

# Análisis de robustez de un predictor de disrupciones en dispositivos Tokamak.

*Raúl Moreno Salinas*



Junio de 2013

Trabajo Fin de Máster

Curso 2012/2013

# Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>6</b>
1.1	Fusión Nuclear: la energía del futuro . . . . .	6
1.2	Física de plasmas . . . . .	7
1.3	Tipos de dispositivos . . . . .	11
1.3.1	Stellerators . . . . .	12
1.3.2	Tokamaks . . . . .	14
1.4	JET . . . . .	15
<b>2</b>	<b>Disrupciones</b>	<b>18</b>
2.1	Tipos de disrupciones . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Predictores</b>	<b>21</b>
3.1	Advanced Predictor of Disruptions, APODIS . . . . .	23
<b>4</b>	<b>Análisis de robustez de Apodis</b>	<b>26</b>
4.1	Objetivo . . . . .	26
4.2	Base de datos . . . . .	26
4.3	Generación de señales con ruido y procedimiento . . . . .	27
4.4	Resultados . . . . .	32
4.5	Conclusiones . . . . .	33
4.6	Trabajo futuro . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Apéndice de resultados</b>	<b>35</b>

## Índice de tablas

1	Dispositivos de fusión por confinamiento magnético: Stellerators. . . . .	12
2	Dispositivos de fusión por confinamiento magnético: Tokamaks. . . . .	14
3	Señales de APODIS . . . . .	27
4	Base de datos utilizada. . . . .	27
5	Resultados Apodis Offline CFC: C23-C27b . . . . .	35
6	Resultados Señal 2 CFC: C23-C27b . . . . .	35
7	Resultados Señal 3 CFC: C23-C27b . . . . .	36
8	Resultados Señal 4 CFC: C23-C27b . . . . .	36
9	Resultados Señal 5 CFC: C23-C27b . . . . .	37
10	Resultados Señal 6 CFC: C23-C27b . . . . .	37
11	Resultados Señal 7 CFC: C23-C27b . . . . .	38
12	Resultados ILW: C28-C30 . . . . .	41

## Índice de figuras

1	Esquema de la reacción de fusión D-T. . . . .	7
2	Sección eficaz - Temperatura para reacciones D-D,D-T,D- $He^3$ . . . . .	8
3	Trayectoria de una partícula cargada en un campo magnético. . . . .	9
4	Ejemplo transición L/H. . . . .	10
5	Ejemplo de ELMs. . . . .	11
6	Ejemplo de Sawteeth. . . . .	11
7	Esquema de un Stellerator . . . . .	13
8	Esquema de un Tokamak . . . . .	14
9	Diseño Original JET . . . . .	15
10	Sistema de bobinas y transformador de JET. . . . .	16
11	Configuraciones magnéticas en JET. . . . .	17
12	Geometría e imagen real JET . . . . .	17
13	Disrupción en JET . . . . .	19
14	Conversión del espacio con SVM . . . . .	23
15	Señales de APODIS . . . . .	24
16	Estructura de APODIS . . . . .	25
17	Comparación APODIS-JET mode lock trigger . . . . .	25
18	Resultados APODIS C28-C30 ILW . . . . .	25
19	Número de disrupciones por campaña . . . . .	26
20	Señal 1: ruido gaussiano en la señal completa. . . . .	28
21	Señal 1 de una descarga safe: ruido gaussiano 5s antes del tiempo disr./final. . . . .	29
22	Señal 1 de una descarga disruptiva: ruido gaussiano 5s antes del tiempo disr./final. . . . .	29
23	Ejemplo de Falsa Alarma. . . . .	30
24	Ejemplo de acierto con la alarma de APODIS posterior al instante de disrupción. . . . .	31
25	Ejemplo de alarma perdida con la alarma de APODIS posterior al instante de disrupción. . . . .	31

---

26	Resultados Señal 2 CFC: C23-C27b . . . . .	38
27	Resultados Señal 3 CFC: C23-C27b . . . . .	39
28	Resultados Señal 4 CFC: C23-C27b . . . . .	39
29	Resultados Señal 5 CFC: C23-C27b . . . . .	40
30	Resultados Señal 6 CFC: C23-C27b . . . . .	40
31	Resultados Señal 7 CFC: C23-C27b . . . . .	41
32	Resultados Señal 2 ILW: C28-C30 . . . . .	42
33	Resultados Señal 3 ILW: C28-C30 . . . . .	42
34	Resultados Señal 4 ILW: C28-C30 . . . . .	43
35	Resultados Señal 5 ILW: C28-C30 . . . . .	43
36	Resultados Señal 6 ILW: C28-C30 . . . . .	44
37	Resultados Señal 7 ILW: C28-C30 . . . . .	44

*It may be that the human mind is too complex to be understood by the human mind. But the desire to attempt the impossible seems to be one of its persistent features.*

Aaron Sloman, 1978

## 1. Introducción

### 1.1. Fusión Nuclear: la energía del futuro

Las necesidades energéticas del ser humano crecen día a día. La población mundial rebasará los 9.000 millones en 2050, un 49,6 % más que en 2000, según las estimaciones revisadas de la ONU. El mercado deberá responder al rápido crecimiento de la población, con el consecuente crecimiento de la demanda energética. De acuerdo con la Agencia Internacional de la Energía (International Energy Agency IEA), en la revisión de 2011, el uso de la energía se incrementará un 33 % entre los años 2010-2035.

En el año 2010, el 81 % de la energía provenía de los combustibles fósiles. Si no se toman medidas, políticas y actuaciones sobre este comportamiento, la temperatura media global aumentará más de 6°C. Aunque hiciésemos todo esto manteniendo un desarrollo sostenible, hacia el año 2035, el 74 % de la energía global seguiría siendo obtenida de los combustibles fósiles. Estos combustibles tienen un gran impacto negativo en el medio ambiente, por ejemplo la gran cantidad de residuos lanzados a la atmósfera durante su combustión. Incluso con un modelo de desarrollo sostenible, hacia el año 2035, el 74 % de la energía global seguiría siendo obtenida de los combustibles fósiles. Además, debido a su reducido coste son masivamente explotados, por lo que las reservas son cada día más limitadas. En el caso del petróleo, existe una dependencia de las reservas que aún no han sido utilizadas y de las que aún no han sido descubiertas, esperando consumir toda reserva hacia la mitad del siglo actual. Por otro lado las reservas de carbón se espera que perduren alrededor de 100 años más.

La opción de la energía nuclear presenta una solución para este gran problema, ya que es capaz de producir grandes cantidades de energía. Hoy en día, la energía producida mediante fisión, descubierta en 1939 por los investigadores alemanes Hahn y Strassmann, puede ser controlada con seguridad. Sin embargo, la extracción, enriquecimiento y utilización de materiales de alto peso atómico (como el uranio) para los procesos de fisión nuclear, generan residuos radiactivos que tardan miles de años en perder su nocividad para el medio ambiente. Esto unido a la gravedad de un posible accidente en centrales nucleares (a pesar de la alta seguridad), genera cierta oposición pública al uso de la energía nuclear por fisión.

En este aspecto es donde las energías renovables deben cobrar importancia. Hacia mediados del siglo XXI el uso de las energías renovables se incrementará significativamente pero no será suficiente para cubrir el crecimiento de la demanda energética. Los estudios apuntan que habrá una reducción en los precios de la electricidad generada por las energías renovables [1].

Nos encontramos en el cruce entre las energías renovables y los combustibles fósiles. Los combustibles fósiles aseguran un suministro a bajo precio durante algunas décadas, comprometiendo así el futuro del medio ambiente. Por otro lado, las energías renovables suponen una fuente ilimitada de energía que no perjudica al medio ambiente, pero no es capaz de abastecer la demanda energética del planeta. Por tanto, la fusión nuclear se pretende que llene el hueco generado por estas dos.

La fusión nuclear se denomina la energía de las estrellas. Sir Arthur Eddington, en 1926, propuso que las estrellas eran esferas de gas caliente, principalmente compuestas por hidrógeno. Las fuerzas gravitacionales producen una presión capaz de generar una temperatura

que transforma los gases en plasma (cuarto estado de la materia) [2]. En 1927, Lewi Tonks e Irving Langmuir otorgaron el nombre de *plasma* a un gas parcialmente ionizado, donde iones y electrones se mueven independientemente [3]. La temperatura y la presión en las estrellas hacen posible que los núcleos de hidrógeno se fusionen en el plasma dando lugar a helio y energía (véase Figura 1).

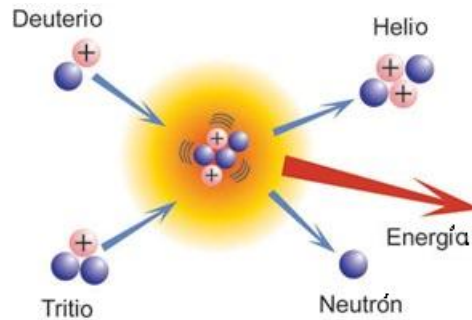


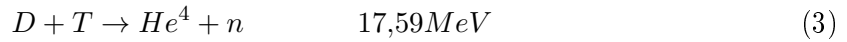
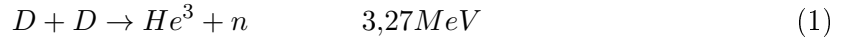
Figura 1: Esquema de la reacción de fusión D-T.

La intención de la energía mediante fusión nuclear es generar electricidad recreando la energía producida en las estrellas. Los reactores de fusión emplearán como combustible, tritio (un isótopo del hidrógeno que puede obtenerse del litio). Hay que tener en cuenta también las bajas emisiones de  $CO_2$  de la fusión nuclear (6-12 Cg/kWh), seguido de la energía hidroeléctrica (4.8 Cg/kWh) y los reactores ligeros de agua (5.7 Cg/kWh). La energía fotovoltaica (16 Cg/kWh), y la eólica (33.7 Cg/kWh) también poseen bajas emisiones de  $CO_2$ , pero tienen en contra el proceso de manufacturación. Por otro lado, el petróleo (200 Cg/kWh) y el carbón (270 Cg/kWh) son las energías más contaminantes [4]. La fusión tiene la ventaja de la seguridad frente a la fisión. A diferencia de la fisión, la fusión no ocurre en el planeta, por lo que en el caso de un posible accidente la fusión nuclear se detendría. El impacto de la radiactividad del accidente sería mínimo debido a los materiales empleados, la radiactividad del tritio (vida media de 12,32 años) es mucho menor que la del uranio (vida media del uranio de 238,4500 de millones de años). Otra ventaja de la fusión es que no necesita un trabajo de extracción minera, ya que el deuterio y el tritio son abundantes en la naturaleza. Además su obtención es más sencilla que la de elementos de alto número másico.

## 1.2. Física de plasmas

Como explicamos anteriormente, el plasma es denominado como el cuarto estado de la materia. Al calentarse suficientemente un gas, los electrones se separan de los átomos. Cuando todos los átomos han perdido sus electrones, el gas ha sido totalmente ionizado, y esto es lo que se conoce como plasma. Como su nombre indica, la física de plasmas estudia el comportamiento del plasma. Los diferentes plasmas (solar, descarga en arco, llamas, fríos, ionosfera,...) difieren en su densidad y temperatura. Las estrellas obtienen su energía de los procesos de fusión nuclear. Los átomos de hidrógeno se fusionan para formar helio, generando

$6 \times 10^8$  MJ por  $Kg$  de hidrógeno, alrededor de 60 millones de veces la energía por  $Kg$  producida por combustibles químicos [5]. La mayoría de los estudios en fusión nuclear comienzan con deuterio (D), ya sea sólo o con el isótopo mas pesado de hidrógeno, tritio (T). Hay tres posibles reacciones [5]:



donde H es un protón, n es un neutrón y  $He^4$  es una partícula  $\alpha$ . Se puede observar que en una de estas reacciones se genera tritio. El deuterio es un elemento estable y abundante (30g de cada  $m^3$  de agua es deuterio). Sin embargo, el tritio no se encuentra en la naturaleza y debe producirse artificialmente: mediante la activación del hidrógeno contenido en el agua o por bombardeo del litio (elemento abundante en la corteza terrestre) con neutrones.

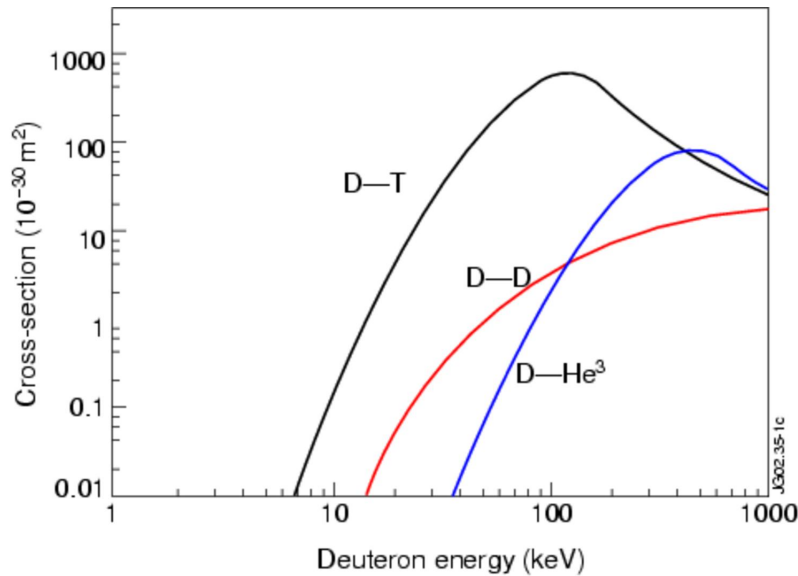


Figura 2: Sección eficaz - Temperatura para reacciones D-D, D-T, D- $He^3$

En la figura 2 (EFDA-JET<sup>©</sup>) se puede observar la sección eficaz para las reacciones de las ecuaciones 1,2 y 3. A temperaturas de  $100 keV$ , la sección eficaz de la reacción  $D - T$  es mucho mayor que las otras dos. El problema es cómo reproducir esta reacción que se produce en el Sol de forma natural con fuerzas gravitacionales 27.9 veces mayores que en la Tierra. Además, si la temperatura de las partículas es muy alta, cómo mantener unidas las partículas a temperaturas mayores que la temperatura del Sol. Véase que la temperatura del núcleo del Sol es de  $15 \times 10^6 K$  frente a la temperatura del plasma en JET que puede alcanzar los  $200 \times 10^6 K$ . Para resolver estos problemas, se lleva a cabo el estudio de las propiedades del

plasma. El plasma es generado por partículas cargadas eléctricamente, y sujeto a una fuerza magnética: Fuerza de Lorentz. Por lo tanto se pueden reemplazar las fuerzas gravitacionales por un campo magnético. Una partícula cargada en un campo magnético uniforme describe dos movimientos:

1. Un movimiento circular perpendicular al campo magnético. El radio del círculo se denomina radio de Larmor (Figura 3a).
2. Un movimiento paralelo a lo largo del campo magnético (Figura 3b).

En la Figura 3 (EFDA-JET<sup>©</sup>) se muestra el movimiento de una partícula cargada en un campo magnético uniforme. En la Figura 3c, se muestra la composición de los movimientos 3a y 3b, una trayectoria helicoidal.

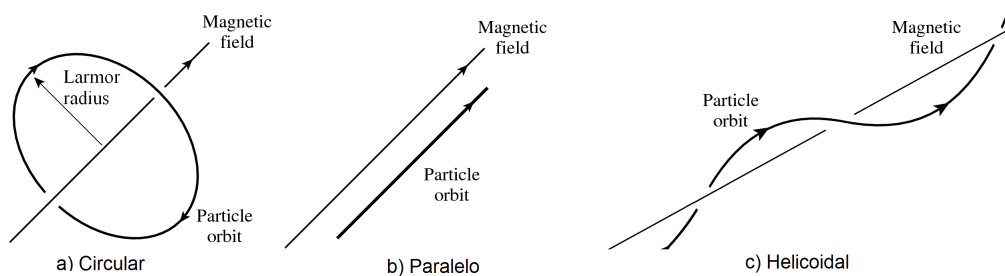


Figura 3: Trayectoria de una partícula cargada en un campo magnético.

Es necesario calentar el plasma, atrapado por el campo magnético, hasta alcanzar condiciones termonucleares. La corriente toroidal inducida por el campo toroidal de las bobinas genera calentamiento óhmico. La resistencia del plasma cae a medida que aumenta la temperatura y además usando el calentamiento óhmico solamente, la temperatura del plasma está lejos de la temperatura requerida para una sección eficaz en reacciones nucleares de fusión. Los métodos alternativos de calentamiento:

- **Inyección de haces neutros (NBI)**: se trata de haces de hidrógeno altamente energéticos se inyectan en el plasma incrementando su temperatura. Las partículas inyectadas en el plasma deben ser átomos neutros ya que de otra manera no podrán atravesar el campo magnético.
- **Calentamiento por radiofrecuencia (RF)**: ondas electromagnéticas de alta frecuencia son generadas en una antena montada en la cámara de vacío. El calentamiento RF incluye diferentes métodos:
  - **ICRH (Ion-Cyclotron Resonant Heating)**: el sistema ICRH usa una frecuencia entre  $23MHz$  (longitud de onda  $\lambda = 13m$ ) y  $57MHz$  ( $\lambda = 5m$ ) resonante en el segundo armónico del deuterio o el primer armónico del tritio y el helio.
  - **ECRH (Electron-Cyclotron Resonant Frequency)**: sólo calienta los electrones del plasma. Usa una frecuencia entre  $140GHz$  ( $\lambda = 2,136mm$ ) y  $170GHz$  ( $1,759mm$ ).

- **LHCD (Lower-Hybrid Current Drive)**: usa frecuencias aproximadas de  $3,7GHz$  ( $\lambda = 0,1m$ ).

Además en el plasma ocurren diversos fenómenos o eventos como las transiciones L/H (L, para el modo de bajo confinamiento, y H, para el modo de alto confinamiento, son dos regímenes de confinamiento del plasma en dispositivos de fusión), cuyo estudio permiten a los científicos lograr un comportamiento mejor del plasma.

- **Transiciones L/H**: son dos regímenes de confinamiento del plasma en dispositivos de fusión. Su estudio permite a los científicos lograr un comportamiento mejor del plasma. Figura 4 [10].
- **ELMs**: inestabilidades disruptivas que ocurren en la región del borde del plasma de un Tokamak debido a la relajación cuasi-periódica de una barrera de transporte previamente formada durante una transición L/H. Este fenómeno fue observado por primera vez en el ASDEX tokamak en 1982 [7]. Figura 5 [10].
- **Sawteeth**: inestabilidades que causan una pérdida de energía del núcleo del plasma. La temperatura y densidad del plasma sigue un ciclo regular de lentos crecimientos y caídas rápidas [8]. Una vez alcanza la temperatura, la energía térmica es lanzada desde el núcleo hacia el borde del plasma en forma de un pulso de calor [9]. Figura 6 [10].
- **Disrupciones**: (en las que está centrado este trabajo y explicaremos en mayor profundidad en un apartado posterior) son dañinas y potencialmente peligrosas para la integridad de la máquina y por lo tanto deben ser evitadas.

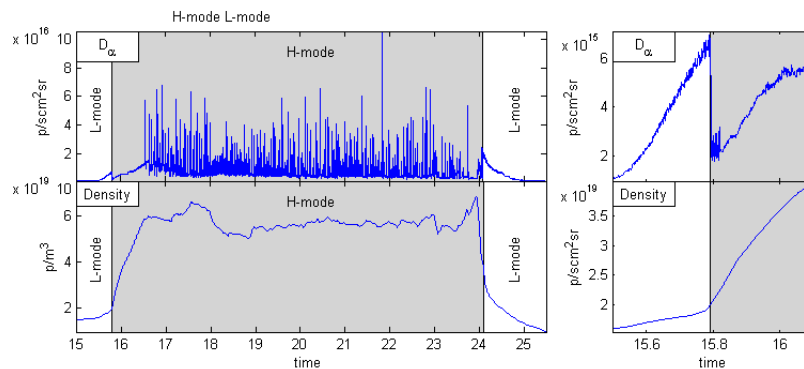


Figura 4: Ejemplo transición L/H.

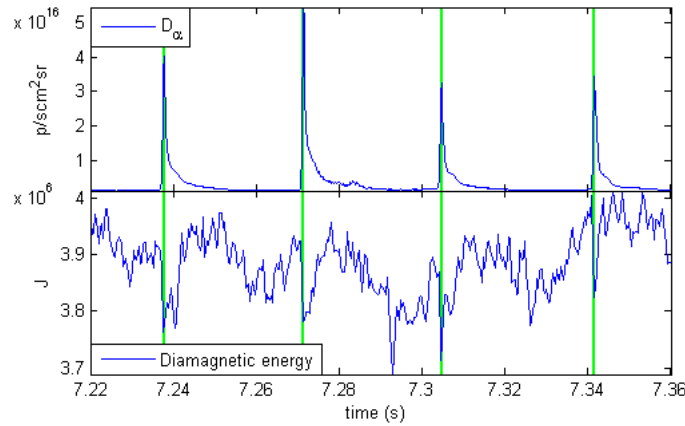


Figura 5: Ejemplo de ELMs.

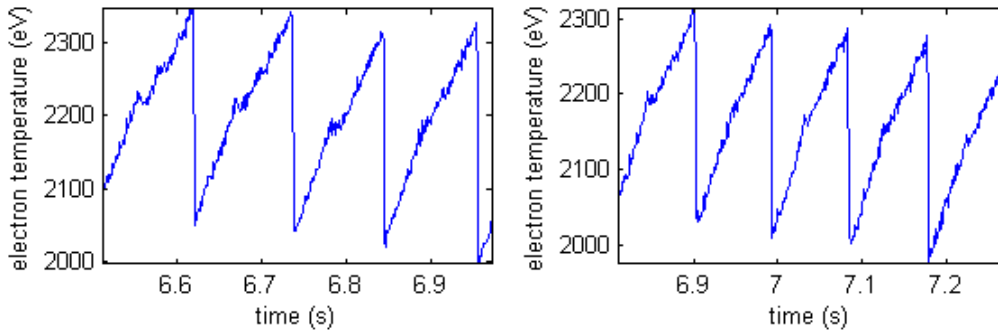


Figura 6: Ejemplo de Sawteeth.

### 1.3. Tipos de dispositivos

La investigación actual para el desarrollo de un futuro reactor de fusión se centra principalmente en dos vías, la fusión por confinamiento magnético y la fusión por confinamiento inercial. En los dispositivos de confinamiento magnético se utilizan campos como se ha explicado anteriormente para crear barreras que aislen el plasma de la cámara de vacío en la cual está contenido. El plasma, con una densidad de hidrógeno superior a  $10^{20}m^{-3}$ , se ha de calentar a temperaturas de decenas de  $KeV$  ( $1eV \approx 11000K$ ) con tiempos de confinamiento del orden de segundos. El confinamiento inercial, en cambio, se genera mediante el calentamiento y compresión de esferas de hidrógeno (las densidades alcanzadas son del orden de  $10^{23}m^{-3}$  y las temperaturas de decenas de  $KeV$ ) durante períodos muy cortos (nanosegundos). Para la compresión y el calentamiento de las esferas se requieren láseres de alta potencia, cuyo desarrollo y posible aplicación en estado continuo plantean problemas de difícil solución [6].

En este estudio nos centramos en los dispositivos por confinamiento magnético. Los primeros intentos para conseguir un dispositivo de confinamiento magnético se basaron en so-

lenoides que confinaban partículas radialmente permitiéndoles fluir axialmente. Para reducir las pérdidas, la solución propuesta consistía en intensificar el campo magnético en los extremos (concepto conocido como espejo magnético). Para evitar la pérdida de partículas en los extremos, Peter Thonemann [11] y Sir George Thomson [12] sugirieron cerrar las líneas de campo magnético sobre sí mismas mediante la creación de campos magnéticos toroidales. En un sistema de campo magnético toroidal, la curvatura y el gradiente del módulo de campo magnético provoca una deriva vertical en dirección opuesta para electrones e iones. Ésta crea un campo eléctrico que induce a su vez una deriva hacia el exterior en todo el plasma, por lo que una configuración puramente toroidal es intrínsecamente inestable. Para evitar esta separación de cargas es necesario retorcer las líneas de campo mediante una componente magnética adicional (poloidal).

Los experimentos en campos toroidales fueron llevados a cabo en la década de 1940 por Alan Ware. Se pueden destacar dos configuraciones de dispositivos por confinamiento magnético: los Stellarators y los Tokamaks.

### 1.3.1. Stellarators

En la década de 1950, un nuevo diseño apareció: el stellerator (steady-state generator). Este diseño fue ideado por Lyman Spitzer en 1951 [13]. La estructura de campo magnético en esta configuración se genera mediante conductores externos bobinados al toro (Figura 7). La corriente que circula por las bobinas puede ser controlada desde el exterior y permite un modo de operación continuo. La intrincada geometría de las bobinas retuerce las líneas de campo magnético alrededor del toro. Sin embargo, la precisión necesaria para el ensamblaje del dispositivo (en especial de las bobinas) es un verdadero reto para la construcción de este tipo de máquinas.

<b>Stellarator</b>			
<b>Name</b>	<b>Location</b>	<b>Name</b>	<b>Location</b>
H1	Australia	HSX	USA
LHD	Japan	NCSX	USA
TJ-II	Spain	W 7-X	Germany

Tabla 1: Dispositivos de fusión por confinamiento magnético: Stellarators.

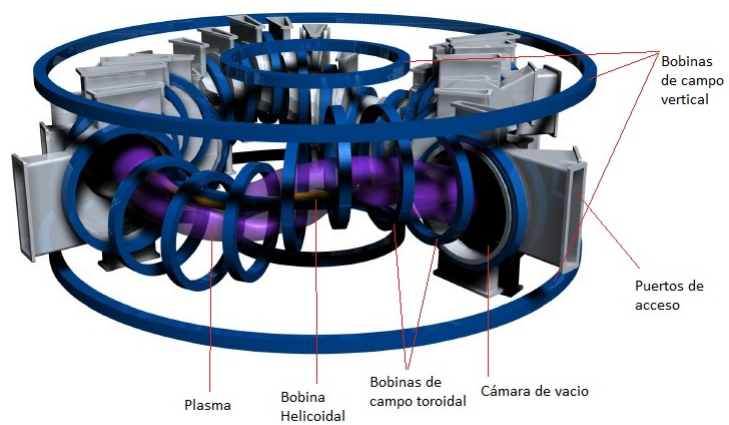


Figura 7: Esquema de un Stellerator

**1.3.2. Tokamaks**

Los científicos de la unión soviética Sakharov y Tamn diseñaron la configuración de los dispositivos tokamak (Figura 8), cuyo significado viene del ruso 'toroidalnaya kamera ee magnitnaya katushka' que puede traducirse como 'cámara toroidal con bobina toroidal'. Este dispositivo era similar a la configuración de Thonemann y Thomson pero con un campo magnético toroidal mayor. La estructura de campo magnético se genera mediante bobinas toroidales y la componente poloidal la produce una corriente que se hace circular por el plasma. Esta corriente se induce mediante un transformador central. Hoy en día la configuración Tokamak es la mas difundida y la que se utilizará para el futuro dispositivo experimental ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Desde el punto de vista ingenieril, presenta menos complicaciones para su construcción que un Stellarator. Sin embargo, una de sus principales desventajas se debe a pérdidas abruptas e inevitables de la energía del plasma (que ocurren sólo en este tipo de configuraciones), llamadas disrupciones.

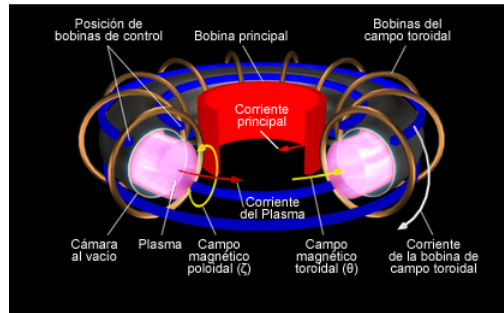


Figura 8: Esquema de un Tokamak

<b>Conventional tokamak</b>			
<b>Name</b>	<b>Location</b>	<b>Name</b>	<b>Location</b>
ALCATOR C-Mod	USA	ASDEX Upgrade	Germany
COMPASS	Czech Republic	DIII-D	USA
EAST	China	FTU	Italy
ISTTOK	Portugal	JET	UK
J-TEXT	China	KSTAR	South Korea
TCV	Switzerland	TEXTOR	Germany
Tore Supra	France	JT-60U	Japan
<b>Spherical tokamak</b>			
<b>Name</b>	<b>Location</b>	<b>Name</b>	<b>Location</b>
LTX	USA	MAST	UK
NSTX	USA	TST-2	Japan

Tabla 2: Dispositivos de fusión por confinamiento magnético: Tokamaks.

## 1.4. JET

Los análisis de este proyecto están realizados en el dispositivo JET. El JET (Joint European Torus), localizado en Culham, Oxfordshire, Reino Unido, es el dispositivo tokamak más grande del mundo en la actualidad. Comenzó a diseñarse en 1973 por P.H. Rebut y concluyó en 1975 con la publicación de «The Jet Design Proposal» [14]. Su construcción duró 4 años, 1979-1983. El primer pulso data del 25 de Junio de 1983. El propósito de JET fue descrito en propuesta de diseño: *el objetivo esencial de JET es obtener y estudiar un plasma en condiciones y dimensiones adecuadas para la reacción termonuclear. Estos estudios se lograrán definiendo los parámetros, tamaños y condiciones de trabajo del reactor Tokamak. La realización de este objetivo involucra 4 áreas principales de trabajo:*

1. *La escala del comportamiento del plasma como parámetros del reactor.*
2. *Interacción plasma-pared en estas condiciones.*
3. *Estudio del calentamiento del plasma.*
4. *Estudio de producción de partículas  $\alpha$ , confinamiento y consecuentemente calentamiento del plasma.*

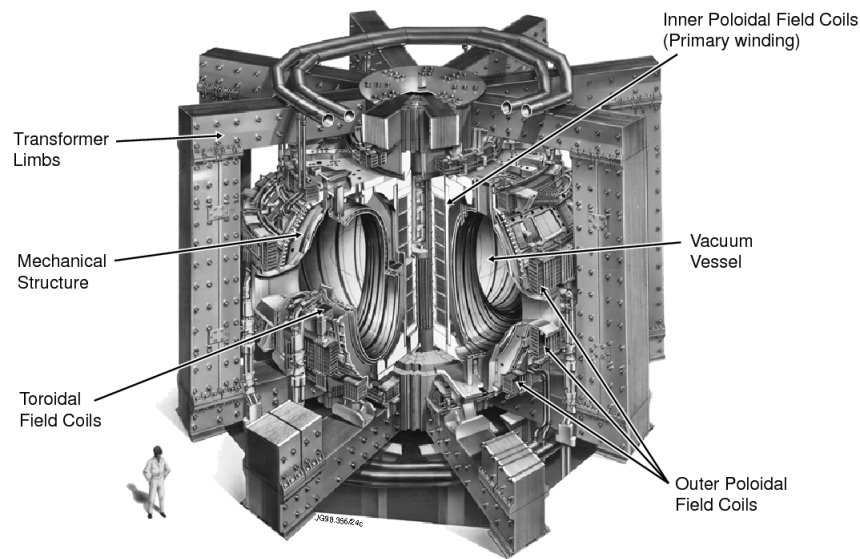


Figura 9: Diseño Original JET

En la Figura 9 (EFDA-JET<sup>©</sup>) se puede observar el diseño original de JET. El volumen del plasma en la cámara de vacío es de  $83 - 100m^3$ . Inicialmente fue diseñado para albergar una corriente de plasma de  $3,8MA$  y posteriormente se diseñó para  $4,8MA$ . El campo magnético toroidal en el centro del plasma que inicialmente era de  $2,8T$  ha sido extendido a  $3,5T$ . Las bobinas de JET tienen forma en D. Este diseño se debe a razones físicas: el campo magnético

dentro de las bobinas de campo toroidal cae con el radio mayor como  $1/R$ , y por lo tanto hay una fuerza magnética mayor en el borde interno que en el borde externo de las bobinas [5](p.22). En el borde interno recto de la bobina, la fuerza magnética nace por el devanado primero del transformador. El borde externo de las bobinas fue diseñado para soportar la fuerza magnética por sí mismo. El campo magnético toroidal de JET, es producido por 32 bobinas, en forma de D, rodeando la cámara de vacío (Figura 10a, EFDA-JET<sup>©</sup>). Cada una de las bobinas de campo toroidal pesa 12 toneladas y esta envuelta por 24 espiras de cobre. La capacidad de corriente combinada de todas las bobinas es de  $51MA$ . Los campos magnéticos podrían causar una fuerza sobre cada bobina de casi 2000 toneladas, dirigida hacia el eje mayor del toro. Los campos magnéticos poloidales consisten en 7 bobinas circulares adjuntas a las bobinas de campo toroidal (Figura 10b, EFDA-JET<sup>©</sup>). El propósito de la bobina interior enrollada alrededor de la columna central del núcleo del transformador (Figura 10c, EFDA-JET<sup>©</sup>) es actuar como la primaria del transformador. Las otras 6 bobinas permiten a los científicos modificar la forma y posición del plasma. La bobina más larga es de  $11m$  de diámetro.

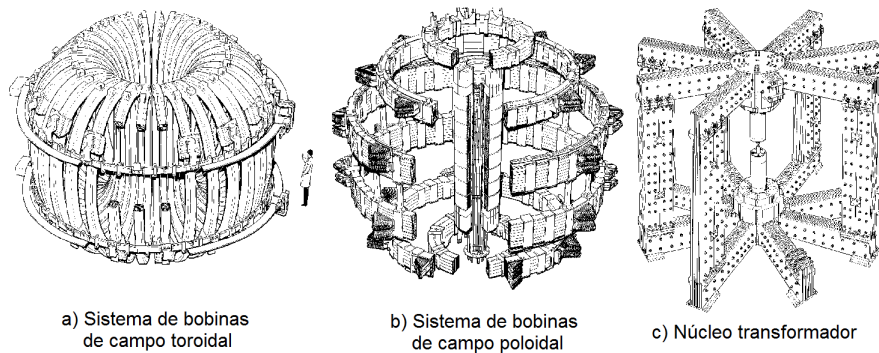


Figura 10: Sistema de bobinas y transformador de JET.

Combinando los campos magnéticos creados por los sistemas de bobinas toroidales y poloidales, es posible generar plasmas con diferentes formas. En la Figura 11 podemos observar 3 configuraciones magnéticas diferentes de plasma en JET. Podemos observar respectivamente, un plasma circular, uno elíptico y una configuración magnética especial: X-point. Con estas configuraciones, aparecen dos tipos de superficies magnéticas: abiertas y cerradas. El cambio de superficie magnética a cerrada se denomina separatriz. La capa entre la separatriz y la pared de la cámara de vacío se denomina capa «scrape-off» (SOL). Las líneas magnéticas externas de la separatriz cruzan la pared de la cámara de vacío y por tanto las partículas en SOL golpean la pared. La superficie bajo el X-point donde las partículas golpean la pared se denomina, divertor.

La cámara de vacío fue diseñada para maximizar el espacio dentro de las bobinas toroidales. Contienen una cámara de vacío cuya presión es menor que una millonésima de la presión atmosférica [5](p.23). La cámara de vacío podría contener hasta  $100m^3$  de plasma. En la Figura 12b (United Kingdom Atomic Energy Authority<sup>©</sup>) se puede observar una imagen

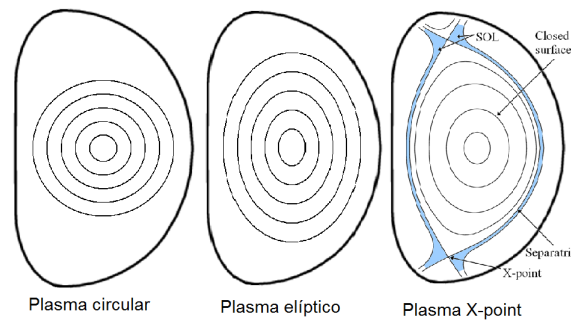


Figura 11: Configuraciones magnéticas en JET.

real de la cámara de vacío tomada en 1998. Las bobinas de campo toroidal en forma de D, determinan la geometría de la cámara de vacío (Figura 12a). El radio altura-anchura ( $a/b$ ) es de 1.6. El valor óptimo del radio  $R/a$  está entre 2 y 3. El valor elegido fue 2.4 para minimizar costes.

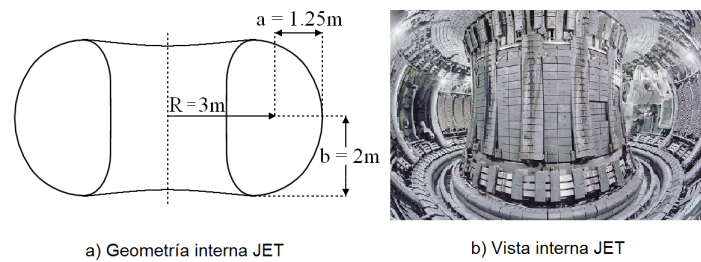


Figura 12: Geometría e imagen real JET

El calentamiento de JET esta compuesto por tres sistemas diferentes: un sistema NBI con 23 MW de potencia total, una antena ICRH de hasta 32MW y una antena LHCD de 12MW de potencia. El sistema de diagnósticos permite a los científicos medir las propiedades del plasma como la densidad y la temperatura para estudiar los fenómenos del plasma que se producen. Actualmente hay más de 90 diagnósticos en operación y más de 20 diseñándose. En cada pulso de JET, se generan unos 40 GBytes de datos por los diagnósticos, frente a los 243 KBytes de datos generados en el primer pulso de JET. Los diagnósticos de JET incluyen entre otros: dispersión Thompson, bobinas magnéticas, cámaras ultra-rápidas de luz visible, sistemas de interferometría, antenas ECE (Electron Cyclotron Emission), espectrómetros de luz visible, ultravioleta y rayos X, etc. Se puede encontrar mucha más información sobre JET en la web EFDA-JET, o en la bibliografía.

## 2. Disrupciones

Las disrupciones son probablemente como hemos comentado las inestabilidades más peligrosas para la seguridad de los dispositivos de fusión. Durante una disrupción, la corriente del plasma cae abruptamente y se pierde el confinamiento del plasma. Al perderse el confinamiento el dispositivo puede sufrir grandes daños debido a la alta corriente y altas temperaturas a las que estaría sometido. Las disrupciones pueden ocurrir repentinamente, prácticamente sin comportamientos anormales obvios o después de períodos del orden de cientos de milisegundos, en los cuales diferentes inestabilidades se potencian hasta terminar abruptamente la descarga. Está generalmente aceptado que el fenómeno evoluciona en una serie de fases [15],[16]:

1. **Evento inicial:** las condiciones del plasma cambian hacia una configuración inestable. Allí la energía radiada o la densidad se incrementan debido a anomalías externas (como por ejemplo fallos mecánicos o de la operación) o internas (comportamientos imprevistos) del plasma, aunque esas variaciones suelen ser sutiles y por lo tanto la posibilidad de que sean detectadas es mínima.
2. **Precursor:** las irregularidades iniciadas en la fase anterior alcanzan un punto crítico determinado por la aparición de crecientes y detectables inestabilidades MHD (Magnetohidrodinámicas). La importancia de esta fase en la detección temprana es fundamental: el fenómeno comienza a ser evidente y además, si es detectado con la suficiente rapidez, es posible iniciar acciones de control para evitarlo o al menos atenuar su efecto. Teóricamente estas inestabilidades comienzan como islas magnéticas que rotan alrededor del eje magnético del plasma y que crecen de tamaño exponencialmente en pocas decenas de milisegundos hasta llevar al plasma a la disrupción.
3. **Fase rápida («thermal quench»):** en esta, en tiempos del orden de milisegundos, el perfil radial de corriente se aplana y la temperatura en el centro del plasma cae en picado.
4. **Fase de apagado («Current quench»):** durante el 'apagado térmico' la temperatura electrónica cae bruscamente dejando al plasma en un estado altamente resistivo. El calentamiento óhmico resultante llega a ser del orden del Gigawatt. El aumento de la resistividad deriva parte de la corriente toroidal, durante la fase de 'apagado de corriente', hacia la cámara de vacío. Estas corrientes inducen momentos de gran magnitud en las estructuras colindantes a la primera pared, las cuales sumadas a las cargas térmicas transferidas en escalas de tiempo menores a  $1ms$  pueden causar daños severos al dispositivo.

Podemos ver un ejemplo de disrupción típica en la Figura 13b [17] y un ejemplo de los precursores en la Figura 13a [17].

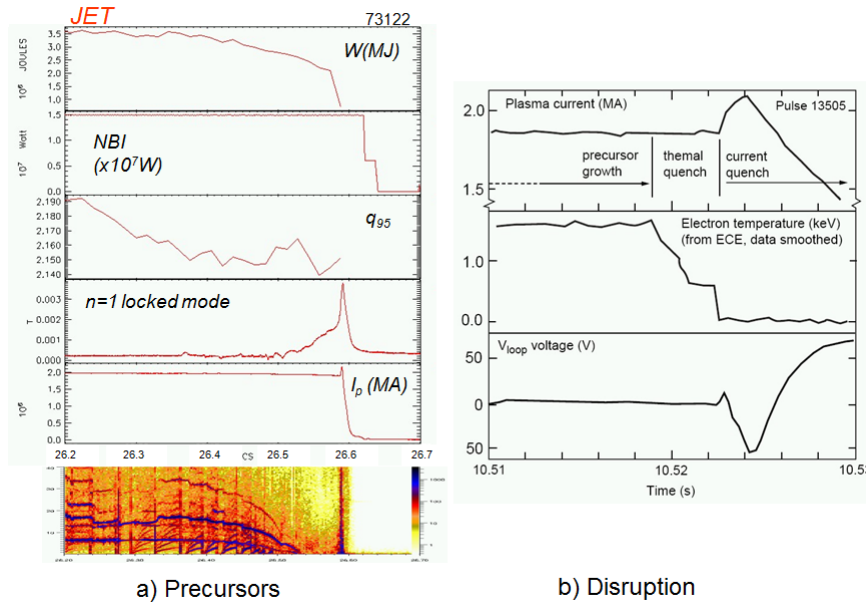


Figura 13: Disrupción en JET

### 2.1. Tipos de interrupciones

Las interrupciones se producen como consecuencia de comportamientos anómalos del plasma cuyas causas no son totalmente comprendidas todavía. Sin embargo, existen diferencias en su desarrollo inicial y en las fases finales (en las que se pierde la energía) en virtud de las cuales puede establecerse una clasificación dependiendo de su evolución. Es posible distinguir al menos, 8 tipos de interrupciones [18],[19]:

- **Mode Lock:** debido a gradientes de temperatura o campos eléctricos externos se desarrollan inestabilidades MHD produciendo islas magnéticas, las cuales crecen hasta terminar en una interrupción.
- **Límite densidad:** estas pueden ser descritas como una inestabilidad que comienza cuando la densidad se eleva más allá de un umbral o cuando existen impurezas en el plasma. La energía radiada crece y consecuentemente se puede medir una caída de la temperatura. Además, el perfil de corriente se encoje como consecuencia del aumento de la resistencia del borde del plasma. Por propiedades inductivas del plasma, el apagado de corriente produce corrientes de halo(aquellas que circulan en el plasma frío fuera de la última superficie magnética cerrada) transfiriendo grandes fuerzas a la cámara de vacío. Este tipo de interrupciones es el más común en JET.
- **Transiciones L/H:** también transiciones de regímenes de alto a bajo confinamiento (transiciones L/H) a altas densidades pueden desarrollar inestabilidades causantes de interrupciones.

- **ITB (Internal Transport Barriers)**: son modos que suelen aparecer en las configuraciones etiquetadas como «escenarios avanzados» y su detección es particularmente complicada dado el breve margen entre la fase de precursor y la de apagado de corriente.
- **High radiated power**: la evolución de tales disrupciones se asemeja a las de límite de densidad pero con la diferencia de que el incremento de energía radiada se produce ligeramente antes que el aumento en la densidad.
- **Low q**: se ha demostrado que para superficies magnéticas, en general con valores bajos del factor de seguridad  $q$  (número de vueltas que las líneas de campo magnético helicoidales dan en dirección toroidal por cada vuelta en dirección poloidal. Para evitar inestabilidades es necesario que el factor sea superior a 1) y en particular aquellas con  $q = 2$  juegan un papel fundamental en la estabilidad del plasma. La superficie  $q=2$  suele volverse inestable y por lo tanto causar las disrupciones por bajo factor de seguridad [20].
- **$\beta$  limit**: están vinculadas a incrementos de la presión del plasma que desencadenan una inestabilidad MHD. De hecho,  $\beta$  es un parámetro MagnetoHidroDinámico (MHD) que mide la presión de confinamiento y por lo tanto se la considera directamente relacionada con los límites de estabilidad. En JET estos límites no se alcanzan en condiciones de operación normal y por lo tanto este tipo de disrupciones no es frecuente.
- **Límite vertical o desplazamiento vertical**: ocurren normalmente en configuraciones de plasmas elongados. Muy rara vez el sistema de control permite este tipo de condiciones y por lo tanto en general se producen cuando los campos de estabilización vertical son desactivados expresamente para experimentos puntuales.

### 3. Predictores

La predicción de las disrupciones es fundamental en el desarrollo de futuros dispositivos. La necesidad de una temprana detección es cada vez más importante, teniendo en cuenta que las disrupciones han cobrado mayor importancia en la nueva pared metálica ILW (ITER-like wall) que en la CFC (Carbon Fiber Composite), e incluso teniendo en cuenta la importancia que tendrán en ITER. En ITER se planean obtener plasmas con mayores corrientes y de tales energías que una sola disrupción podría provocar daños severos en varias partes del dispositivo, desde la erosión de los componentes expuestos al plasma (aquellos que recubren internamente la cámara de vacío y el resto de sistemas próximos a los flujos de partículas y energía procedentes del plasma) a daños en su estructura. La caracterización física de las disrupciones para su posible predicción y mitigación es extremadamente compleja. La dificultad de desarrollar un modelo físico capaz de detectar las disrupciones se debe a la cantidad de variables involucradas y a la relación no lineal entre estas. Por ello en los últimos 15 años varios sistemas de aprendizaje (fundamentalmente basados en Neural Networks y Support Vector Machines) han sido utilizados como una aproximación alternativa a la detección del fenómeno. Los sistemas de aprendizaje son aplicables dado que las disrupciones pueden considerarse un problema de clasificación: disruptivas y no disruptivas. No todos los estudios en disrupciones abordan la adecuada extracción de características a la vez que la identificación de comportamientos disruptivos. A pesar de ello se han ido desarrollando diversos trabajos:

- Diversos estudios de Cannas, [21] demuestran que el clasificador es capaz de diferenciar entre descargas disruptivas y no disruptivas mediante el entrenamiento de un sistema de redes neuronales. En el trabajo de Cannas [22] se utiliza una base de datos de 274 descargas. Mediante mapas auto-organizados se realizan agrupamientos en 86 descargas disruptivas para determinar las muestras a emplearse en el entrenamiento del sistema de aprendizaje. Este sistema, basado en redes neuronales, alcanza a detectar un 68 % de las disrupciones. Según Cannas en su trabajo [23], los modelos son capaces de alcanzar altas tasas de acierto únicamente si son probados con descargas pertenecientes al mismo período de las usadas en el entrenamiento. Si en el test se utilizan descargas posteriores, las tasas de acierto caen drásticamente. Tras esto se propone como solución un sistema (basado en SVM y acoplado al de predicción) destinado a detectar nuevos comportamientos de manera que estos puedan ser utilizados para un reentrenamiento, evitando la falta de generalización.
- En ASDEX-Upgrade, cabe destacar el estudio realizado por Pautasso[24]. Se basa en redes neuronales que analizan simultáneamente la evolución de 8 parámetros del plasma y sus derivadas temporales en 99 experimentos. Una vez entrenado, el sistema es probado en un entorno simulado de tiempo real con 500 nuevos pulsos obteniendo un 85 % de predicciones correctas con un 1 % de alarmas perdidas. En una segunda etapa, las pruebas son realizadas en tiempo real obteniendo un 79 % de identificaciones correctas.
- En DIII-D una red neuronal fue entrenada para detectar disrupciones  $\beta$  limit [25] intentando establecer umbrales para la activación de alarmas. Se descartaron las descargas

en las que faltaba alguno de los parámetros requeridos por el sistema de detección. La base de datos final estaba constituida por 84 descargas que fueron utilizadas para la etapa de entrenamiento y de pruebas.

- En el tokamak indio ADITYA un trabajo destinado a detectar disrupciones de límite de densidad utilizaba una base de datos de sólo 23 descargas [26]. Se analizaban únicamente descargas disruptivas y no era aplicable en tiempo real.
- También con redes neuronales, dos estudios de Yoshino fueron desarrollados en JT-60U. En el primer estudio realizado por Toshino [27] el sistema es entrenado primero con 12 descargas disruptivas y 6 no disruptivas. La información de salida de la red neuronal entrenada se valida y modifica de acuerdo al análisis de un grupo independiente de 12 descargas disruptivas. El modelo final fue probado con 300 descargas disruptivas y 1008 no disruptivas obteniendo tasas de acierto mayores del 80 % a 50ms antes de la disrupción. El segundo estudio [28] emplea una base de datos de 525 descargas y prueba que un entrenamiento con descargas no disruptivas y un ajuste del último paso del anterior trabajo se pueden obtener buenos resultados en la detección de disrupciones de mayor dificultad (las descargas de test son del tipo  $\beta$  limit), con una tasa de aciertos del 76 %).
- Otro estudio interesante relaciona dos dispositivos: JET y ASDEX-Upgrade utilizando una base de datos de 185 señales (89 de ASDEX-Upgrade y 96 de JET) [29]. En él se entrena un sistema de redes neuronales con descargas de JET y el sistema de predicción es probado en ASDEX-Upgrade con tasas de acierto del 67 %. El test inverso logra un porcentaje del 69 % de tasa de aciertos.
- En JET Murari desarrolla una técnica con lógica difusa [19]. Este clasificador basado en reglas no alcanza las tasas de aciertos de los predecesores. Sin embargo, presenta un innovador análisis, mediante el CART, de la importancia relativa de las diferentes señales medidas para la identificación del fenómeno.

Los trabajos previamente citados poseen una escasa robustez, es decir, una vez realizado el entrenamiento, no mantienen las tasas de acierto para descargas de campañas posteriores. Esto hace que no sean útiles ya que no son capaces de generalizar para usarse en campañas posteriores. Hay que destacar también que todo predictor está limitado por los sistemas de mitigación y actuación. Estos sistemas se basan en la finalización del calentamiento rápidamente, modificación de la forma y corriente del plasma, insuflar gas o inyectar pellets para eludir o atenuar los comportamientos disruptivos. Por lo que, en general las disrupciones que se producen rápidamente, son prácticamente imposibles de detectar y se excluyen en las estadísticas de estos trabajos. Esto puede llegar a ser un problema importante, ya que a pesar de que estas disrupciones son escasas, son igualmente peligrosas y su eliminación podría llegar a falsear los resultados confundiéndonos. Los sistemas de aprendizaje realizados en JET y otros tokamak han empleado en general bases de datos pequeñas para obtener resultados fiables. Además puesto que la intención es aplicar el predictor en tiempo real, no se debe seleccionar detalladamente las descargas limitando su corriente máxima.

De manera alternativa a todo esto se desarrolló un exitoso predictor, con una capacidad de generalización satisfactoria, altas tasas de acierto y usando una gran base de datos ,llamado APODIS, basado en una combinación de 3 clasificadores SVM [30]. Este predictor ha sido aplicado en la predicción de interrupciones en JET durante las campañas de pared de carbono y ha sido integrado en tiempo real en la campaña ITER-like wall.

### 3.1. Advanced Predictor of Disruptions, APODIS

Para llevar a cabo cualquier acción de mitigación es imprescindible un predictor en tiempo real. APODIS ha sido implementado en la red de tiempo real RTDN (Real-Time Data Network) de JET, para el reconocimiento en tiempo real de interrupciones. El predictor ha sido entrenado con descargas pertenecientes a las campañas de CFC wally ha estado operando con las descargas de la campaña ILW.

Este predictor emplea modelos basados en métodos de maquinas de aprendizaje. Clasifica entre descarga disruptiva y no disruptiva. El objetivo de estos modelos es construir una función de decisión para determinar la clase de nuevas muestras. Esta función de decisión se construye mediante un conjunto de muestras cuya clase se conoce, conjunto de entrenamiento. Para comprobar la eficacia del modelo construido se toma un conjunto de test diferente al de entrenamiento para clasificar y ver la tasa de aciertos. APODIS usa SVM (Support Vector Machines), una metodología de clasificación binaria. SVM convierte el espacio inicial de vectores características en un nuevo espacio donde la función de decisión es lineal (Figura 14).

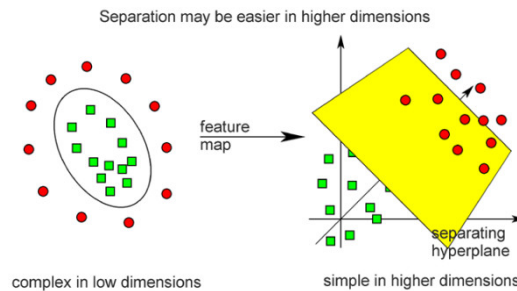


Figura 14: Conversión del espacio con SVM

La función de cambio de espacio se denomina Kernel. Los Kernel tradicionales son:

- Lineal:  $H(x, x') = xx'$ .
- RBF(Radial Basis Function):  $H(x, x') = \exp[-\gamma |x - x'|^2]$ .

Esta explicación breve describe el funcionamiento de SVM, cuya compleja matemática y mejor explicación se muestra en el libro Learning from data [31].

APODIS comenzó a desarrollarse en 2008 [32] y [35]. La actual versión de APODIS, en funcionamiento en JET en la ILW, difiere de la primera versión en varios aspectos: desarrollo en tiempo real, cantidad de descargas tomadas para el entrenamiento, señales empleadas y procesamiento exhaustivo para eliminar descargas redundantes, [34].

Este predictor emplea 7 señales en tiempo real para caracterizar el plasma, muestreadas a intervalos de  $1ms$ . Estas señales se procesan en ventanas de  $32ms$  (desde el instante en que la corriente del plasma cruza un umbral de  $750kA$ ) tomando como características su media y su desviación estándar del espectro de Fourier (eliminando la componente continua) [32],[36], teniendo así 14 características por muestra (Figura 15).

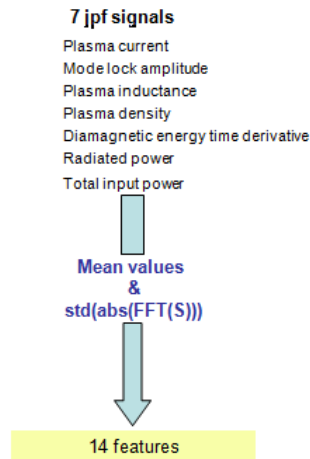


Figura 15: Señales de APODIS

Una novedad importante de este predictor es su estructura de múltiples capas, combinando dos capas: una primera con 3 clasificadores RBF y una segunda capa con un clasificador lineal como función de decisión. Tras completar una ventana de  $32ms$ , los tres vectores características más recientes ( $x(t - 64)$ ), ( $x(t - 32)$ ) y ( $x(t)$ ) son recibidos por la primera capa de APODIS como entradas de M3, M2 y M1 respectivamente. La salida de estos es recibida como entrada por el clasificador de la segunda capa, el cual determina si se trata de una interrupción o no y marca el instante según las ventanas que hayan determinado esa decisión. Podemos ver esta estructura en la Figura 16.

El entrenamiento fue realizado con descargas de las campañas de pared CFC de las campañas C19-C22:125 descargas disruptivas no intencionadas y 100 descargas no disruptivas seleccionadas aleatoriamente de las 2312 disponibles tras su correspondiente procesado. Las descargas intencionadas no son consideradas para el entrenamiento ya que, como su nombre indica, al ser intencionadas ocurren de manera repentina sin precursores ni comportamiento disruptivo previo. Tener en cuenta en un predictor estas descargas podría confundir los modelos al realizar el entrenamiento. Tomando un conjunto de test de las campañas C23-C27b de 3578 descargas no disruptivas y 228 disruptivas, APODIS logra una tasa de aciertos de 93,42%, una tasa de alarmas perdidas de 6,58% y una de falsas alarmas de 5,11%. Gracias a estos resultados, se decide implementar APODIS en el RTDN de JET [37].

Apodis ha obtenido unos resultados realmente buenos en las últimas campañas de JET, C28-C30, como se muestra a continuación en las figuras 17 y 18, [34].

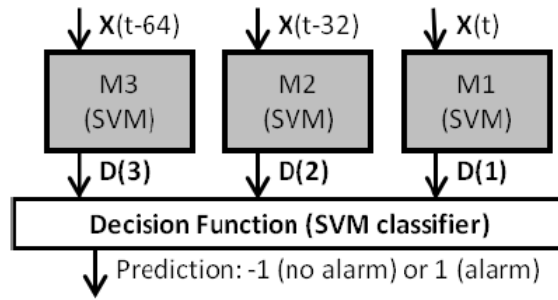


Figura 16: Estructura de APODIS

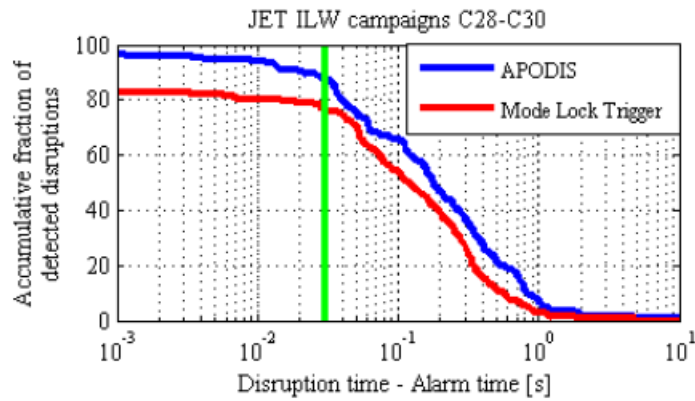


Figura 17: Comparación APODIS-JET mode lock trigger

	JET off-line classification	APODIS predictions
Safe	651	645 (99.08%)
False alarms	n/a	6 (0.92%)
Unintentional	305	300 (98.36%)
Missed alarms	n/a	5 (1.64%)
TOTAL	956	956
Intentional	35	n/a

Figura 18: Resultados APODIS C28-C30 ILW

## 4. Análisis de robustez de Apodis

### 4.1. Objetivo

El impacto de las disrupciones en dispositivos de confinamiento magnético de tipo tokamak es muy importante. Esta importancia ha ido en aumento con el tiempo, centrándonos en JET, desde la pasada pared CFC (Carbon Fiver Composite) hasta la pared metálica ILW (ITER-like wall) donde las disrupciones han cobrado una gran importancia. Véase en la Figura 19 como se ha incrementado el número de disrupciones en la ILW (CFC:C15a-C27b, ILW: C28-C30).

Campaign	#disruptions	Campaign	#disruptions
C15a	26	C22	34
C15b	10	C23	25
C16	3	C24	15
C1617	79	C25	19
C18	20	C26	58
C19	51	C27a	46
C20	32	C27b	71
C21	16	<b>C28-C30</b>	<b>305</b>

Figura 19: Número de disrupciones por campaña

Como anteriormente comentamos, APODIS ha funcionado y testeado descargas de las campañas ILW C28-C30 en JET. Ha alcanzado exitosos resultados, pero durante cada descarga en JET, muchas señales pueden fallar. Si fallan señales empleadas por el predictor, este puede fallar. Aunque esto suceda, el plasma seguirá su curso normal, sea disruptivo o no, por lo que es de gran importancia realizar un estudio del comportamiento del predictor en estos casos. El objetivo de este estudio es determinar la robustez de APODIS, definiendo como robustez la sensibilidad y eficacia del predictor cuando una señal usada por este falla o no aparece correctamente, manteniendo el predictor su correcto funcionamiento.

### 4.2. Base de datos

Es de gran importancia detallar la base de datos seleccionada para realizar el estudio, la cual debe contener todas las señales para cada descarga. Las señales empleadas son las mencionadas en la Figura 15. En la tabla 3 designaremos las señales con números para mayor claridad.

Se selecciona una base de datos formada por descargas de las campañas *C23 – C27b*, de la pared CFC, y de las campañas *C28 – C30*, de la pared ILW. De esta manera estudiamos la robustez tanto en pared de carbono como pared metálica. La base de datos seleccionada se detalla en la tabla 4, aunque en la tabla también se muestran las disrupciones intencionadas, estas no son consideradas en el estudio.

Nombre	Señal
Plasma Current	1
Mode Lock Amplitude	2
Plasma Inductance	3
Plasma Density	4
Diamagnetic Energy Time Derivative	5
Radiated Power	6
Total Input Power	7

Tabla 3: Señales de APODIS

<b>CFC: C23-C27b</b>				
Campana	Disr. No Int.	Safe	Disr. Int.	Total
C23	24	490	8	522
C24	14	361	12	387
C25	19	570	22	611
C26	58	1323	49	1430
C27a	43	320	10	373
C27b	70	513	59	642
C23-C27b	228	3578	160	3966
<b>ILW: C28-C30</b>				
Campana	Disr. No Int.	Safe	Disr. Int.	Total
C28-C30	201	1036	56	1293

Tabla 4: Base de datos utilizada.

### 4.3. Generación de señales con ruido y procedimiento

Se han realizado dos análisis de robustez. Una vez descargadas todas las señales (Tabla 3) para cada descarga de la base de datos (Tabla 4), se procede a generar la base de datos introduciendo ruido a cada señal de la siguiente manera:

- **Ruido gaussiano en la señal completa:** se toma cada señal por descarga y se sustituye por un ruido gaussiano de amplitud moderada en torno a 0. Se realiza de forma moderada ya que si se aplica la misma amplitud de ruido para todas las señales, o se emplea una amplitud demasiado grande; provocaría cambios bruscos en la señal que serían identificados por el predictor como un comportamiento disruptivo. Además de este motivo, es más común que una señal falle y aparezca evolucionando en el tiempo sin variación en torno a 0, que un comportamiento anómalo con cambios bruscos. De esta manera para cada señal ha sido seleccionada una amplitud para el ruido generado. Con este análisis eliminamos las señales por completo, como podemos ver en la Figura 20.
- **Ruido gaussiano 5s antes del final o del tiempo de interrupción:** se toma cada señal por descarga y se sustituye por un ruido gaussiano igual que en el caso anterior;

pero este es introducido 5s antes del final de la descarga (para las descargas «safe») o 5s antes del instante de la disrupción. Como en la sección 2 se explica, las disrupciones presentan un comportamiento disruptivo antes de que se produzca, consiguiendo de este modo eliminar ese comportamiento introduciendo el ruido. A diferencia del caso anterior, el ruido en este caso no es llevado en torno a 0, sino que se mantiene en torno al valor de la amplitud donde se introduce. En el caso de que lo llevásemos a 0, podríamos provocar un cambio brusco en la señal que indudablemente sería clasificado como un comportamiento disruptivo. Podemos ver un ejemplo para una descarga «safe» en la Figura 21, y para una descarga disruptiva en la Figura 22.

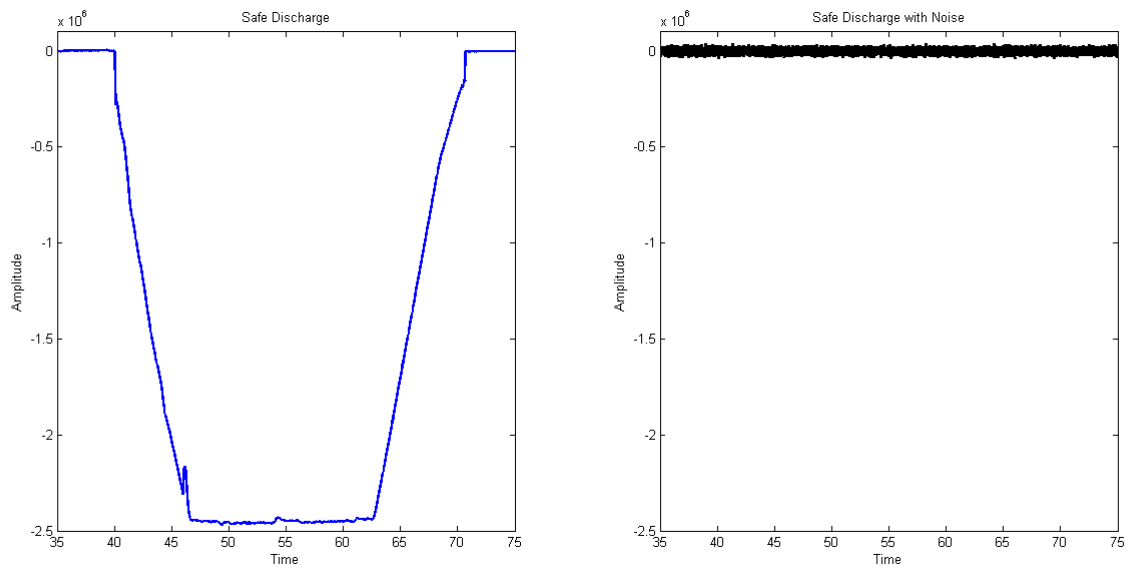


Figura 20: Señal 1: ruido gaussiano en la señal completa.

Una vez preparada la base de datos original y la de señales con ruidos para ambos casos, se procede a testear cada campaña de descargas con APODIS. Se ha utilizado una versión de APODIS offline modificada para cambiar una de las señales que procesa normalmente, por una de las generadas con ruido. De esta manera se testea cada campaña sustituyendo en cada caso, una señal por otra con ruido, primero con ruido en la señal completa y después con ruido 5s antes del final de la descarga o del instante de disrupción. APODIS al igual que en el caso online, comenzará a procesar en el instante que la señal cruza los  $-750kA$  y se detendrá en el instante que vuelve a cruzar dicho umbral.

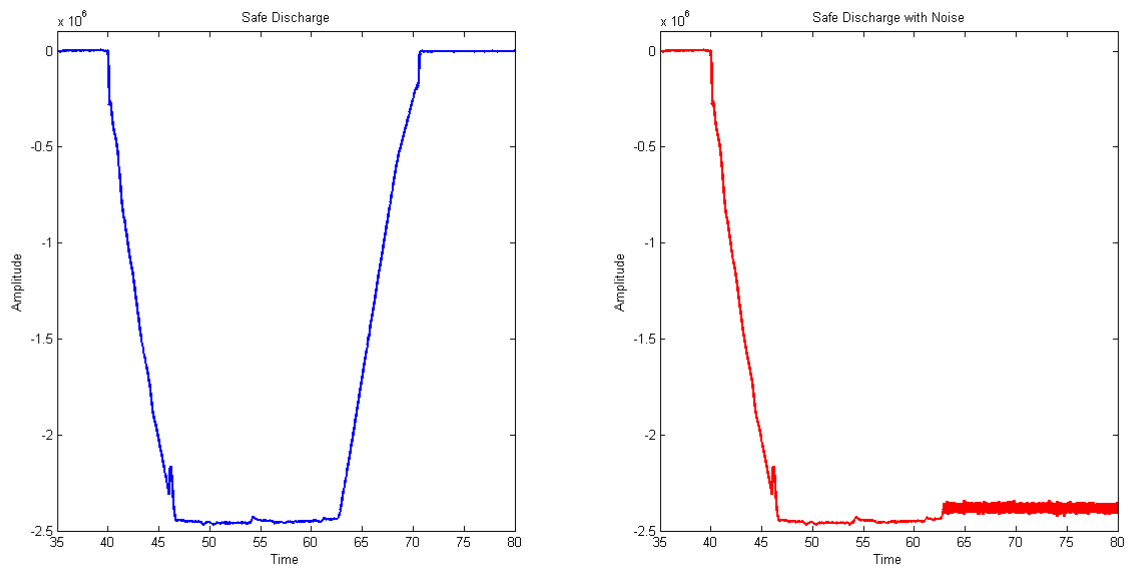


Figura 21: Señal 1 de una descarga safe: ruido gaussiano 5s antes del tiempo discr./final.

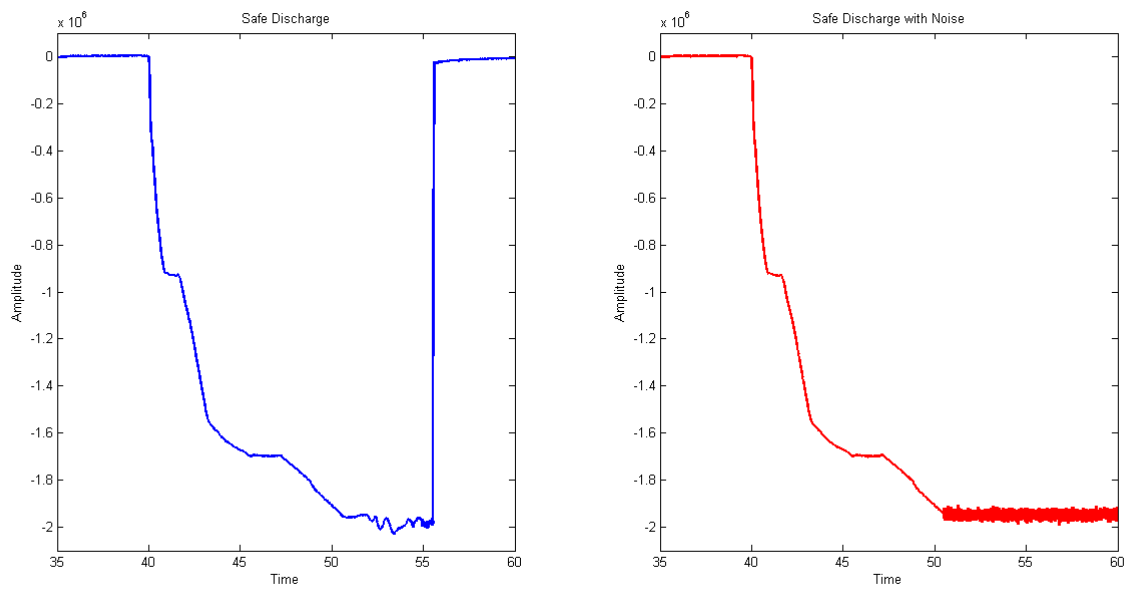


Figura 22: Señal 1 de una descarga disruptiva: ruido gaussiano 5s antes del tiempo discr./final.

A la hora de analizar los resultados, tomamos los siguientes términos para elaborar las estadísticas:

- **Acierto:** llamamos acierto cuando APODIS lanza una alarma en un instante anterior al instante de disrupción de la descarga disruptiva.
- **Falsa alarma:** llamamos falsa alarma cuando APODIS lanza una alarma en una descarga «safe». Podemos ver un ejemplo en la Figura 23.
- **Alarma perdida:** llamamos alarma perdida a dos casos:
  - Si en una descarga disruptiva, APODIS no lanza ninguna alarma.
  - Si en una descarga disruptiva, APODIS lanza una alarma en un instante posterior al instante de la disrupción, pero el intervalo de tiempo entre la alarma de APODIS y el instante que APODIS cruza el umbral de  $-750kA$  al final de la descarga, es inferior a  $30ms$ . Podemos ver un caso en el que sucede esto y sería un acierto porque el intervalo es  $< 30ms$ , en la Figura 24; y otro caso que corresponde a una alarma perdida ya que el intervalo es  $> 30ms$ , en la Figura 25.

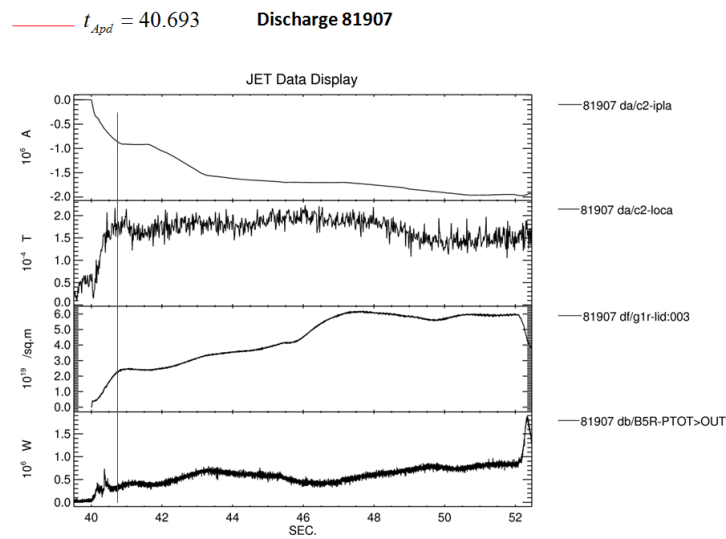


Figura 23: Ejemplo de Falsa Alarma.

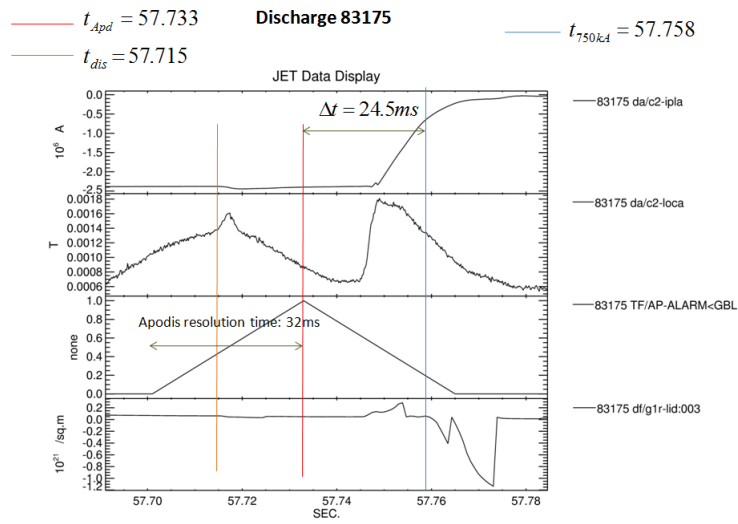


Figura 24: Ejemplo de acierto con la alarma de APODIS posterior al instante de disrupción.

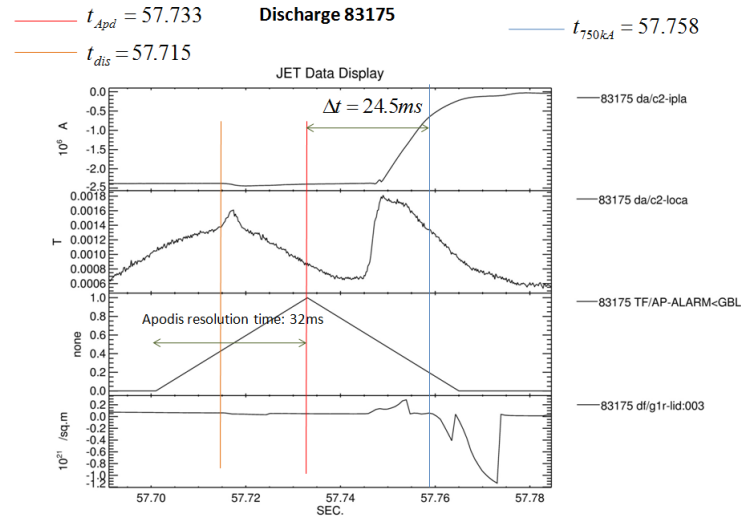


Figura 25: Ejemplo de alarma perdida con la alarma de APODIS posterior al instante de disrupción.

#### 4.4. Resultados

*Todos las tablas y Figuras de resultados se pueden observar en la sección Apéndice de resultados.*

Se ha realizado un análisis por campañas y global, este proyecto se centrará en el estudio del análisis global aplicado a los casos CFC y ILW. La señal 1 se ha excluido de los resultados ya que APODIS basa su funcionamiento en esta señal, cuando cruza el umbral determinado de corriente (señal 1) al principio APODIS comienza a analizar la descarga, de igual modo cuando cruza el umbral final deja de analizar la señal. Si introducimos ruido en esta señal, los umbrales de disparo no se cruzan y el predictor no llega a activarse por lo que no tiene sentido introducir errores en esta señal, de acuerdo con la estructura y funcionamiento de APODIS.

Es importante mencionar en primer lugar que si observamos los resultados en las tablas 6,7,8,9,10,11, excepto para la señal 3, se obtienen las mismas tasas de aciertos y falsas alarmas, ya sea introduciendo un ruido en toda la señal o 5s antes del final o antes del tiempo de disrupción. Se puede deducir que al introducir un ruido 5s antes del instante de la disrupción, estamos eliminando el comportamiento disruptivo previo a la disrupción y el introducir este ruido o un ruido en toda la señal es algo muy semejante. De esta forma, podemos concluir que los comportamientos disruptivos determinantes para APODIS suceden en este intervalo de tiempo.

A pesar de esto en las Figuras 28, 29, 30, 31 se muestran ambos casos ya que a pesar de poseer la misma tasas, los tiempos de predicción no son exactamente iguales. Se elige el criterio para las gráficas de aciertos logarítmicas de adjudicar un valor de  $-0,1ms$  a los aciertos, como explicamos en la sección 4.3, con instantes posteriores al de la disrupción. Debido a esto en los resultados de las gráficas logarítmicas se puede apreciar que cerca del instante cero ascienden rápidamente, esto se debe a que los resultados son expuestos desde el instante de la disrupción hacia atrás.

- Los resultados de la señal 2 (Figura 26, tabla 6) muestran que esta es imprescindible para el predictor. Si introducimos un ruido de las dos formas realizadas, no consigue predecir ni detectar ningún comportamiento disruptivo.
- Los resultados de la señal 3 (Figura 27, tabla 7) muestran que es básica para el correcto funcionamiento del predictor. Si introducimos ruido en esta señal se obtienen unas tasas lo suficientemente bajas para concluir que la señal 3 también es determinante en el funcionamiento de APODIS. En este caso se puede apreciar que en el caso de ruido 5s antes del final o antes del instante de la disrupción, las tasas son ligeramente peores.
- Los resultados de la señal 5 (Figura 29, tabla 9) y 7 (Figura 31, tabla 11) muestran que tienen una gran importancia, no siendo tan imprescindibles como la señal 2 y 3, pero produciendo un empeoramiento de las tasas ya que nos encontramos en un rango de tasa de acierto superior al 80%. Además la diferencia de tiempos de predicción es notable.
- Los resultados de la señal 4 (Figura 28, tabla 8) y 6 (30, 10) muestran que las tasas empeoran ligeramente al igual que los tiempos de predicción pero de una forma menos notable que las anteriores señales.

Al igual que para las campañas de pared de carbono  $C23 - C27b$ , si observamos los resultados en la tabla 12, excepto para la señal 3, se obtienen las mismas tasas de aciertos y falsas alarmas ya sea introduciendo un ruido en toda la señal o 5s antes del final o el tiempo de disrupción. Se puede deducir y concluir los mismos aspectos mencionados en los resultados de CFC.

A pesar de esto en las Figuras 34, 35, 36, 37 se muestran ambos casos como mencionamos en los resultados de CFC.

- Los resultados de la señal 2 (Figura 32, tabla 12) muestran que esta es imprescindible para el predictor. Si introducimos un ruido de las dos formas realizadas, no consigue predecir ni detectar ningún comportamiento disruptivo.
- Los resultados de la señal 3 (Figura 33, tabla 12) muestran que es básica para el correcto funcionamiento del predictor. Si introducimos ruido en esta señal se obtienen unas tasas lo suficientemente bajas para concluir que la señal 3 también es determinante en el funcionamiento de APODIS. En este caso se puede apreciar que en el caso de ruido 5s antes del final o instante de la disrupción, las tasas son mejores pero la antelación con la que se produce la predicción nos lleva a considerar que podría hasta llegar a tratarse como una falsa alarma.
- Los resultados de la señal 4 (Figura 34, tabla 12) y 5 (Figura 35, tabla 12) muestran que tienen una gran importancia, no siendo tan imprescindibles como la señal 2 y 3, ya que producen un empeoramiento de las tasas notable al encontrarnos en un rango de tasa de acierto superior al 80%. Además la diferencia de tiempos de predicción es notable.
- Los resultados de la señal 6 (Figura 36, tabla 12) muestran que las tasas empeoran ligeramente al igual que los tiempos de predicción pero de una forma menos notable que las anteriores señales.
- Los resultados de la señal 7 (Figura 37, tabla 12) muestran algo destacable, los resultados en este caso son iguales en cuanto a tasas pero ligeramente mejores en cuanto a tiempos de predicción. Esto nos permite deducir que la contribución de esta señal es mucho menor que el resto de las señales llegando incluso a confundir al predictor en su funcionamiento.

#### 4.5. Conclusiones

Tras el análisis realizado podemos concluir que debido a la estructura de APODIS y su funcionamiento:

- La señal 1 es imprescindible debido que establece el umbral de disparo en el que APODIS comienza y deja de funcionar.
- Centrándonos en los resultados de las tablas 6,7,12,y Figuras 26,27,32 y 33 se deduce que las señales 2 y 3 son imprescindibles también para el correcto funcionamiento de APODIS. Si estas señales sufren alteraciones, errores, o un comportamiento anómalo las tasas de acierto caen drásticamente.

- En el caso de las demás señales tanto para pared CFC como ILW se puede generalizar que su aportación tiene una significativa relevancia debido a la magnitud de las tasas en las que nos movemos, en torno al 80%. Al ser resultados altos es más complicado mejorar dichos porcentajes.
- Destacar un aspecto curioso, y es que se puede observar que para la pared metálica ILW, la señal 7 puede llegar a contribuir muy poco al correcto funcionamiento del predictor incluso llegando a confundirlo.

#### 4.6. Trabajo futuro

Actualmente se esta llevando a cabo un estudio más avanzado sobre el predictor APODIS en JET. Hoy en día, APODIS realiza su procesamiento procesando ventanas de  $32ms$  en cada señal, cada  $32ms$ , es decir:  $[0, 32]$ ,  $[33, 64]$ ,  $[65, 96]$ , ... El trabajo que se está desarrollando consiste en realizar un aprendizaje similar al que hace APODIS pero realizando un mecanismo de ventanas deslizantes variado. Esto quiere decir que se realizará un procesamiento de ventanas de  $32ms$  pero cada  $2, 4, 8, 16, 32ms$  respectivamente.

## 5. Apéndice de resultados

<b>Apodis Offline CFC: C23-C27b</b>		
<b>Ruido Señal Completa</b>		
<b>Campaña</b>	<b>Tasa Aciertos</b>	<b>Tasa Falsas Alarmas</b>
C23	66.67%(16/24)	4.08%(20/490)
C24	100%(14/14)	3.88%(14/361)
C25	100%(19/19)	8.42%(48/570)
C26	87.93%(51/58)	8.39%(111/1323)
C27a	81.40%(35/43)	0.15%(48/320)
C27b	87.14%(61/70)	5.07%(26/513)
C23-C27b	85.97%(196/228)	7.46%(267/3578)

Tabla 5: Resultados Apodis Offline CFC: C23-C27b

<b>Señal 2 CFC: C23-C27b</b>		
<b>Ruido Señal Completa</b>		
<b>Campaña</b>	<b>Tasa Aciertos</b>	<b>Tasa Falsas Alarmas</b>
C23	0%(0/24)	0%(0/490)
C24	0%(0/14)	0%(0/361)
C25	0%(0/19)	0%(0/570)
C26	0%(0/58)	0%(0/1323)
C27a	0%(0/43)	0%(0/320)
C27b	0%(0/70)	0%(0/513)
C23-C27b	0%(0/228)	0%(0/3578)
<b>Ruido Señal 5s antes final/Tdisr</b>		
<b>Campaña</b>	<b>Tasa Aciertos</b>	<b>Tasa Falsas Alarmas</b>
C23	0%(0/24)	0%(0/490)
C24	0%(0/14)	0%(0/361)
C25	0%(0/19)	0%(0/570)
C26	0%(0/58)	0%(0/1323)
C27a	0%(0/43)	0%(0/320)
C27b	0%(0/70)	0%(0/513)
C23-C27b	0%(0/228)	0%(0/3578)

Tabla 6: Resultados Señal 2 CFC: C23-C27b

<b>Señal 3 CFC: C23-C27b</b>		
<b>Ruido Señal Completa</b>		
<b>Campaña</b>	<b>Tasa Aciertos</b>	<b>Tasa Falsas Alarmas</b>
C23	12.5 %(3/24)	0.41 %(2/490)
C24	42.85 %(6/14)	0.28 %(1/361)
C25	10.53 %(2/19)	0.17 %(1/570)
C26	18.96 %(11/58)	0.45 %(6/1323)
C27a	23.25 %(10/43)	0 %(0/320)
C27b	22.86 %(16/70)	0.19 %(1/513)
C23-C27b	21.05 %(48/228)	0.30 %(11/3578)
<b>Ruido Señal 5s antes final/Tdisr</b>		
<b>Campaña</b>	<b>Tasa Aciertos</b>	<b>Tasa Falsas Alarmas</b>
C23	4.17 %(1/24)	0.20 %(1/490)
C24	21.43 %(3/14)	0.83 %(3/361)
C25	10.53 %(2/19)	0.17 %(1/570)
C26	27.59 %(16/58)	0.45 %(2/1323)
C27a	16.28 %(7/43)	0.62 %(2/320)
C27b	18.57 %(13/70)	1.36 %(7/513)
C23-C27b	18.42 %(42/228)	0.45 %(16/3578)

Tabla 7: Resultados Señal 3 CFC: C23-C27b

<b>Señal 4 CFC: C23-C27b</b>		
<b>Ruido Señal Completa</b>		
<b>Campaña</b>	<b>Tasa Aciertos</b>	<b>Tasa Falsas Alarmas</b>
C23	70.83 %(17/24)	4.90 %(24/490)
C24	92.86 %(13/14)	3.60 %(13/361)
C25	100 %(19/19)	7.37 %(42/570)
C26	87.93 %(51/58)	6.95 %(92/1323)
C27a	79.07 %(34/43)	13.75 %(44/320)
C27b	88.57 %(62/70)	4.68 %(24/513)
C23-C27b	85.97 %(196/228)	6.68 %(239/3578)
<b>Ruido Señal 5s antes final/Tdisr</b>		
<b>Campaña</b>	<b>Tasa Aciertos</b>	<b>Tasa Falsas Alarmas</b>
C23	70.83 %(17/24)	4.90 %(24/490)
C24	92.86 %(13/14)	3.60 %(13/361)
C25	100 %(19/19)	7.37 %(42/570)
C26	87.93 %(51/58)	6.95 %(92/1323)
C27a	79.07 %(34/43)	13.75 %(44/320)
C27b	88.57 %(62/70)	4.68 %(24/513)
C23-C27b	85.97 %(196/228)	6.68 %(239/3578)

Tabla 8: Resultados Señal 4 CFC: C23-C27b

<b>Señal 5 CFC: C23-C27b</b>		
<b>Ruido Señal Completa</b>		
<b>Campaña</b>	<b>Tasa Aciertos</b>	<b>Tasa Falsas Alarmas</b>
C23	58.33 %(14/24)	2.04 %(10/490)
C24	92.86 %(13/14)	3.04 %(11/361)
C25	100 %(19/19)	3.68 %(21/570)
C26	81.03 %(47/58)	4.84 %(64/1323)
C27a	74.42 %(32/43)	7.81 %(25/320)
C27b	82.86 %(58/70)	3.12 %(16/513)
C23-C27b	80.26 %(183/228)	4.11 %(147/3578)
<b>Ruido Señal 5s antes final/Tdisr</b>		
<b>Campaña</b>	<b>Tasa Aciertos</b>	<b>Tasa Falsas Alarmas</b>
C23	58.33 %(14/24)	2.04 %(10/490)
C24	92.86 %(13/14)	3.04 %(11/361)
C25	100 %(19/19)	3.68 %(21/570)
C26	81.03 %(47/58)	4.84 %(64/1323)
C27a	74.42 %(32/43)	7.81 %(25/320)
C27b	82.86 %(58/70)	3.12 %(16/513)
C23-C27b	80.26 %(183/228)	4.11 %(147/3578)

Tabla 9: Resultados Señal 5 CFC: C23-C27b

<b>Señal 6 CFC: C23-C27b</b>		
<b>Ruido Señal Completa</b>		
<b>Campaña</b>	<b>Tasa Aciertos</b>	<b>Tasa Falsas Alarmas</b>
C23	70.83 %(17/24)	4.49 %(22/490)
C24	92.86 %(13/14)	3.60 %(13/361)
C25	100 %(19/19)	8.77 %(50/570)
C26	87.93 %(51/58)	8.08 %(107/1323)
C27a	81.39 %(35/43)	15 %(48/320)
C27b	87.14 %(61/70)	5.07 %(26/513)
C23-C27b	85.96 %(196/228)	7.43 %(266/3578)
<b>Ruido Señal 5s antes final/Tdisr</b>		
<b>Campaña</b>	<b>Tasa Aciertos</b>	<b>Tasa Falsas Alarmas</b>
C23	70.83 %(17/24)	4.49 %(22/490)
C24	92.86 %(13/14)	3.60 %(13/361)
C25	100 %(19/19)	8.77 %(50/570)
C26	87.93 %(51/58)	8.08 %(107/1323)
C27a	81.39 %(35/43)	15 %(48/320)
C27b	87.14 %(61/70)	5.07 %(26/513)
C23-C27b	85.96 %(196/228)	7.43 %(266/3578)

Tabla 10: Resultados Señal 6 CFC: C23-C27b

<b>Señal 7 CFC: C23-C27b</b>		
<b>Ruido Señal Completa</b>		
<b>Campaña</b>	<b>Tasa Aciertos</b>	<b>Tasa Falsas Alarmas</b>
C23	62.5 %(15/24)	2.24 %(11/490)
C24	92.86 %(13/14)	3.60 %(13/361)
C25	100 %(19/19)	10 %(57/570)
C26	89.65 %(52/58)	8.77 %(116/1323)
C27a	76.74 %(33/43)	10.625 %(34/320)
C27b	88.57 %(62/70)	4.48 %(23/513)
C23-C27b	85.09 %(194/228)	7.10 %(254/3578)
<b>Ruido Señal 5s antes final/Tdisr</b>		
<b>Campaña</b>	<b>Tasa Aciertos</b>	<b>Tasa Falsas Alarmas</b>
C23	62.5 %(15/24)	2.24 %(11/490)
C24	92.86 %(13/14)	3.60 %(13/361)
C25	100 %(19/19)	10 %(57/570)
C26	89.65 %(52/58)	8.77 %(116/1323)
C27a	76.74 %(33/43)	10.625 %(34/320)
C27b	88.57 %(62/70)	4.48 %(23/513)
C23-C27b	85.09 %(194/228)	7.10 %(254/3578)

Tabla 11: Resultados Señal 7 CFC: C23-C27b

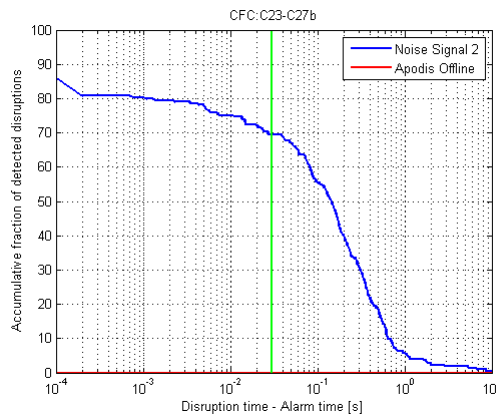
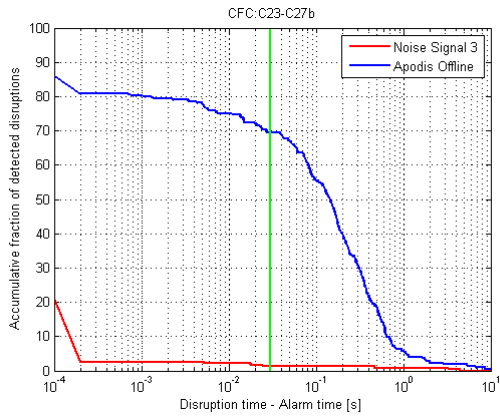
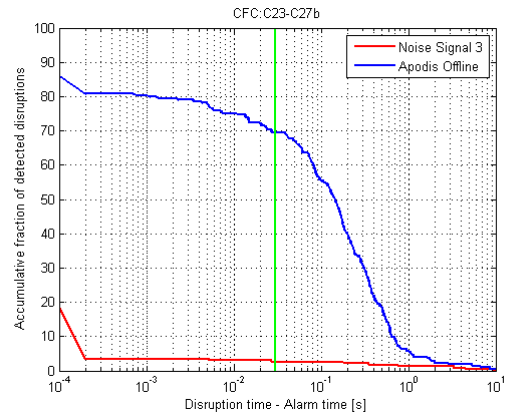


Figura 26: Resultados Señal 2 CFC: C23-C27b

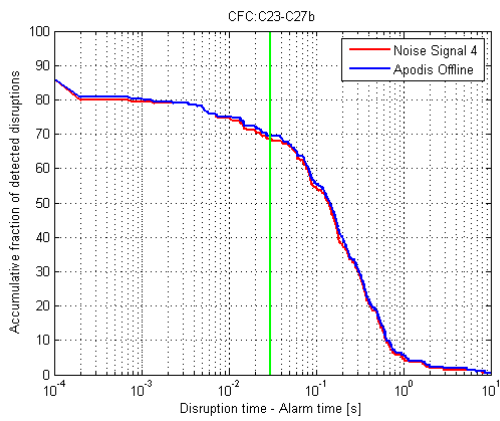


(a) Ruido Señal Completa

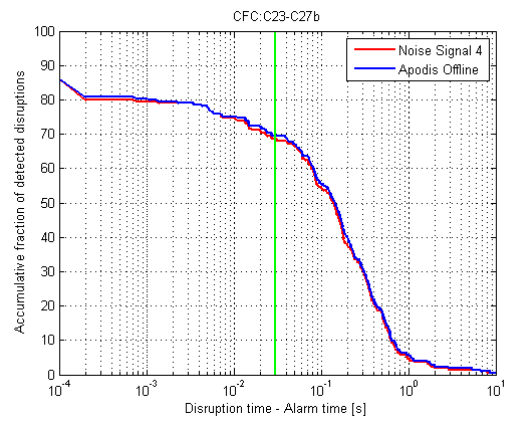


(b) Ruido Señal 5s

Figura 27: Resultados Señal 3 CFC: C23-C27b

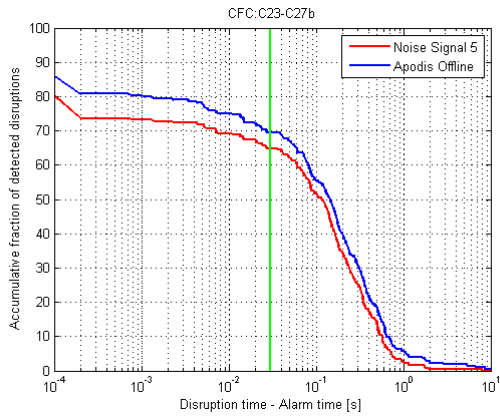


(a) Ruido Señal Completa

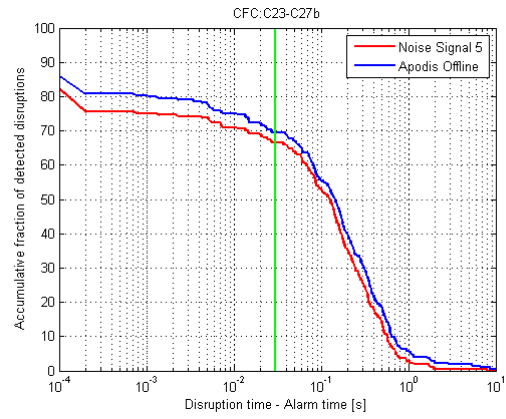


(b) Ruido Señal 5s

Figura 28: Resultados Señal 4 CFC: C23-C27b

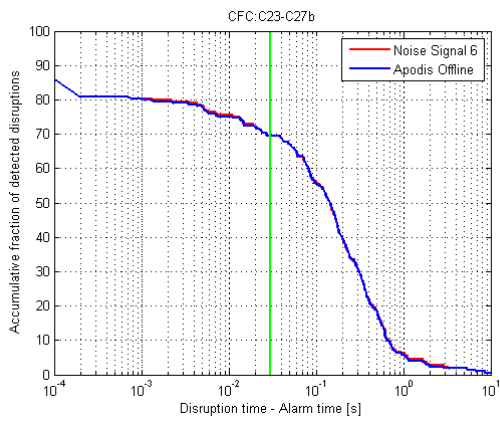


(a) Ruido Señal Completa

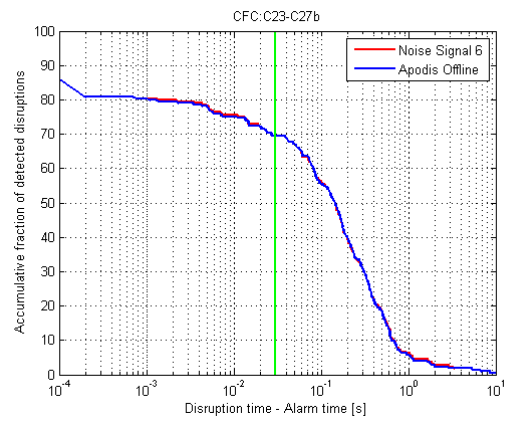


(b) Ruido Señal 5s

Figura 29: Resultados Señal 5 CFC: C23-C27b

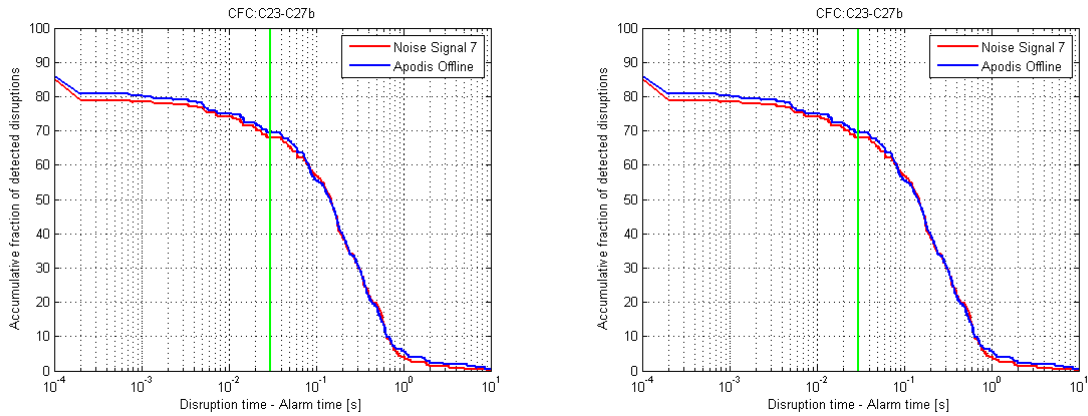


(a) Ruido Señal Completa



(b) Ruido Señal 5s

Figura 30: Resultados Señal 6 CFC: C23-C27b



(a) Ruido Señal Completa

(b) Ruido Señal 5s

Figura 31: Resultados Señal 7 CFC: C23-C27b

<b>ILW: C28-C30</b>		
<b>Ruido Señal Completa</b>		
<b>Señal</b>	<b>Tasa Aciertos</b>	<b>Tasa Falsas Alarmas</b>
2	0 % (0/201)	0 % (0/1036)
3	5.47 % (11/201)	0 % (0/1036)
4	82.09 % (165/201)	1.54 % (16/1036)
5	80.60 % (162/201)	1.45 % (15/1036)
6	84.58 % (170/201)	2.03 % (21/1036)
7	86.57 % (174/201)	2.99 % (31/1036)
APODIS offline	87.06 % (175/201)	2.22 % (23/1036)
<b>Ruido Señal 5s antes final/Tdisr</b>		
<b>Señal</b>	<b>Tasa Aciertos</b>	<b>Tasa Falsas Alarmas</b>
2	0 % (/201)	6.27 % (65/1036)
3	8.95 % (18/201)	0 % (/1036)
4	82.09 % (165/201)	1.54 % (16/1036)
5	80.60 % (162/201)	1.45 % (15/1036)
6	84.58 % (170/201)	2.03 % (21/1036)
7	86.57 % (174/201)	2.99 % (31/1036)
APODIS offline	87.06 % (175/201)	2.22 % (23/1036)

Tabla 12: Resultados ILW: C28-C30

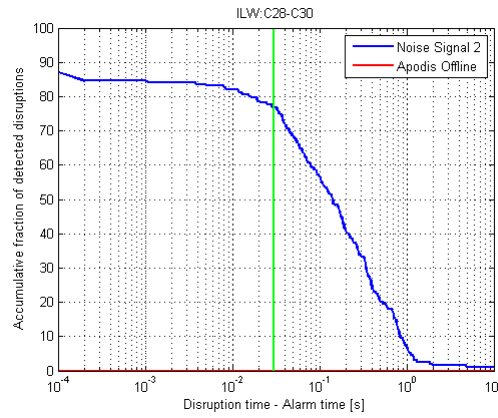
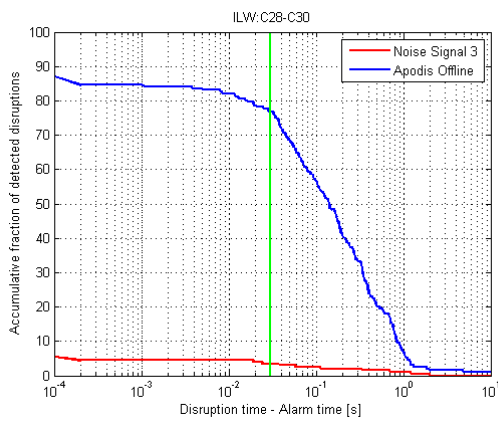
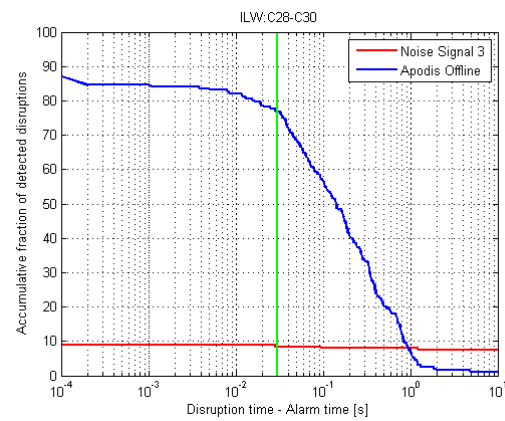


Figura 32: Resultados Señal 2 ILW: C28-C30

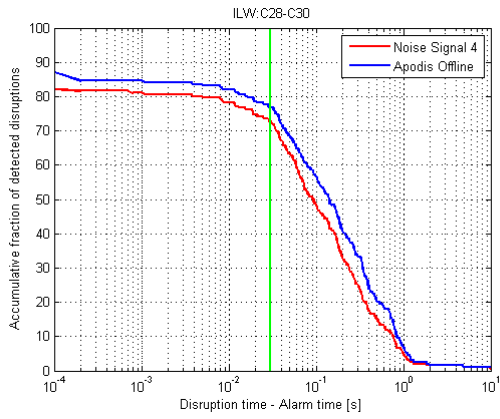


(a) Ruido Señal Completa

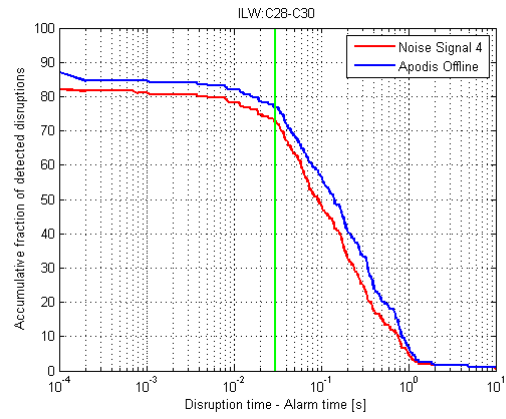


(b) Ruido Señal 5s

Figura 33: Resultados Señal 3 ILW: C28-C30

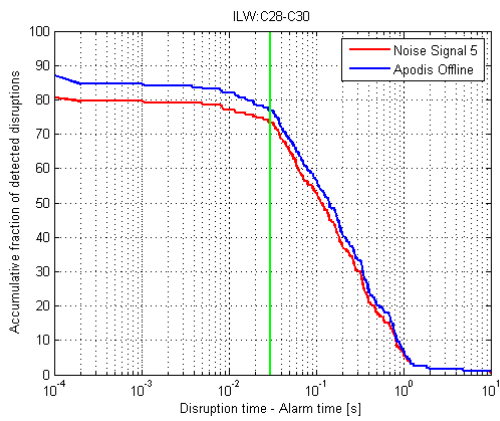


(a) Ruido Señal Completa

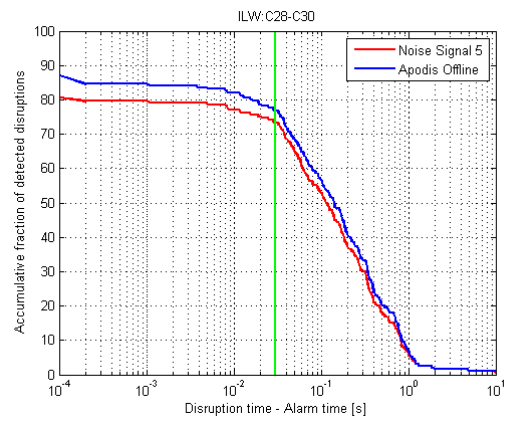


(b) Ruido Señal 5s

Figura 34: Resultados Señal 4 ILW: C28-C30

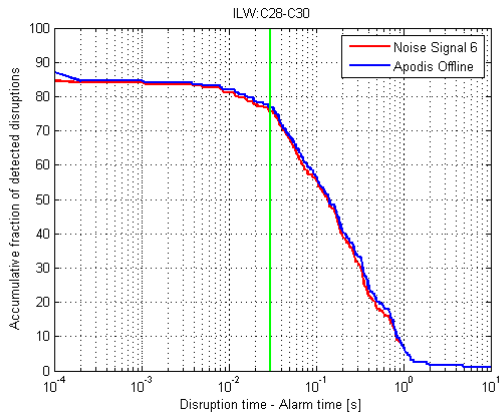


(a) Ruido Señal Completa

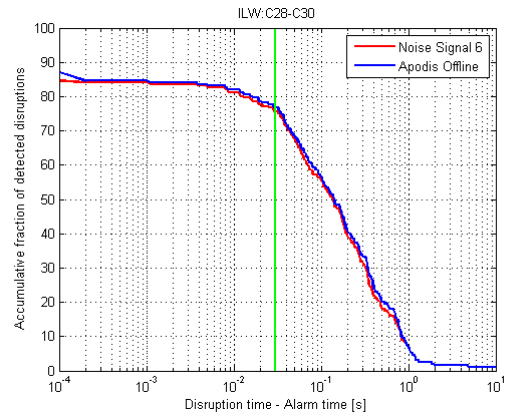


(b) Ruido Señal 5s

Figura 35: Resultados Señal 5 ILW: C28-C30

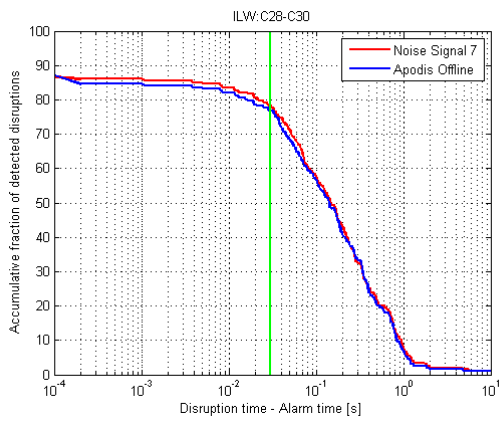


(a) Ruido Señal Completa

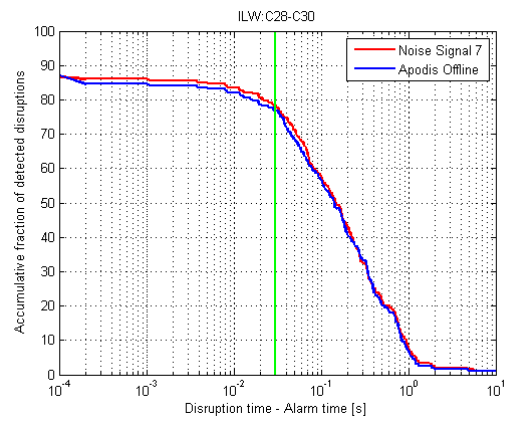


(b) Ruido Señal 5s

Figura 36: Resultados Señal 6 ILW: C28-C30



(a) Ruido Señal Completa



(b) Ruido Señal 5s

Figura 37: Resultados Señal 7 ILW: C28-C30

## Referencias

- [1] de Vries, B.J.M., Van Vuuren, D.P. and Hoogwijk, M.M.: *Renewable energy sources: Their global potential for the first-half of the 21st century at a global level: An integrated approach.* Energy Policy, vol.35(4), 2007.
- [2] Eddington, A.S.: *The Internal Constitution of the stars.* Cambridge University Press, 1926. ISBN 978-05-21-33708-3.
- [3] Tonks, L. and Langmuir, I.: *Oscillations in ionized gases. Physical Review, vol.33(2), pages 195-210, 1929.*
- [4] Kikuchi, M.: *Frontiers in Fusion Research.* Springer,2011. ISBN 978-1-84996-410-4.
- [5] Wesson, J.: *The science of JET.* JET Publications Office, 2000.
- [6] Bell, A. R.: «*Laser Produced Plasmas*»,*Plasma Physics: An Introductory Course.* Cambridge University Press,Cambridge, 1993.
- [7] Wagner, F. et al.: *Recent results of H-mode studies on ASDEX*, Proceedings of the Thirteenth Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research (IAEA, Vienna), vol. I, pp. 277-90.1982.
- [8] McCracken, G.M. and Stott, P.: *Fusion: the energy of the universe.* Elsevier, 2005. ISBN 0-12-481851-X.
- [9] Wesson, J.: *Tokamaks.* Oxford University Press, 1987. ISBN 0-198-50922-7.
- [10] González Sanz, S.: *Data Mining Techniques for massive databases: an application to JET and TJ-II fusion devices.* CIEMAT y UCM, 2012.
- [11] Thonemann, P. C. and Cowhig, W. T.: *The role of the self magnetic field in high current gas discharges. Proceedings of the Physical Society.* Section B, vol.64(7), pages 345-354, 1951.
- [12] Thomson, G. P. and Blackman, M.: *Improvements in or relating to gas discharge apparatus for producing themonuclear reactions.* British patent 817681, 1946.
- [13] Spitzer, L. A.: *A proposed Stellarator.* Princeton University Plasma Physics Laboratory, U.S. Atomic Energy Commission, 1951.
- [14] Rebut, P. H. and JET design team: *The JET project-design proposal.* Thecnical report, Commission of the European Communities EUR-5516e (EUR-JET-R5), 1976.
- [15] Schuller, F. C.: *Disruptions in tokamaks.* Plasma Physics and Controlled Fusion, vol.37(11A), page A135, 1995.
- [16] ITER Physics Expert Group on Disruptions, Plasma Control, and MHD et al.: *Chapter 3: MHD stability, operational limits and disruptions.* Nuclear Fusion, Vol.39, No.12, 1999.

- [17] Hender, T.: *Review of disruptions*. EURATOM/CCFE Fusion Association, Culham, UK
- [18] Savtchikov, A.: *Mitigation of disruptions in a tokamak by means of large gas injection*. Inaugural dissertation, Heinrich-Heine Universitat, Dusseldorf, Germany, 2003.
- [19] Murarai, A., Vagliasindi, G., Zedda, M. K., Felton, R., Sammon, C., Fortuna, L., Arena, P. and JET-EFDA contributors: *Prototype of an adaptive disruption predictor for a jet based on fuzzy logic and regression trees*. Nuclear Fusion, vol.48(3), page 035010, 2008.
- [20] Morris, A. W.: *MHD instability control, disruptions, and error fields in Tokamaks*. PPCF Vol.34, N.13. Pps 1871-1879, 1992.
- [21] Cannas, B. et al. *Disruptions forecasting at JET using Neural Networks*. Nuclear Fusion, vol.44, 68-76, 2004.
- [22] B.Cannas, B., Fanni, A., Sias, G., Sonato, P., Zedda, M.K.: *Neural approaches to disruption prediction at JET*. 31st EPS Conference on Plasma Physics London, ECA Vol.28G, P-1.167, 2004.
- [23] Cannas, B. et al. *A prediction tool for real-time application in the disruption protection system at JET*. Nuclear Fusion, vol.47, No.11, 1559-1569, 2007.
- [24] Pautasso, G. et al.: *On-line prediction and mitigation of disruptions in ASDEX Upgrade*. Nuclear Fusion, vol.42, 100-08, 2002.
- [25] Wroblewski, D., Jahns, G.L. and Leuer, J.A.: *Tokamak disruption alarm based on a neural network model of the high- beta limit*. Nuclear Fusion, vol.37, 725, 1997.
- [26] Sengupta, A. and Ranjan, P.: *Prediction of density limit disruption boundaries from diagnostic signals using neural networks*. Nuclear Fusion, vol.41, 487, 2001.
- [27] Yoshino, R.: *Neural-net disruption predictor in JT-60U*. Nuclear Fusion, vol.43, 1771,2003.
- [28] Yoshino, R.: *Neural-net predictor for beta limit disruptions in JT-60U*. Nuclear Fusion, vol.45, 2005.
- [29] Windsor, C.G. et al.: *A cross-tokamak neural network disruption predictor for the JET and ASDEX Upgrade tokamaks*. Nuclear Fusion, vol.45, 337,2005.
- [30] Ratta, G. A., Vega, J., Murari, A., Vagliasindi, G., Johnson, M. F., de Vries, P. C. and JET-EFDA contributors: *An advanced disruption predictor for JET tested in a simulated real-time environment*. Nuclear Fusion, vol. 50(2), page 025005, 2010.
- [31] Cherkassky, V., Mulier, F.: *Learning from data*. John Wiley and Sons, Inc., 1998.
- [32] G. A. Rattá, G. A., Vega, J., Murari, A., Johnson, M. and JET-EFDA Contributors: *Feature extraction for improved disruption prediction analysis at JET*. Review of Scientific Instruments, 79, 10F328, 2008.

- [33] G. A. Rattá, G. A., Vega, J., Murari, Vagliasindi, G., Johnson, M. F., de Vries, P. C. and JET-EFDA Contributors: *An advanced disruption predictor for JET tested in a simulated real-time environment*. Nuclear Fusion, vol.50, 25005 (10pp),2010.
- [34] Vega, J., Dormido-Canto, S., López, J.M.,Murari, A., Ramírez, J.M., Moreno, R., Ruis, M., Alvez, D., Felton, R. and JET EFDA contributors: *Results of the JET Real-Time Disruption Predictor in the ITER-Like Wall Campaigns*. Diagnostics, Data Acquisition and Remote Participation. SOFT 2012.
- [35] G. A. Rattá, G. A., Vega, J., Murari, Vagliasindi, G., Johnson, M. F., de Vries, P. C. and JET-EFDA Contributors: *An advanced disruption predictor for JET tested in a simulated real-time environment*. Nuclear Fusion, vol.50, 25005 (10pp),2010.
- [36] G. A. Rattá, G. A., Vega, J., Murari and JET-EFDA Contributors: *Improved feature selection based on genetic algorithms for real time disruption prediction on JET* Fusion Engineering and Design, 2012.
- [37] López, J. M., Vega, J., Alves, D., Dormido-Canto, S., Murari, A., Ramírez, J.M. et al: *Implementation of the disruption predictor APODIS in JET's real-time networkd using the MARTe framework*. Proc. of the 18th REAL-TIME Conference. June 11-15, 2012. Berkeley (CA), USA.

