores, el de cinco canales (arriba) y el Acord12 (abajo).  $U_{cc}$  es la alimentación del condensador de limpieza;  $U_a$  la del condensador de análisis (en el caso del analizador de 5 canales también de los condensadores que guían los iones hasta los detectores);  $U_D$  es la alimentación de los detectores; e  $I_{em}$  es la alimentación del electroimán del Acord12. Adaptado de [RSA 96] y [ASU 74]

### 3.3.7.- Control del espectrómetro

#### 3.3.7.1. Temporizador

Una señal de salida se utiliza para tener el mismo tiempo de conteo en todos los canales del CAMAC, esta es la señal de temporizadores. Para evitar interferencias electromagnéticas de la

sala experimental la señal es óptica. El temporizador del diagnóstico está en el canal 25 del panel 1 de la sección de temporizadores de TJ-II [Are 98].

El temporizador es un pulso de luz-oscuridad (pulso 1-0). La señal empieza con 400 ms de luz (1), después vienen 500 ms de oscuridad (0) y finalmente luz continua (1). Cuando empieza el segundo periodo de luz, el CAMAC comienza la adquisición de datos. El periodo de oscuridad sirve para reiniciar todos los contadores a 0 y de este modo no acumular cuentas de un disparo a otro [Cam].

#### 3.3.7.2. Protocolo de vacío

El vacío en la ventana de TJ-II se mide con dos manómetros, uno por espectrómetro. Los analizadores pueden conectarse a la cámara de TJ-II independientemente. Durante la operación hay una presión máxima permitida en la cámara de vacío del stellarator definida por el físico responsable de operación, teniendo en cuenta el protocolo del dispositivo. En caso de que una de las presiones medidas por los manómetros sea mayor que la definida para la operación la válvula correspondiente a ese espectrómetro no podrá ser abierta y si estaba abierta se cerrará automáticamente, impidiendo de este modo el aumento de la presión en la cámara de vacío de TJ-II.

#### 3.3.7.3. Control remoto

El control de la posición del sistema y de las válvulas se realiza mediante un sistema de control remoto. Para realizar los requerimientos del control remoto se ha utilizado un PLC (*Programmable Logic Controller*). El PLC del diagnóstico se conecta a los PLC de los otros diagnósticos a través de una red Profibus (*PROcess Field BUS*) mediante una fibra óptica.

El autómata programable (PLC) asume el control en tiempo real y se comunica con los otros participantes de la red Profibus recibiendo parámetros y órdenes para cambiar su estado. Cualquier dato erróneo que no esté entre los límites del programa ejecutado por el controlador será rechazado y no se ejecutará.

La integración de la red Profibus con la red *ethernet* básica se ha realizado a través de un PC con Windows NT como servidor, que hace de puerta de comunicación entre las dos redes.

Para actuar remotamente desde cualquier terminal conectada a la red *ethernet* de TJ-II, las pantallas utilizadas para monitorear el diagnóstico se han programado en el servidor. La aplicación que recopila toda la información de la red es un *BridgeView* donde están programadas todas las pantallas para el diagnóstico. Este software tiene la posibilidad de publicar las pantallas de control a través de páginas en lenguaje HTML.

Para garantizar el buen comportamiento de los diagnósticos y evitar operaciones incorrectas se han introducido tres niveles de seguridad. El primer nivel se establece en el diagnóstico y consiste en la acción sobre un botón mecánico que anula la posibilidad del control remoto y sólo permite el control local. Para acceder al control desde la red es necesario desconectar el botón y dar un nombre de usuario y contraseña al servidor para obtener la pantalla correspondiente. El tercer nivel se establece desde la pantalla de control de la persona responsable del diagnóstico, permitiendo la posibilidad de actuar sobre el diagnóstico desde fuera del Ciemat sólo desde ordenadores cuya dirección IP está previamente aceptada y después de introducir otro nombre de usuario y contraseña.

Desde cualquier ordenador de la red del Ciemat con un navegador *web* se puede acceder al control remoto, esto permite el control del diagnóstico desde diferentes plataformas de ordenador. Para actuar sobre el diagnóstico es suficiente introducir los valores de las diferentes variables que se quieran modificar. [Lop 02]

La alimentación del condensador de análisis del analizador de 5 canales y el electroimán del Acord12 se realiza a través de una interfaz CAMAC-GPIB (*General Purpose Interface Bus*). La señal de salida del CAMAC va a un DAC (Convertidor de Digital a Analógico). La señal de salida de este DAC es un voltaje entre -5V y +5V, esta señal analógica va directamente a la fuente de alto voltaje para controlarla. Una entrada de 5V corresponde a 5kV. El control del módulo DAC viene dado por comandos del CAMAC.

El GPIB es controlado a través del CAMAC. El controlador del CAMAC tiene una microVAX (*fuexp6*) que se conecta a una estación VAX (*fuexp1*), y puede programarse desde allí. Cualquier ordenador conectado a la red del Ciemat se puede conectar a esta VAX y programar desde allí las fuentes de alimentación. La conexión desde fuera del Ciemat se realiza a través de un cortafuegos, con lo que el ordenador que se quiere conectar tiene que haber estado previamente identificado.

### 3.3.8.- Sistema de adquisición de datos del espectrómetro de intercambio de carga

#### 3.3.8.1. Esquema de los ordenadores

Una vez que las fuentes están programadas, el sistema preliminar de adquisición (PDA) empieza con los detectores, la señal de salida de éstos va hasta los preamplificadores. Los preamplificadores convierten los pequeños pulsos de corriente en una señal NIM estándar. Estos amplificadores incluyen amplificador y un discriminador integrado. El umbral mínimo de detección corresponde a una señal de entrada de  $\sim 2 \cdot 10^5$  e. La duración de las señales estándar es de 40 ns. [ADM 96]

En el Acord12 hay dos contadores de 8 canales, cada uno de ellos se utiliza para una línea de detectores (hidrógeno y deuterio). Los contadores también cuentan con una entrada para el tiempo, dado por un generador de intervalos de tiempo (TIG). Los datos se almacenan en la memoria buffer de los contadores y después de cada disparo se transfieren al CAMAC.

Después del pulso el CAMAC exporta a través de Ethernet la información al VAX (*fuexp1*) a través de otra VAX (*fuexp6*) incorporada en el CAMAC. En el VAX (*fuexp1*) es donde corre el programa de control y se guardan los datos del disparo. Otro programa, éste corre en una máquina Unix (*fusc*), traslada los datos guardados en la VAX (*fuexp1*) al sistema general de adquisición de datos de TJ-II. Este programa recoge a través de protocolo *ftp* los datos del VAX (*fuexp1*) hasta el ordenador de almacenaje de los datos de TJ-II.

### 3.3.8.2.- Programas de adquisición

Hay dos principales programas en el sistema de adquisición de TJ-II: *npa12* y *getcx2*. Con estos dos programas se recogen los datos de los analizadores y se guardan en la base de datos central de TJ-II.

#### *npa12*

Este programa es el que recoge los datos en la VAX. Se introducen como parámetros de entrada comunes el número de disparo de TJ-II, el tiempo en que empieza a contar neutros, el tamaño de la ventana temporal, el número de ventanas temporales a adquirir y la masa de los neutros.

También se introducen como parámetros de entrada, pero esta vez independientes para cada analizador la energía a la que analizará los neutros, la presión de gas de la cámara de “*stripping*”, y las rendijas utilizadas en la apertura central y primera rendija.

El programa después de recibir el número de cuentas de cada detector y con los datos entrados, calculará el número absoluto de neutros para cada energía seleccionada, almacenándolos en la estación VAX.

#### *getcx2*

Este es un programa de Unix que coge los datos almacenados en la VAX donde los guardaba el programa *npa12* y los transfiere a la base de datos central de TJ-II. Este programa tiene un sistema de seguridad para evitar sobrescribir antiguas descargas por equivocación.

### 3.3.8.3.- Programas de análisis

Para calcular la temperatura iónica se utilizan dos programas, uno para cada uno de los analizadores. En este programa se introduce el número de descargas a analizar, el intervalo de tiempo que se quiere analizar y el tamaño de las ventanas temporales a analizar. También existe la opción de introducir un disparo de ruido para mayor precisión en los análisis.

Una vez introducidos los parámetros deseados para el cálculo el programa presenta en la salida los flujos para cada energía y también los representa gráficamente. Después de estas acciones se pasa al análisis para calcular la temperatura de los iones en cada intervalo temporal.

Este análisis puede hacerse especificando los valores para cada intervalo temporal o dando los valores globalmente para todos los intervalos. El programa calcula la regresión lineal de los neutros en función de la energía y lo presenta en pantalla; los datos se pueden variar para un mejor ajuste, permitiendo también descartar algunas energías que no tienen suficientes cuentas para poder considerarse aceptables para el análisis.

Los programas también introducen automáticamente las temperaturas iónicas calculadas en la base de datos central de TJ-II.

### **3.4.- Conclusiones**

En un dispositivo de fusión experimental es muy importante tener múltiples diagnósticos para obtener diferentes parámetros del plasma y así conocer mejor su comportamiento en diversas circunstancias. Uno de estos diagnósticos es el de intercambio de carga analizador de partículas neutras.

El diagnóstico de intercambio de carga permite, a través del análisis energético de los átomos neutros que escapan del plasma, conocer diversas magnitudes de los iones centrales que forman el plasma. La principal magnitud que mide es la temperatura de los iones a partir de este espectro si se trata de un plasma de baja densidad, aunque con las debidas correcciones también se puede aplicar a plasmas densos.

El heliac flexible TJ-II dispone de dos analizadores de partículas neutras montados en la misma sección poloidal. Estos dos analizadores permiten encontrar el espectro energético de dos puntos del plasma de la sección poloidal, y variando su posición se puede barrer toda la sección. El espectrómetro cuenta con todo el software asociado necesario para realizar el análisis de los datos obtenidos.

Durante la realización de esta tesis se ha comprendido el principio físico y funcionamiento del espectrómetro de intercambio de carga. También se ha aprendido a manejarlo y resolver los posibles problemas asociados a su operación.

Este diagnóstico cuenta con dos analizadores, uno de 5 canales y un Acord12, este último analiza un mayor número de energías por cada descarga. Una mejora que se ha realizado en el Laboratorio Nacional de Fusión ha sido una modernización del analizador de 5 canales para pasar a ser un Acord12, pues es sencilla su adaptación. Otra mejora prevista es cambiar la longitud del tornillo para permitir barrer toda la sección donde se encuentra enclavado el diagnóstico.

Una posible mejora a este diagnóstico sería la de añadir otra línea de visión, para con menos descargas obtener más puntos radiales, con lo que sería más sencillo completar un perfil radial de flujo de neutros.

Diagnósticos del mismo tipo están en funcionamiento en diferentes laboratorios de investigación del mundo, tanto en tokamaks como stellarators. Esta variedad de localizaciones permite compartir la experiencia de operación de los diferentes grupos.