

Los Limitadores Móviles (LM)
del TJ-II: Control de Carga
Térmica y Control de Partículas

E. de la Cal

Toda correspondencia en relación con este trabajo debe dirigirse al Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Ciudad Universitaria, 28040-MADRID, ESPAÑA.

Las solicitudes de ejemplares deben dirigirse a este mismo Servicio.

Los descriptores se han seleccionado del Thesaurus del DOE para describir las materias que contiene este informe con vistas a su recuperación. La catalogación se ha hecho utilizando el documento DOE/TIC-4602 (Rev. 1) Descriptive Cataloguing On-Line, y la clasificación de acuerdo con el documento DOE/TIC.4584-R7 Subject Categories and Scope publicados por el Office of Scientific and Technical Information del Departamento de Energía de los Estados Unidos.

Se autoriza la reproducción de los resúmenes analíticos que aparecen en esta publicación.

Depósito Legal: M-14226-1995
NIPO: 238-98-002-5
ISSN: 1135-9420

Editorial CIEMAT

CLASIFICACIÓN DOE Y DESCRIPTORES

700330

TOKAMAC DEVICES; PARTICLES; MOBILITY; STATIC LOADS; THERMAL ANALYSIS

"Los Limitadores Móviles (LM) del TJ-II: Control de Carga Térmica y Control de Partículas"

De la Cal, E.
34 pp. 13 figs. 4 refs.

Resumen:

Se han previsto para el TJ-II cuatro limitadores móviles con objeto de reducir las cargas térmicas sobre la región convexa de la cámara de vacío (y sus protecciones), que rodea a las bobinas centrales. A su vez deben caracterizar la región del plasma al exterior de la última superficie magnética cerrada ("Scrape Off Layer" o "S.O.L."). El papel que deberán jugar en las diferentes etapas de operación del TJ-II se ha analizado desde los puntos de vista de control de partículas y de carga térmica. La problemática del control de impurezas se tratará en otro informe.

En cuanto al control de cargas térmicas, se ha realizado un modelo simplificado para estimar la eficacia de los limitadores, llegándose a la conclusión, que será necesario un nuevo diseño optimizado de la cabeza para la fase de inyección de neutros (NBI), si se desea que el rendimiento sea aceptable. Las medidas experimentales que se harán en la primera fase del TJ-II (ECH) con las sondas de temperatura y las sondas Langmuir instaladas en las cabezas, serán fundamentales para la optimización del diseño.

Por lo que respecta al control de partículas, será absolutamente necesario contar con las técnicas habituales de acondicionamiento de la primera pared, preferiblemente la boronización. Esto es debido a que no hay previsto ningún sistema de bombeo activo para el control de la densidad electrónica.

Finalmente se analiza muy brevemente el importante papel que puede jugar la topología magnética en la interacción plasma-pared, pudiendo encontrarse configuraciones en las que los limitadores trabajan en modo divertor. Esta flexibilidad del TJ-II de cambiar la configuración magnética ha de explotarse, con el fin de encontrar escenarios favorables de operación, principalmente para la fase de alta inyección de potencia.

"The Mobile Limiters of TJ-II: Power and Particle Control"

De la Cal, E.
34 pp. 13 figs. 4 refs.

Abstract:

For mobile limiters have been designed for the TJ-II stellerator to reduce thermal loads on the vacuum vessel and its protections at the region of the central hard core ("groove") and to characterise the scrape off layer plasma. The role of the mobile limiters for particle and thermal load control is analysed for the different operating phases of TJ-II. The task of impurity control will be treated in a future report.

A simplified model has been used to estimate the thermal loads on the limiters. The conclusion is that a new design for the limiter heads will be necessary for the neutral beam injection (NBI)-phase at high power density, if acceptable efficiencies of thermal removal is desired. The experimental measurements which will be made in the first phase (ECH) with the temperature and Langmuir probes installed in the diagnosed limiter-heads will be essential for the optimisation of the future limiter-shape.

For particle control it will be absolutely necessary to use first wall conditioning techniques (e.g. boronization), since no active pumping method is foreseen for TJ-II. Again, this point will be more critical in the NBI-phase, due to the larger particle fluxes to the first wall and due to possible thermal gas desorption caused by local overheating of plasma-facing surfaces.

The role of magnetic topology on plasma-wall interaction is finally analysed. A configuration has been found in which the limiters act as divertor plates ("Natural Island Divertor"). This inherent flexibility for changing the magnetic topology of TJ-II should be exploited in order to find the most favourable operating scenarios for the high power injection phase.

Introducción

Los limitadores son componentes de un dispositivo de fusión dedicados al control de la interacción del plasma con las superficies materiales con las que entra en contacto. Existen otras tareas englobadas en esta rama de la física de plasmas de fusión llamada habitualmente "plasma-pared" tales como por ejemplo:

- el "acondicionamiento" de la cámara de vacío y su primera pared;
- el estudio de fenómenos básicos como la erosión de materiales ("sputtering") y el comportamiento ó "reciclado" en éstos del combustible (hidrógeno y sus isótopos);
- la elaboración de modelos de borde del plasma y su verificación experimental; etc.

El control de la interacción de plasma-pared es fundamental en los dispositivos experimentales de tipo pequeño y medio, como el TJ-II, para:

- producir plasmas de calidad (pureza ó Z_{eff} en el centro del plasma, duración del plasma, balance de energía expresado por el triple producto $n T \tau$, etc.);
- optimización de la vida útil del dispositivo experimental, consiguiendo reproducibilidad en los experimentos, así como minimización de "descargas falladas" que tanto desesperan al investigador encargado del experimento.
- evitar daños por cargas térmicas ó electrones supratérmicos en la cámara de vacío y diagnósticos.
- caracterizar con los diagnósticos instalados en los limitadores la región externa del plasma que interactúa directamente con las superficies (Scrape Off Layer ó S.O.L.) y verificar así modelos que puedan extrapolarse a futuros reactores de tipo stellarator.

A medida que el dispositivo experimental tiene dimensiones y parámetros de plasma mas relevantes (tamaño, potencia, longitud de la descarga, utilización de tritio, etc.) la importancia relativa en tareas de "plasma-pared" adquieren mayor relevancia.

A continuación se analizarán desde un punto de vista teórico dos funciones a cumplir por los limitadores del TJ-II (figura 1): el control de carga térmica y el de partículas. La tercera tarea, el control de impurezas, se tratará en otro informe. Para tratar estas dos primeras funciones de los limitadores es necesario aplicar un modelo del plasma del S.O.L., que se aborda brevemente para el caso de TJ-II. Posteriormente se introduce (de una manera muy preliminar) la importancia de la topología magnética en la

interacción plasma-pared para un stellerator y en especial para TJ-II. No hay que olvidar que en la fecha en la que se escribió este informe no se disponía ni de un sólo dato experimental. Por tanto lo aquí expuesto no son más que modelos a verificar y puntos a estudiar en los futuros años de operación. Se harán finalmente algunos comentarios para el diseño de unos limitadores optimizados, que serán una pieza clave para la fase de alta inyección potencia en TJ-II.

Es importante mencionar la posibilidad inherente de los stellerators de producir configuraciones de tipo divertor ("Natural Island Divertor"), que puede ofrecer grandes ventajas frente a la configuración limitador. Este es un campo muy estudiado en los actuales stellerators de todo el mundo y será una de las piezas clave para la extrapolación de dispositivos experimentales a un futuro reactor. Si los stellerator quieren competir con los tokamaks, habrán de conseguirse divertores al menos igual de eficaces en cuanto a control de partículas, carga térmica e impurezas.

El S.O.L. en configuración tipo limitador

La configuración de S.O.L. tipo limitador se produce cuando la última superficie cerrada (ó separatriz) "toca" el limitador, es decir, ambos tienen el mismo radio menor r . Los modelos del S.O.L. para configuraciones tipo limitador son aplicables tanto a tokamaks como a stellerators. Están basados en el transporte anómalo de las partículas cargadas y en la interacción de éstas con partículas neutras y superficies materiales. En el caso más simplificado (simetría toroidal y poloidal) se obtienen perfiles radiales de densidad electrónica $n_e(r)$ del plasma del S.O.L. de tipo:

$$n_e(r) = n_e(a) \exp(-(r-a)/\lambda_n), \quad (1a)$$

siendo λ_n la longitud característica de decaída exponencial de la densidad, que puede expresarse con ayuda de un modelo simplificado como:

$$\lambda_n \approx (D L_c / c_s)^{1/2}. \quad (1b)$$

El coeficiente de difusión perpendicular D es anómalo, ya que su valor es más elevado de lo que los modelos de transporte de partículas ó fluidos predicen sin considerar turbulencia, aunque

existen pocos resultados concluyentes al respecto. Se puede obtener D según la ley empírica de escala de Bohm como:

$$D \approx 0.06 (T_e(a) / BT). \quad (1c)$$

Debido a que el acuerdo de los datos experimentales y la ley (1c) es a menudo bastante burdo (hasta un factor 10 de error!), siempre es necesario medir en cada máquina las longitudes de decaída en el S.O.L. Aparte del comportamiento anómalo del transporte de partículas cargadas, existen una gran cantidad de fenómenos físicos que han de tenerse en cuenta en esta región del plasma. Debido por ejemplo a la alta densidad de neutros, existen procesos de reacción del plasma con partículas neutras (ionización, excitación, etc.), así como con superficies materiales ("sputtering", reciclado, etc.). Estos procesos son clásicos, en el sentido que son bien conocidos y estudiados en otros campos de física, por lo que en general puede decirse que, si bien los modelos a menudo son complejos, existe una buena comprensión de lo que se observa experimentalmente.

Volviendo a la ecuación (1b) tenemos una dependencia de λ_n con la velocidad acústica de los iones c_s , que es según el criterio de Bohm, la velocidad con la que los iones penetran en la región con campo eléctrico no nulo creado por un material inmerso en el plasma ("sheath"), y viene dada por:

$$c_s \approx (k(T_e + T_i)/m_i)^{1/2}. \quad (1d)$$

Por último queda por ver la longitud de conexión L_c , que se define como la distancia media a lo largo de una línea de campo que recorren los iones y electrones desde que entran en el S.O.L. hasta que dan con una superficie material. Puede también definirse como mitad de la longitud de una línea de campo magnético en la separatriz desde que "nace" en una superficie hasta que "muere" en otra. Este parámetro requiere un análisis más detallado ya que en principio viene impuesto por la configuración de los limitadores y por tanto, es controlable (y cómo veremos, en un rango muy amplio). En un informe posterior se tratará este punto con más detalle, ya que se está corriendo un código que permite analizar la longitud de conexión en función del tipo de limitador con la configuración exacta del TJ-II. En general puede tomarse lo que aquí se presenta como una aproximación bastante correcta.

Para el caso de tener un limitador toroidal solamente (limitadores móviles completamente retraídos), la longitud de conexión es fácil de calcular: $L_C \approx \pi R / \iota$. En realidad L_C es algo mayor debido a la helicidad del campo magnético, pero el valor es típicamente $L_C \approx 4$ m. La cosa se complica notablemente al introducir los limitadores móviles y para tratar de entender el problema (que exige algo de imaginación) se propone un ejemplo práctico. De manera esquemática se ha dibujado un corte poloidal del plasma en la figura 2a, indicando la posición relativa de los limitadores móviles (LM), r_{LM} , y toroidal (LT), r_{LT} . Existirá una región del plasma S.O.L. que estará dominada por los LM si $r_{LM} < r_{LT}$; por ejemplo pongamos $d = r_{LT} - r_{LM} = 5$ mm de espesor. Esta región definirá un ángulo poloidal de contacto plasma-limitador móvil que denominaremos Θ_{LM} . Para el caso en que $d = 5$ mm y una configuración standard, $\Theta_{LM} \approx \pi/10$. En la figura 2b se han representado con trazas discontinuas algunas líneas de campo magnético en $r = a$ para una configuración con $\iota(a)/2\pi = 1.5$ de TJ-II. Los ejes de coordenadas representan los ángulos toroidal ϕ y poloidal Θ . Se ha representado la arista del limitador toroidal con una línea punteada y con "pivotes" gruesos la región de contacto de los limitadores móviles definidos por el ángulo Θ_{LM} . La longitud de conexión será la mitad de la distancia entre dos puntos de intersección de una línea de campo y una arista de limitador. Para el caso del limitador toroidal ($d < 0$) tendremos $L_C \approx R / 2\iota \approx 3$ m. Si $d > 0$ tendremos la región más interna del S.O.L. dominado por limitadores modulares (LM) y el valor de L_C dependerá de la línea de campo escogida. Por ello, para configuraciones dominadas por limitadores modulares, se suele definir una longitud de conexión efectiva que es igual al valor medio de todas. Para calcular ésta, es necesario conocer la velocidad de deriva radial v_r de las partículas cargadas, que esta relacionada con el coeficiente de difusión perpendicular D . En la mayoría de los dispositivos se ha estimado experimentalmente $0.1 < D \text{ (m}^2/\text{s)} < 1$ en el S.O.L. y la relación entre la velocidad del plasma paralela al campo v_{II} y la de deriva radial v_r cumple $10^{-4} < v_r/v_{II} < 10^{-3}$. A continuación se estimará para TJ-II la longitud de conexión a partir de estas suposiciones para una configuración con $d = 5$ mm (LM está 5 mm al interior respecto de LT). Tenemos que $v_r = l_r/\tau_{SOL}$ y $v_{II} = l_{II}/\tau_{SOL}$, siendo l_{II} la longitud de la línea de campo que confina a la partícula y por tanto igual a L_C , l_r la máxima distancia radial que la partícula puede desplazarse y viene dada por la posición relativa de los limitadores modulares y toroidales d , y finalmente τ_{SOL} es el tiempo de confinamiento de la partícula desde que entra en el

S.O.L. hasta que impacta en un limitador. Para el caso de máxima difusión radial tendremos por tanto:

$$LC = 2 d v_{II} / v_I \approx 2 \times 5 \times 10^{-3} \times 10^3 \text{ m} = 10 \text{ m} \quad (2a)$$

y para el caso en que el coeficiente de difusión es mínimo ($v_I/v_{II} = 10^{-4}$) tendremos $LC \approx 100 \text{ m}$. No hay que olvidar que para $r > (a + d)$ entramos en la región dominada por el limitador toroidal, con una longitud de conexión más corta y por tanto, con una longitud de decaída exponencial más pequeña (en un factor 2 a 5). Resumiendo y como muestra la figura 3 tendremos dos regiones diferentes en el S.O.L.:

si $a < r < a + d$ ($d = 5 \text{ mm}$) : $10 \text{ m} < LC < 100 \text{ m}$;

si $r > a + d$: $LC = 3 \text{ m}$.

Este resultado tiene una implicación importante: si la longitud de decaída en el caso de limitador toroidal es de 2 cm, para el caso del limitador móvil ésta debiera ser de 5 - 10 cm. Esta es la distancia que habrá que introducir los limitadores para desacoplar el limitador toroidal, cosa que es impensable dado que reduciría fuertemente el radio menor del plasma. Por ello es necesario dar a los limitadores un perfil poloidal (ver sección "Optimización de limitadores").

Hay que mencionar que el ejemplo utilizado aquí con $\nu / 2\pi = 1.5$ no es representativo de las configuraciones tipo limitador que se vayan a utilizar en TJ-II (generalmente se utilizarán valores ligeramente inferiores). Esto es debido, primero a que el hecho de que la transformada rotacional en la separatriz sea racional, induce islas que generan un S.O.L. sin simetría poloidal (ver sección de configuración tipo divertor). Segundo, existen regiones en el S.O.L., en las que las líneas de campo en la separatriz nunca "tocan" los limitadores móviles y otras en las que las líneas de campo conectan directamente a éstos.

Los limitadores y sus diagnósticos

Se han fabricado cuatro limitadores, aunque por el momento sólo hay dos instalados en TJ-II. De hecho, queda por ver si es posible trabajar sólo con dos limitadores optimizados en la fase de NBI, cosa que ahorraría trabajo y facilitaría la operación. Los limitadores han sido descritos con todo tipo de detalles técnicos en otro informe recientemente publicado (ver referencia).

Los diagnósticos de los limitadores móviles son:

-Sondas de temperatura

En una de las cabezas hay instaladas en bloques térmicamente aislados 8 sondas de tipo PT-100 y en la otra 3. Con ellas será posible realizar un perfil de deposición de potencia, así como una estimación de la potencia total convectiva sobre los limitadores.

- Sondas Langmuir

Se han instalado 6 sondas por cabeza, cada una de 4 pines de tungsteno (ver figura 4). Servirán para realizar perfiles de densidad y temperatura electrónica en el S.O.L., así como para medir fluctuaciones. También se utilizarán para comprobar la posición de los limitadores respecto del plasma.

-Cámara CCD visible color

Una cámara comercial con objetivo variable mira a uno de los limitadores y al plasma. Se utiliza primeramente para ver de manera rápida y cualitativa si ha habido plasma y segundo para determinar la posición del plasma respecto del limitador toroidal ("groove") y del limitador móvil. El sistema completo consta además de un monitor en color y un grabador de vídeo profesional, ambos situados en la sala de control. El sistema permite la grabación automatizada de las descargas, quedando etiquetada en la imagen la hora exacta de cada descarga para su posterior identificación(ver figuras 5a y 5b).

-Espectroscopía visible con resolución espacial

La cámara CCD antes mencionada, u otra más sensible que se adquiriera en un futuro próximo, junto con una serie de filtros interferenciales ya adquiridos, realizarán medidas en dos dimensiones de:

- flujos de plasma (filtro de $H\alpha$);
- flujo de potencia convectiva (filtro IR);
- densidad y temperatura electrónica (3 filtros de HeI).

Una tarjeta de digitalización de imágenes para estación de trabajo Alpha ha sido adquirida para el procesamiento de las imágenes.

Control de carga térmica

La tarea principal de los limitadores móviles del TJ-II es reducir los flujos térmicos incidentes sobre las protecciones de la cámara de vacío en la región convexa de las bobinas centrales ("groove"). En caso de retirar los limitadores móviles esta región actúa como limitador del plasma y recibiría prácticamente toda la potencia convectiva. Lo primero es aclarar cuales son los límites y consecuencias de cargas térmicas elevadas sobre las superficies expuestas al plasma. El límite superior admisible viene dado por que la temperatura máxima que pueda alcanzar localmente esa superficie sea siempre inferior a la temperatura de sublimación del material de que ésta consta. Esto es por dos motivos: primero, por la degradación de la pieza expuesta, y segundo, por que el flujo de impurezas de la superficie provocaría un colapso radiativo del plasma. Existe otro límite superior para el incremento de temperatura mucho más sutil, pero sin lugar a dudas importante: el de la desorción de gases por una superficie debido a un calentamiento local de ésta. Conviene recordar que un incremento local de temperatura puede desorber la suficiente cantidad de impurezas ó hidrógeno como para degradar la decarga ó incluso colapsarla. Por ello la primera regla a seguir es simplemente, reducir al máximo los calentamientos locales sobre todo en piezas que puedan tener tasas altas de desorción, o sea, estén mal acondicionadas.

El flujo de calor (expresado en unidades de potencia por unidad de superficie) que escapa del plasma en los actuales dispositivos de fusión es principalmente de dos tipos: radiativo y convectivo. Ambos suelen tener un valor global del mismo orden y para los cálculos que aquí se presentarán será igual al 50% de la potencia inyectada para ambos términos. Dado que el flujo de calor radiativo es en primer orden isotrópico (excepto para descargas de muy alta densidad electrónica), mientras que el flujo de calor por convección del plasma se localiza principalmente en las superficies que actúan de limitador, se puede desprestigiar en el cálculo de cargas térmicas sobre los limitadores el término radiativo. Es decir: el calor es principalmente transportado por las partículas cargadas siguiendo las líneas de campo. El flujo paralelo de calor en la separatriz $F_q(a)$ viene dado por:

$$F_q(a) = \gamma n_i v_i T_i , \quad (3)$$

siendo γ el coeficiente de transferencia de calor del plasma a la superficie (su valor es del orden de 15 para deuterio si el potencial del limitador está puesto a tierra) y está ligado al

potencial relativo plasma-superficie ó “sheath”. n_i , v_i y T_i son la densidad, velocidad paralela y temperatura iónicas en la separatriz respectivamente. El valor absoluto de $F_q(a)$ se ha determinado experimentalmente en numerosos dispositivos de fusión de manera directa por calorimetría ó termografía e indirecta a través de la ecuación (3), siendo su valor típicamente de 1-100 MW m⁻². Para TJ-II pueden alcanzarse típicamente valores de 50 MW m⁻² en la fase de inyección de neutros (NBI), ya que la relación potencia inyectada a superficie externa del plasma (densidad de potencia) será tan elevada ó más, que en los mayores dispositivos de fusión: 2 MW en TJ-II corresponden en densidad de potencia a 40 MW en JET (más de la máxima potencia inyectada). Afortunadamente, no solamente es importante el valor absoluto de la potencia, sino también el tiempo que esta es inyectada, es decir, la energía inyectada en la descarga (producto de la potencia y el tiempo). El record de energía inyectada lo ostenta el tokamak superconductor y activamente refrigerado Tore Supra: 2.5 MW durante 2 minutos que hacen aproximadamente 300 MJ! Este valor es muy superior al que se vaya alcanzar en TJ-II jamás (sería un éxito llegar a 1 MJ).

El perfil de flujo de calor paralelo en el S.O.L. viene dado por:

$$F_q(r) = F_q(a) \exp(-(r-a)/\lambda_q), \quad (4)$$

siendo λ_q la longitud característica de decaída exponencial, que está relacionada con las de la densidad λ_n y temperatura λ_T electrónica por:

$$\lambda_q = 2 \lambda_n \lambda_T / (2 \lambda_T + 3 \lambda_n). \quad (5)$$

Por ejemplo, si $\lambda_T = 3$ cm y $\lambda_n = 2$ cm, tendremos una $\lambda_q = 1$ cm. Con los perfiles de densidad y temperatura electrónica deducidos con las sondas Langmuir podremos obtener experimentalmente este parámetro. Esta tarea será extremadamente importante a la hora de diseñar los futuros limitadores optimizados

La obtención de la temperatura a la que ascienda una superficie sometida a un flujo térmico obliga normalmente a cálculos complejos que han de resolverse numéricamente. A continuación se presentan estimaciones, en las que se han hecho simplificaciones importantes, de las temperaturas a las que puedan ascender las superficies de los limitadores. Para un conocimiento más detallado sería necesario contemplar la

conducción del calor a lo largo del limitador y su estructura, que necesitaría de un cálculo de elementos finitos con la geometría exacta del limitador.

Para pulsos de calor suficientemente cortos, la conducción térmica de la superficie al interior del material sólo se realiza a lo largo de un espesor característico, pudiéndose calcular el incremento de temperatura superficial transitoria ΔT_S según,

$$\Delta T_S = 2 p t^{0.5} (\pi k c \rho)^{-0.5} , \quad (6)$$

con: p = densidad de potencia,
 t = duración del pulso,
 k = conductividad térmica del material (ver Apéndice 1),
 c = calor específico del material (ver Apéndice 1),
 ρ = densidad del material (ver Apéndice 1).

A modo de ejemplo (un tanto dramático) para TJ-II: un pulso de $t = 0.3$ s con una densidad de potencia $p = 50$ MW m⁻² en la separatriz produciría sobre superficies perpendiculares al flujo incrementos de temperatura por descarga del orden de 5000 °K para acero inoxidable, de 2000 °K para grafito y 3000 °K para tungsteno. Podemos sacar una primera conclusión: evitar el acero inoxidable en superficies que reciban altas densidades de potencia si no se quieren hacer experimentos de evaporación! La segunda conclusión: es necesario optimizar el diseño de un limitador expuesto a flujos térmicos importantes, homogenizando la densidad de potencia sobre la máxima superficie posible. En la figura 6a se muestra el perfil de la cabeza del limitador móvil en dirección $y(r)$ (prácticamente coincide con la dirección del campo magnético). Se ha definido un sistema de ejes de coordenadas que describe la geometría y que se muestra en la figura 6b. La función del perfil viene dada por:

$$y(r) = y_0 \exp ((r-a)/\lambda_q), \quad (7)$$

siendo y_0 la mitad de la extensión toroidal del limitador ($y_0 = 45$ mm en nuestro caso) y λ_q la longitud característica de decaída exponencial del flujo térmico. El flujo de calor paralelo se describe según la ecuación vectorial (*cursiva negrita indica vector*):

$$F(r) = F_q(a) \exp (-(r-a)/\lambda_q) (\mathbf{u}_B \mathbf{u}_N) \mathbf{u}_B , \quad (8)$$

siendo u_B y u_N los vectores unitarios del campo magnético y de la normal a la superficie en r . Optimizar el perfil significa que el flujo incidente de calor sea constante por unidad de superficie en el limitador y para ello es necesario conocer λ_q . Para las cabezas actuales se ha estimado $\lambda_q = 5$ mm en TJ-II, por supuesto en ausencia de datos experimentales! Este punto será imprescindible de analizar experimentalmente para el diseño de los futuros limitadores optimizados.

De manera similar, el perfil poloidal del limitador debe homogenizar la deposición de potencia. Desgraciadamente, las cabezas de los limitadores tienen perfil plano en dicha coordenada, por lo que el plasma sólo "tocará" en un punto. Esto conllevará a una eficiencia relativamente baja de los limitadores, que según estimaciones preliminares tendrán una eficacia de extracción de potencia por limitador:

$$\alpha = P_{LM} / P_{CONV} \leq 10\% , \quad (9)$$

con: P_{LM} = potencia extraída por limitador.

P_{CONV} = potencia convectiva que escapa del plasma;

y eso sin contar efectos de sombras de un limitador sobre otro. Hay que recordar que estas estimaciones se han hecho para $d = 5$ mm y $\lambda_q = 5$ mm, y que sólo medidas experimentales de calorimetría podrán confirmar este hecho. Como consecuencia, la distribución de carga térmica será poco homogénea a lo largo de la coordenada x del limitador (ver definición de coordenadas en la figura 6b). La distribución se obtiene haciendo un cambio de coordenadas en la ecuación (8) y tomando la aproximación que el radio menor del plasma a es constante para ángulos poloidal $0 < \Theta < \Theta_0/2$, obteniéndose:

$$F(x) = F_q(z_0) \exp (-(x^2 + a^2)^{1/2} - a) / \lambda_q) . \quad (10)$$

La coordenada z representa la coordenada vertical y para $\Theta = 0$ corresponde con r . En la figura 7 se ha representado la distribución normalizada en el origen del flujo térmico sobre una mitad del limitador a lo largo de x para $a = 100$ mm y $\lambda_q = 5$ mm. Cabe resaltar la poca homogeneidad de la carga térmica: los dos bloques centrales ($0 < x < 40$ mm) tendrán que absorber el 90% de la energía, mientras que los 3 exteriores sólo reciben un 10%. Este resultado nos indica la necesidad de optimizar este perfil en el diseño de las futuras cabezas.

Nota: La distribución exacta solamente se podrá conocer analizando resultados experimentales, ya que ésta dependerá de λ_q , así como de la posición relativa limitador móvil-limitador toroidal.

En la figura 8 se ha representado para las mismas condiciones una simulación de la vista tangencial de la distribución de flujo térmico. A partir de ésta, podría calcularse la distribución de temperaturas en el limitador (suponiendo un valor para $F_q(a)$). Sin embargo, resultaría poco realista hacerlo utilizando la fórmula (4), que sirve para obtener incrementos de temperatura superficiales ΔT_S debido a pulsos suficientemente cortos. El efecto de hacer una serie de pulsos repetitivos produce un calentamiento del volumen del limitador a una temperatura T_V debido a la conducción del calor de la superficie al interior del bloque que habrá que tener en cuenta. Dado que el tiempo entre descargas en TJ-II será del orden de 300 s (valor mínimo nominal), puede demostrarse que durante este tiempo la temperatura en el bloque se habrá homogenizado por conducción del calor, pudiéndose hablar de una temperatura global de la cabeza T_V (el tiempo de homogenización de la temperatura en el volumen se puede estimar en unas decenas de segundo, que es muy inferior al tiempo entre descargas). Para calcular T_V es necesario tener en cuenta la radiación del calor (radiación de cuerpo negro expresada por la ley de Stefan-Boltzmann) en todas las superficies, así como la conducción del calor a lo largo de la estructura del limitador y de ésta a la cámara del TJ-II. Para estimar este último término es necesario un cálculo complejo, siendo necesario introducir la geometría exacta de toda la estructura del limitador en un código que calcule numéricamente la ecuación diferencial del calor por el método de los elementos finitos. Dado que esto no está en el ánimo de un servidor, se ha decidido despreciar este término y obtener así un límite superior de la temperatura T_V de la cabeza del limitador. Esta aproximación será más correcta a altas temperaturas ($T_V > 400$ °C), ya que el término radiativo aumenta con T^4 . De todas maneras los tubos que sujetan la cabeza, al ser estrechos (2 mm de pared), largos (900 mm) y de acero inoxidable (que es un relativamente mal conductor), harán de barrera de conducción del calor, por lo que se espera un gradiente térmico importante entre las cabezas y las tapas de vacío del limitador. Con estas condiciones simplificadas la ecuación del calor viene dada :

$$\rho V c (dT_V/dt) = F_q^{DC} - \epsilon \sigma A T_V^4, \quad (11)$$

siendo:

- ρ = densidad del material;
- V = volumen de la cabeza del limitador;
- c = calor específico del material;
- F_q^{DC} = flujo de calor total en continua sobre la cabeza;
- ϵ = emisividad de la superficie;
- σ = cte. de Stefan-Boltzmann;
- A = superficie de la cabeza;

Esta ecuación es un balance de potencia, en el que se expresa que el cambio de energía interna en el bloque de la cabeza del limitador es igual al flujo de calor que le llega menos la potencia radiada superficialmente. El "truco" es convertir la potencia total que le llega al limitador en forma de pulsos F_q^P en una potencia continua (DC) F_q^{DC} :

$$F_q^{DC} = (t_p/\Delta t) F_q^P, \quad (12)$$

siendo t_p la duración del pulso ó descarga y Δt el intervalo de tiempo entre ellas. Dado que F_q^P no se conoce, hemos de estimarla:

$$F_q^P = \alpha \beta P^{IN}, \quad (13)$$

siendo α la eficacia de extracción de potencia del limitador (hemos supuesto que 10% por cada limitador), β la fracción de potencia convectiva (50%, aunque puede ser superior) y P^{IN} la potencia inyectada en la descarga. Una vez que se introducen todos los parámetros en la ecuación (11), se resuelve numéricamente, obteniéndose la evolución temporal de T_V . Finalmente, tendremos que sumar ΔT_S obtenida en la separatriz (máxima flujo de calor) a T_V , dado que nosotros estamos interesados en la máxima temperatura local que se alcanza en el limitador T_{Max} (esquemáticamente en la figura 9). Se han realizado unos cuantos ejemplos prácticos para las cabezas de acero inoxidable y otras supuestamente de grafito, así como para dos potencias inyectadas, 400 kW y 2 MW durante 0.3 s. En la figura 10 tenemos la evolución temporal de T_V , a la que se ha sumado ΔT_S para las cabezas de acero inoxidable. Puede observarse que:

- el tiempo de equilibrio de T_V es de alrededor de 5 horas de operación;

- la temperatura máxima ($T_{\text{Max}} = \Delta T_S + T_V$) es de aproximadamente $T_{\text{Max}} \approx 600$ °C para el caso de 400 kW y de $T_{\text{Max}} \approx 1300$ °C para 2MW.

Para las cabezas de grafito (figura 11) el tiempo de equilibrio es mucho menor (típicamente 1 hora) y $T_{\text{Max}} \approx 700$ °C para el caso de máxima potencia inyectada.

Aunque el modelo presentado sea simplificado y además se parta de parámetros que han de medirse experimentalmente y una estimación puede dar lugar a un error considerable (flujo de calor, eficiencia del limitador, etc.) puede concluirse que para la fase ECH ($P^{\text{IN}} < 400$ kW en $t < 0.3$ s) las cabezas de acero inoxidable no llegarán a la temperatura superficial de evaporación, aunque si lo podrán hacer en la fase de NBI ($P^{\text{IN}} = 2$ MW en 0.5 s). Para esta última fase será conveniente pasar a materiales compuestos de carbono, que resisten mejor las altas temperaturas y además se calientan menos. Además, este tipo de materiales son los que mejor comportamiento tienen a la hora de optimizar el control de partículas (ver siguiente sección) y el control de impurezas (futuro informe).

Control de partículas

El control de partículas en los dispositivos experimentales de fusión es necesario para controlar de densidad del plasma y en los futuros reactores además, deberá bombear el helio del plasma (cenizas de la reacción nuclear deuterio-tritio) a un ritmo suficientemente elevado como para no diluir el combustible. Es un punto importante, y de nuevo, va a más, a medida que se aumenta la potencia y la duración de la descarga.

El balance global de partículas tiene en cuenta, por un lado la inyección de partículas neutras, y por otro, su bombeo. En TJ-II la inyección se realiza con ayuda de válvulas de gas (H_2 ó D_2 en general) y en la fase de NBI tendremos también la contribución de los neutros energéticos. Para el caso de TJ-II (ausencia de bombeo activo), el valor absoluto del flujo de partículas neutras a inyectar Γ_{iny} viene dado por:

$$\Gamma_{\text{iny}} = N_P (1 - f R) / (\tau_P f), \quad (14)$$

N_P = número de partículas en el plasma;

f = eficiencia de fueling;

R = coeficiente de reciclado;

τ_p = tiempo de confinamiento de partículas.

Introduciendo valores aproximados en esta ecuación tendremos para TJ-II, $\Gamma_{iny} \approx 10^{21}$ partículas/s ó 10 mbar l/s de H₂ ó D₂. En función del estado de la pared (R), se consigue un cierto nivel de densidad inyectando más ó menos gas. Para una pared completamente saturada (R = 1), sólomente habrá que inyectar gas para la fase de ionización y posteriormente cerrar la valvula (sí bien se opera con mayor comodidad inyectando gas en cantidad).

La contribución relativa de neutros inyectados por NBI es del mismo orden: $\Gamma_{iny} \approx 5 \times 10^{20}$ partículas/s para la máxima potencia. Si el reciclado de la primera pared sube a valores próximos a R = 1, que es el estado de equilibrio plasma-pared, la inyección de potencia lleva consigo una inyección de partículas, que no puede ser controlada simplemente cortando la inyección de gas. Esto conllevaría a un incremento indeseado de la densidad del plasma y puede que al límite de densidad y al colapso radiativo de la descarga. Es por tanto necesario un método para el control de partículas para la fase de inyección de neutros.

Existe desgraciadamente otro término de inyección que no es controlable fácilmente: la desorción superficial inducida por calentamiento de un material expuesto al plasma ó al haz NBI. Este término puede producir el colapso de la descarga si se alcanza el límite de densidad. Ocurre principalmente en descargas con alta inyección de energía (producto de potencia por tiempo), generalmente en máquinas grandes. Se prevee, para compensar estos incrementos de densidad, incorporar sistemas de bombeo activo acoplados a limitadores ó divertores. En TJ-II la densidad de potencia puede ser suficientemente elevada como para que éste término fuente sea importante, dificultando el control de partículas.

Dado que no hay previsto ningún sistema de bombeo activo, será necesario utilizar el acondicionamiento de las superficies próximas al plasma para conseguir el bombeo de la pared ó bombeo pasivo. La cantidad de hidrógeno ó deuterio aproximado que puede absorber una superficie bien acondicionada es de $n_s = 10^{17}$ H/cm² para materiales compuestos de carbono y $n_s = 10^{16}$ H/cm² para acero inoxidable (para temperaturas superficiales menores de 300°C). Se considera una superficie "bien acondicionada" si tiene un coeficiente de reciclado $R < 0.9$, cosa que se consigue con ayuda de una descarga de tipo "glow discharge"

(descarga luminiscente) en helio durante típicamente unas cuantas horas. Como los limitadores móviles tienen una superficie de contacto pequeña, no tendrán una gran capacidad de bombeo y habrá que contar con el limitador toroidal para esta tarea. ¿Cuanto tiempo durará en TJ-II el bombeo de pared eficaz por acondicionamiento ? La cantidad total de hidrógeno depositado en la superficie NHS por descarga es:

$$NHS = (1 - R) N_P t / \tau_P , \quad (15)$$

que para descargas con buen bombeo pasivo ($0.8 < R < 0.9$) tiene un valor promedio de $NHS \approx 3 \times 10^{19}$ H. El número de descargas N con pared de superficie S bien acondicionada ($R < 0.9$) después de una desaturación completa del hidrógeno de lka pared será,

$$N = n_s S / NHS . \quad (16)$$

Suponiendo un área de interacción del limitador toroidal de 2×10^4 cm² el número de descargas con buen control de densidad será del orden de $N \approx 10$ para protecciones de acero inoxidable y $N \approx 100$ si son de compuestos de carbono. Esto nos indica que para la fase de NBI, en la que el control de densidad puede ser especialmente crítico, habrá que contar con el limitador toroidal fabricadas con compuestos de carbono y además con el acondicionamiento de la pared con descargas de desaturación de helio al menos cada 100 pulsos (cosa bastante razonable). El modo de acondicionamiento típico en otros dispositivos de mismas características que TJ-II y aconsejable aquí también es el de una boronización cuando el nivel de oxígeno en el plasma sea más elevado que el carbono y "glow discharge " de helio nocturno. No obstante no hay que descartar que sea necesario ó conveniente instalar un sistema de bombeo activo. En la última sección se hace una proposición de instalar un sistema de de bombeo tipo "Ti-getter" en un limitador móvil (figura 13).

Configuración tipo divertor en TJ-II

El control de la interacción plasma-pared puede conseguirse en una configuración distinta de la del limitador: la de tipo divertor. Esta se define que ocurre cuando la separatriz no "toca" el limitador. Se crea una región de plasma S.O.L. entre limitador (que en este caso se denomina "placa del divertor") y la última superficie magnética cerrada. En general puede decirse que la

configuración divertor es más ventajosa, siendo la más utilizada en todas las máquinas grandes actuales. Así lo harán también los futuros reactores, como p.ej. ITER. En los tokamaks el divertor axis-simétrico da las mejores prestaciones en cuanto a control de potencia, partículas e impurezas. El éxito del divertor reside en crear un plasma S.O.L. que está desacoplado del plasma central, que es de alta densidad y baja temperatura electrónica para reducir la pulverización ó "sputtering" de las placas del divertor, apantallar los flujos de impurezas (ionización y difusión a la pared) y crear un manto radiativo que reduzca la potencia convectiva sobre las placas de los divertores (ASDEX-U, DIII-D, JT-60, JET, etc.). Pero y en los stellerators? Existen pocos resultados concluyentes, principalmente porque no hay grandes stellerators para probar los divertores (para ello es necesario que la máquina sea grande, que tenga alta potencia y pulsos largos). Existen numerosos estudios teóricos, así como experimentos preliminares antes de que sean probados en los futuros stellerators grandes como LHD y WS-7X. Un gran problema en el diseño de los futuros divertores de los stellerators será el de la falta de simetría toroidal, siendo necesario el uso de geometría de tres dimensiones. Sin duda, los resultados globales de estas máquinas dependerán en gran medida de la eficiencia de sus divertores. Existen tres diferentes posibles configuraciones de divertor en stellerators: ergódico, de islas naturales (N.I.D.) y de islas locales (L.I.D.). En TJ-II se podrá estudiar la segunda, que está basada en tener una transformada rotacional racional al interior del radio del limitador (ver figura 12a). Se ha encontrado una configuración de este tipo con islas de orden 2, que tiene un plasma con un radio menor hasta la separatriz del orden de 20 cm. Esto último es importante, ya que se trata de incrementar el plasma de borde (mal confinamiento) para desacoplar la interacción plasma-pared, sin fuerte reducción en el volumen del plasma bien confinado. El principal defecto es que la posición poloidal de las islas, que es dónde se concentran los flujos de partículas, no coinciden con los limitadores en su posición actual en A3 y C3 (ver figura 12a). Se esperaría por tanto que en esta configuración gran parte de la interacción plasma-pared se produzca en vez de sobre los limitadores, en distintas regiones de la cámara de vacío, tal y como ocurrió en W7-AS. Todo esto podría ser estudiado en la fase BCH (baja inyección de potencia) sin ningún peligro y ver si debido al plasma de tipo divertor en el S.O.L. se produce un escenario favorable de operación (por ejemplo la reducción de Z_{eff}). De confirmarse esto debería estudiarse la posibilidad de cambiar en un futuro los limitadores a otra posición optimizada (ver en la figura 12b para $\theta = 45^\circ$ (tapas A/C 4 ó A/C 5) ó encontrar una

configuración cuyas islas en el borde coincidan en posición con los LM.

Optimización de limitadores

Para la fase en la que se inyecta del orden de 1.5 MW al plasma por NBI es necesario cambiar las cabezas de los limitadores móviles a otras realizadas con un material de baja Z, en principio carbono. Esto es necesario principalmente para reducir al máximo la Z_{eff} del plasma (contaminación efectiva del plasma). En ese momento se puede aprovechar para hacer mejoras en el diseño de la cabeza, algunas de las cuales se presentan aquí. Estas modificaciones han de estar apoyadas en las medidas experimentales obtenidas en la campaña con los actuales limitadores. Se propone principalmente (ver figura 13):

- Elección del material del limitador, teniendo para ello principalmente en cuenta la optimización del control de impurezas. La elección más conservadora (y segura) sería la de grafito ó fibra de carbono (CFC).
- Revisar el perfil toroidal, ajustándolo a las longitudes características del flujo térmico medido experimentalmente para los escenarios dónde se prevea mayor calentamiento superficial.
- Dar al limitador un perfil poloidal con un radio de curvatura que se ajuste lo mejor posible a las distintas configuraciones. En caso de que fuera innecesario el giro poloidal que tiene actualmente, eliminar este mecanismo. Esto simplificaría la operación, principalmente si se automatizan con motores.
- Maximizar la superficie de la base del limitador, ajustándolo a 10 mm de la garganta por cada lado (base trapezoidal).
- Rediseñar los diagnósticos de la cabeza del limitador, así como los cables y pasamuros con ayuda de la experiencia obtenida en la primera fase. Las sondas langmuir deberían ser de carbono y de mayor grosor para aguantar mejor las elevadas cargas térmicas.

El objetivo de estas modificaciones es optimizar la cabeza de los limitadores de manera que sean más eficaces, es decir, puedan recibir más potencia por limitador sin "recortar" el tamaño del plasma. Esto ha de lograrse maximizando la superficie de contacto pero uniformizando el perfil de temperatura en la máxima superficie de contacto posible. Unos primeros cálculos estiman que

con las anteriores modificaciones se podría aumentar en un factor tres a cinco la eficacia de los limitadores móviles, es decir, a misma introducción de los limitadores los optimizados serían interaccionarían con el plasma tres a cinco veces más. Cabría discutir entonces la posibilidad de reducir a dos el número de limitadores, con el consiguiente ahorro en trabajo y coste durante la instalación y explotación de los nuevos limitadores. No hay que descartar la posible conveniencia de cambiar las posiciones de los limitadores de tapa. Además se debe estudiar con la experiencia de operación de TJ-II, si sería recomendable un sistema de bombeo activo para el control de densidad. Aquí se ha presentado una solución relativamente económica y sencilla: la integración en los LM de un sistema de bombeo tipo "Ti-getter" (ver figura 14).

Conclusiones

Las conclusiones principales son para la fase de baja inyección de potencia (ECH):

- Las cargas térmicas sobre la cámara de vacío y sus protecciones (limitador toroidal) no son excesivas, pero aún así podrá controlarse mejor con los limitadores móviles (evitando p. ej. degasificación local), debido al perfil radial que homogeniza la densidad de potencia mejor que las posibles aristas de las protecciones. El posible efecto positivo de meterlos en el plasma deberá ser estudiado.
- Una campaña experimental con los diagnósticos descritos deberán dar información acerca de los parámetros del plasma del S.O.L. y su correlación con los parámetros del plasma central. Esta información será imprescindible para la optimización de los limitadores.
- Un estudio deberá relacionar los parámetros centrales del plasma y la posición de los limitadores (toroidal y/o móvil), así como con la configuración magnética (divertor / limitador).
- Es necesario un nuevo diseño de los limitadores; las modificaciones a hacer se han argumentado aquí. El material será carbono (grafito ó CFC) y será absolutamente necesario darle un perfil poloidal optimizado para mejorar la actual pobre eficacia de interacción con el plasma.

Para la fase de alta inyección de potencia (NBI):

- La densidad de potencia sobre los materiales puede llegar a ser muy elevada y es recomendable un nuevo diseño de las cabezas de los limitadores que puedan disipar por ejemplo un 50% de la potencia convectiva. Esto sería imposible con el actual diseño, que no homogeniza suficientemente la distribución poloidal de la carga

térmica. Además un primer cálculo estima que puede superarse la temperatura de fusión del acero inoxidable (material actualmente utilizado) para 2 MW de potencia inyectada, siendo aconsejable pasar a materiales compuestos de carbono ó carbono/boro..

- El control de partículas dependerá exclusivamente del acondicionamiento de la primera pared (boronización + descargas de helio). Deberá hacerse con ayuda del limitador toroidal, que siendo de carbono y bien acondicionado con descargas de helio podrá bombear de manera pasiva durante aproximadamente 100 descargas. Esto será especialmente crítico en la fase de NBI, en la que la inyección de potencia conlleva inyección continua de partículas en el plasma. Otro término fuente no controlable será la desorción superficial inducida por calentamientos locales en la cámara ó limitadores ("puntos calientes"). No se descarta la necesidad de un sistema de bombeo activo, que podría instalarse directamente en los limitadores móviles.

- Los estudios de correlación potencia inyectada - parámetros del plasma, optimizando la interacción plasma-pared, deberán predecir si se puede incrementar la potencia en TJ-II a más de 2 MW en un futuro (muy lejano).

Referencias

Como referencia técnica de los limitadores móviles:

"Los limitadores móviles del TJ-II: montaje, diseño de cabezas diagnosticadas y posibles mejoras", E. de la Cal y F. López Mántaras, informe interno Asociación EURATOM-Ciemat (1998).

Como referencia teórica se recomiendan distintos capítulos de:

"Physics of Plasma-Wall Interaction", edited by D.E. Post and R. Behrisch, NATO ASI Series B: Physics, Vol. 131, Plenum Press (1984).

Futuras publicaciones sobre este tema:

"The mobile limiters of the TJ-II stellarator for plasma boundary studies", E. de la Cal et al, aceptado a publicar en J. Nucl. Mater. (1999).

"Longitudes de conexión en TJ-II", A.López Fraguas et al, Report Ciemat a publicar en un futuro próximo.

Agradecimientos

Se agradecen los comentarios a F.L. Tabarés y a D. Tafalla. El grupo de sondas es coautor en todo lo que se refiere a sondas Langmuir (instalación y explotación). Agradezco a A. López Fraguas su colaboración en todo lo que respecta a configuraciones magnéticas y a J.A. Jimenez por ayudarme a resolver numéricamente la ecuación del calor en los limitadores con "Mathematica".

Descripción de las figuras

Figura 1: Vista general de uno de los limitadores.

Figura 2: a) Esquema de corte poloidal del plasma, limitador toroidal (LT) y limitador móvil (LM). b) Diagrama de líneas de campo magnético en la separatriz (línea de trazas), y posición de los limitadores móviles (trazas verticales) y toroidal (línea de puntos).

Figura 3: Densidad electrónica n_e en el S.O.L. en función del radio menor del plasma r para una configuración con $d < 0$ y otra con $a = 100\text{mm}$.

Figura 4: Foto de la cabeza diagnosticada instalada en la cámara de vacío.

Figura 5: Imágenes tomadas con la cámara CCD (vista tangencial): a) en la separatriz ($d = 15\text{ mm}$) y b) limitador móvil retirado $d = 0$.

Figura 6: a) Perfil toroidal de la cabeza del limitador móvil. b) Esquema explicativo del sistema de ejes de coordenadas utilizado para describir la geometría del limitador.

Figura 7: Distribución poloidal de la carga térmica sobre el limitador móvil a lo largo de la coordenada x .

Figura 8: Descripción esquemática de la evolución temporal de T_V , ΔT_S y $T_{Max} = T_V + \Delta T_S$ en una secuencia de descargas.

Figura 9: Evolución temporal de la máxima temperatura superficial del limitador móvil con cabezas de acero inoxidable para descargas de 0.3 s con 400 kW y 2MW de potencia inyectada.

Figura 10: Evolución temporal de la máxima temperatura superficial del limitador móvil con cabezas de grafito para descargas de 0.3 s con 400 kW y 2MW de potencia inyectada.

Figura 11: Una configuración tipo divertor en TJ-II: a) en $\phi = 22.5^\circ$ y b) en $\phi = 45^\circ$.

Figura 12: Los limitadores optimizados.

Figura 13: Esquema de limitadores con bombas de tipo "Ti-getter".

Figura 1: Vista general de uno de los limitadores.

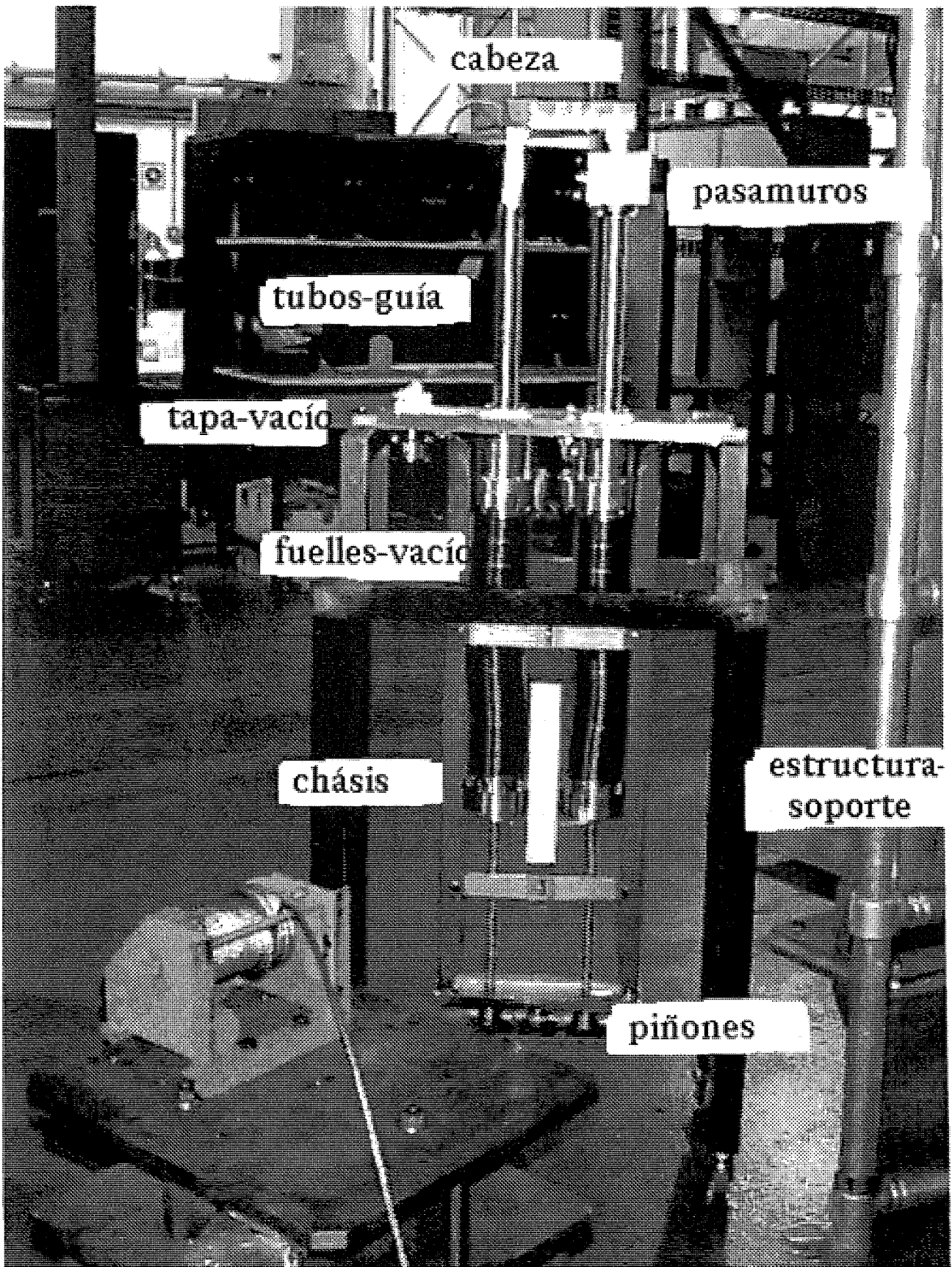


Figura 2: a) Esquema de corte poloidal del plasma, limitador toroidal (LT) y limitador móvil (LM). b) Diagrama de líneas de campo magnético en la separatriz (línea de trazas), y posición de los limitadores móviles (trazas verticales) y toroidal (línea de puntos).

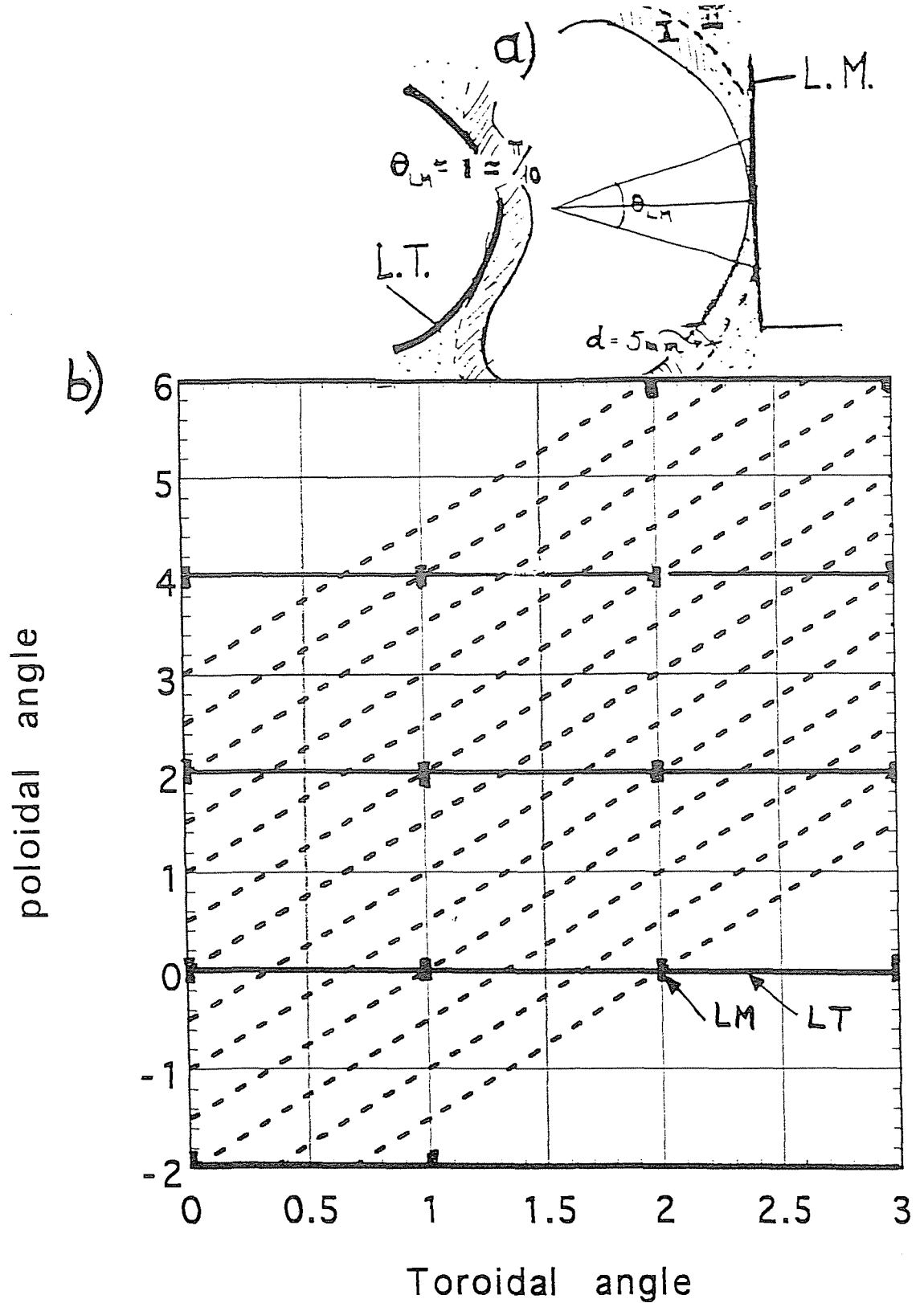


Figura 3: Densidad electrónica n_e en el S.O.L. en función del radio menor del plasma r para una configuración con $d < 0$ y otra con $a = 100\text{mm}$.

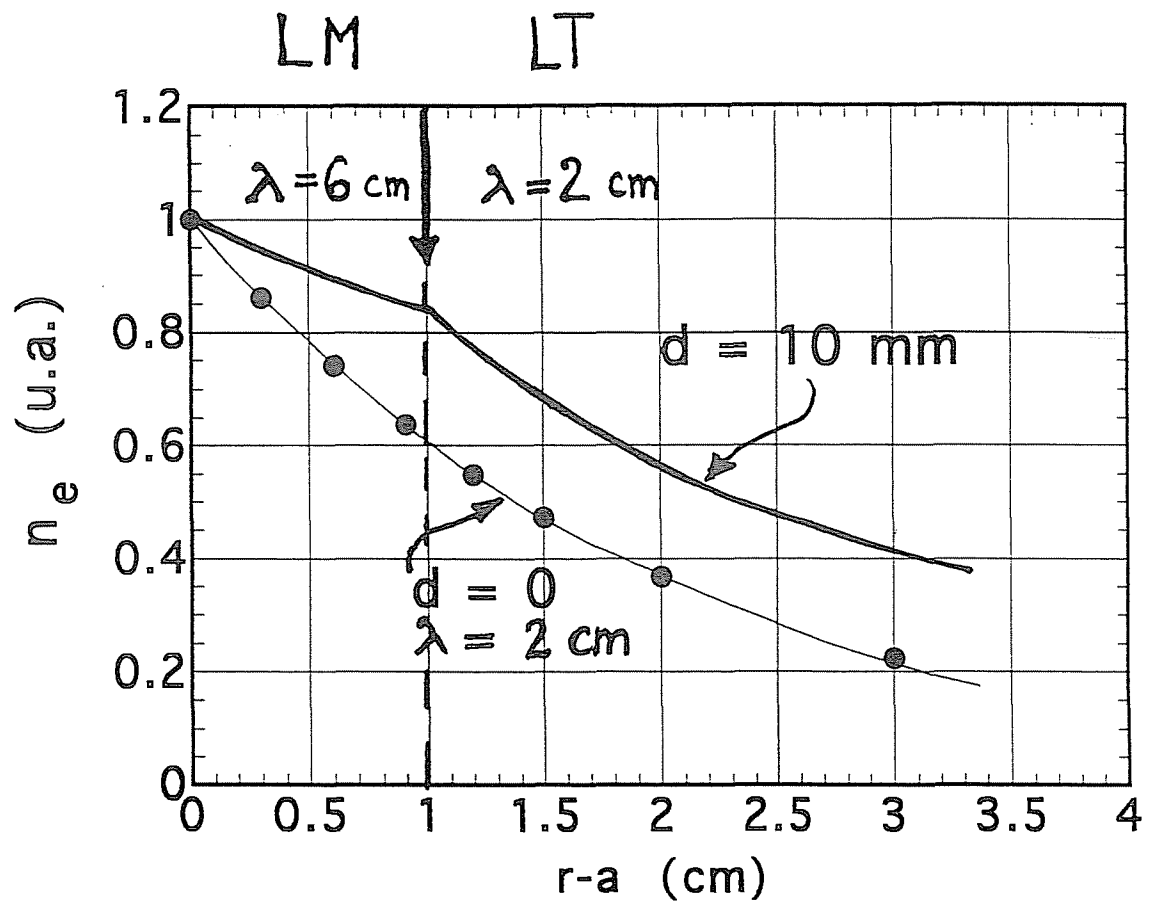


Figura 4: Foto de la cabeza diagnosticada instalada en la cámara de vacío.

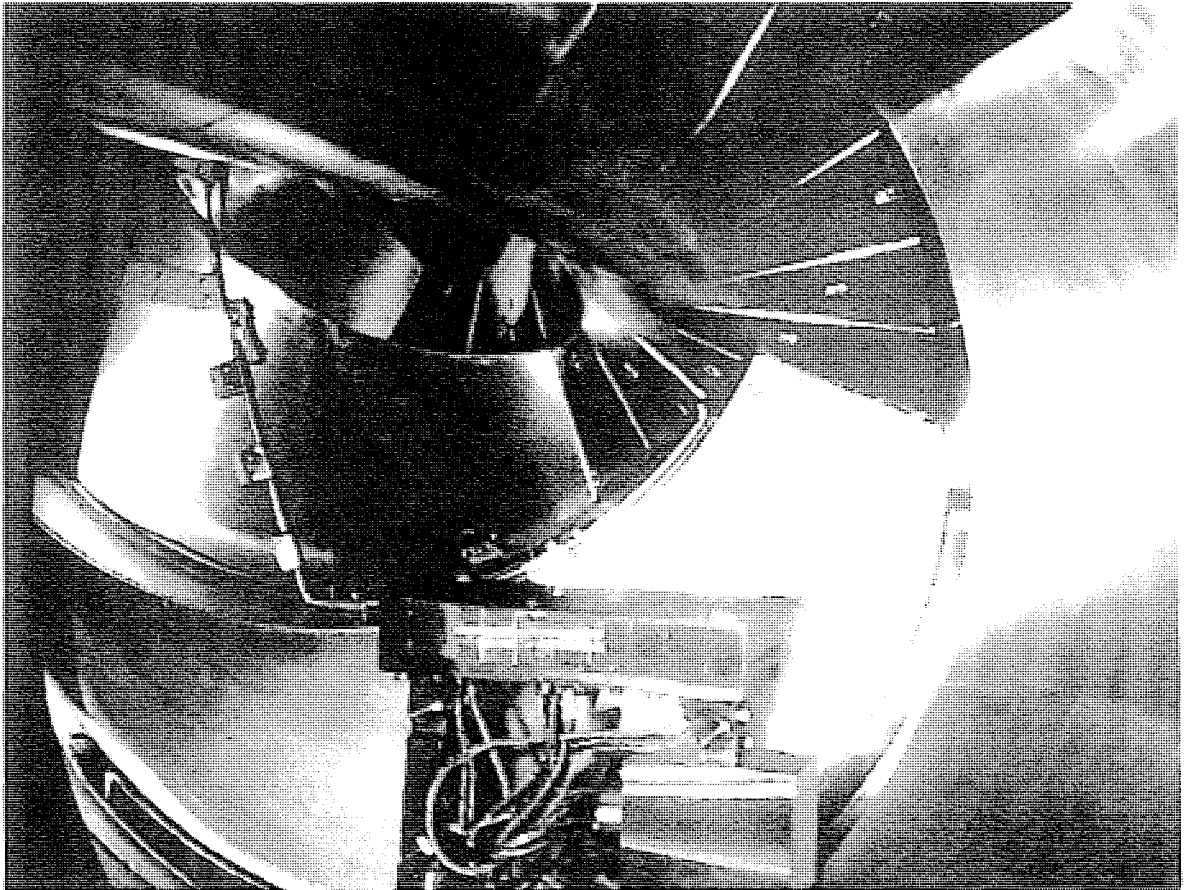
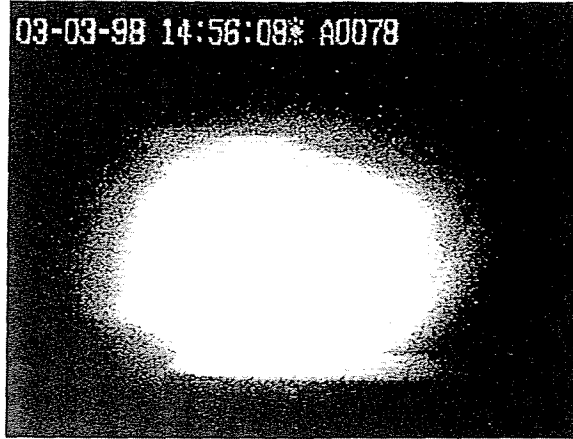


Figura 5: Imágenes tomadas con la cámara CCD (vista tangencial): a) en la separatriz ($d = 15$ mm) y b) limitador móvil retirado $d = 0$.

a)



b)



Figura 6: a) Perfil toroidal de la cabeza del limitador móvil. b) Esquema explicativo del sistema de ejes de coordenadas utilizado para describir la geometría del limitador.

Figura 6a

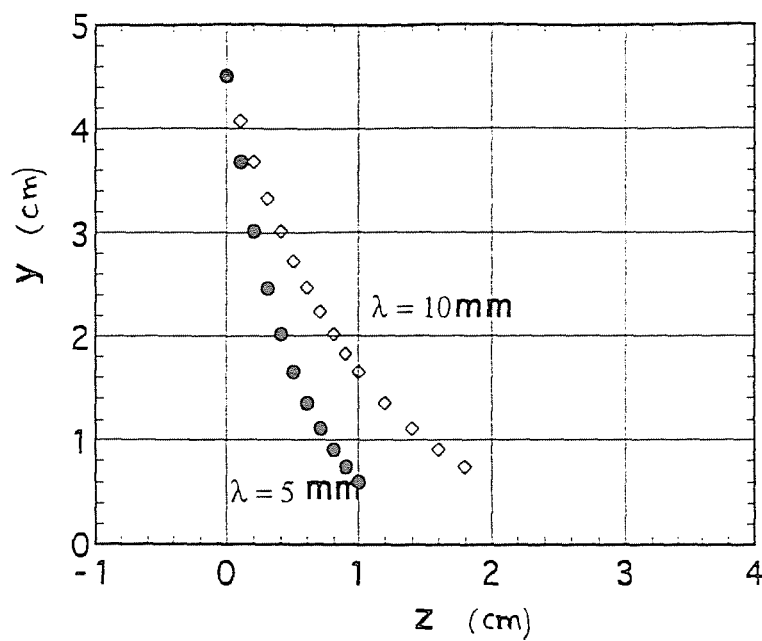


Figura 6b

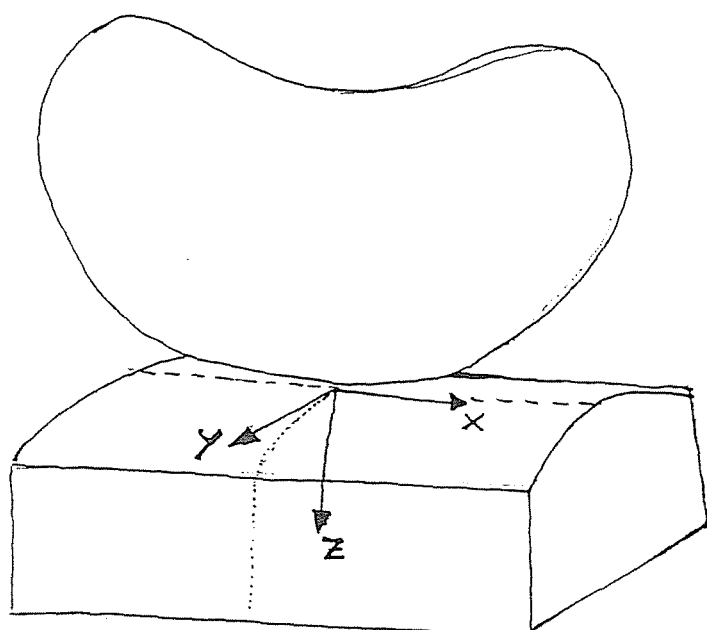


Figura 7: Distribución poloidal de la carga térmica sobre el limitador móvil a lo largo de la coordenada x..

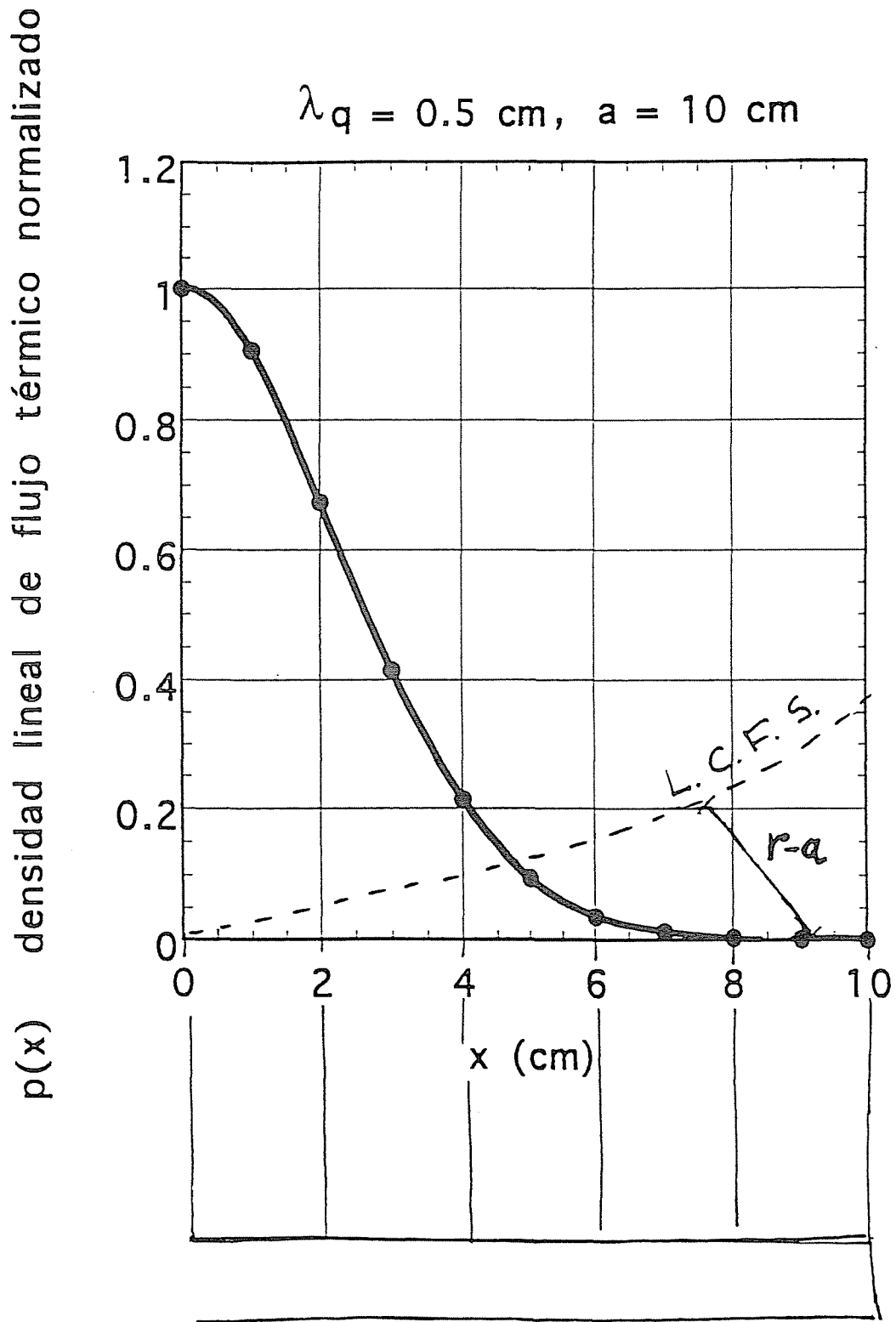


Figura 8: Descripción esquemática de la evolución temporal de T_v , ΔT_s y $T_{Max} = T_v + \Delta T_s$ en una secuencia de descargas.

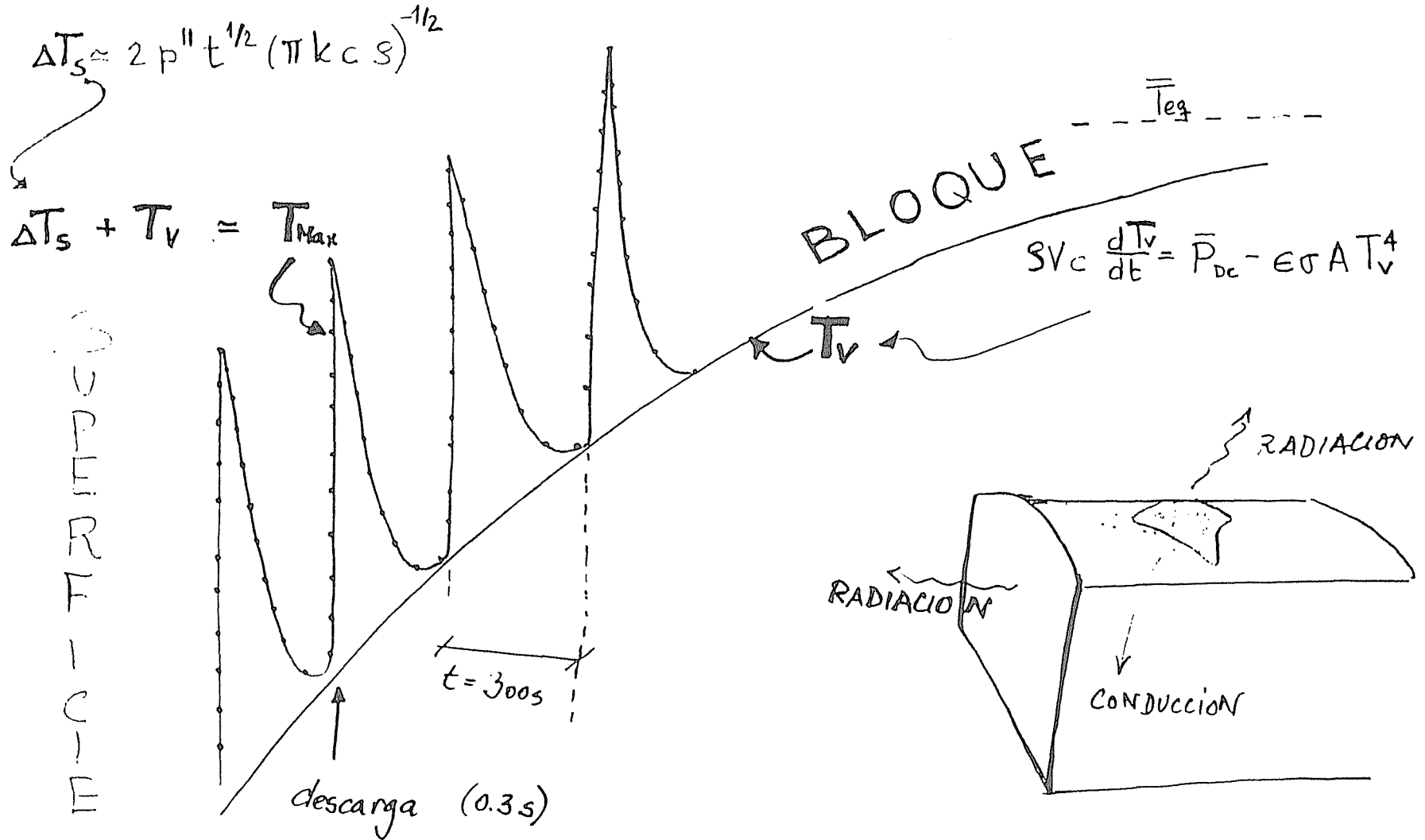


Figura 9: Evolución temporal de la máxima temperatura superficial del limitador móvil con cabezas de acero inoxidable para descargas de 0.3 s con 400 kW y 2MW de potencia inyectada.

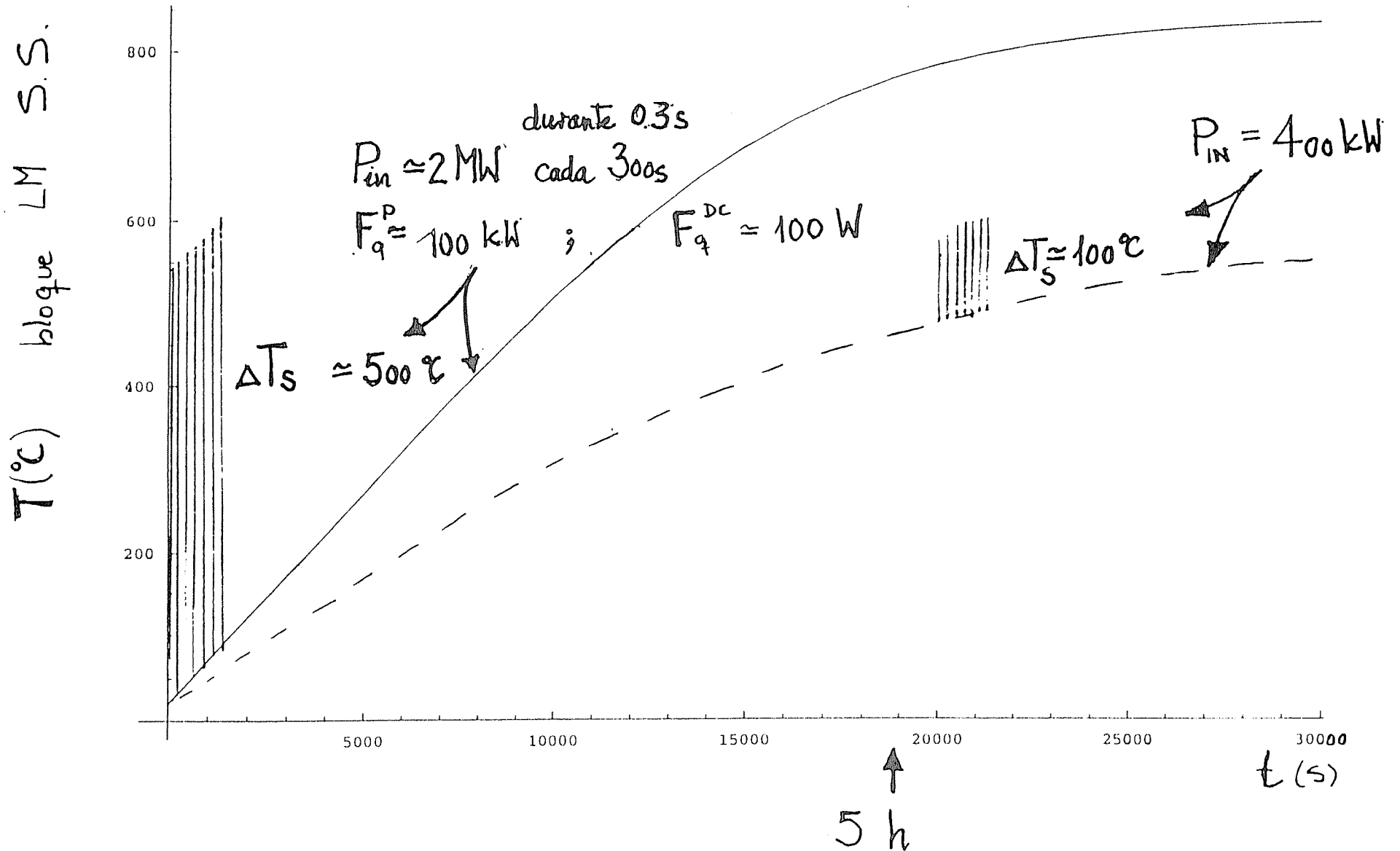
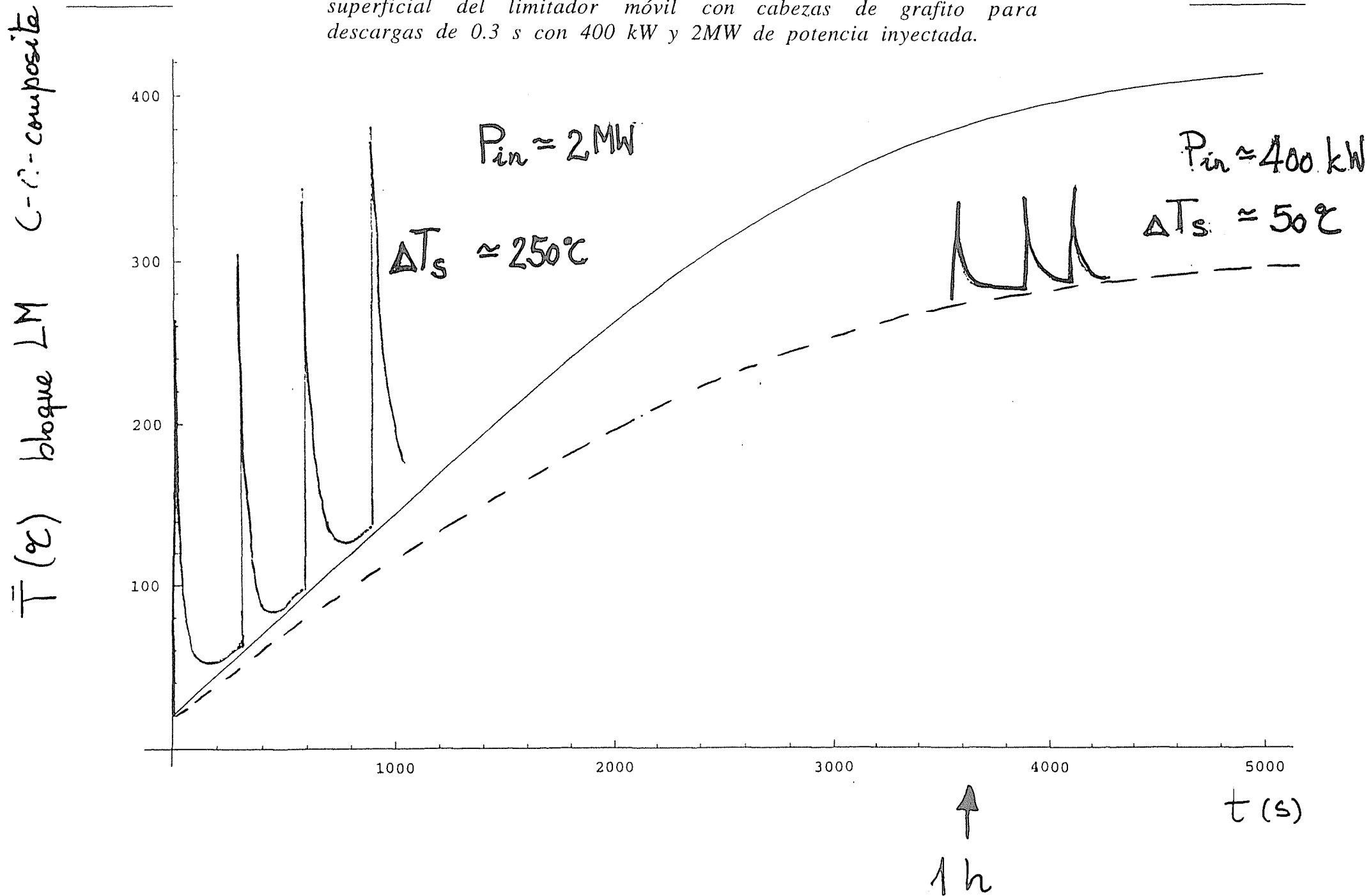


Figura 10: Evolución temporal de la máxima temperatura superficial del limitador móvil con cabezas de grafito para descargas de 0.3 s con 400 kW y 2MW de potencia inyectada.



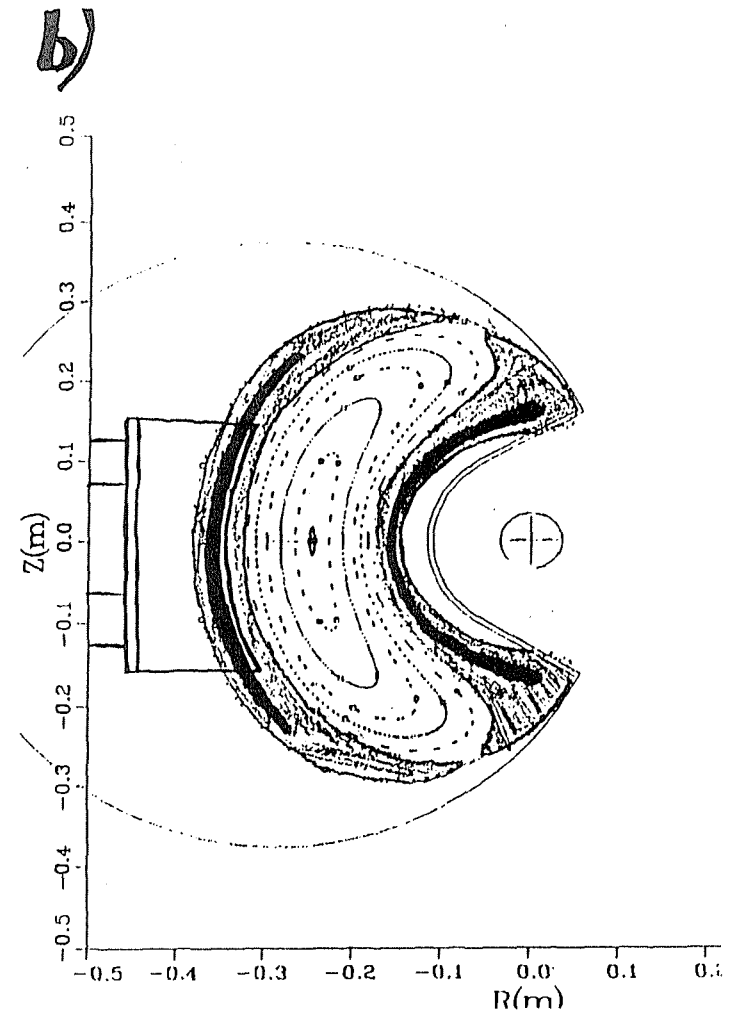
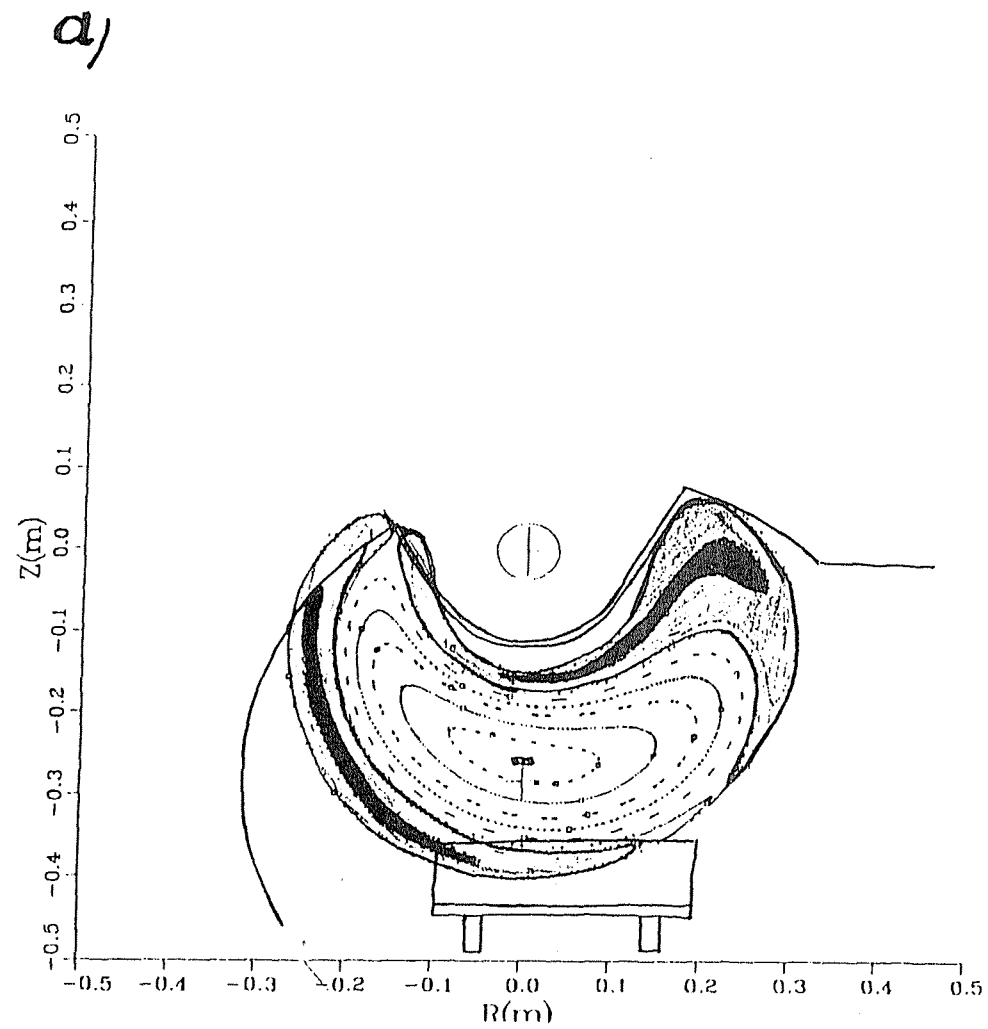


Figura 11: Una configuración tipo divertor en TJ-II: a) en $\phi = 22.5^\circ$ y b) en $\phi = 45^\circ$.

Figura 12: Los limitadores optimizados.

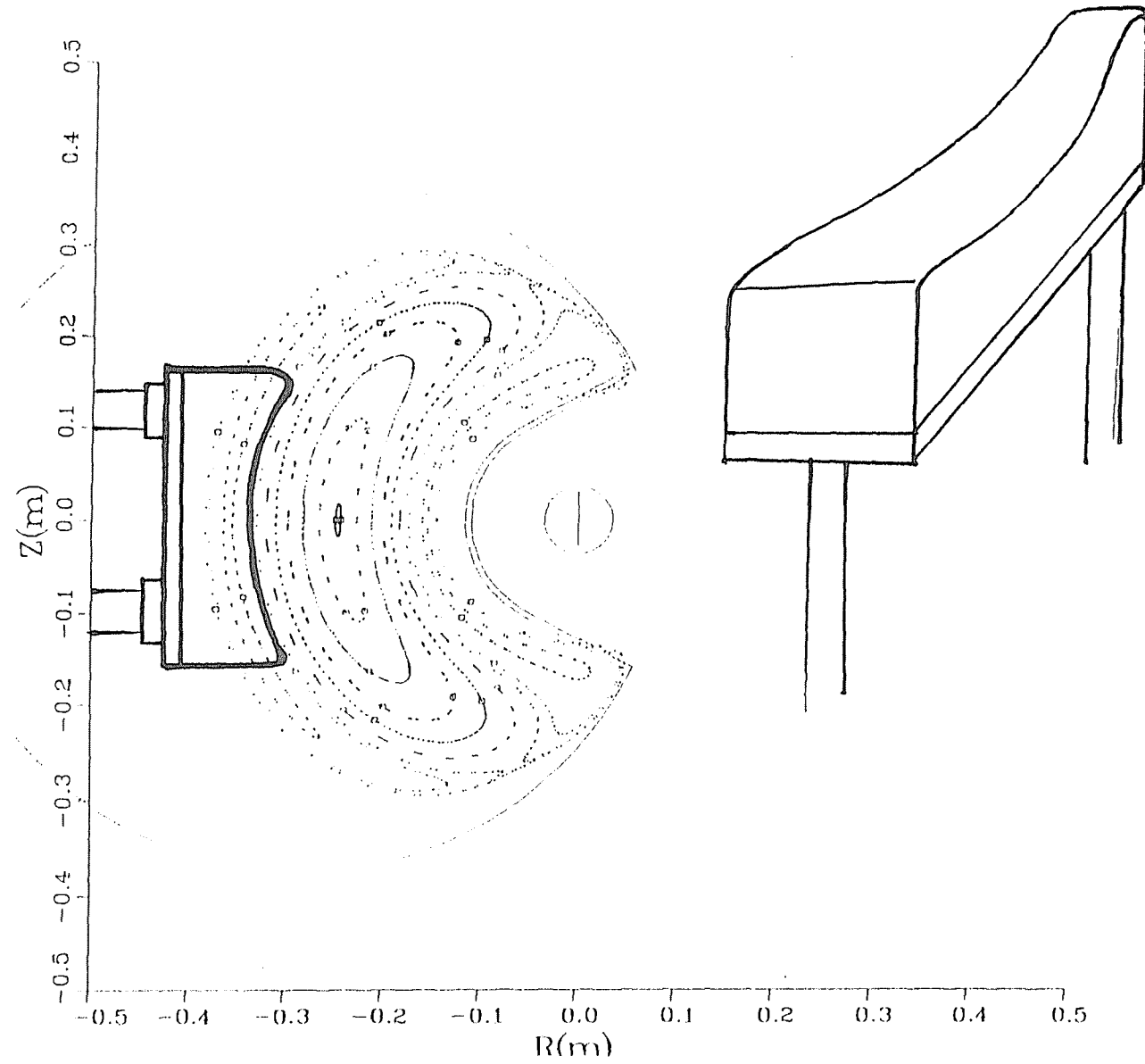
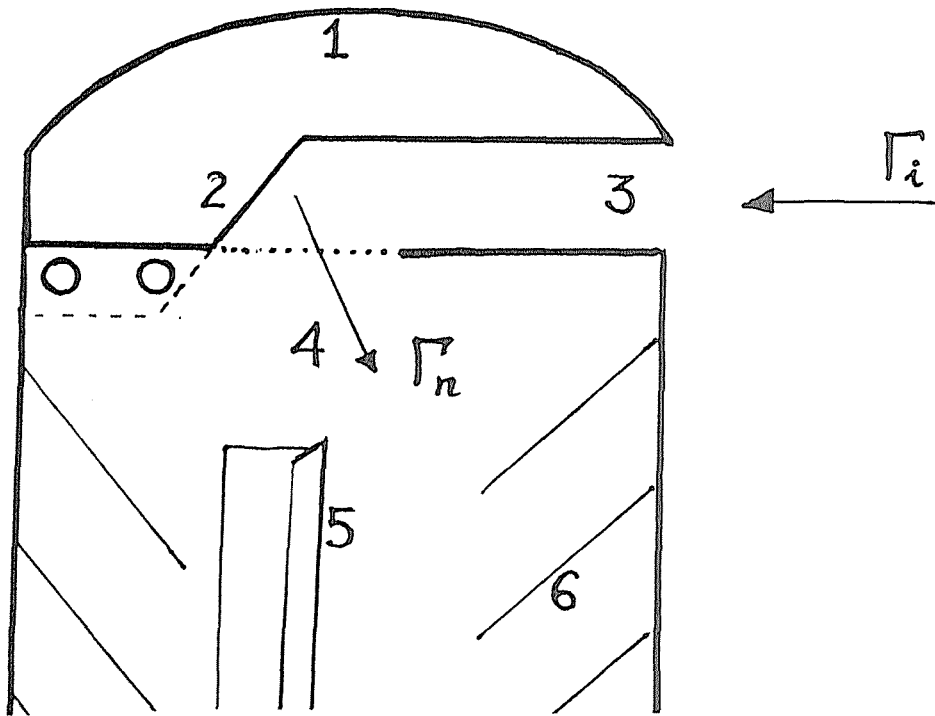


Figura 13: Esquema de limitadores con bombas de tipo "Ti-getter".



- 1...Cabeza de compuesto de carbono
- 2...Neutralizador
- 3...Garganta
- 4...Cajón de acero inoxidable
- 5...Filamentos de titanio
- 6...Aletas

