



Aprendizaje Automático en Bases de Datos de Fusión Nuclear

Sebastián Dormido Canto

Departamento de Informática y Automática
Universidad Nacional de Educación a Distancia

Madrid, 5 de Abril de 2016

Jesús Vega Sánchez, Gonzalo Farias, Raul Moreno, Giuseppe Ratta, Jesús Manuel Ramírez, Andrea Murari

1. Introducción - Motivación

- Requerimientos de energía
- La Fusión nuclear como alternativa

2. Problemas en bases de datos de fusión

- Reconocimiento de patrones:
 - Aplicación: Formas de onda
 - Aplicación: Imágenes (Eliminación de la luz parásita en diagnóstico TS)
- Clasificación supervisada:
 - Aplicación: Clasificación de las imágenes del diagnóstico TS (Thomson Scattering)

3. Predicción de Disrupciones en un dispositivo de fusión termonuclear.

- ¿Qué se entiende por disrupción?
- Predictores de disrupciones
- Predictores en JET (JPS y APODIS)
- Estructura de APODIS
- Algunas consideraciones prácticas

4. Trabajos presentes/futuros

Requerimientos de energía

- Para 2100 se espera requerir hasta el **cuádruple** de energía*
- Los combustibles fósiles son recursos no renovables.
- La fisión nuclear (gran capacidad energética) produce residuos radioactivos.
- La fusión nuclear (en desarrollo) como alternativa.



* *International climate policy architectures: Overview of the EMF 22 International Scenarios, Clarke et al, Energy Economics, 2009*

¿Qué es la fusión nuclear?

Es una reacción en la que se unen 2 núcleos ligeros para formar uno más pesado. Este proceso desprende energía porque el peso del núcleo pesado es menor que la suma de los pesos de los núcleos más ligeros.

¿Cuál es la tecnología utilizada en fusión?

El problema que se plantea es la unión de núcleos que están cargados positivamente.

Una posible solución sería acelerarlos en un acelerador de partículas ➡ Poco rentable

Para vencer las fuerzas electrostáticas de repulsión ➡ Temperaturas de millones de grados

El gas se encuentra en estado de **plasma**

Confinamiento inercial

Consiste en comprimir y calentar el combustible nuclear de forma tan rápida que la fusión ocurre antes de que el mismo pueda expandirse y tocar las paredes (mediante haces de rayos láser).

Confinamiento magnético

El plasma se confina mediante campos magnéticos de tal forma que se crea una barrera entre las partículas cargadas del plasma y la pared de la cámara que lo contiene.

↓
Tokamaks

↓
Stellerators

La fusión nuclear como alternativa

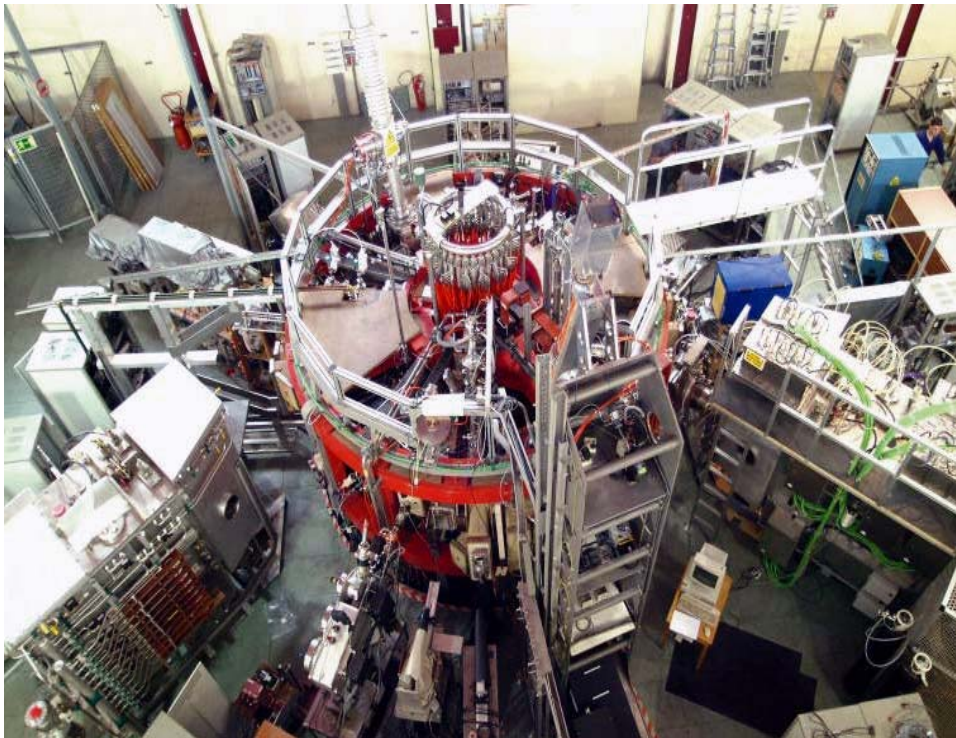
Ventajas

- Energía prácticamente inagotable.
- Combustibles: deuterio y tritio.
- No se producen residuos radiactivos, sólo Helio.

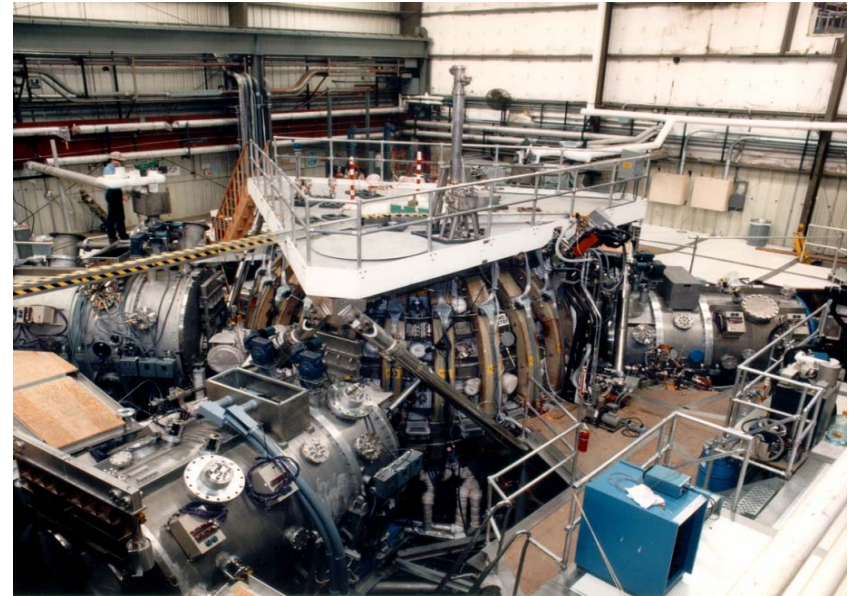
Limitaciones

- Tecnológicamente difícil de controlar.
- No se conoce bien la física del proceso.
- Los costes son elevados (ITER, € 15 Mil Millones).

Dispositivos experimentales de fusión

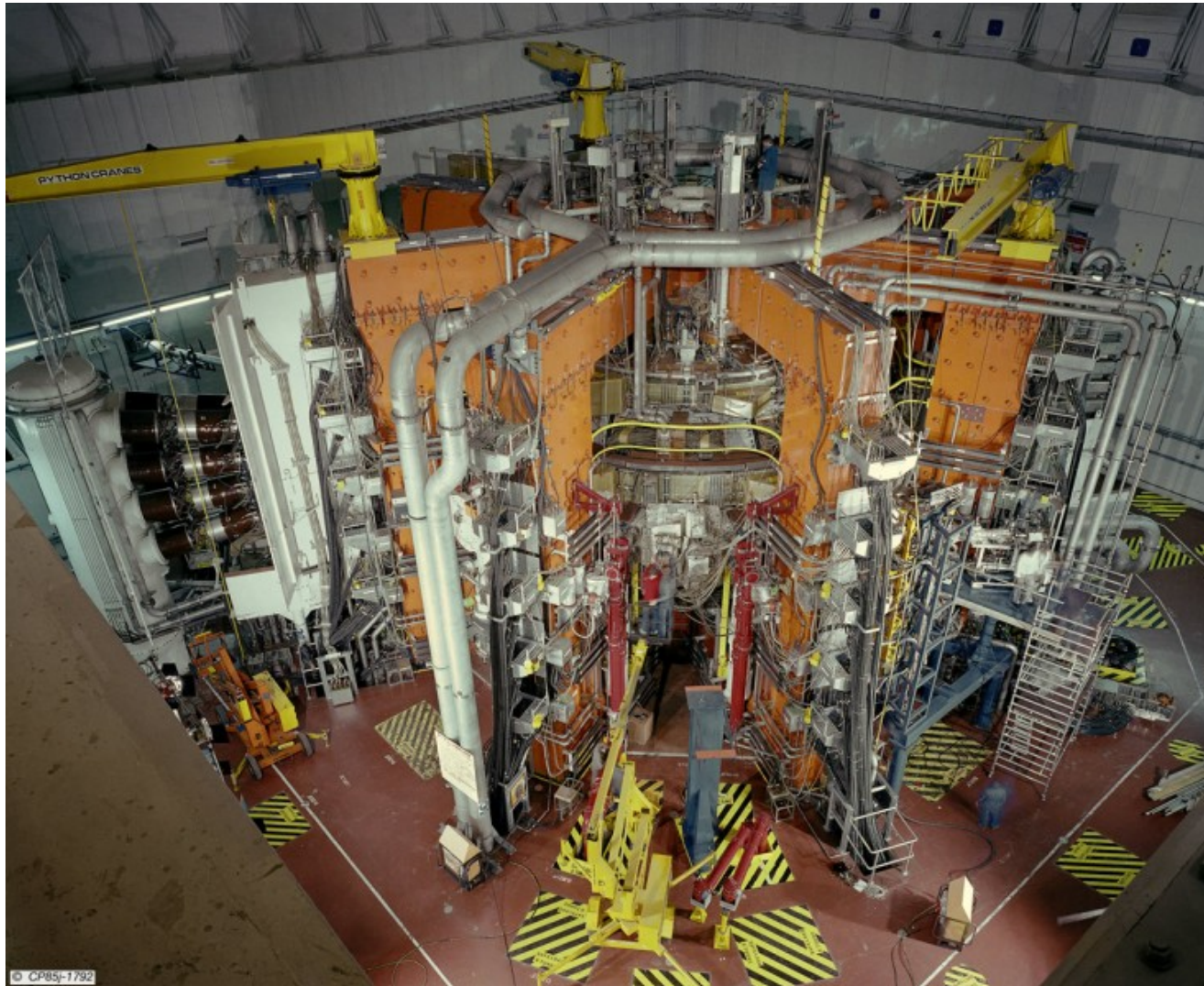


TJ-II



DIII-D

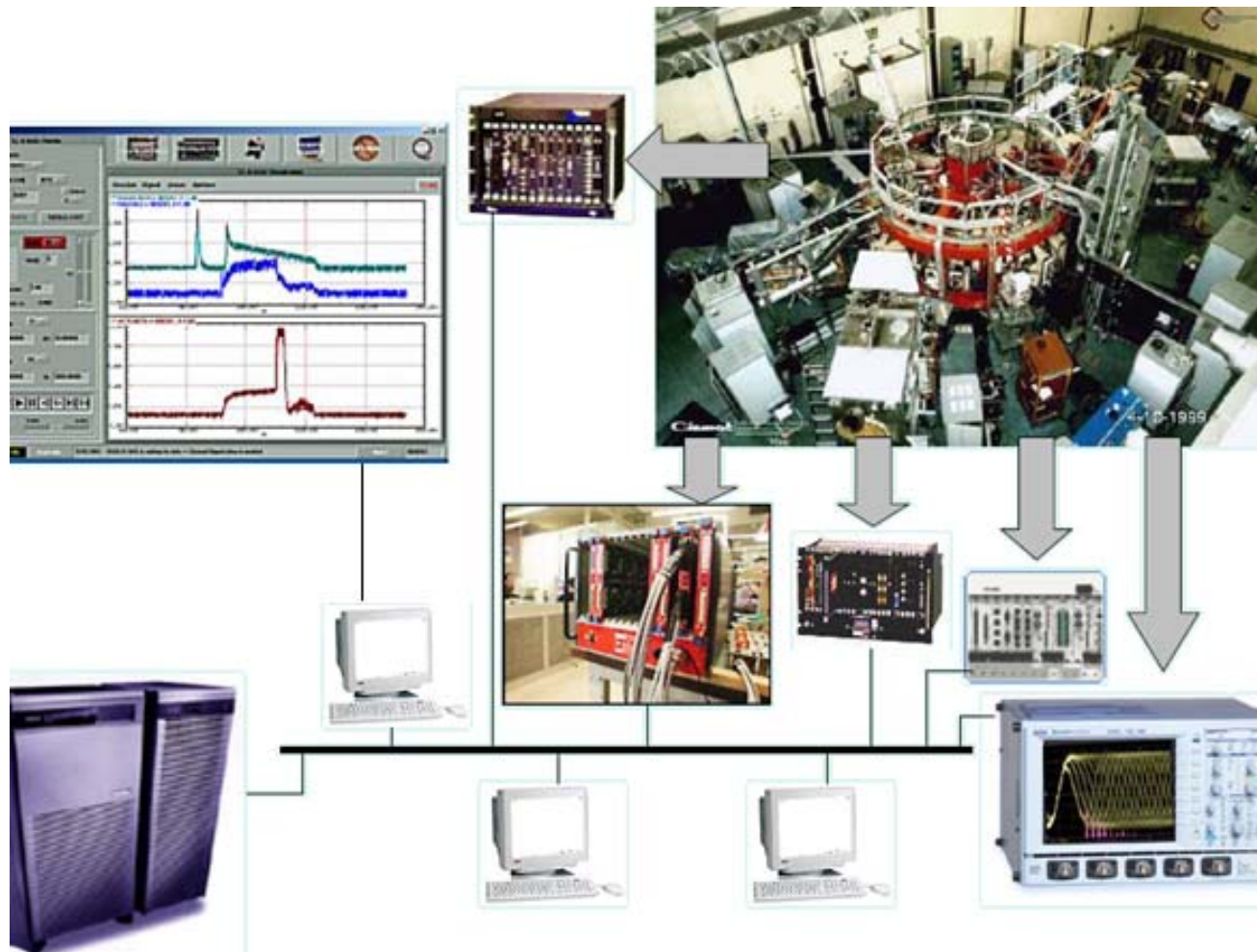
Dispositivos experimentales de fusión



JET (Joint European Torus)

Introducción - Motivación

Para el estudio de los fenómenos físicos que ocurren en el plasma los dispositivos de fusión poseen una gran variedad de instrumentos de medida



Diagnósticos: mediciones indirectas del estado del plasma

Introducción - Motivación

- Los experimentos en los dispositivos de fusión son realizados mediante lo que se denomina ***descarga***.
- Una descarga de unos segundos de duración puede generar grandes cantidades de información.
- El TJ-II tiene más de **1000** canales de medida y JET más de **10000**.
- Alrededor de **10GBytes por descarga** pueden ser almacenados en JET, **100 TBytes por año**.
- ITER podría generar **1TB por descarga**, **1PBytes por año**.

¡¡Se estima que sólo el 10% de los datos son analizados!!



Se requieren **SISTEMAS AUTOMÁTICOS E INTELIGENTES** de procesamiento de la información.

1. Introducción - Motivación

- Requerimientos de energía
- La Fusión nuclear como alternativa

2. Problemas en bases de datos de fusión

- Reconocimiento de patrones:

 - Aplicación: Formas de onda
 - Aplicación: Imágenes (Eliminación de la luz parásita en diagnóstico TS)
- Clasificación supervisada:
 - Aplicación: Clasificación de las imágenes del diagnóstico TS (Thomson Scattering)

3. Predicción de Disrupciones en un dispositivo de fusión termonuclear.

- ¿Qué se entiende por disrupción?
- Predictores de disrupciones
- Predictores en JET (JPS y APODIS)
- Estructura de APODIS
- Algunas consideraciones prácticas

4. Trabajos presentes/futuros

Reconocimiento de patrones

Aplicación: Búsqueda de patrones formas de onda

Implementación: enfoque sintáctico (reconocimiento estructural de patrones)

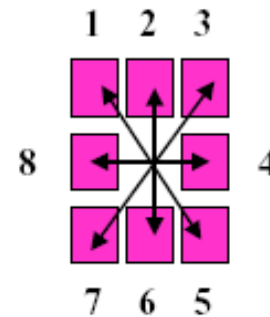
Se considera que los patrones están compuestos por subpatrones más simples



Primitivas

2 2 2 2 2 2 2
2 2 2 2 2 2 2

0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0

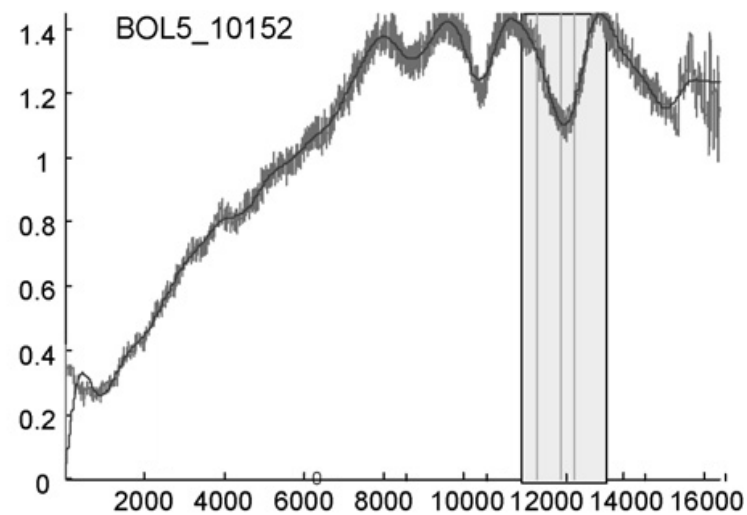
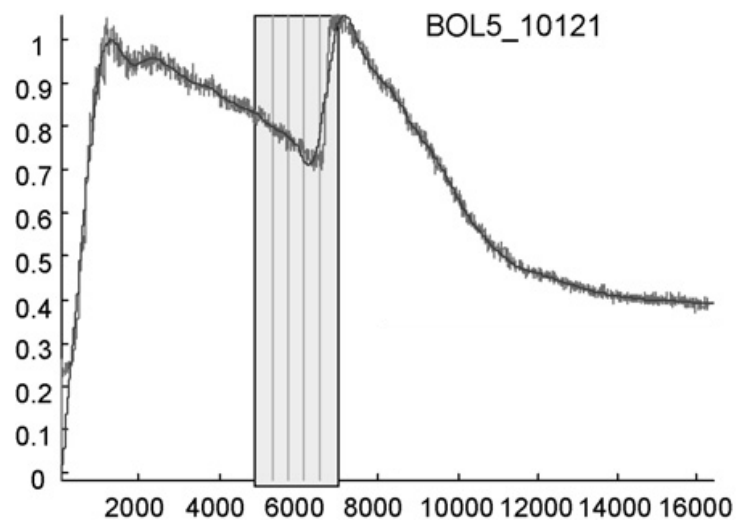
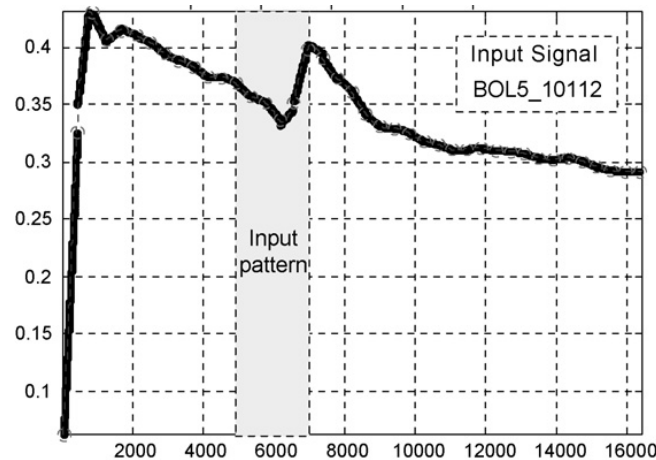


codificación en 8-directiones

**Patrón a
buscar**

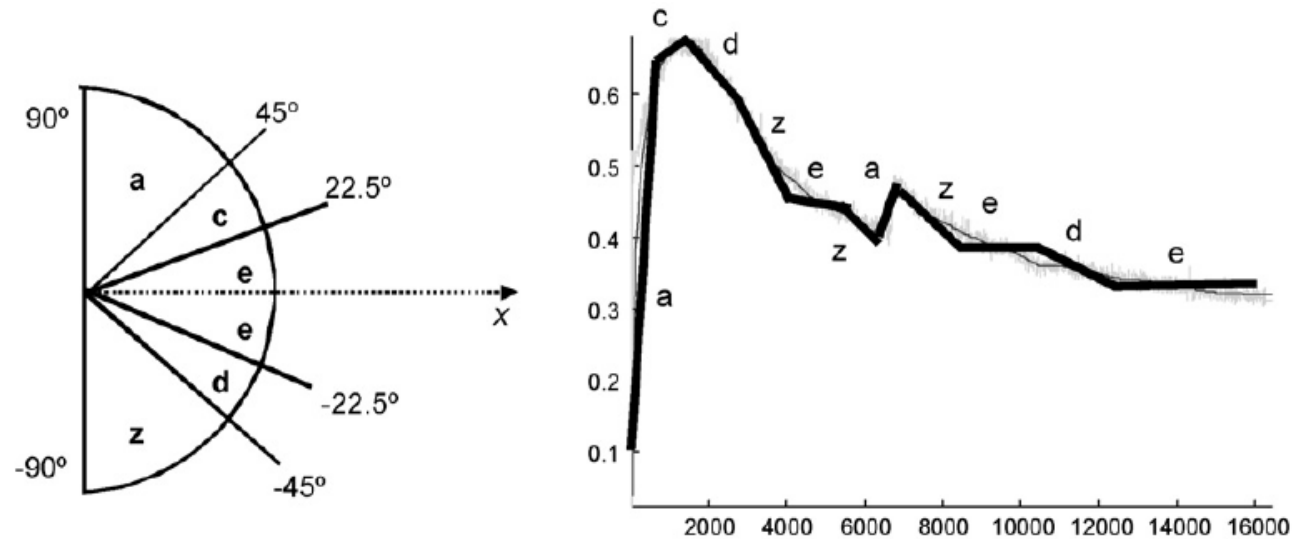
33333343444555566677777777 ... 333446 ... 3333333333 ... 22

En el caso de las señales de fusión la búsqueda de patrones similares podría implicar física similar

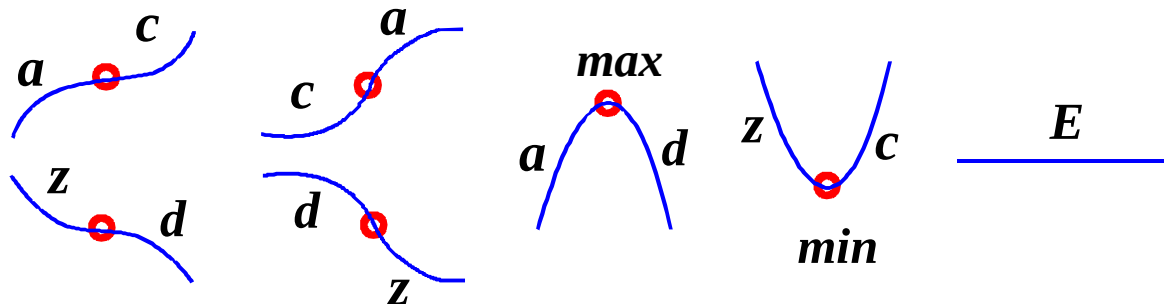


Reconocimiento de patrones

Primitivas a partir de segmentos de longitud constante



Primitivas a partir de la concavidad



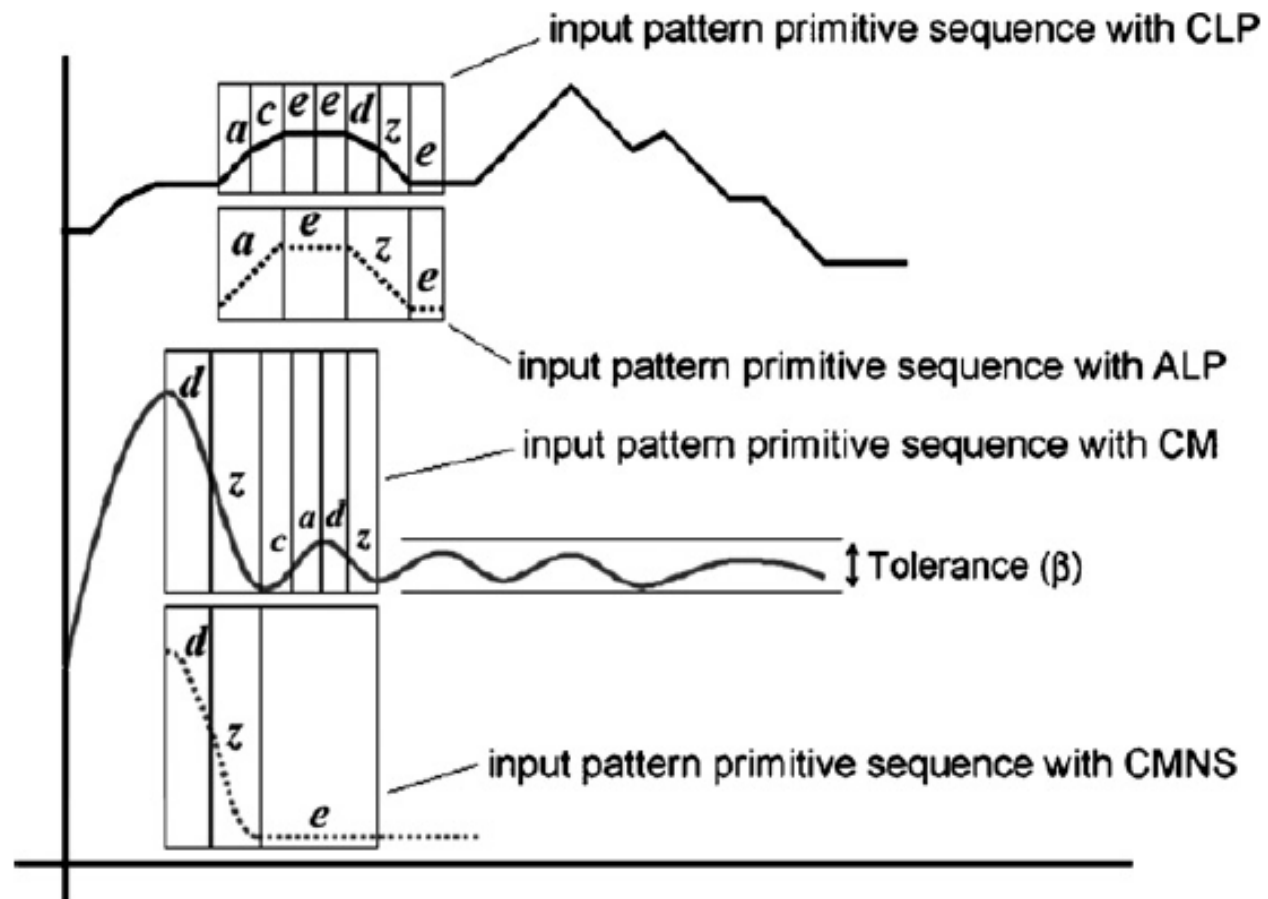
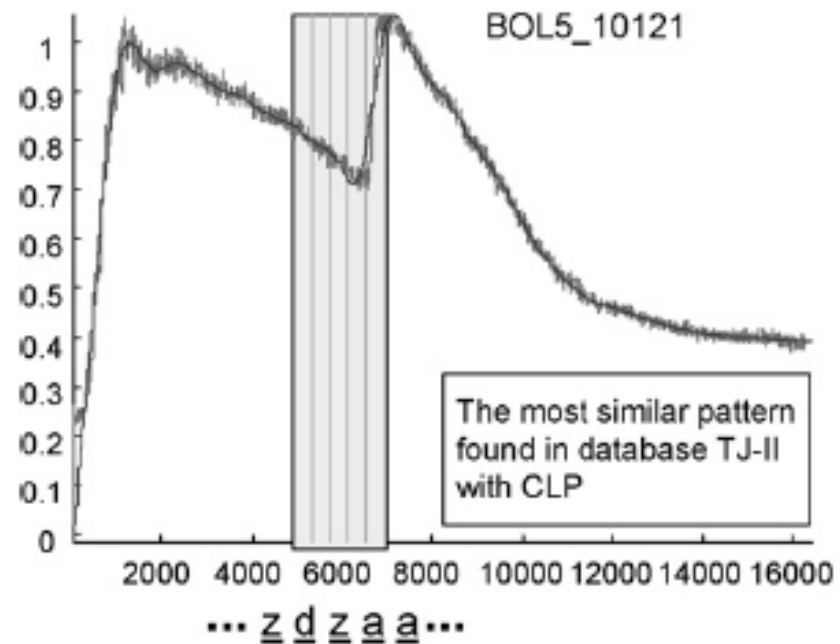
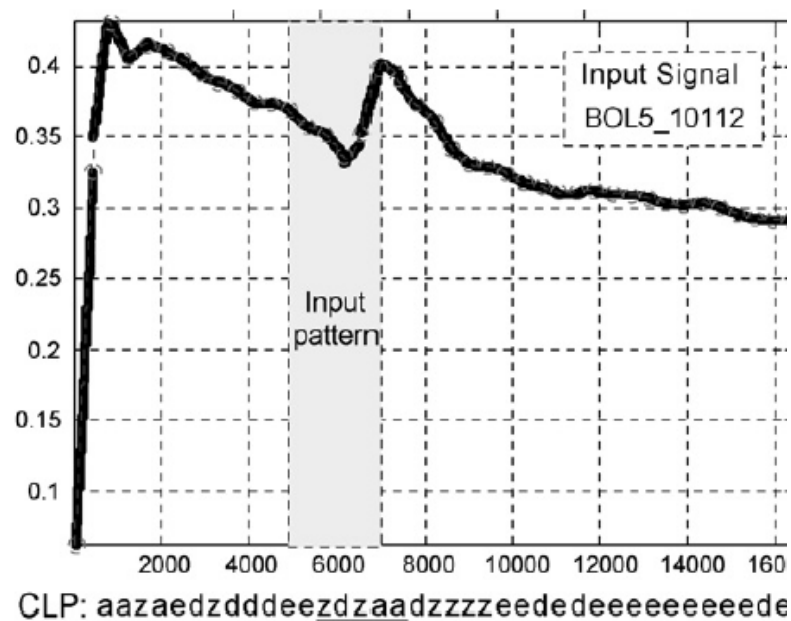


Fig. 4. Primitive sequences in an input pattern with the different methods.

Ejemplo: Primitivas a partir de segmentos de longitud constante



1. Introducción - Motivación

- Requerimientos de energía
- La Fusión nuclear como alternativa

2. Problemas en bases de datos de fusión

- Reconocimiento de patrones:
 - Aplicación: Formas de onda
 - ➡ – Aplicación: Imágenes (Eliminación de la luz parásita en diagnóstico TS)
- Clasificación supervisada:
 - Aplicación: Clasificación de las imágenes del diagnóstico TS (Thomson Scattering)

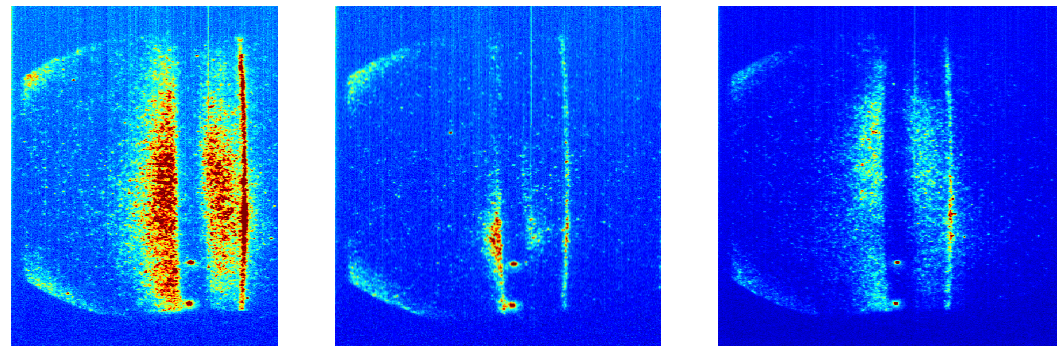
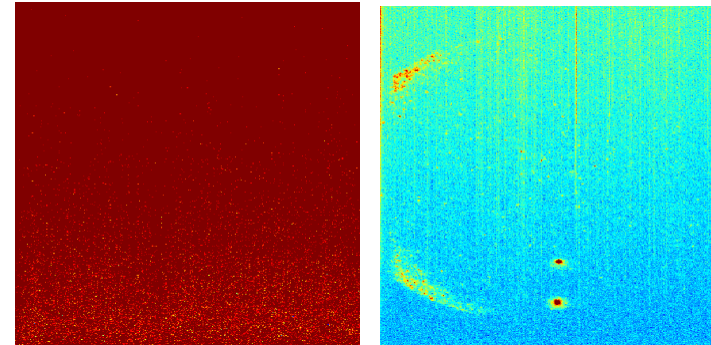
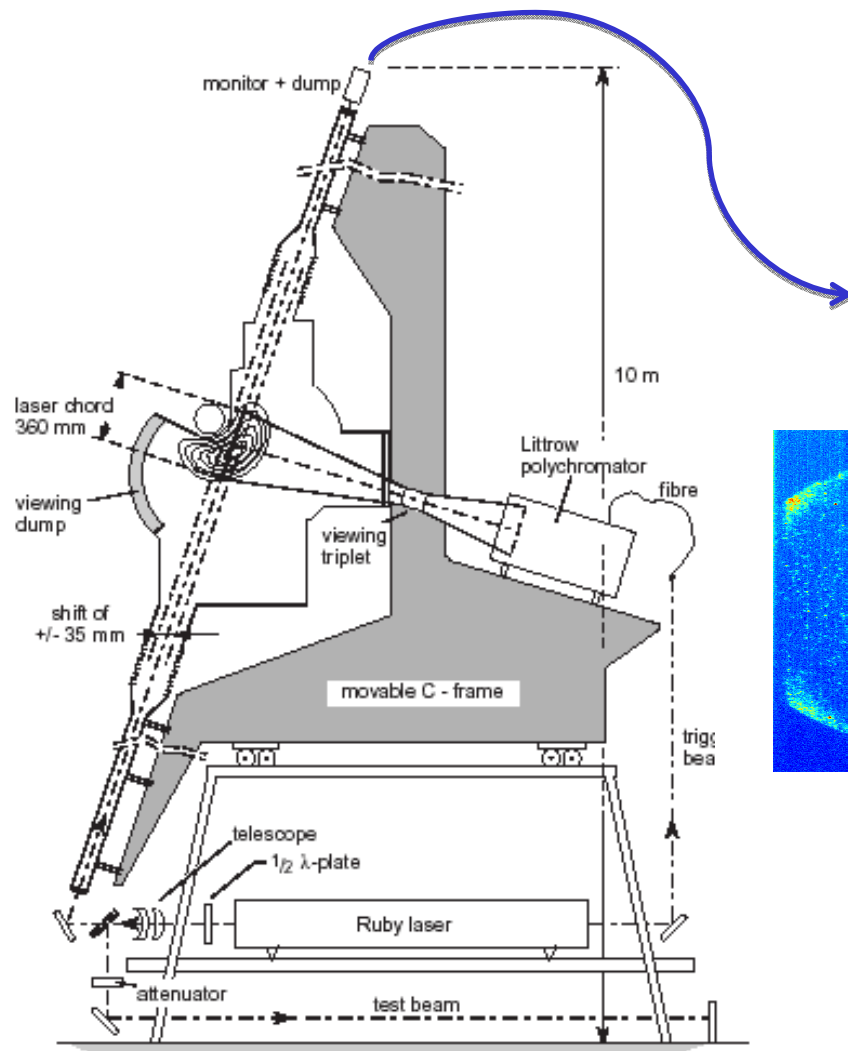
3. Predicción de Disrupciones en un dispositivo de fusión termonuclear.

- ¿Qué se entiende por disrupción?
- Predictores de disrupciones
- Predictores en JET (JPS y APODIS)
- Estructura de APODIS
- Algunas consideraciones prácticas

4. Trabajos presentes/futuros

Reconocimiento de patrones

Aplicación: Imágenes (Eliminación de la luz parásita en diagnóstico Thomson Scattering)

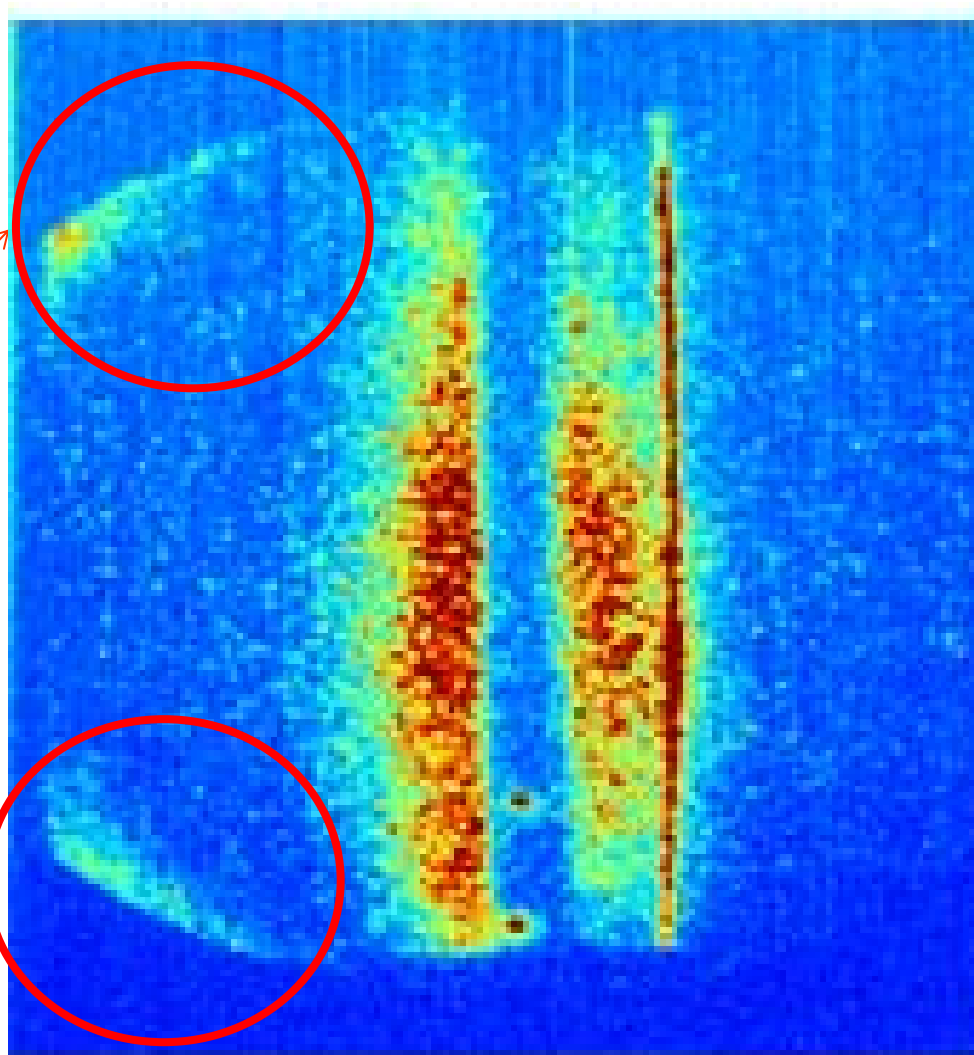


Pattern	Description
BKGND	CCD Camera background
CUTOFF	Plasma reaching the cut-off density during ECH heating
ECRH	Plasma during ECH heating
NBI	Plasma during NBI heating
STRAY	A collapsed discharge

Table 1 Patterns or classes of the TJ-II Thomson Scattering Diagnostic.

Análisis espectral de la luz dispersada por el plasma

**Luz parásita
(ruido)**



Causas de la luz parásita:

- La reflexión de Fresnel de la superficie de las lentes.
- Burbujas de aire en el cristal.
- Difracción debido a bordes.
- Polvo, etc...

Posibles soluciones:

- Aplicar filtro hardware: Normalmente costosos
- Aplicar filtros paso bajo o la transformada wavelet.
- La aplicación de filtros con efecto global sobre la imagen completa no resultan adecuados porque ruido e información se reducen en la misma proporción



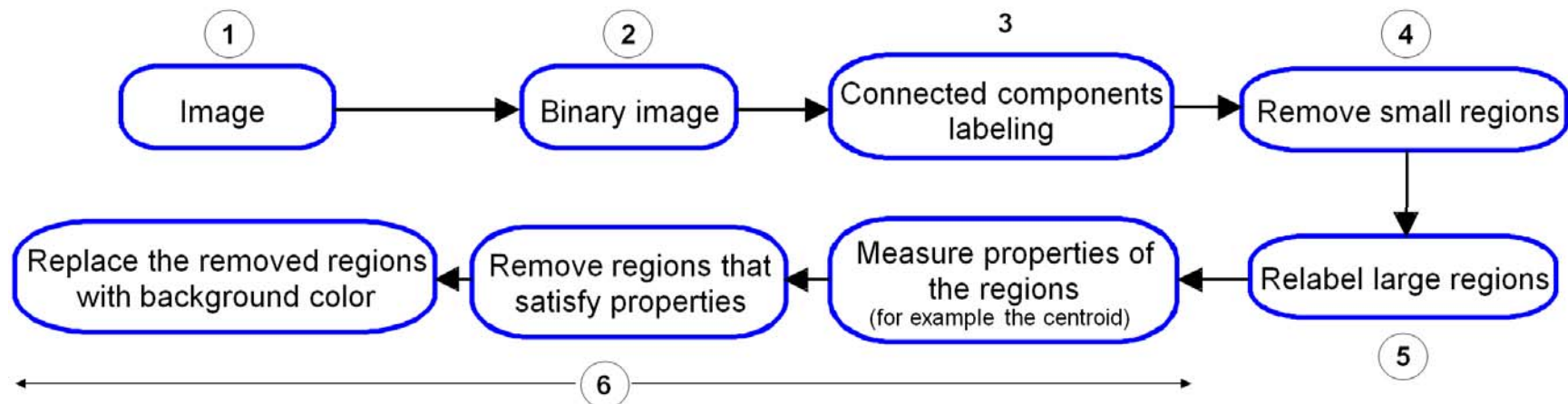
**Aplicar algoritmos selectivos de regiones de imágenes
(Algoritmos de segmentación)**

Reconocimiento de patrones

La segmentación de una imagen $f(x,y)$ es una partición de $f(x,y)$ en subimágenes $R_1, R_2, \dots, R_n$ conectadas que cumplen las siguientes restricciones:

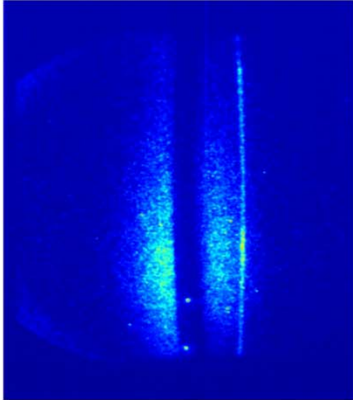
- 1) $\bigcup_{i=1}^n R_i = f(x, y)$
- 2) $R_i \cap R_j = \emptyset$
- 3) Cada subimagen satisface un predicado o conjunto de predicados

En concreto se han aplicado técnicas de segmentación de imágenes con componentes conectados

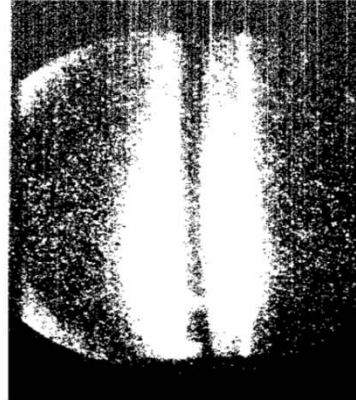


Reconocimiento de patrones

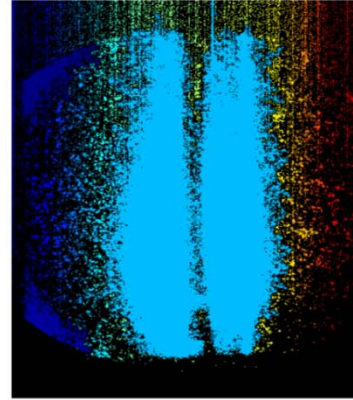
1 Original image



2 Binary image



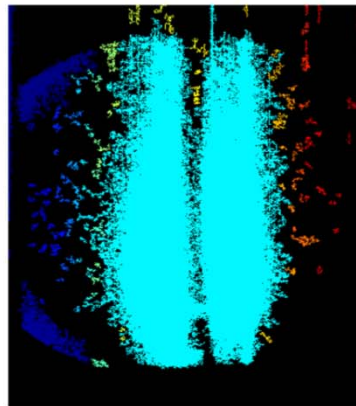
3 Labeled regions



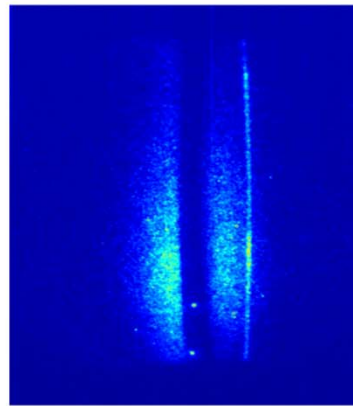
4 Big regions



5 Relabel regions



6 Processed image



Factor de conectividad 8:

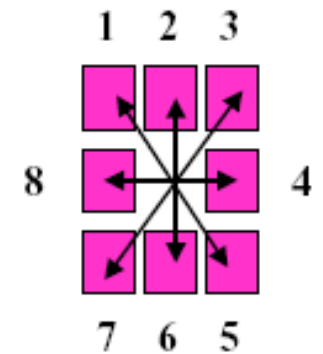


Imagen original

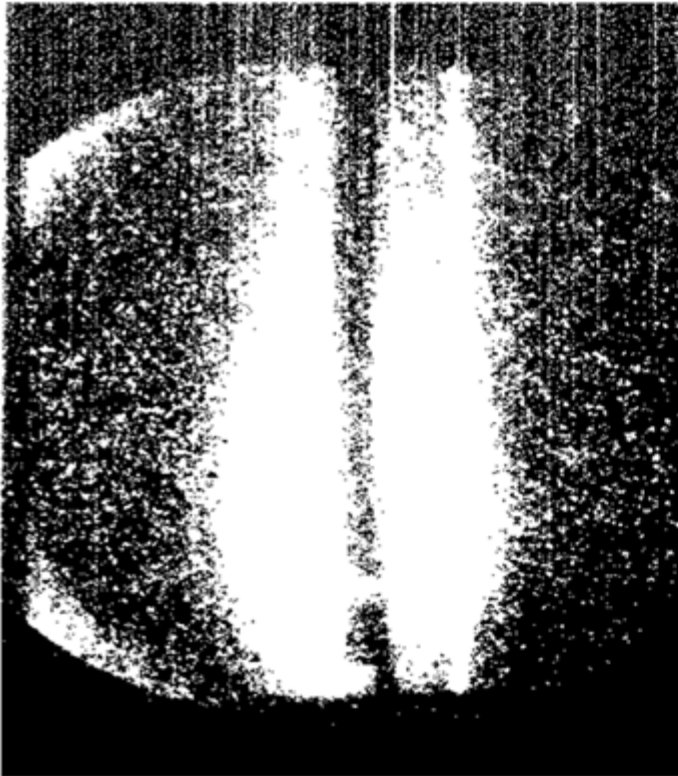
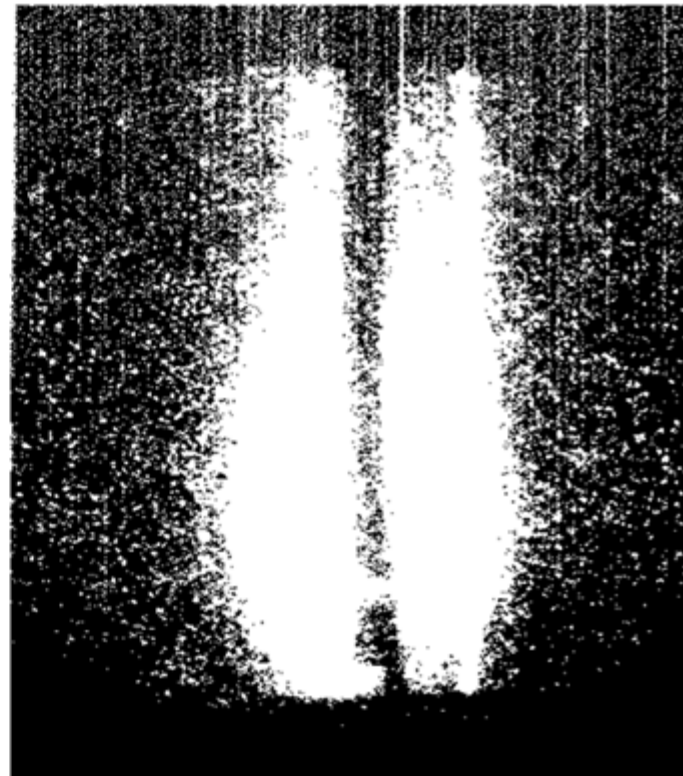
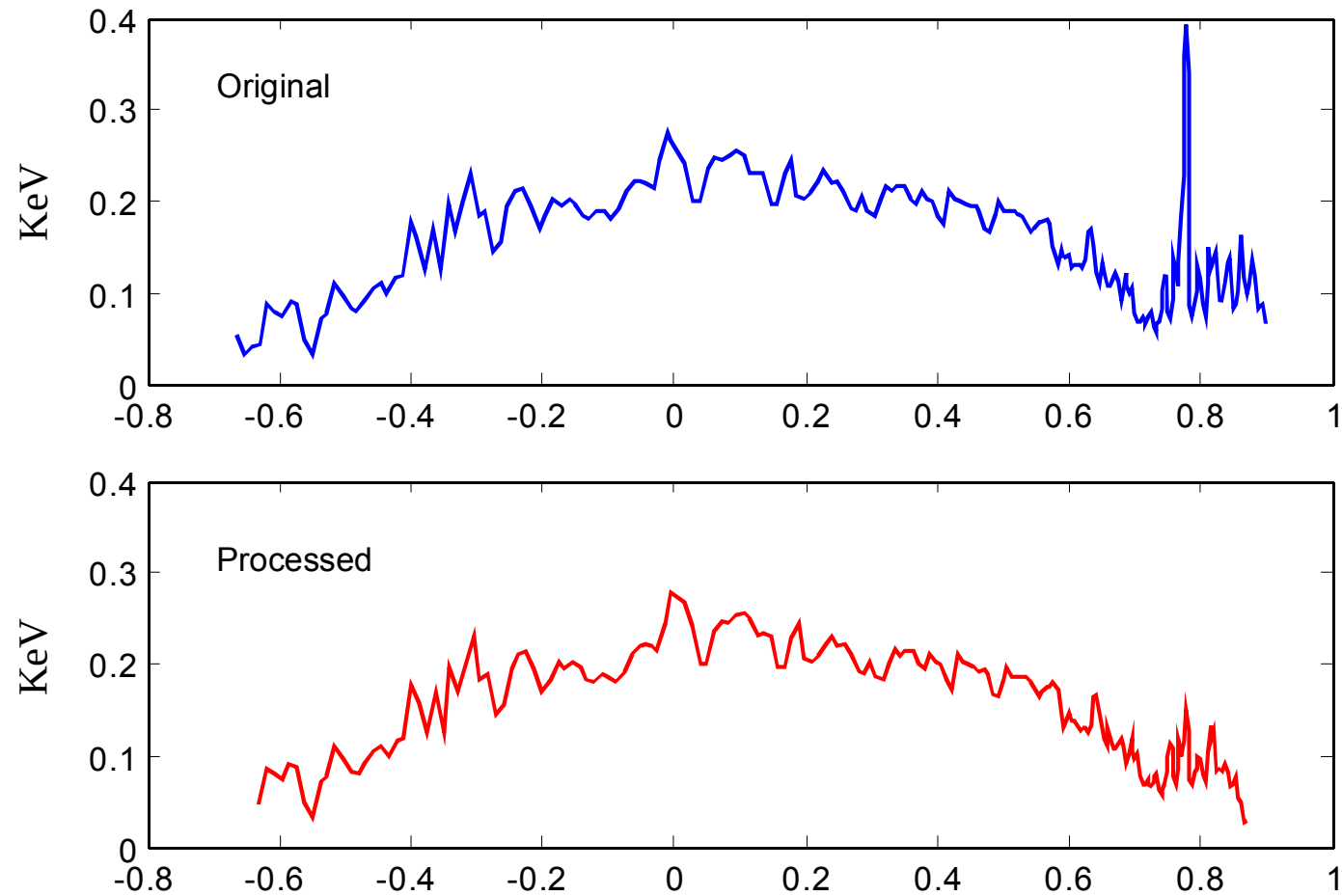


Imagen procesada

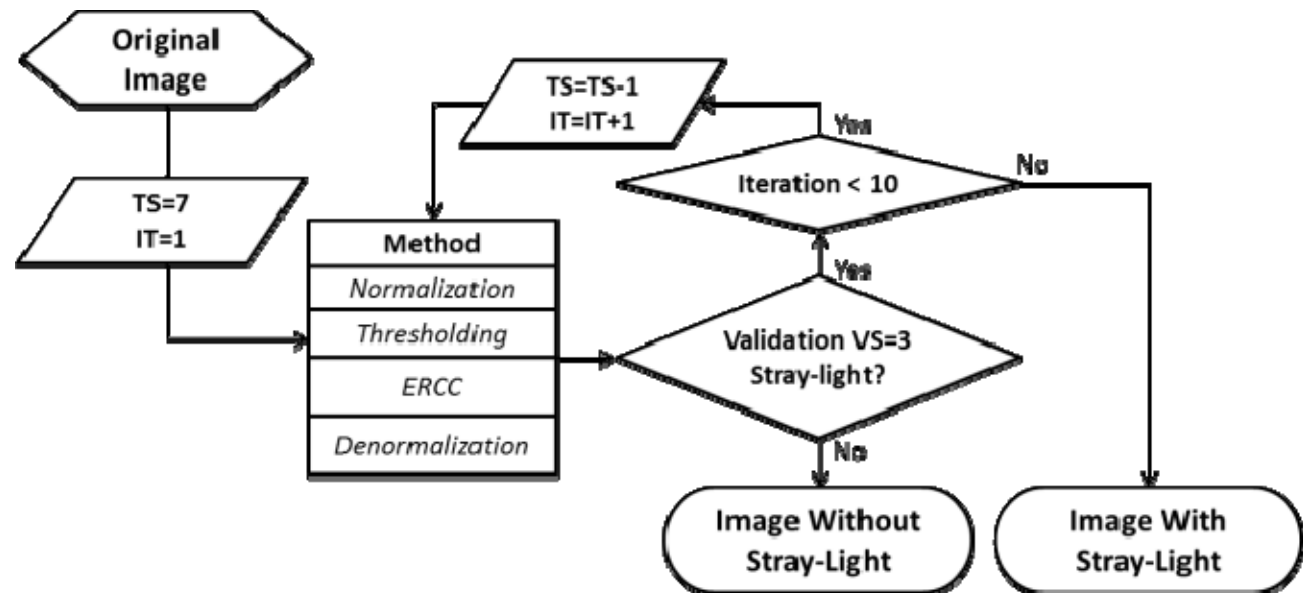
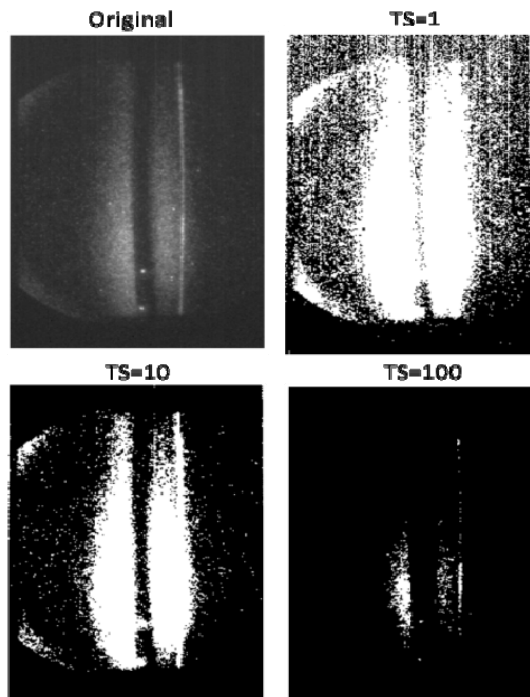


Perfil de la temperatura electrónica



Nuevo algoritmo iterativo de reducción de ruido

Imágenes binarias
para diferentes umbrales



Resultados: Porcentaje de imágenes por clase sin ruido en la enésima iteración (1146 imágenes).

	0	2	4	6	8	10
NBI	0,3%	0,3%	1,2%	45,8%	96,1%	99,4%
ECRH	0,4%	2,3%	9,3%	56,1%	97,1%	99,5%
CUTOFF	0,0%	2,3%	9,5%	23,8%	92,8%	100,0%
STRAY	1,9%	5,8%	8,2%	20,0%	89,2%	99,0%
Average	0,6%	2,7%	7,0%	36,4%	93,8%	99,5%

1. Introducción - Motivación

- Requerimientos de energía
- La Fusión nuclear como alternativa

2. Problemas en bases de datos de fusión

- Reconocimiento de patrones:
 - Aplicación: Formas de onda
 - Aplicación: Imágenes (Eliminación de la luz parásita en diagnóstico TS)
- Clasificación supervisada:
 - Aplicación: Clasificación de las imágenes del diagnóstico TS (Thomson Scattering)

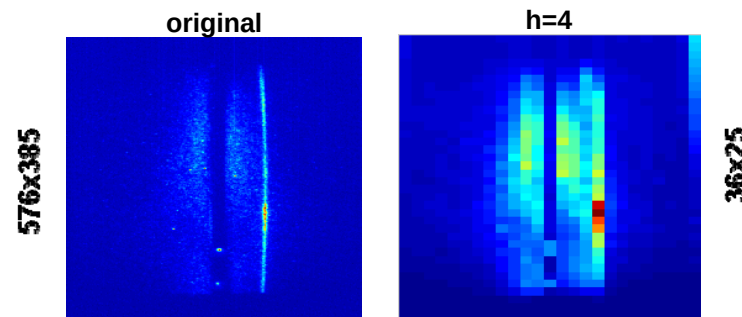
3. Predicción de Disrupciones en un dispositivo de fusión termonuclear.

- ¿Qué se entiende por disrupción?
- Predictores de disrupciones
- Predictores en JET (JPS y APODIS)
- Estructura de APODIS
- Algunas consideraciones prácticas

4. Trabajos presentes/futuros

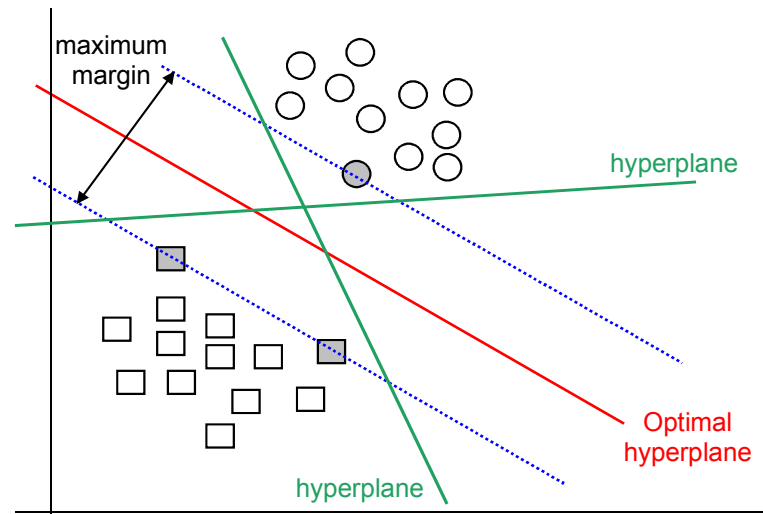
Aplicación: Clasificación de las imágenes del diagnóstico TS (Thomson Scattering).

Implementación: Análisis Wavelets + Maquinas de Vectores Soporte (SVM)

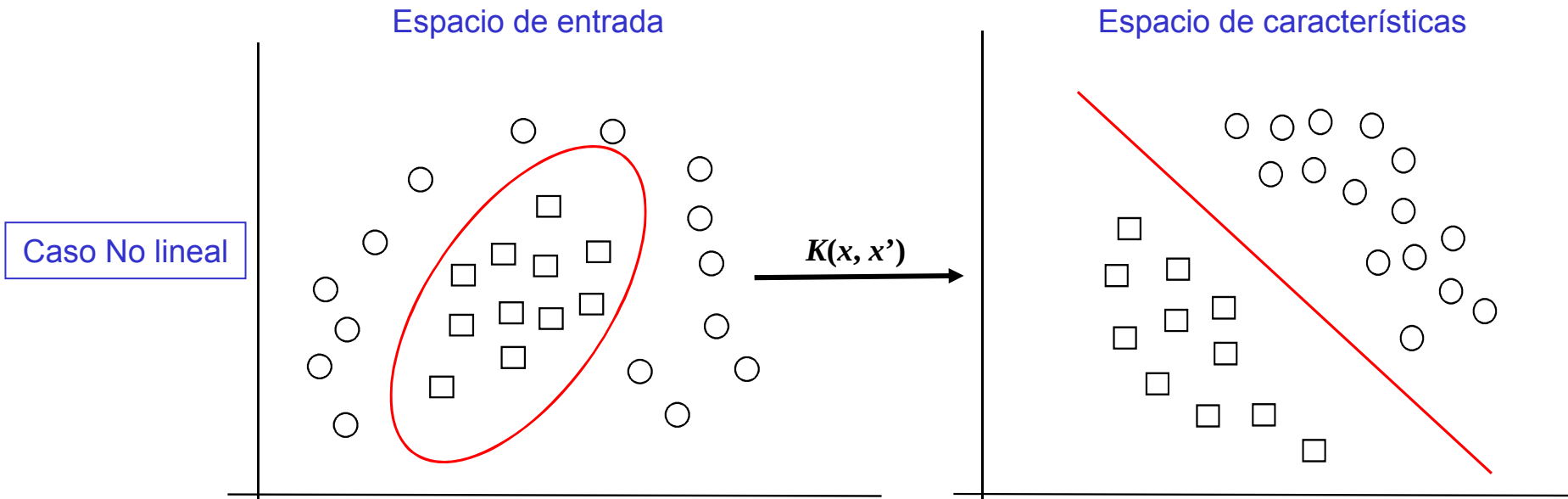


Maquinas de Vectores Soporte

Caso lineal



Clasificación supervisada



Dado un conjunto de datos de entrada pertenecientes a dos clases:

$$(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n), x \in \mathcal{R}^d, y \in \{+1, -1\}$$

SVM mapea el espacio de entrada en un espacio de características de alta dimensión a través de funciones nucleo (kernel):

Lineal: $K(x, x') = \langle x, x' \rangle$

Polinomial de grado d : $K(x, x') = (\langle x, x' \rangle + 1)^d$

Función de base radial: $K(x, x') = \exp\left\{-\|x - x'\|^2 / 2\sigma^2\right\}$

La función de decisión que define el hiperplano es la siguiente:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i K(x_i, x) + b$$

Los parámetros $\alpha_i, i = 1, \dots, n$ son la solución del siguiente problema de optimización cuadrático:

$$\text{Maximizar la función: } L(\alpha) = -\frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i, y_j) + \sum_{i=1}^n \alpha_i$$

$$\text{Sujeto a las restricciones: } \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0, \quad 0 \leq \alpha_i \leq C / n \quad i = 1, \dots, n$$

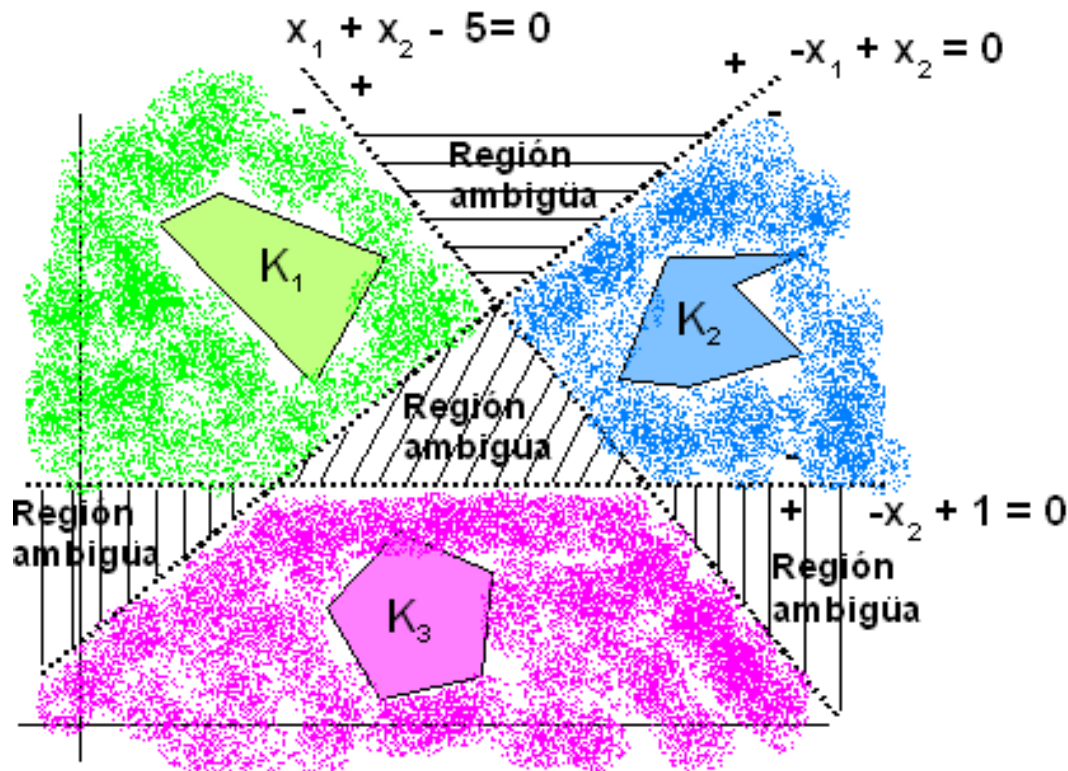
donde $(x_i, y_i), i = 1, \dots, n$ son datos de entrenamiento $x_i \in \mathbb{R}^n, y_i \in \{-1, +1\}$,

K es la función kernel y C es un parámetro de regularización

Máquinas de vectores soporte (SVM): multclasificador

Un hiperplano por cada clase:

$$d_1(x) = -x_1 + x_2 \quad d_2(x) = x_1 + x_2 - 5 \quad d_3(x) = -x_2 + 1$$



Clasificar el patrón

$$X = [6, 5]$$

$$d_1(X) = -1, \quad d_2(X) = 6, \quad d_3(X) = -4$$

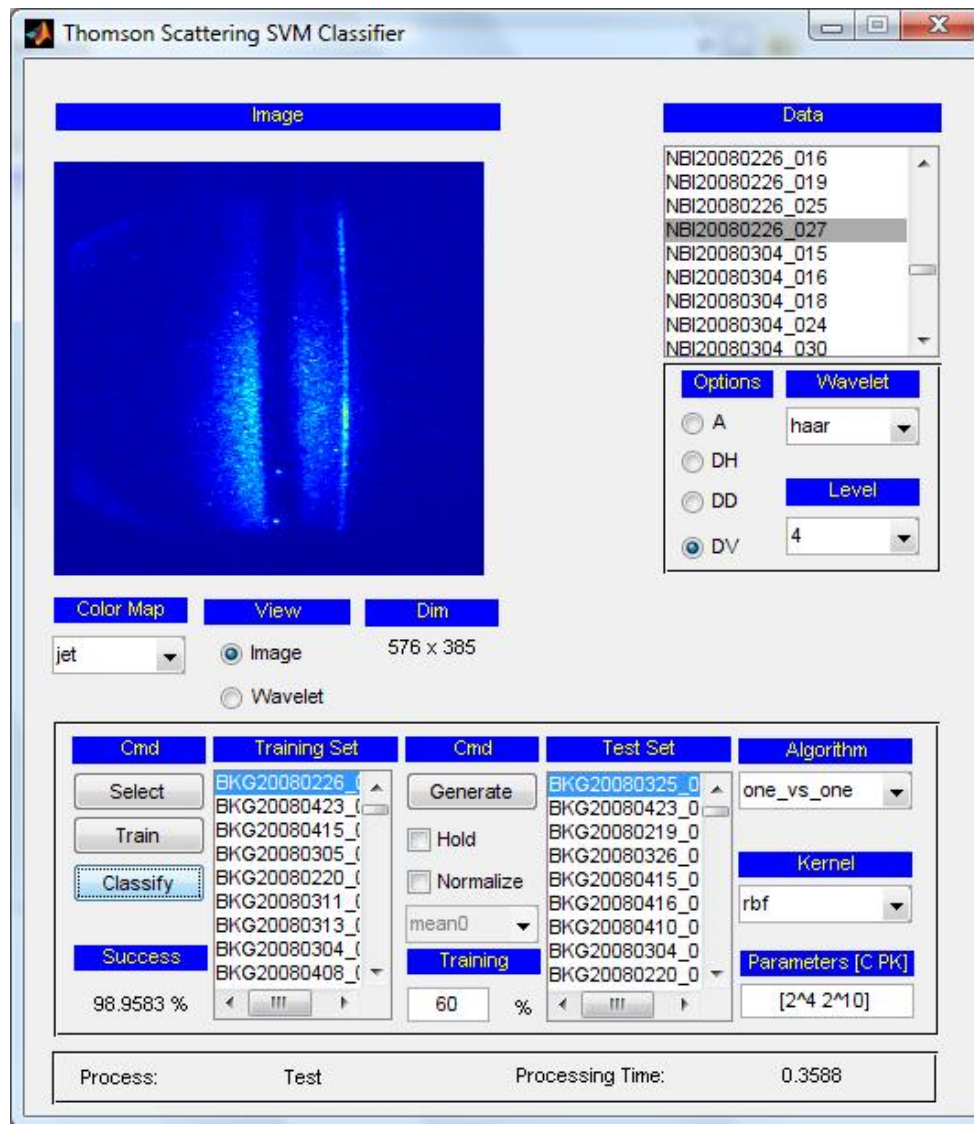
X es asignado a K_2

Ya que

$$d_2(X) > 0 \text{ mientras}$$

$$d_1(X) < 0 \text{ y } d_3(X) < 0$$

Clasificación supervisada



Resultados: Tasas de aciertos

Con un total de 242 imágenes
(60% entrenamiento, 40% evaluación)

(a) Algoritmo: uno contra el resto

(b) Algoritmo: uno contra uno

Tasa de aciertos %

lineal	98.68
polinomial	96.05
rbf	98.68

(c) Algoritmo: Weston and Watkins

Tasa de aciertos %

lineal	34.21
polinomial	60.52
rbf	98.68

1. Introducción - Motivación

- Requerimientos de energía
- La Fusión nuclear como alternativa

2. Problemas en bases de datos de fusión

- Reconocimiento de patrones:
 - Aplicación: Formas de onda
 - Aplicación: Imágenes (Eliminación de la luz parásita en diagnóstico TS)
- Clasificación supervisada:
 - Aplicación: Clasificación de las imágenes del diagnóstico TS (Thomson Scattering)

3. Predicción de Disrupciones en un dispositivo de fusión termonuclear.

- ¿Qué se entiende por disrupción?
- Predictores de disrupciones
- Predictores en JET (JPS y APODIS)
- Estructura de APODIS
- Algunas consideraciones prácticas

4. Trabajos presentes/futuros

¿Qué se entiende por Disrupción?

Es una pérdida del confinamiento del plasma. Cuando el plasma disrumpe toda la energía del plasma va hacia la pared del dispositivo pudiendo causarle daños irreparables.



En el contexto de garantizar una operación segura en los dispositivos de fusión termonuclear las acciones de *avoidance* y de *mitigation* de las disrupciones son problemas cruciales.



Un predictor de disrupciones es un pre-requisito para poder implementar cualquier metodología de *avoidance* y *mitigation* de disrupciones.

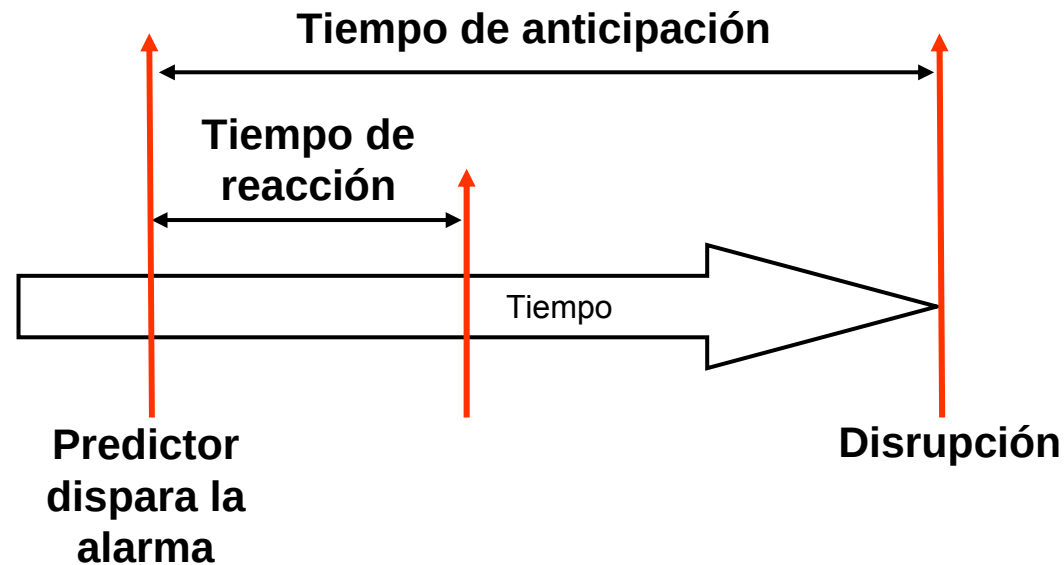


Objetivo: Desarrollar predictores de disrupciones que sean eficientes

Predictores de disrupciones

El diseño de un predictor de disrupciones se realiza atendiendo a los siguientes factores:

1. Las tasas de acierto ($ITER > 95\%$).
2. Las tasas de falsas alarmas ($ITER < 5\%$).
3. El tiempo de anticipación de la predicción del instante de la disrupción.
4. Alta capacidad de generalización (Robustez).
5. Que pueda operar en tiempo real.



El tiempo de reacción debe ser menor que el tiempo de anticipación. En JET el mínimo tiempo para poder llevar a cabo acciones de mitigación son 30 ms.

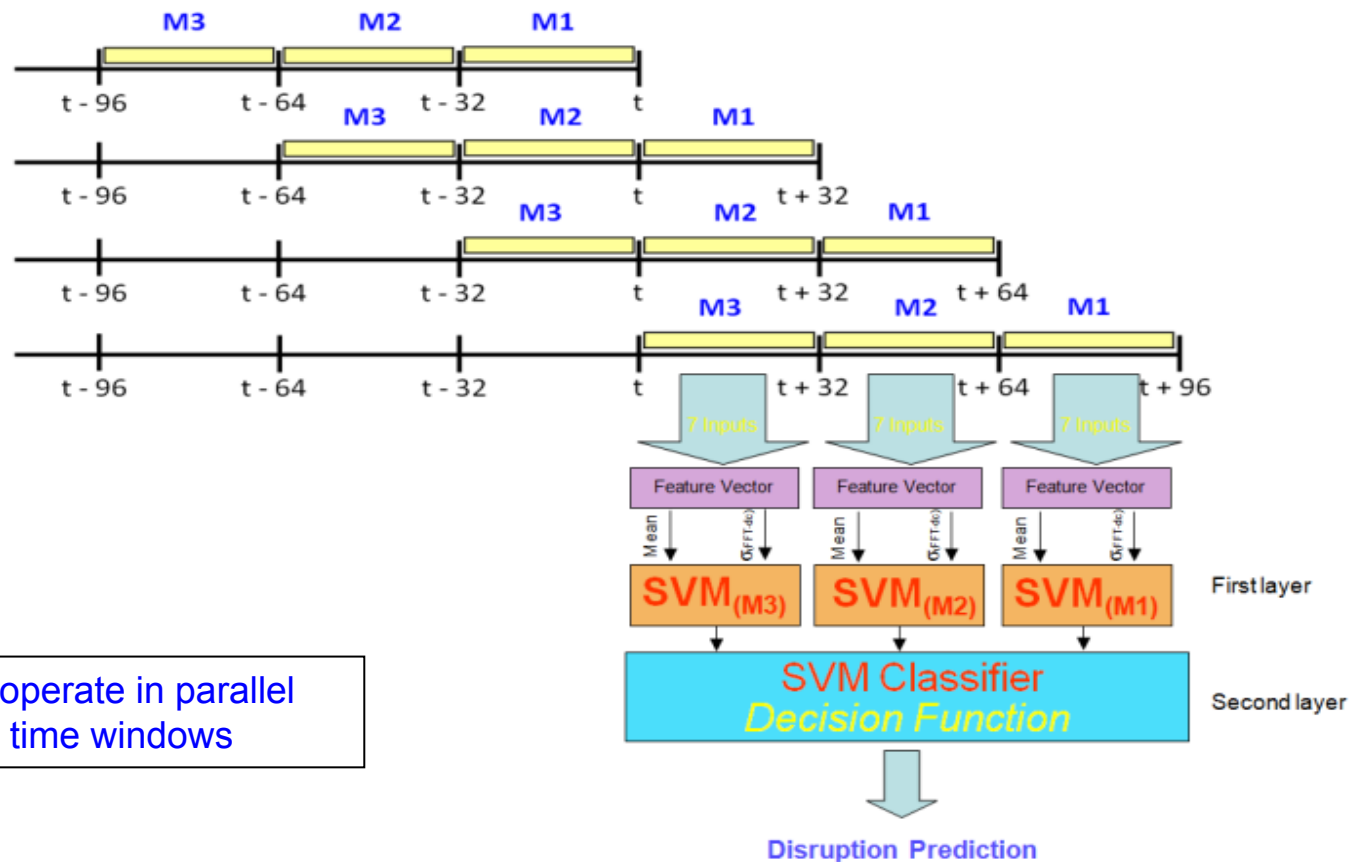
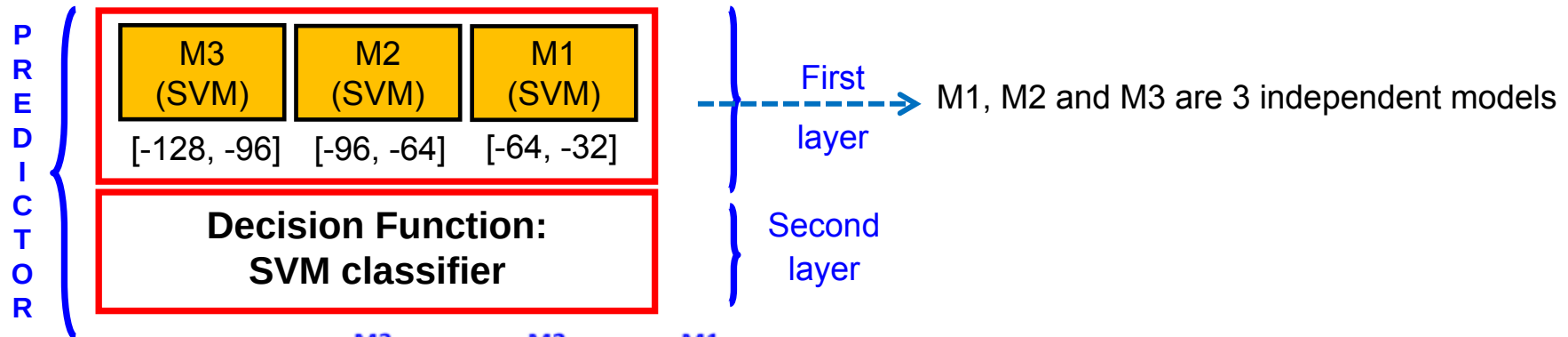
Predictores de disrupciones en JET

- JPS (JET Protection System): basado en una única señal magnética que determina si la descarga es disruptiva en función de que se supere un umbral.
- APODIS (Advance Predictor Of DISruptions):
 - APODIS no está basado en una única señal (como ocurre en el JPS).
 - APODIS utiliza información en el dominio de la frecuencia.
 - APODIS es un predictor construido a partir de modelos basados en datos formado por una combinación especial de clasificadores binarios.
 - APODIS tiene en cuenta la evolución temporal del plasma.

Además

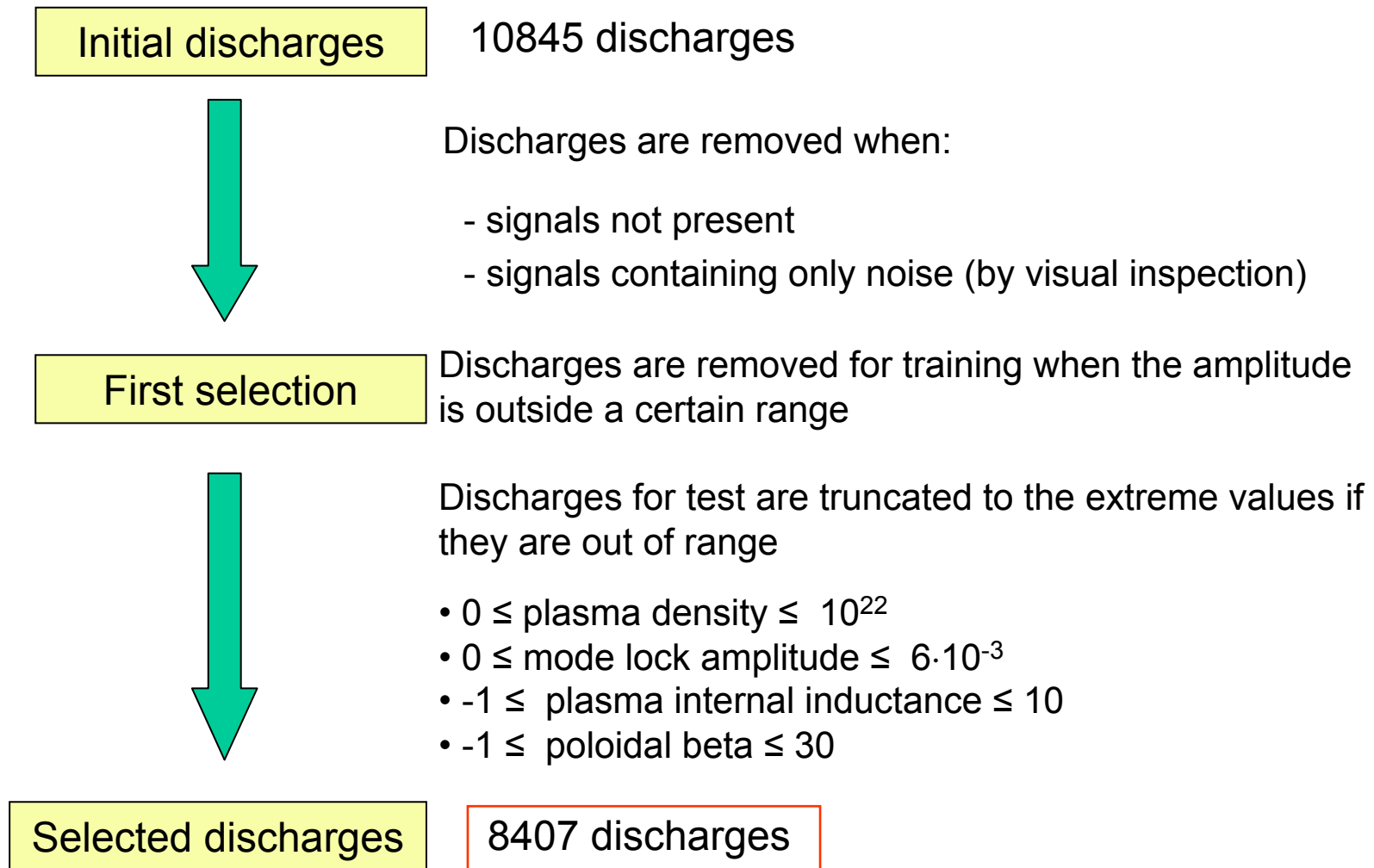
 - APODIS cumple las 5 características que se le solicitan a un predictor de disrupciones.

Estructura de APODIS



The classifiers operate in parallel on consecutive time windows

Selección de descargas para entrenar APODIS



Discharges removed = 2438

Distribución de descargas por campañas

	Non Disruptive	Unintentional disruptions	Intentional disruptions	Total discharges per campaign
C15a	256	21	6	283
C15b	158	10	0	168
C16	10	3	0	13
C1617	1032	73	0	1105
C18	302	14	13	329
C19	585	47	41	673
C20	703	28	12	743
C21	573	16	3	592
C22	451	34	3	488
C23	490	24	8	522
C24	362	14	12	388
C25	570	19	22	611
C26	1323	58	49	1430
C27a	320	43	10	373
C27b	513	70	59	642
TOTAL	7648	521	238	8407

Predicción de Disrupciones en un dispositivo de fusión termonuclear

- 7500 predictors per set of features have been developed

–They require a CPU time of 900 h to train the first layer classifiers

–CIEMAT HPC has been used (240 nodes, 2 Quad-Core 3 GHz, 16GB)

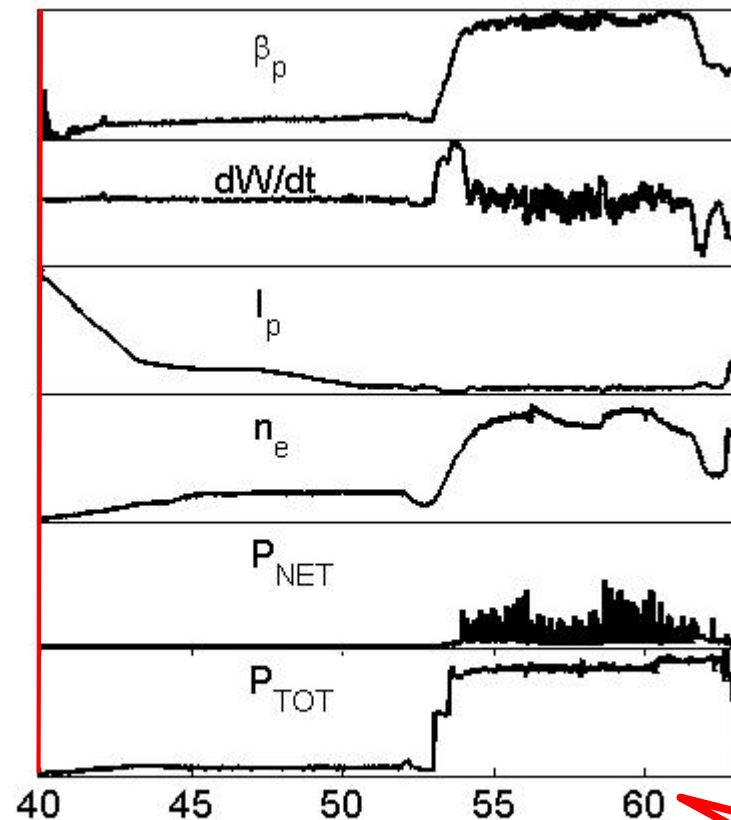
7 jpf signals

Plasma current
Mode lock amplitude
Plasma inductance
Plasma density
Diamagnetic energy time derivative
Radiated power
Total input power

Mean values
&
 $\text{std}(\text{abs}(\text{FFT}(S)))$ } 32 ms

14 features

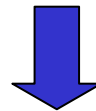
Shot 77643



Alarm!

Algunas consideraciones prácticas

- De cara a ITER: cuando un dispositivo nuevo de fusión comienza su funcionamiento no se disponen de datos para poder construir un predictor:
 - ¿Sería posible utilizar un predictor entrenado con descargas de otro dispositivo?
 - ¿Cuánto tiempo habría que esperar para tener predictores de alto rendimiento?



ITER no puede esperar cientos de descargas hasta disponer de un predictor de disrupciones fiable



Objetivo: Desarrollo de predictores adaptativos '*from scratch*'

Predictor de disrupciones '*from scratch*'

- Consideraciones para probar la metodología:
 - Se han utilizado las descargas de la campaña C2830 (1237 discharges: 201 disruptive, 1036 non-disruptive).
 - El predictor de base que se ha utilizado es APODIS (misma arquitectura, mismas señales, etc...).
 - Hay que preservar el orden cronológico de las descargas.
 - El primer modelo se genera cuando ocurre la primera descarga disruptiva (se utiliza hasta que ocurre la siguiente descarga disruptiva).
 - Se realiza un re-entrenamiento del predictor después de cada disrupción. (cada nuevo predictor se utiliza para hacer las predicciones hasta la siguiente disrupción).

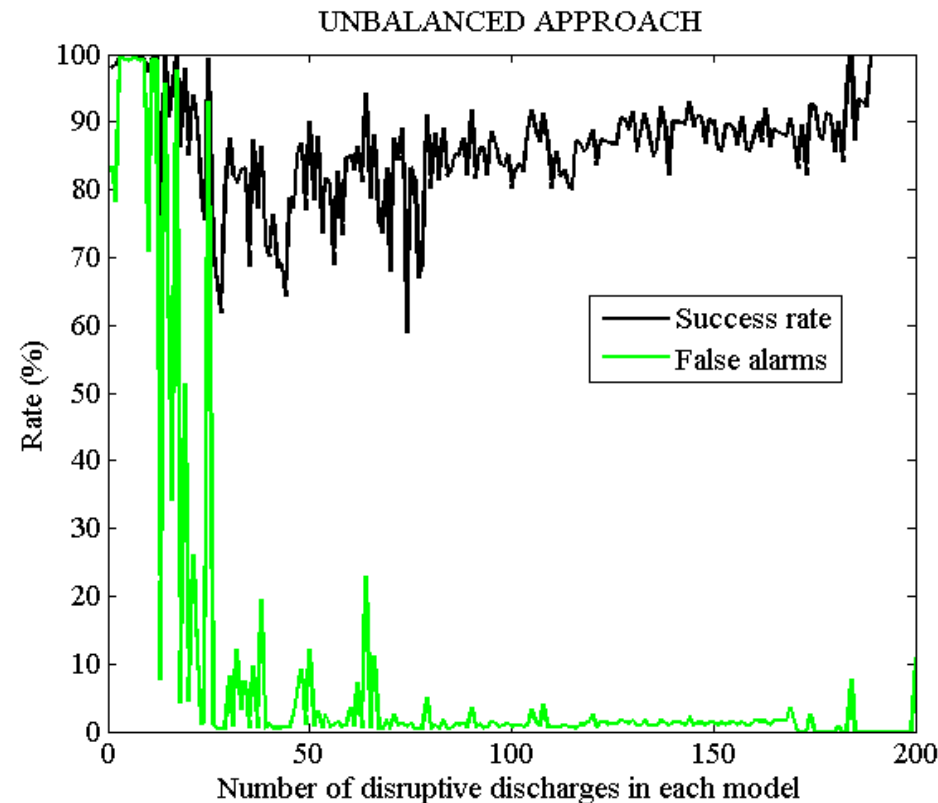


Tres escenarios de entrenamiento:

- Aproximación desbalanceada.
- Aproximación balanceada.
- Aproximación híbrida.

Aproximación desbalanceada

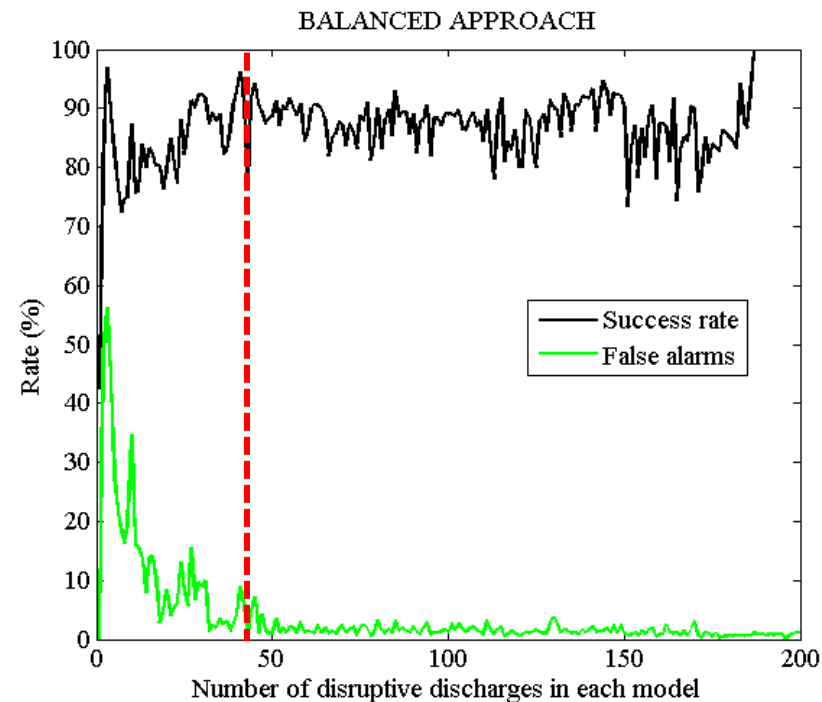
- El número de modelos a entrenar en cada campaña es igual al número de descargas disruptivas.
- **Conjunto de entrenamiento:** todas las descargas disruptivas y todas las descargas no disruptivas que se hayan producido hasta ese instante.



Dado un modelo las tasas corresponden a los resultados de las descargas posteriores.

Aproximación balanceada

- El número de modelos a entrenar en cada campaña es igual al número de descargas disruptivas.
- **Conjunto de entrenamiento:** todas las descargas disruptivas que se hayan producido hasta ese instante e igual número de descargas no disruptivas escogidas aleatoriamente de las descargas pasadas.

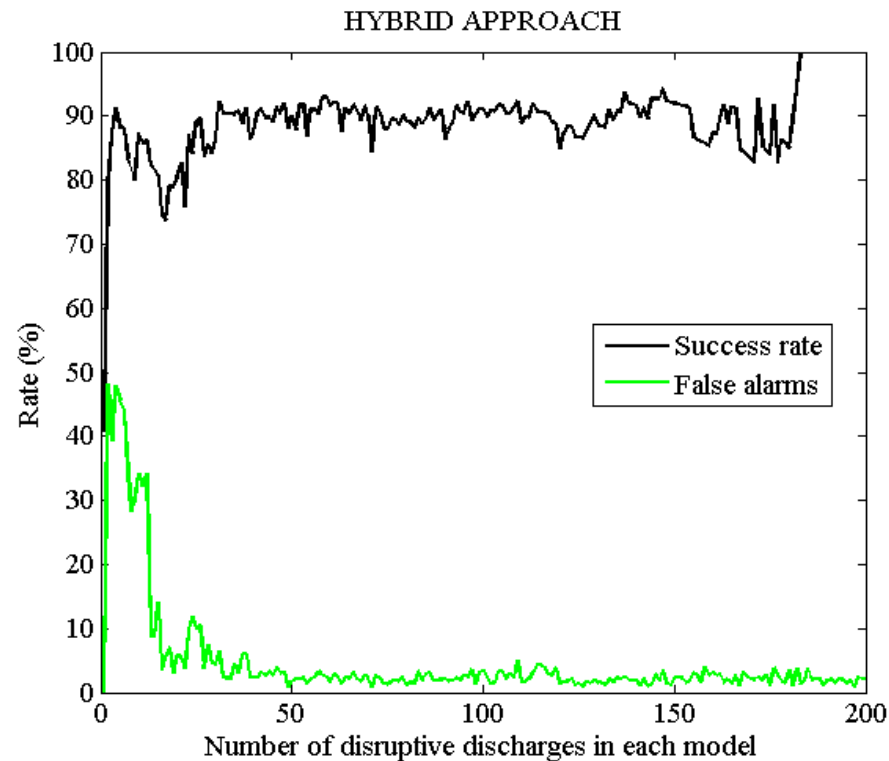


Dado un modelo las tasas corresponden a los resultados de las descargas posteriores.

40 descargas disruptivas son necesarias para empezar a tener resultados más estables.

Aproximación híbrida

- El número de modelos a entrenar en cada campaña es igual al número de descargas disruptivas.
- **Conjunto de entrenamiento:** se realiza una aproximación balanceada hasta el modelo 42 y una aproximación desbalanceada (insertando sólo las descargas disruptivas) a partir del modelo 42.



Dado un modelo las tasas corresponden a los resultados de las descargas posteriores.

Preguntas a resolver

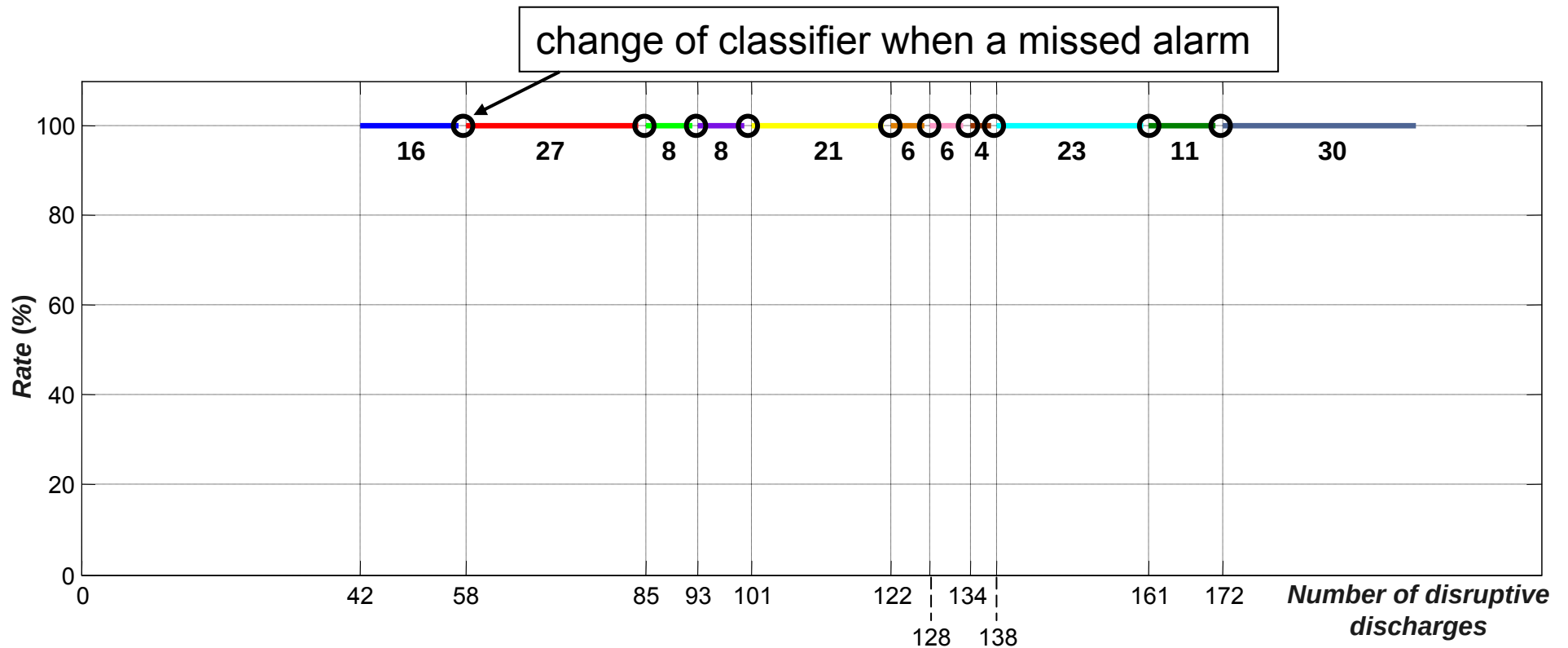
- ¿Es realmente necesario entrenar después de cada disrupción?
 - El coste computacional puede ser un problema a medida que el número de descargas aumenta.
- ¿Cuándo se pararía el proceso de re-entrenamiento? ¿Es realmente un valor extra el re-entrenar después de cada predicción acertada?



Solución práctica: Re-entrenar únicamente cuando se pierda una alarma

Predicción de Disrupciones en un dispositivo de fusión termonuclear

JET campaigns C28_C30



- Hybrid approach
- Very high success rates

1. Introducción - Motivación

- Requerimientos de energía
- La Fusión nuclear como alternativa

2. Problemas en bases de datos de fusión

- Reconocimiento de patrones:
 - Aplicación: Formas de onda
 - Aplicación: Imágenes (Eliminación de la luz parásita en diagnóstico TS)
- Clasificación supervisada:
 - Aplicación: Clasificación de las imágenes del diagnóstico TS (Thomson Scattering)

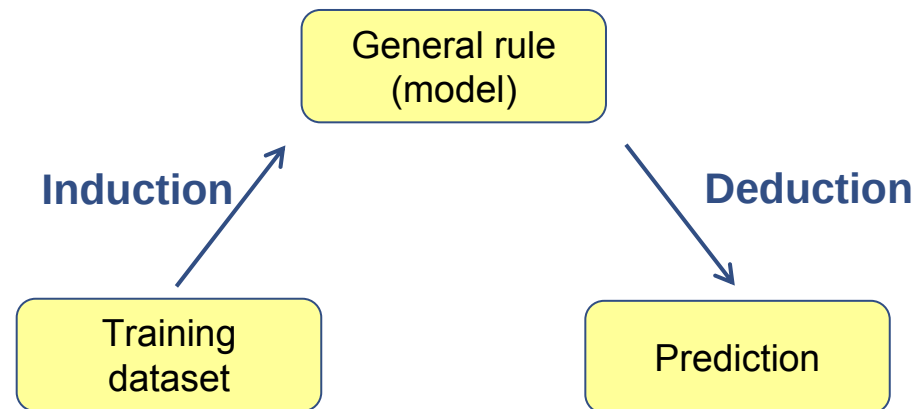
3. Predicción de Disrupciones en un dispositivo de fusión termonuclear.

- ¿Qué se entiende por disrupción?
- Predictores de disrupciones
- Predictores en JET (JPS y APODIS)
- Estructura de APODIS
- Algunas consideraciones prácticas

4. Trabajos presentes/futuros

Planteamiento del primer trabajo

- Lo ideal sería tener buenos modelos teóricos basados en primeros principios de la evolución del plasma. ➡ !!!! Resultados poco satisfactorios
- Los modelos de interrupciones *orientados a datos* están basados en técnicas de clasificación automáticas:



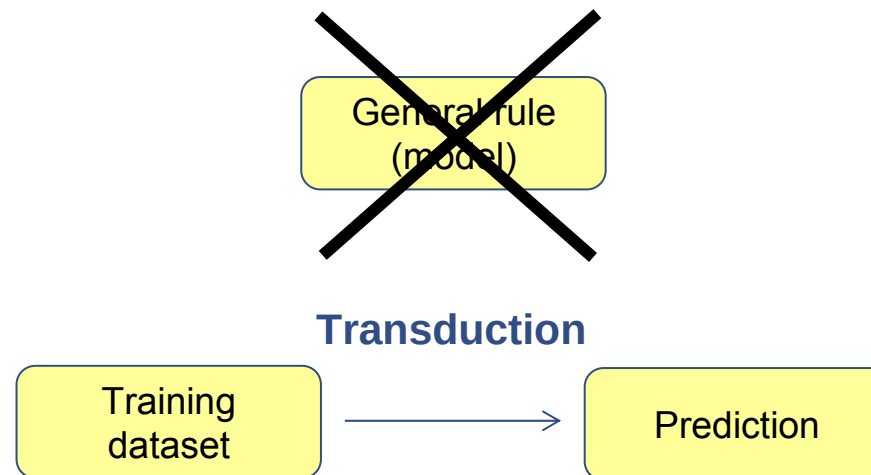
A predictor is made up of two steps

Common methods for the inductive step: neural networks, SVM, k-nearest neighbours, SOMs, ...

¿Es posible predecir sin utilizar una regla general?

Utilización de predictores conformales

- Los ***predictores Venn*** son predictores probabilísticos que proporcionan una '*barra de error de probabilidad*' para cada predicción individual.
- Son válidos incluso para un número reducido de muestras.



En un marco de predicción On-line: las predicciones se realizan secuencialmente y para cada nueva predicción se utilizan todas las muestras anteriores en lugar de utilizar repetidamente una regla general.

Planteamiento del segundo trabajo

Intentar que el predictor haga la predicción de si la descarga es disruptiva y cuanto tiempo falta para que ocurra la disrupción

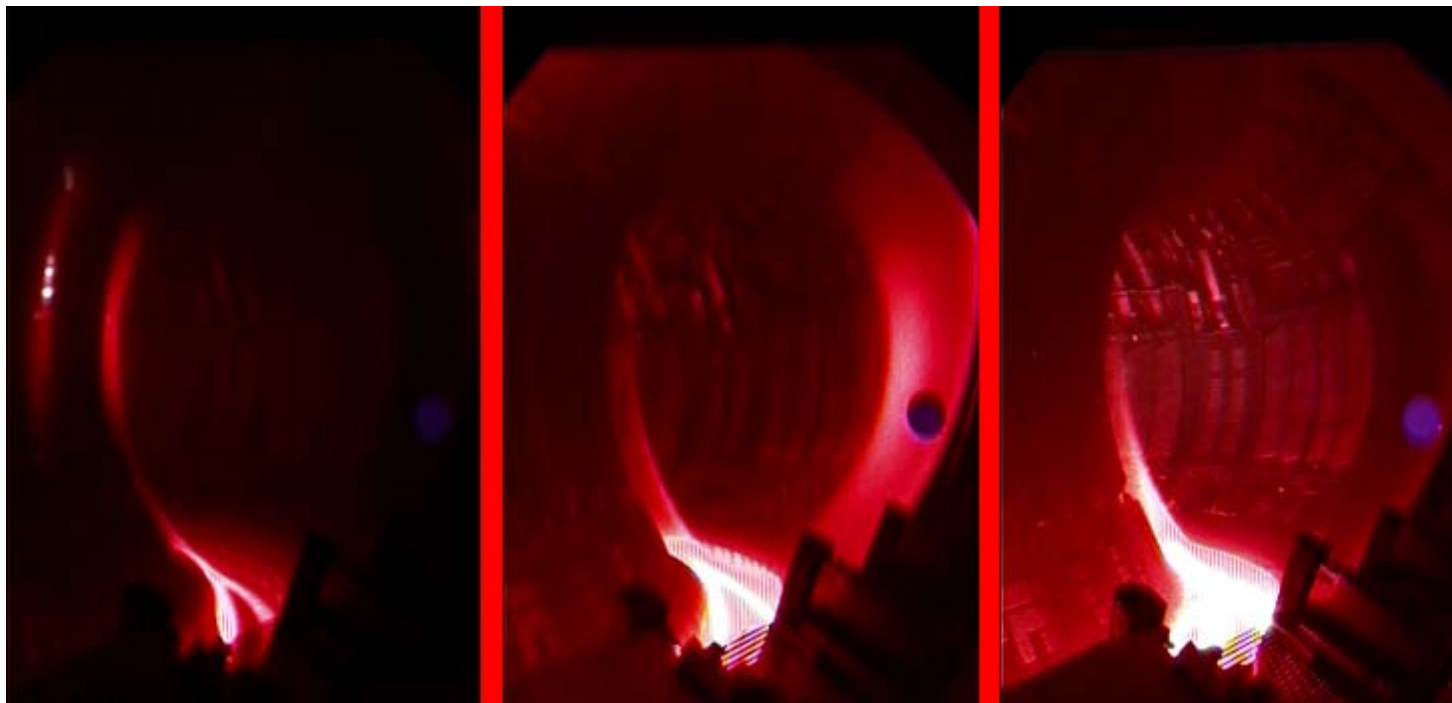


DTP (Disruption Time predictor)

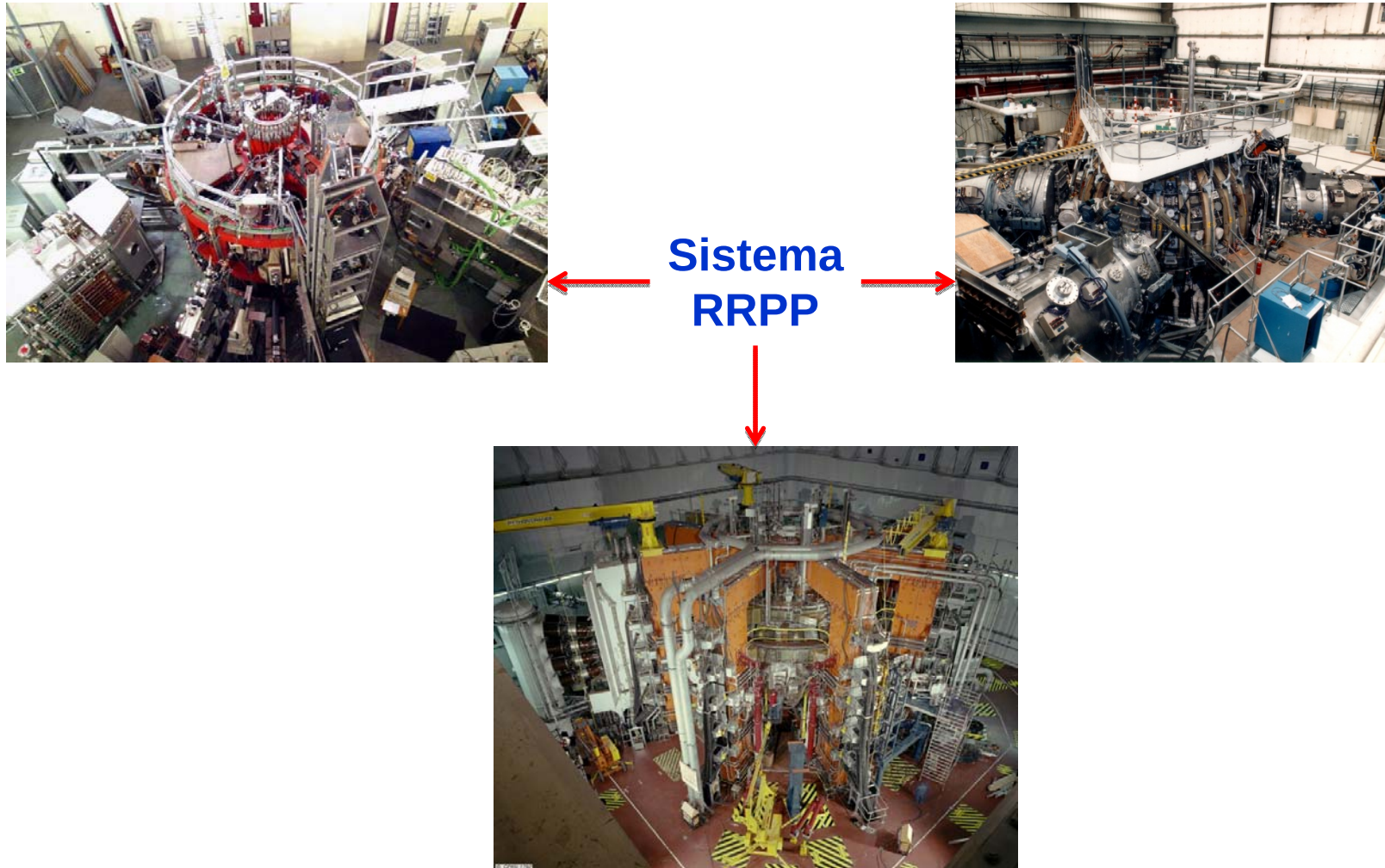
- ❑ APODIS: El predictor intenta contestar la siguiente pregunta: ¿Habrá una disrupción en el futuro?
- ❑ DTP: El predictor intenta contestar la siguiente pregunta: ¿Cuánto tiempo falta para que ocurra la disrupción?

Otros trabajos:

- ☐ Incorporar diagnósticos de imágenes a los predictores de disrupciones.
- ☐ Clasificación de tipos de disrupciones.
- ☐ Búsqueda de patrones escalados y rotados en vídeos e imágenes



Extrapolar resultados entre diferentes dispositivos



Uso de supercomputación y aplicaciones en tiempo real



La fusión es la energía del futuro y

siempre lo será