



La fusión, más cercana.
Un sencillo experimento de bajo coste

Vicente M. Queral Mas

Ingeniero Industrial

24 Abril 2007

Conferencias 'ZIVIS, supercomputador ciudadano', Zaragoza

Foto : Un plasma del experimento

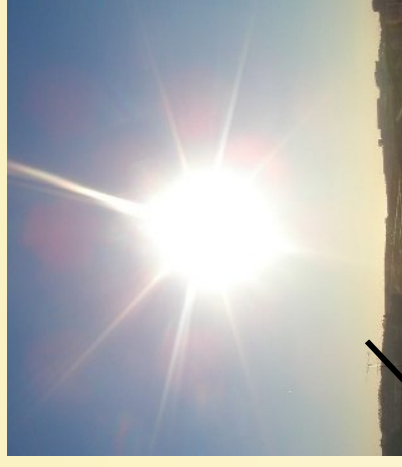
Esquema de la charla

- I) **Introducción** : La energía. La fusión. Cercana?. Sencilla?
- II) **Elementos del experimento** : Cámara de vacío, bobinas, escayola, mecanizador, sistema de vacío y calentamiento. Plasma.
- III) **Computación**. Simulación para el diseño
- IV) **Ideas finales**

El sol, energía única

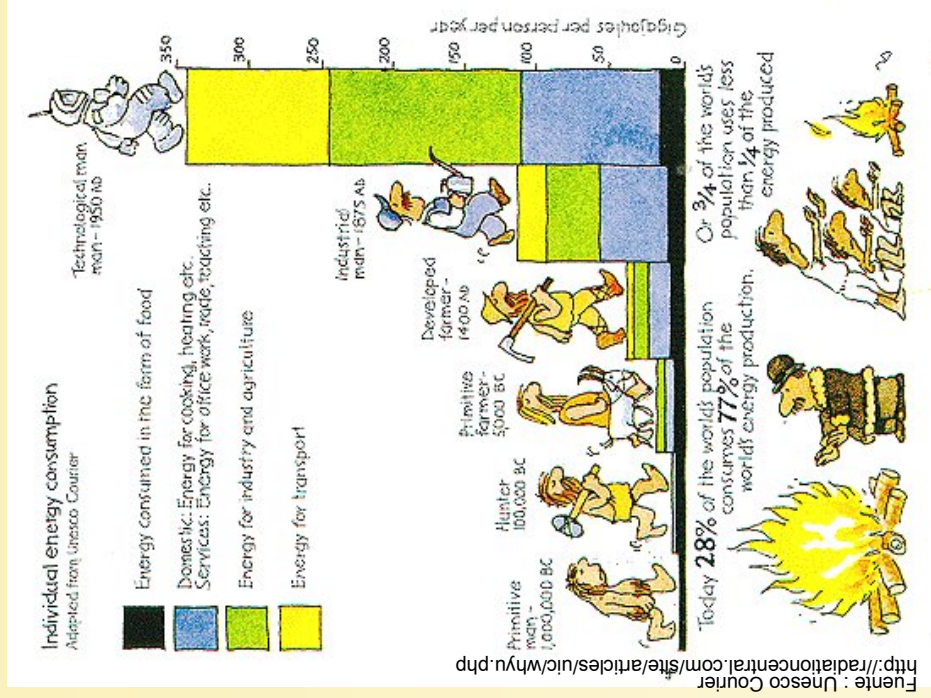
La Fusión intenta producir energía de forma similar al sol

Casi toda la energía ha provenidido del sol

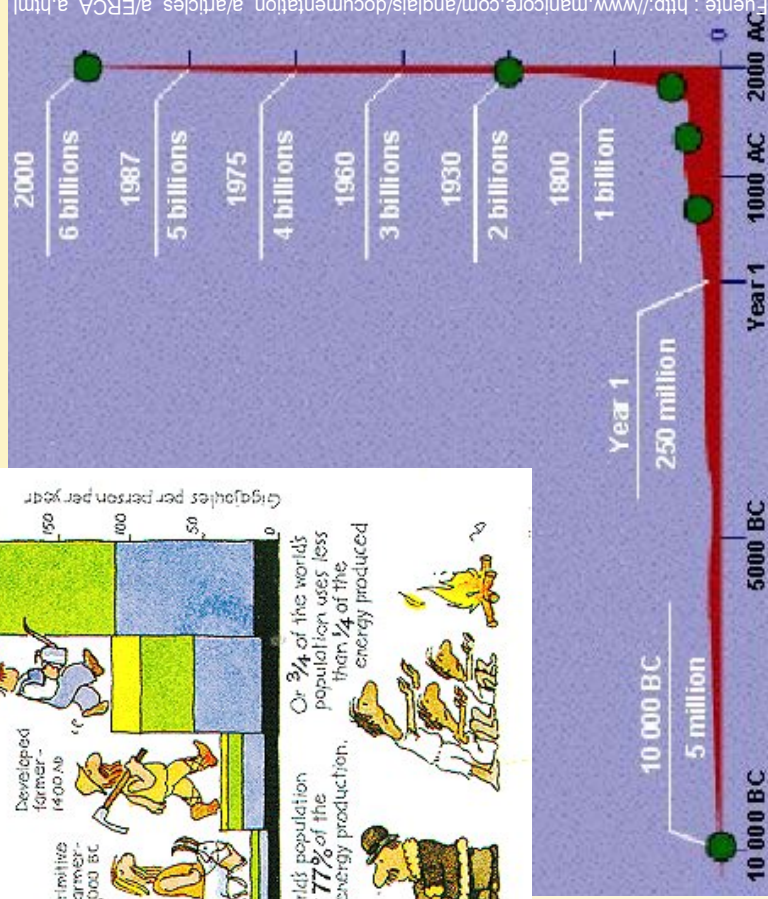


Combustibles fósiles

1 Consumo por habitante según época



2 Crecimiento de población



3 Consumo mundial histórico de energía. 10000AC-

La fusión (sol + reactores), energía única

1 Consumo mundial histórico

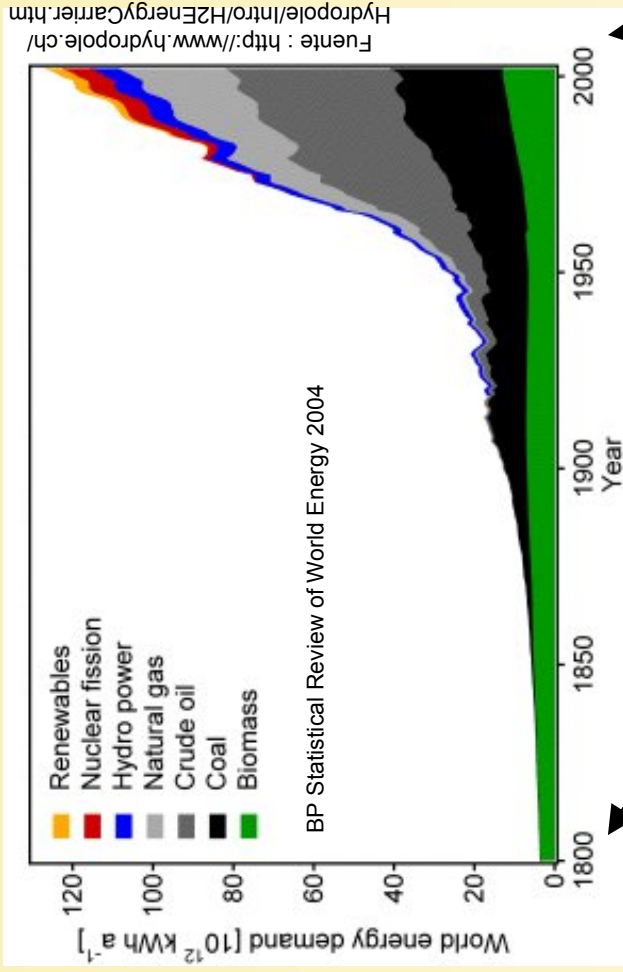


Gráfico expandido

Tenemos un gravísimo problema energético

1' Consumo mundial histórico 10000AC-

Energías futuras : Cada una con sus ventajas y sus limitaciones e inconvenientes



Otras menores
(biomasa, hidroel., mar, ...)



Eólica



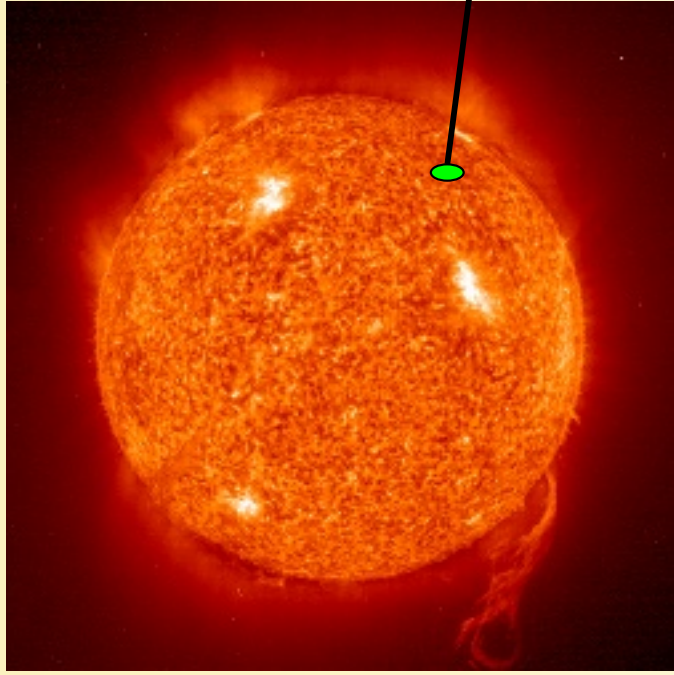
Solar
térmica y
fotovoltaica



Fusión

Inicio del consumo de petróleo y gas

La esencia de la fusión



1

En concreto hablaremos de fusión por **confinamiento magnético**

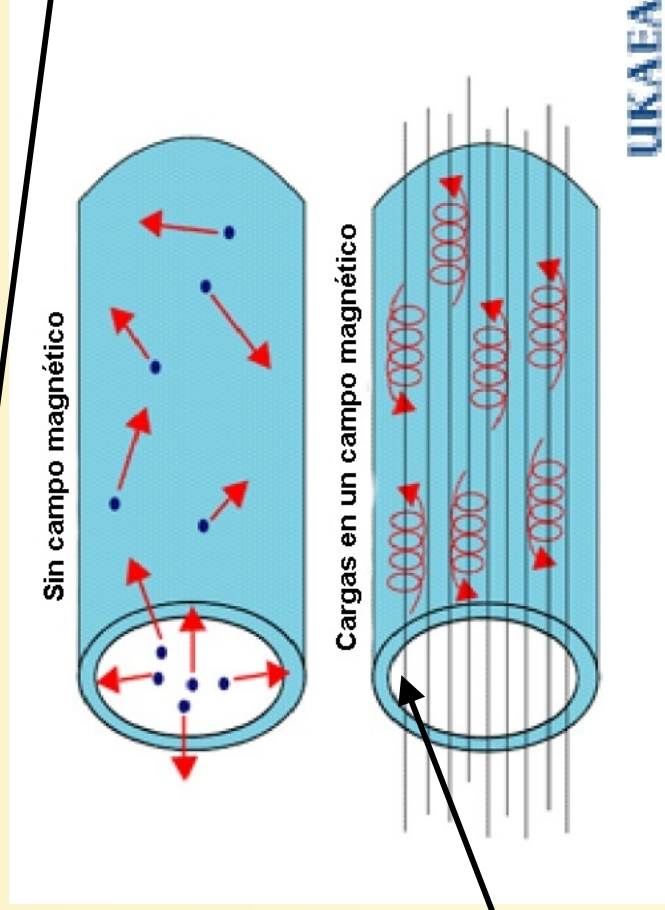
Se intenta mantener un 'pequeñísimo sol', un plasma, en el interior de una 'botella'.

2

En concreto hablaremos de fusión por **confinamiento magnético**

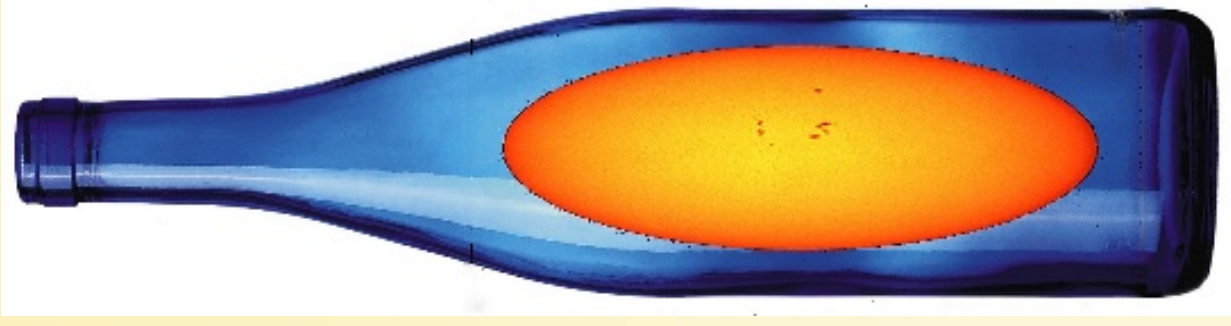
Se intenta mantener un 'pequeñísimo sol', un plasma, en el interior de una 'botella'.

3



Botella magnética :
La botella es un poco más compleja que la '2'.

- Requiere de **campos magnéticos** para minimizar el n° de partículas que alcanzan las paredes.

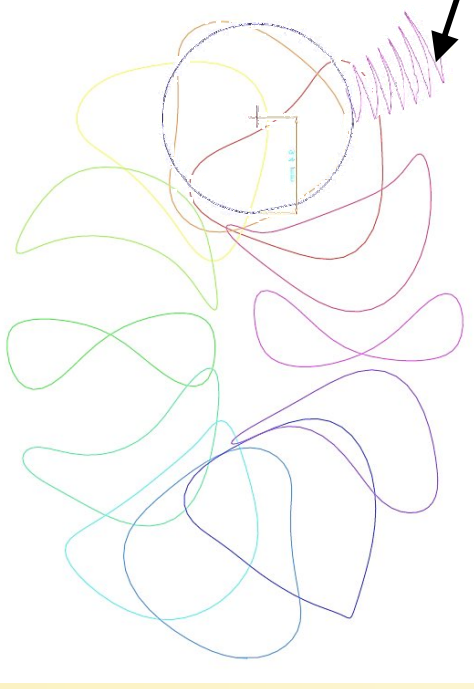


Bobinas

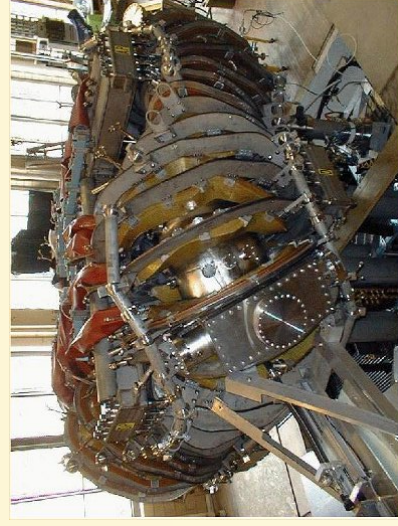
Reacción de fusión

Campo magnético → **la forma de las bobinas es esencial.**

Cuanto más bien diseñadas y precisas, más temperatura se alcanza con el mismo tamaño del reactor.

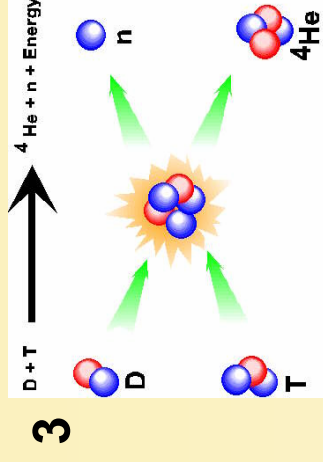


Bobinas en el presente dispositivo : La partícula escapa pronto (también en casi todos en el mundo)

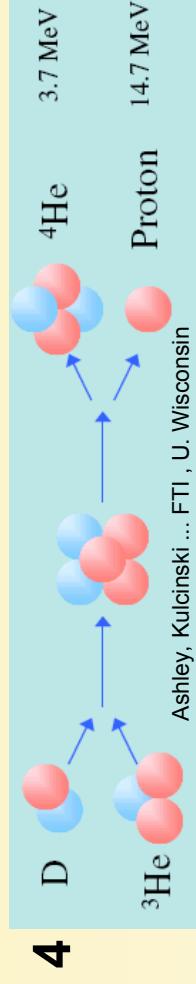


2 HSX, año 1999 :
‘Mejores’ bobinas

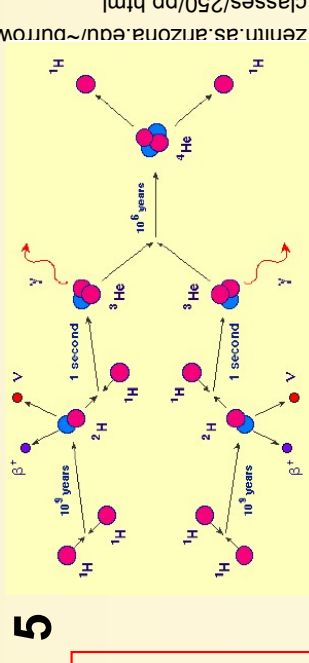
Simulación y cálculo intensivo ~ZIVIS



La reacción de fusión más fácil en la tierra ~10⁸ °C



Más dificultosa, pero posible y ‘mejor’



Hay otras reacciones casi imposibles en la tierra

Por comparar : Reacciones nucleares de fusión en el sol

De qué experimento se trata?

Lo que **NO** he construido :

- No es un reactor termonuclear, *no hay reacciones*
- No produce energía, *aunque sería estupendo que lo hiciera*
- No es ningún invento excepcional, *sólo una construcción*

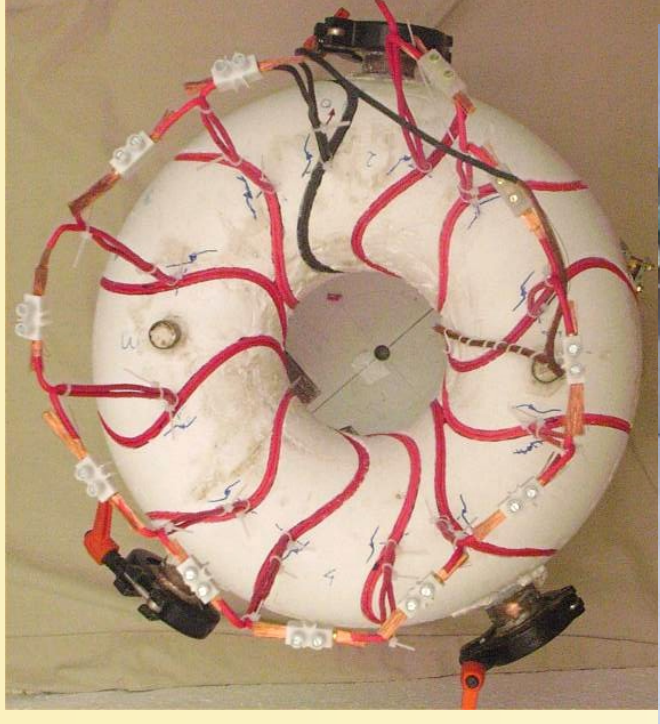
Lo que **SÍ** he construido :

▪ Se trata de un dispositivo experimental cuyo nombre es **UST_1**, del tipo **stellarator** (cierta *botella magnética en forma toroidal* = 'donut')

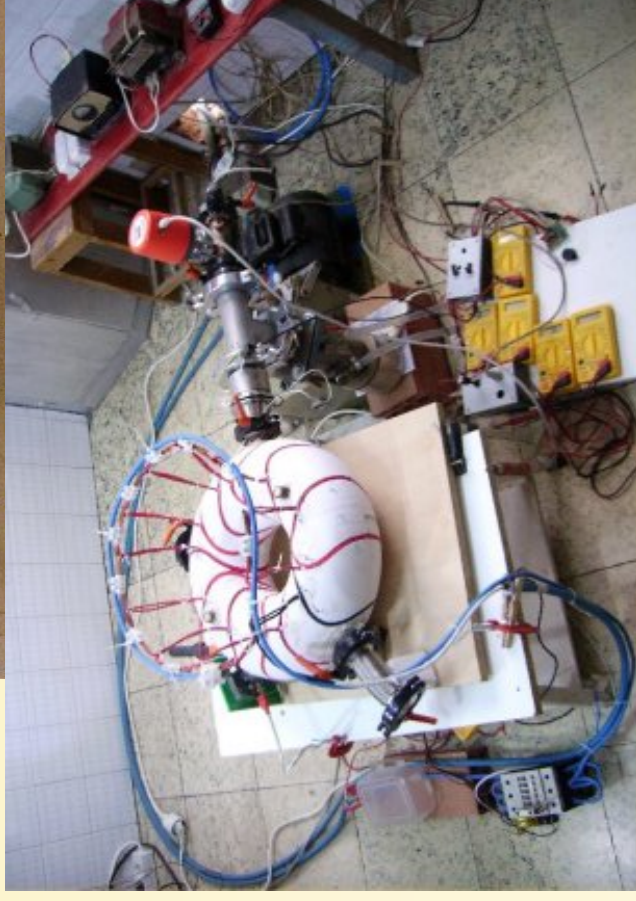
▪ **Objetivo** : *Aprender y experimentar en fusión, especialmente en tecnologías para fusión, y en menor medida en simulación y física del plasma*

El stellarator UST_1

1



2



La instalación completa

De qué experimento se trata?

Las características del stellarator:

- Es de los más pequeños, 370mm de diámetro exterior
- No es de los más exactos (errores < 0.5%)
- Se encuentra instalado en una vivienda

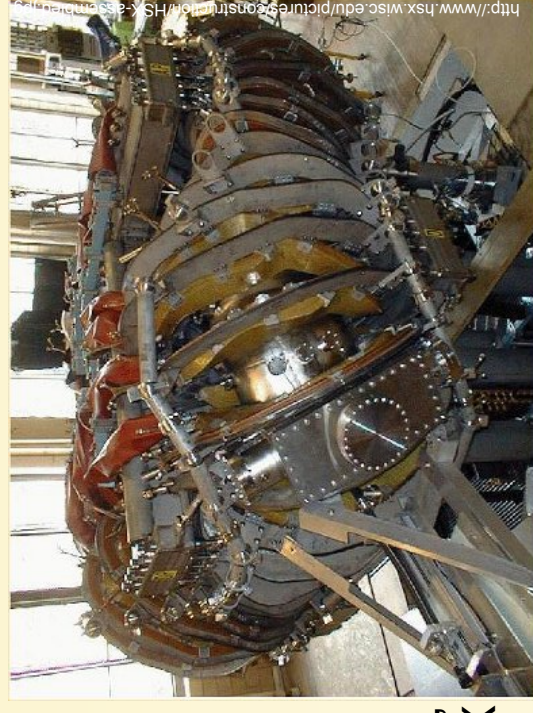
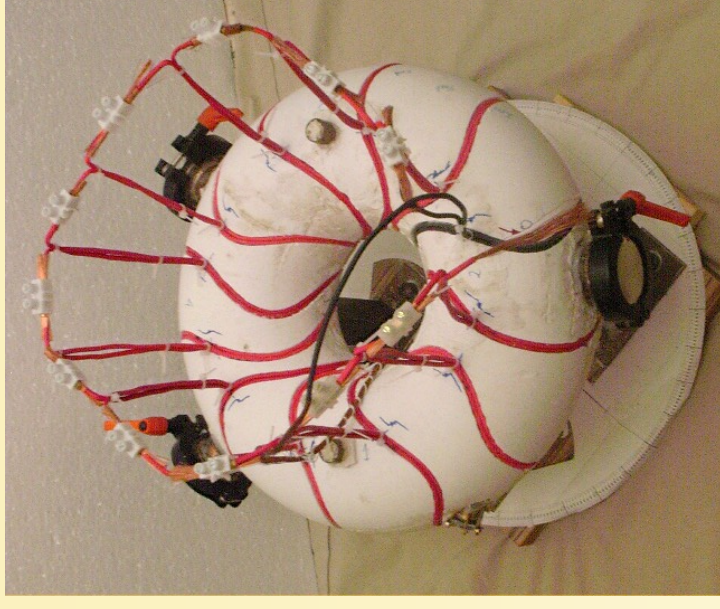
Muy posiblemente es :

- El más económico. Menos de 3000€
- El más sencillo. Solo elementos imprescindibles
- El único diseñado y construido por una sola persona

Debemos recordar que :

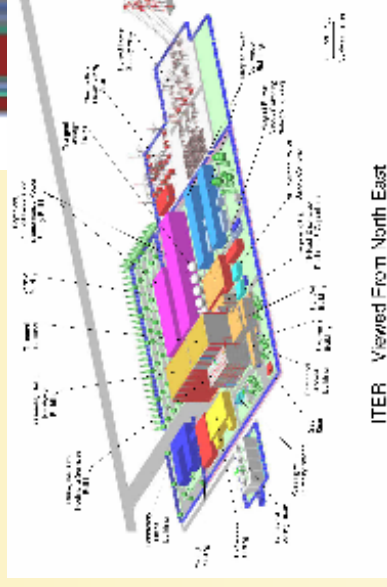
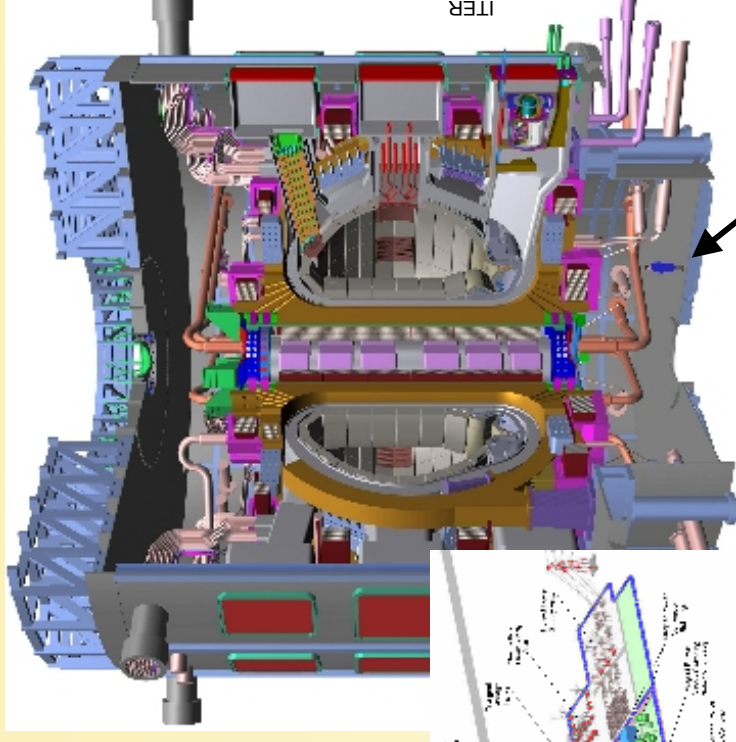
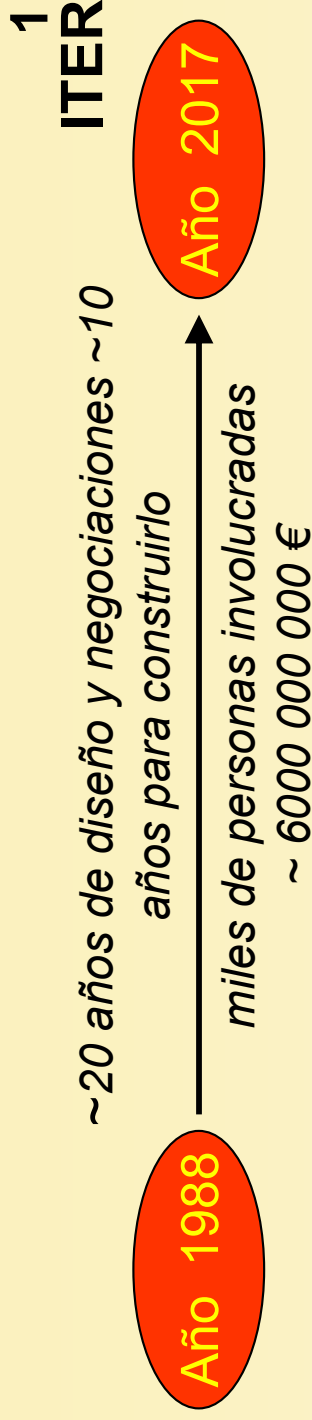
- **NO** produce energía, ni reacciones debido a su pequeño tamaño, desafortunadamente.

El stellarator
UST_1



Otro stellarator,
HSX

Más cercana?



ITER Viewed From North East

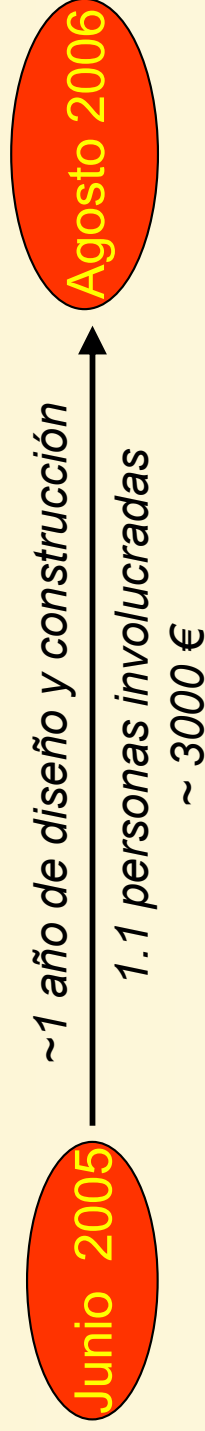
2 Edificios ITER

Una persona



3

- **UST_1** es el más cercano a las dimensiones humanas y su espacio,
- **pero no acercará la fusión en el tiempo**, la industrial, probablemente



Cuestión de tamaño + calidad

Tamaños comparativos

Cada experimento de fusión tiene su calidad y su magnitud :

**	ITER	JET	W7-X	TJ-II	TJ-K	UST_1
Volumen de plasma en m ³ *	1000	100	30	1	0.1	0.001
Calidad	excelente	buena	excel.	buena		regular

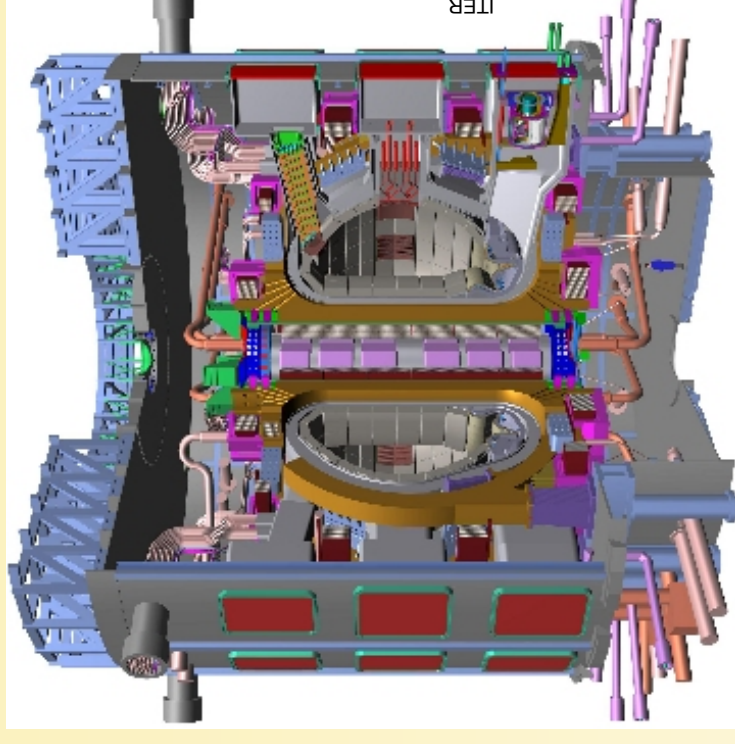
Calidad de UST_1 es regular (precisión, optimización) pero el coste extremadamente bajo.

Es muy 'sencillo'! (comparar con ITER).

Carece de muchos sensores (=diagnósticos) y sistemas de calentamiento (NBI, microondas ...).

** NOTA : Nombre de distintos stellarators y tokamaks en el mundo

* NOTA : Valores más exactos o típicos: ITER 840 m³ , JET 85 m³



ITER, Francia (en construcción)

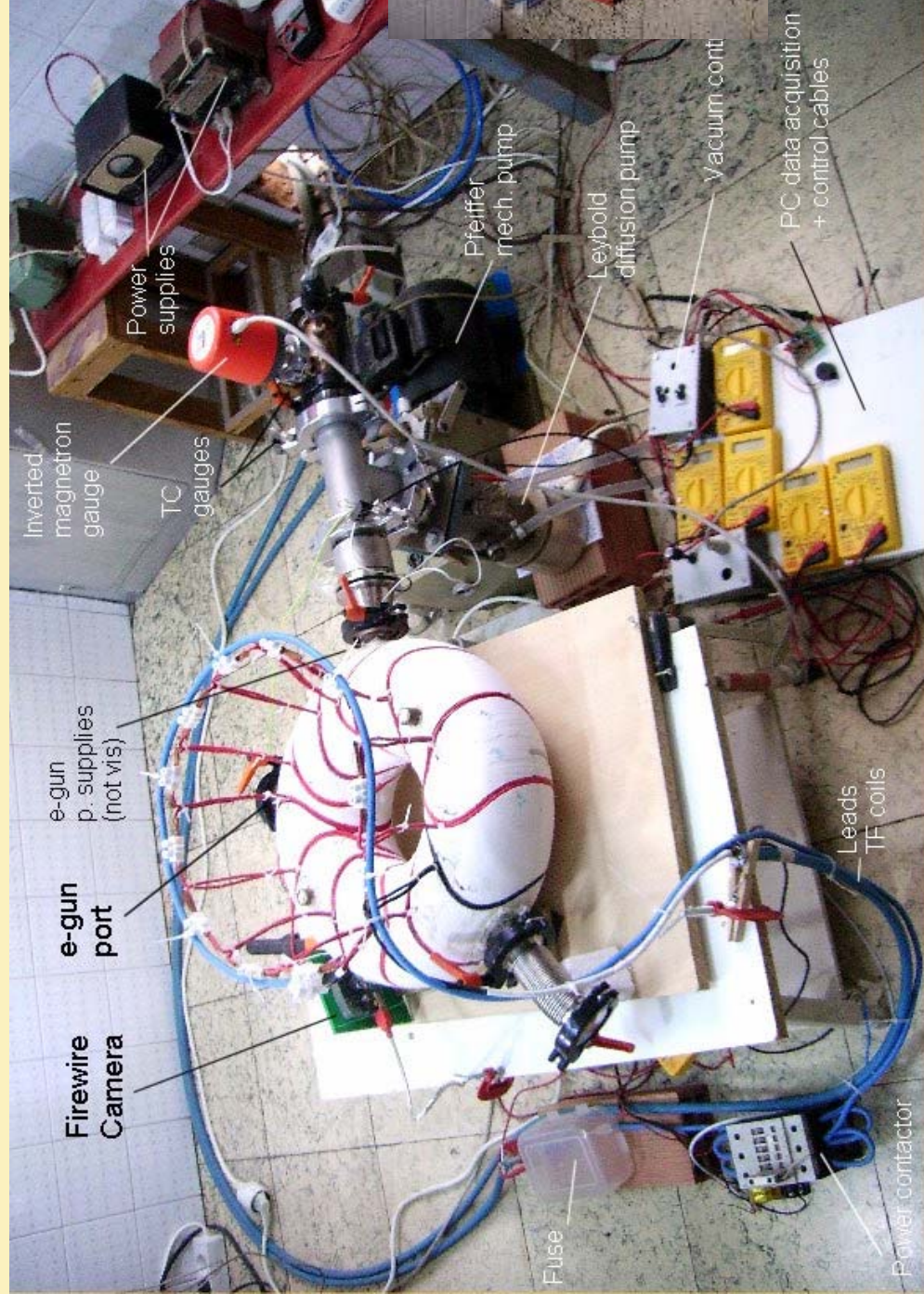


TJ-II, Madrid



UST_1, Castellón

Una visión general



◀ Los sistemas principales son: Sistema de vacío, fuentes de alimentación, PC's de control y adquisición de datos y el stellerator en sí.



◀ Fuentes de alimentación
2

1 UST_1

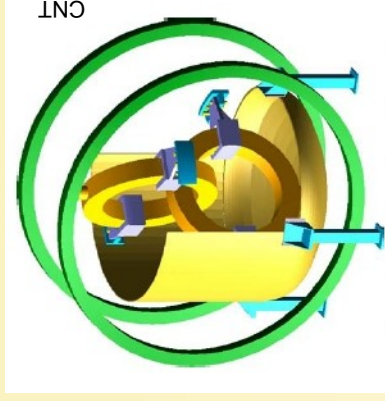
- Se han diseñado y construido **sólo los sistemas estrictamente necesarios**. Son elementos de segunda mano, en general

La elección

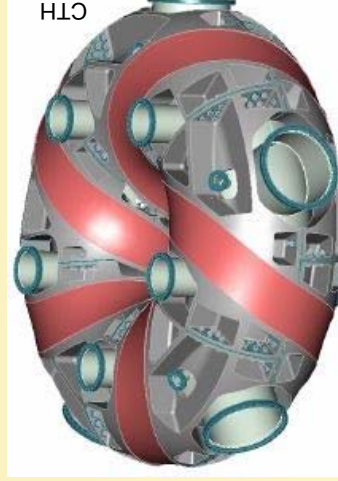
Primero tenemos que elegir entre el modelo :



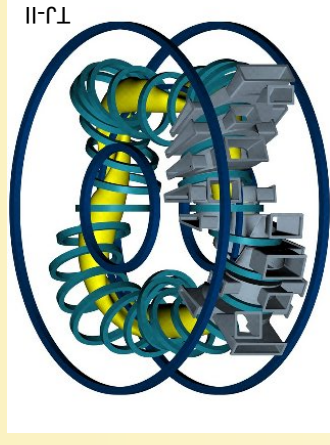
1 Modelo llamado stellarator modular



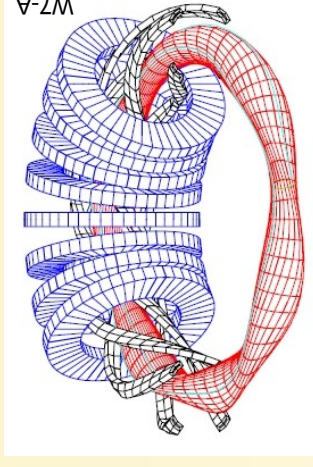
2 De 'bobinas planas inclinadas'



3 Torsatrón o heliotrón



4 Heliac



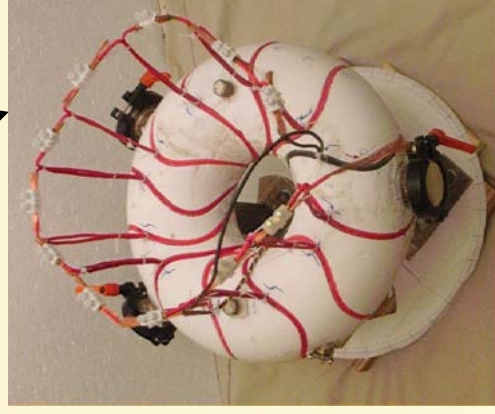
5 Stellarator clásico

▪ La decisión fue sobre todo **económica,**

▪ si no podemos 'comprar' el modelo 1, pues *construimos una mezcla entre el estilo 1 y el 3,* que sí podemos pagarlo

UST_1

Stellarator modular 'circular'



II . Elementos de UST_1 :
Cámara de vacío, bobinas, escayola,
mecanizador, sistema de vacío y
calentamiento. Plasma.

El principio, la cámara de vacío



1

Codo de cobre. Pared de 0.8mm de espesor



2

◀ Cámara de vacío formada por 5 codos de 75°. Tubo 80mm diam. R-toro 119mm. Soldado con plata-Sn al 5%



3

Detalle, perforación para una boca y dos anillos para reforzar la cámara



Cámara finalizada. 3 bocas de 35mm diam. Soldado con plata-Sn al 50%. Una ventana de vidrio. No materiales ferromagnéticos.

4

Selección del conductor adecuado

Pruebas : ▪ Probé varios tipos de conductores de cobre, normales-bricolaje

▪ El cable elegido es de 'gran' **sección de cobre** y mínima de aislante

▪ Está bobinado sobre un cilindro de **escayola** que se estaba probando como **soporte**

▪ **Superconductores** : Fue estudiado. Caros (Bi-2223 3000€ + extras). Difícil fabricarlos con calidad suficiente sin medios. YBCO es el ideal para nitrógeno líquido.

Alternativas:

Varios tests



1



4



3



2

Selección : ▶

6mm² cond.

flexible,

desaislado y

funda

termorretractil.

Diam. ext

=3.5mm



5 Test surco-bobina

La escayola



1 Mecanizando el molde de corcho blanco para la escayola. Semicírculo de alambre caliente girando sobre un eje



2 Test de la cámara de vacío dentro del molde de corcho



3 Cámara de vacío recubierta de capa flexible y hermética

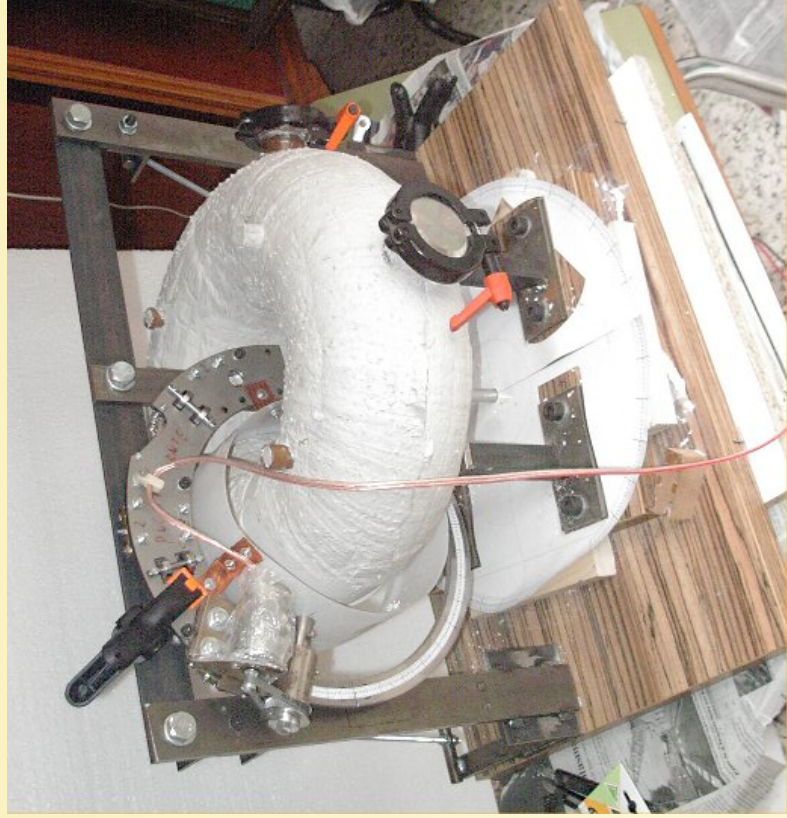


4

Molde preparado para verter la escayola

Preparación del toroide de escayola

Rectificación de la escayola antes de mecanizar los surcos



1 Rectificando el 'donut' porque el molde de corcho es bastante imperfecto



2 ◀ Rectificando las imperfecciones debidas al molde



4 Resultado. Ahora el toroide ya es 'perfecto'

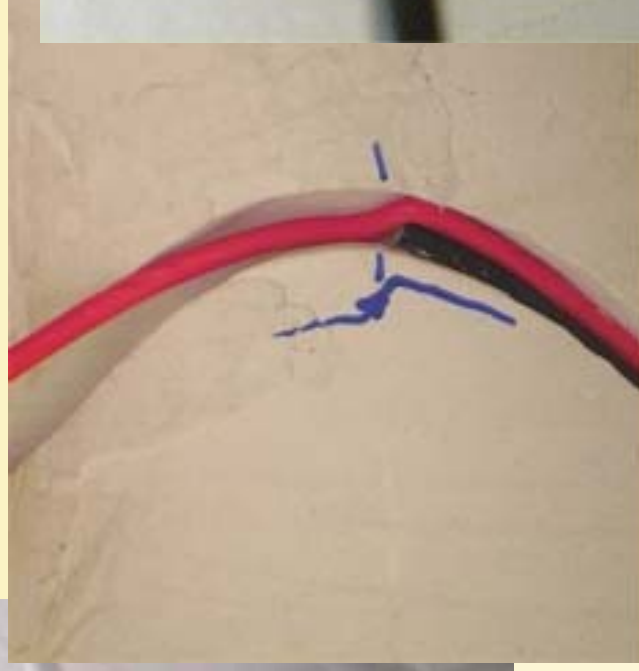


3 Detalle de parte rectificada y parte sin rectificar

Proceso de bobinado

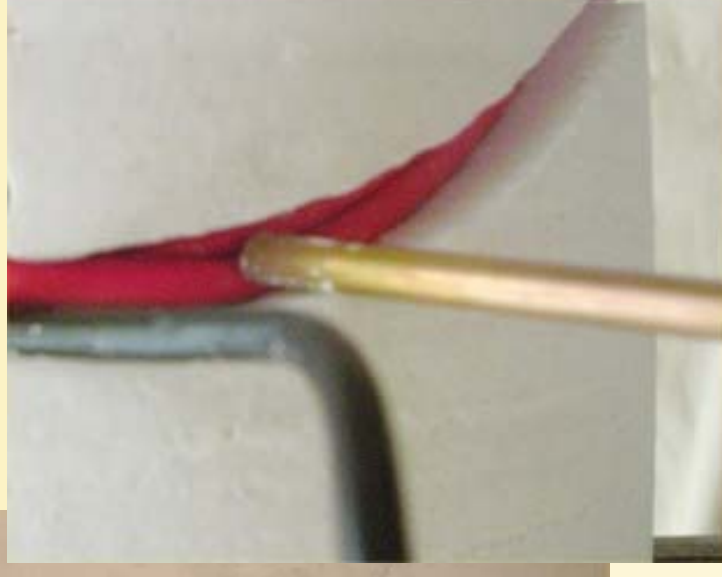


- 1 ◀ Surcos mecanizados en el marco compacto de escayola, ancho 7mm, profundidad 12.5mm. Precisión $\pm 0.3\text{mm}$



- 2 Inicio del bobinado. Conductor auxiliar negro, conductor real rojo

NOTA : Luego veremos como se han creado los surcos



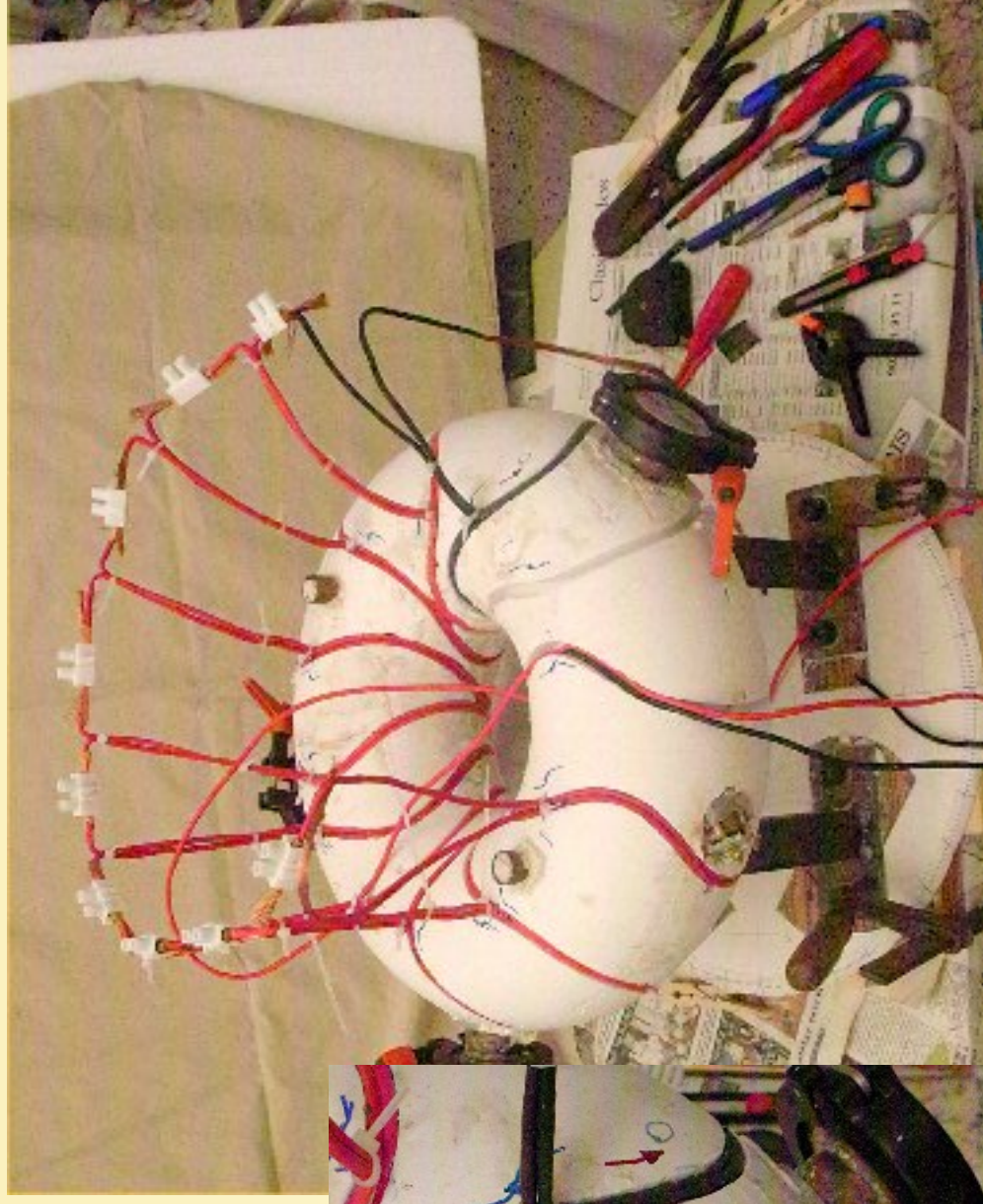
- 3 Compactación y posicionamiento de los conductores en el surco

Ya casi está !

- Lo siento, pero no he podido traer el stellarator (pesado y frágil).



1 ▲ Acabando la penúltima bobina



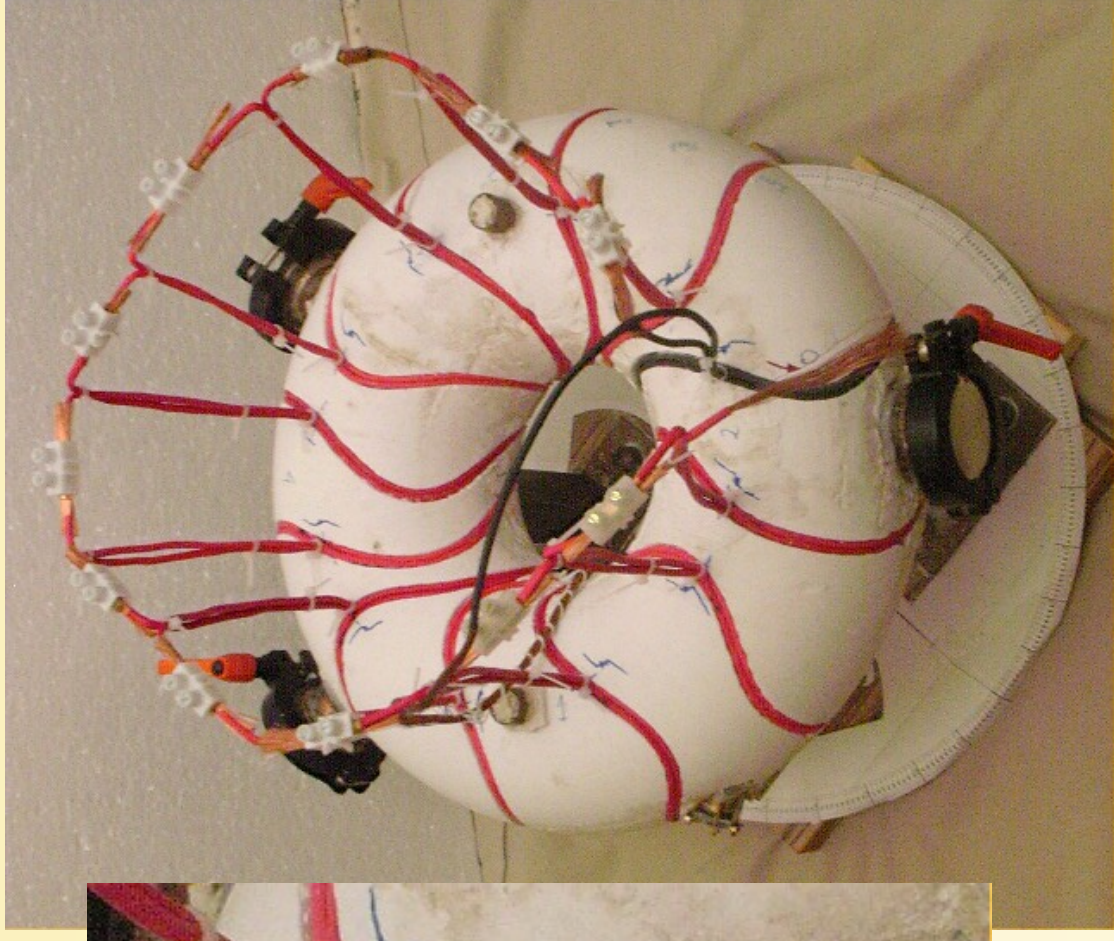
▲ Faltan dos bobinas para finalizar. Se observan las herramientas de trabajo (Varias tijeras, cutex, alicates, destornilladores, pinzas, barras para presionar y bridas)

2

El resultado, UST_1

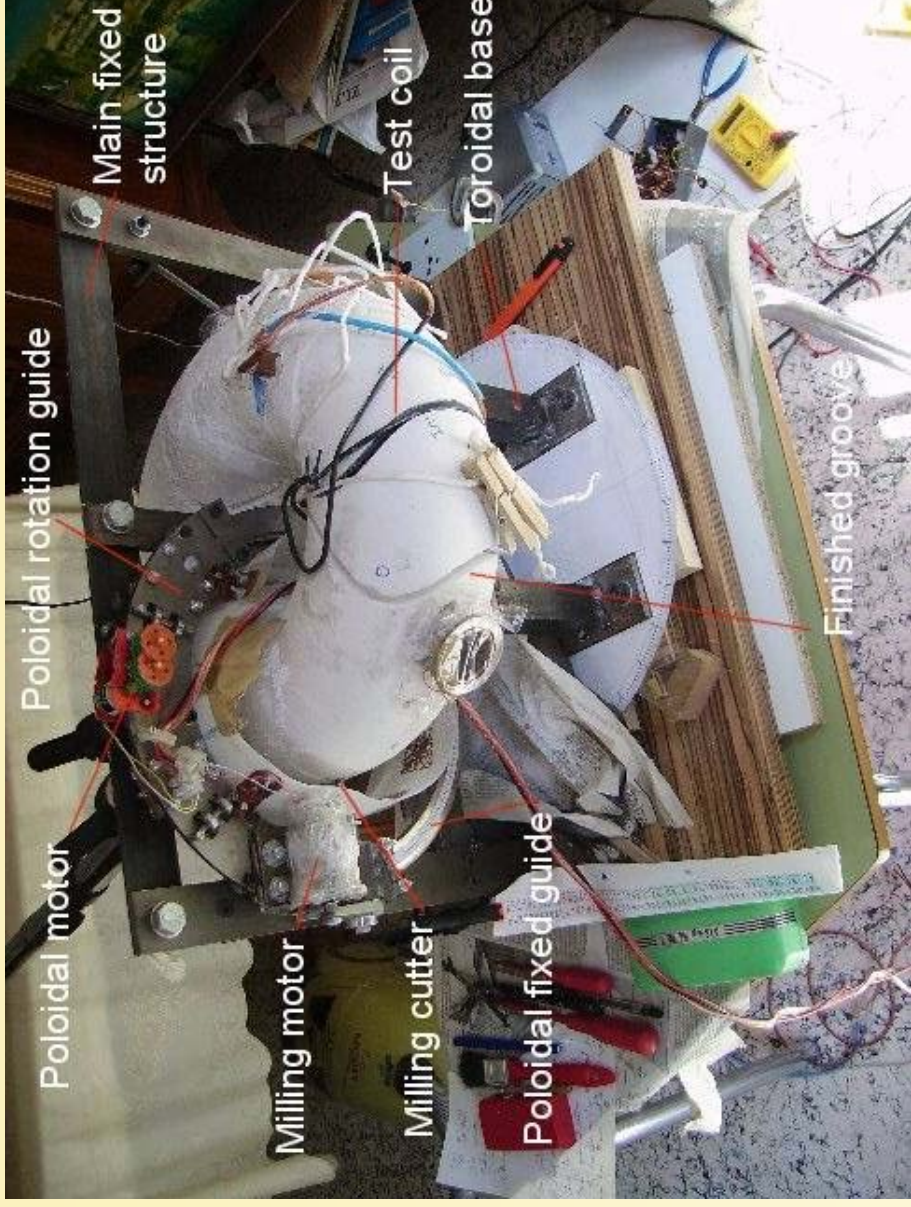


1 Detalle de las bobinas



2 Vista en perspectiva del stellarator de bajo coste. Finalizado.

Creatividad → bajo coste → posible lo imposible



Innovador aparato mecanizador

Ventajas :

- La mecanización y posicionamiento de las bobinas es el mismo proceso → errores menores.
- Los errores geométricos = $\pm 0.3\text{mm}$ son pequeños y pueden ser menores.

Inconvenientes :

- No muy adecuado para stellarators de ciertos tipos, grandes, ni reactores.

Fresadora* especial que trabaja en coordenadas toroidales**. Fue ideado, diseñado, patentado, construido, probado y los surcos mecanizados

- Costó bastante tiempo y esfuerzo, pero resultado muy satisfactorio (bajo coste y exactitud)

fresadora* = máquina-herramienta para el mecanizado de piezas

Pero, cómo funciona el aparato mecanizador?



Algunos elementos :

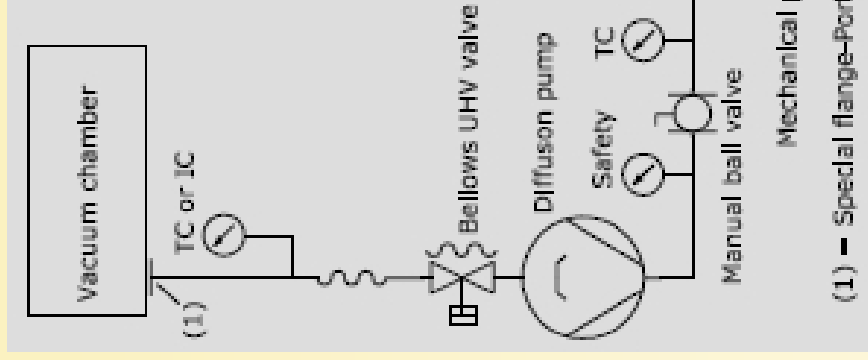
- Guía poloidal + motor
 - Motor de fresado y fresa
 - Pórtico soportante
 - Dos semianillos fijos
 - Tubo de aspiración de partículas
 - Cubre antipartículas
 - Listado de coordenadas
-
- Algunos surcos mecanizados
 - Una bobina de prueba (negro)



Emplea ~2 horas para mecanizar un surco de ancho 7mm ,
profund. 12.5mm . Posicionamiento semiautomático

Función auxiliar : Corte de moldes toroidales. Soporte, alambre caliente y molde

Sistema de vacío



Esquema del sistema de vacío



Elementos principales

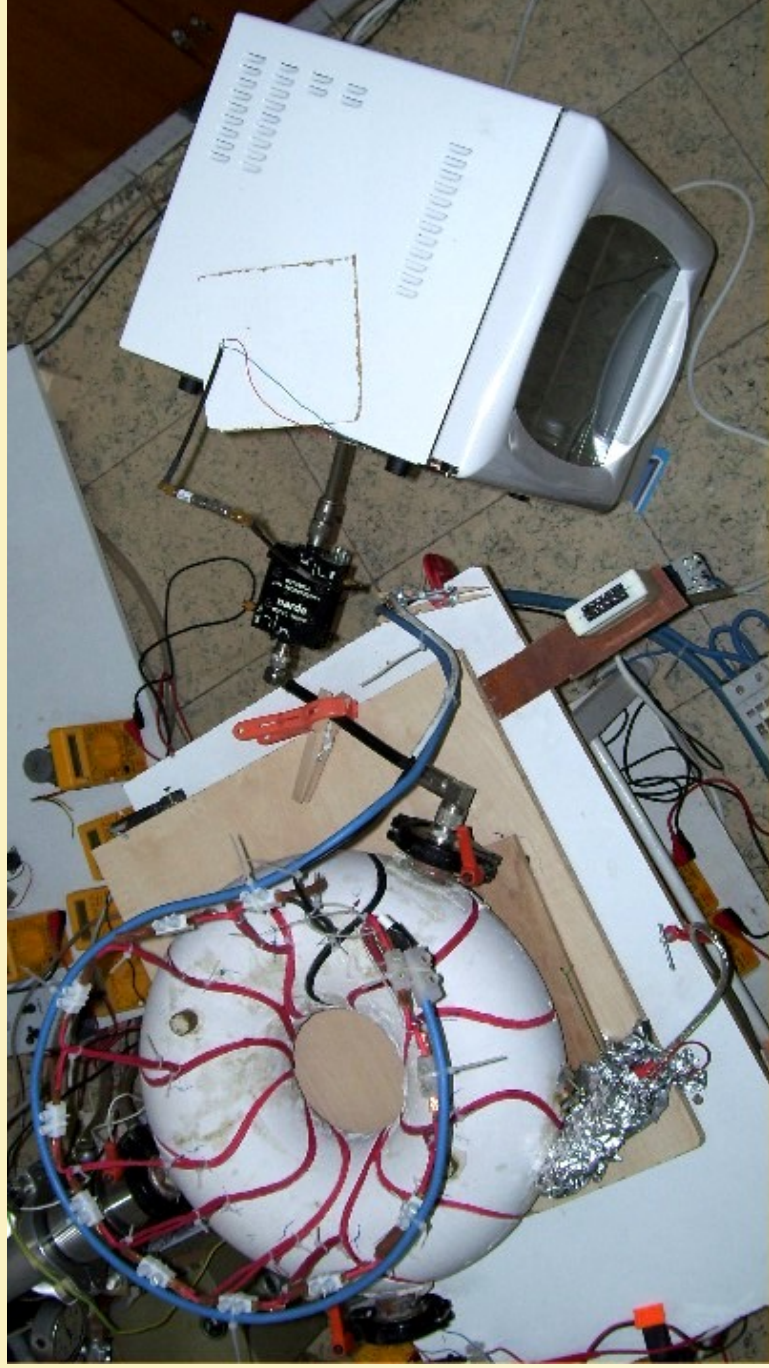
- Una bomba de vacío mecánica
- Otra bomba para producir alto vacío, alrededor de una centésima de millonésima de la presión atmosférica.
- Varios sensores de vacío para conocer la presión
- Acoplamientos (tubos, bocas...)

- Logrado un vacío de 5mPa = 5 centésimas de millonésima de la presión atmosférica.
- Lo correcto sería 1 mil millonésima o menos.

Sistema de calentamiento y un plasma

Por medio de microondas se calienta el plasma (en UST_1 es un horno de microondas común)

Video de uno de los primeros plasmas. Pulso 222



Se observa : un horno de microondas común, líneas coaxiales de transmisión de microondas, medidor de potencia, antena(no visible, dentro de UST_1)

- La calidad del plasma es todavía baja.
- Faltan aparatos de medida (diagnósticos) y meses o años de mejoras en la calidad del plasma.



Primer plasma

Coste

- **Coste total = 2700€,**

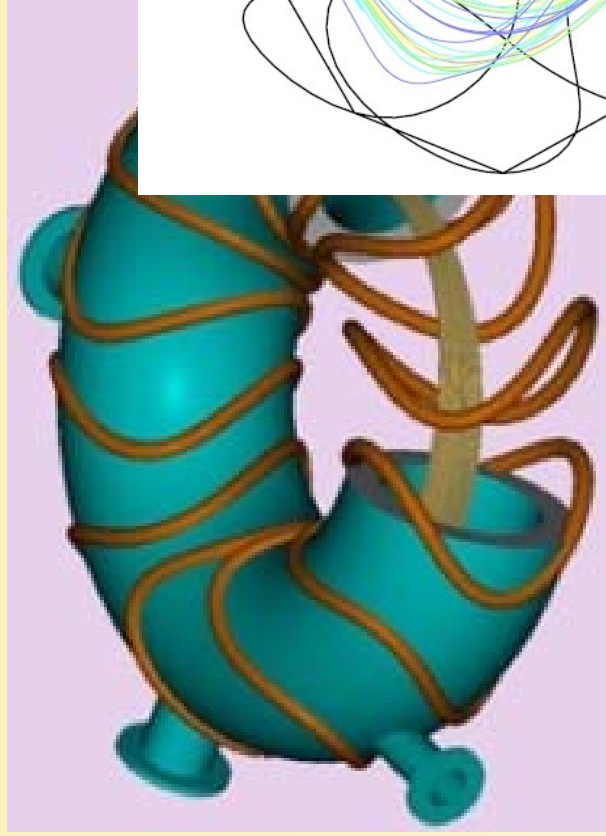
Incluyendo el núcleo de UST_1, sistema de vacío, de e-gun, control, calentamiento, pero no el trabajo.

- *Aunque a primera vista no lo parezca, 2700€ es muy poco comparado con lo que sería normal, 15 000€ ó 30 000€*

(Trabajo no incluido) Coste, incl. transporte	€ (Euros)
Cámara de vacío + marco para las bobinas	61
Conductor eléctrico	75
Calentamiento microondas	~120
Fuentes alimentación + líneas + contactor	206
Aparato mecanizador (sólo elementos pagados)	222
Diagnósticos: e-gun + RGA + espectroscopio	441
Sistema de vacío	1610

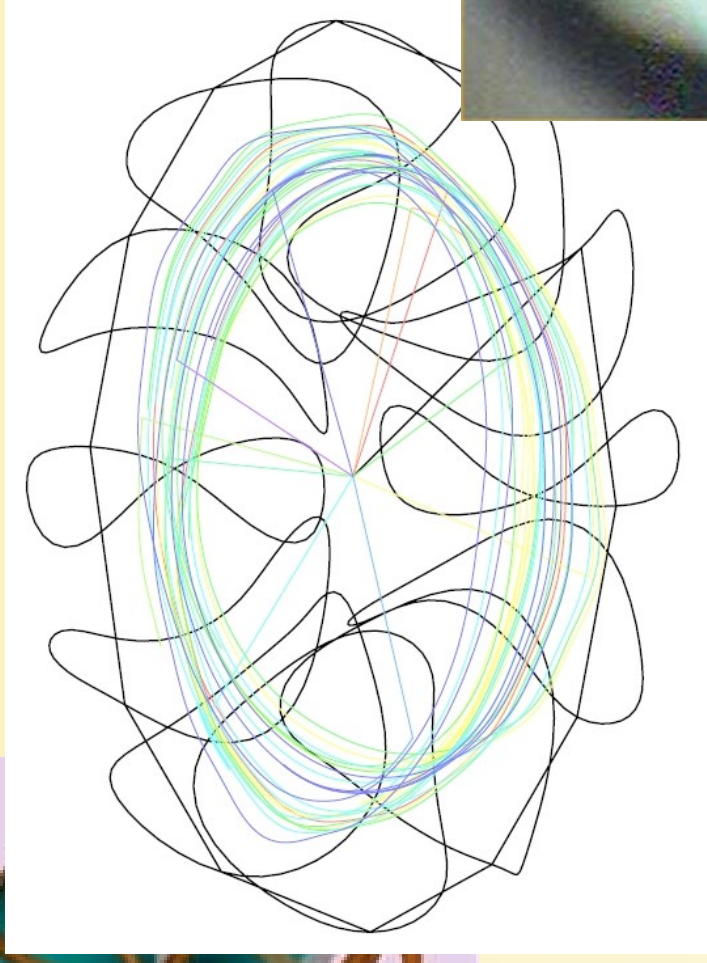
III . Computación. Simulación para el diseño de UST_1

Un objetivo, minimizar las partículas que escapan



1

Simulación de trayectorias de partículas ▼ 2



Un plasma real. Son electrones e iones moviéndose a alta velocidad. Los e⁻ a casi 1 millón de metros por segundo ▼

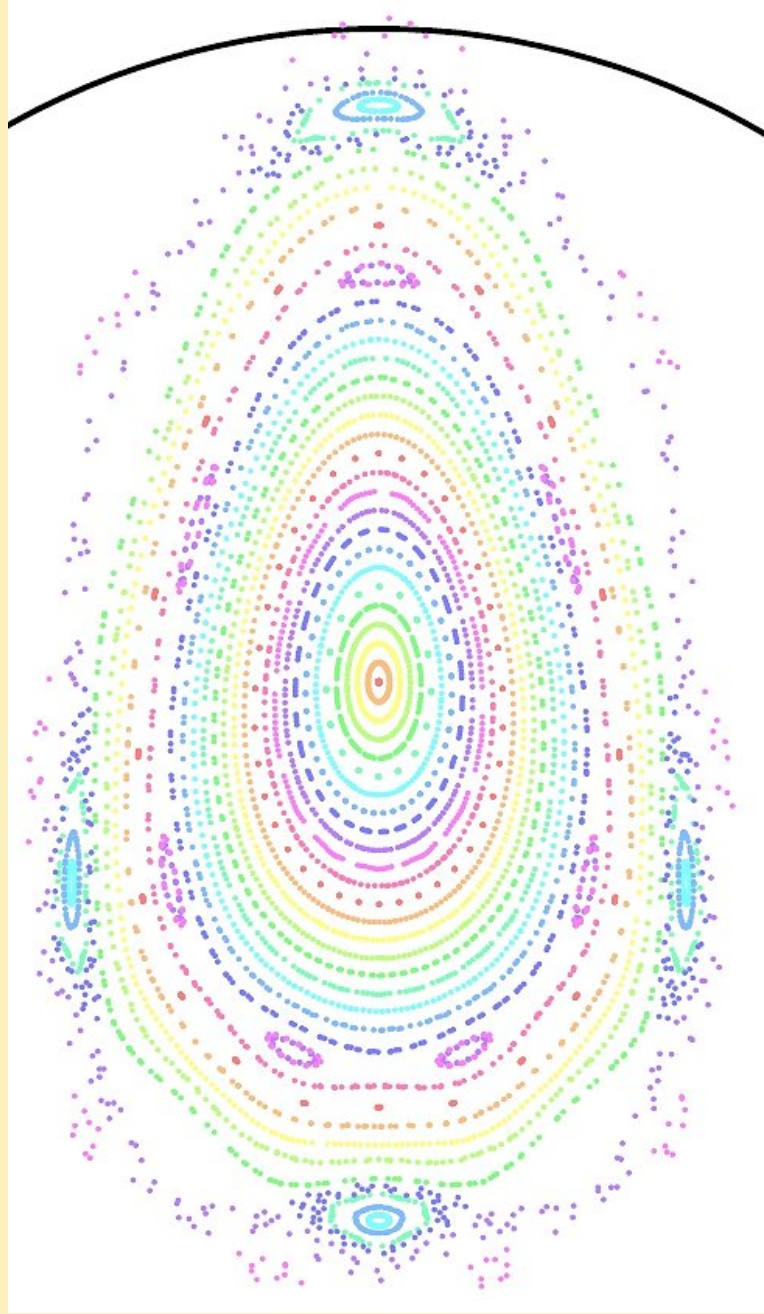


3

El objetivo principal es **minimizar el número de partículas energéticas*** que escapan hacia la pared en un segundo

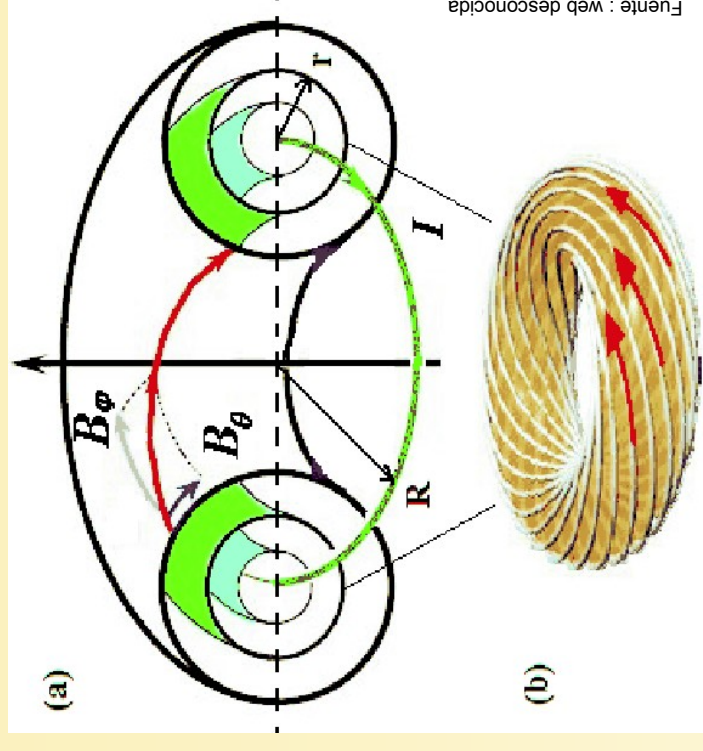
- * *Energéticas ~ Alta temperatura =*
 - 20 000 °C en UST_1
 - 100 000 000 °C en reactores y grandes experimentos

Primer cálculo : superficies magnéticas



Simulación-Cálculo : Superficies magnéticas en UST_1

Utilizando 'Grid' preciso 1/400m = 2.5mm de lado, 725000 nodos

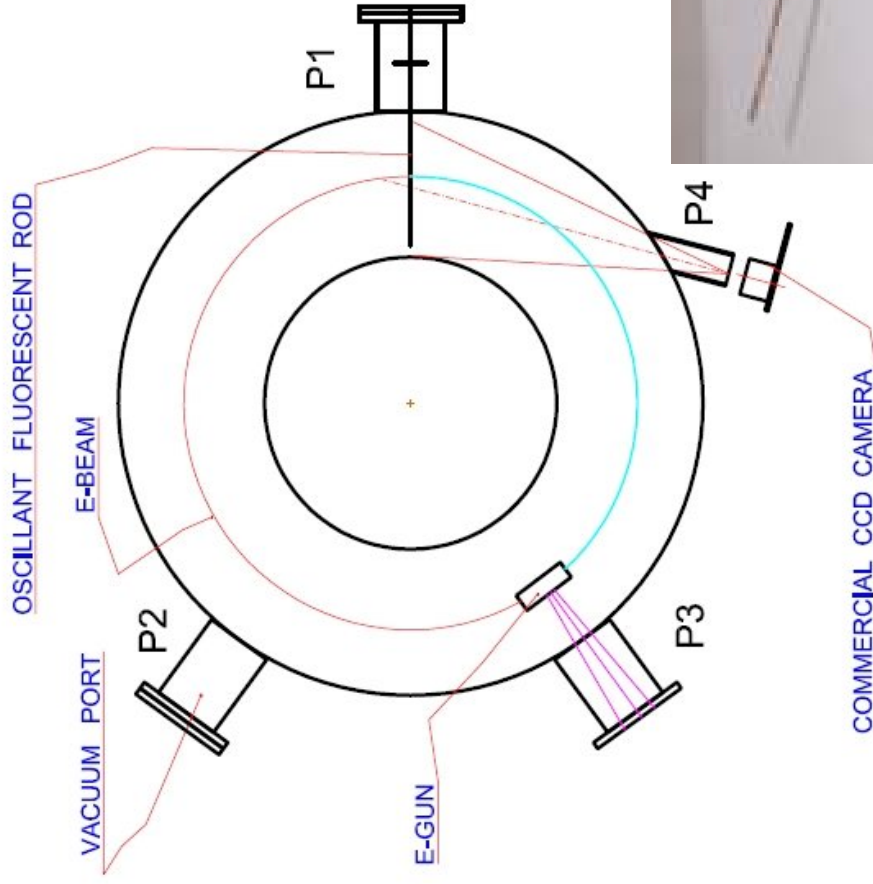


Esquema del significado y origen de las superficies magnéticas

- Lo anterior ha sido simulado utilizando un código JAVA llamado SimPIMF , corriendo sobre un PC a 3GHz
- Esta simulación es rápida y no da problemas de tiempo de cómputo. Costó sólo 278s. Cada una de las 34 partículas en la realidad 'viviría' 0.2 milisegundos.

Experimento. Son correctos los cálculos?

FIELD MAPPING EXPERIMENTAL SETUP



1

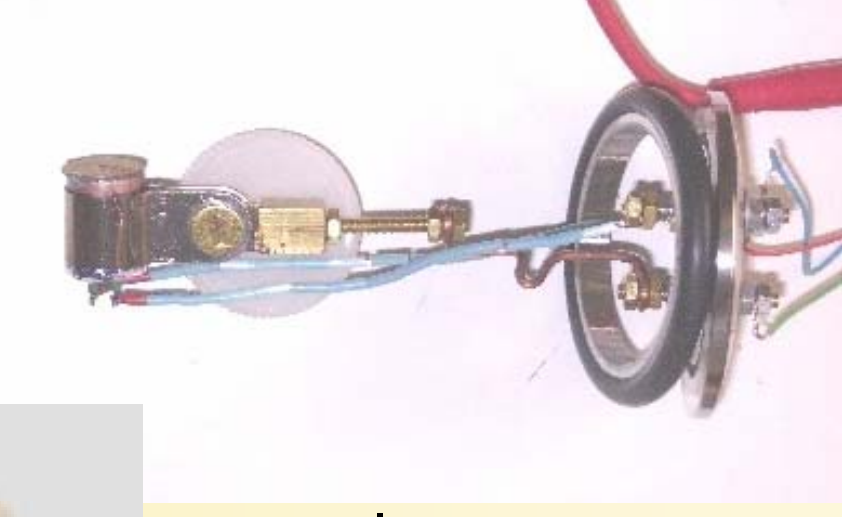
Segundo modelo de cañón de electrones :
Diam. externo = 14mm . Corriente e-beam < 1 mA 4



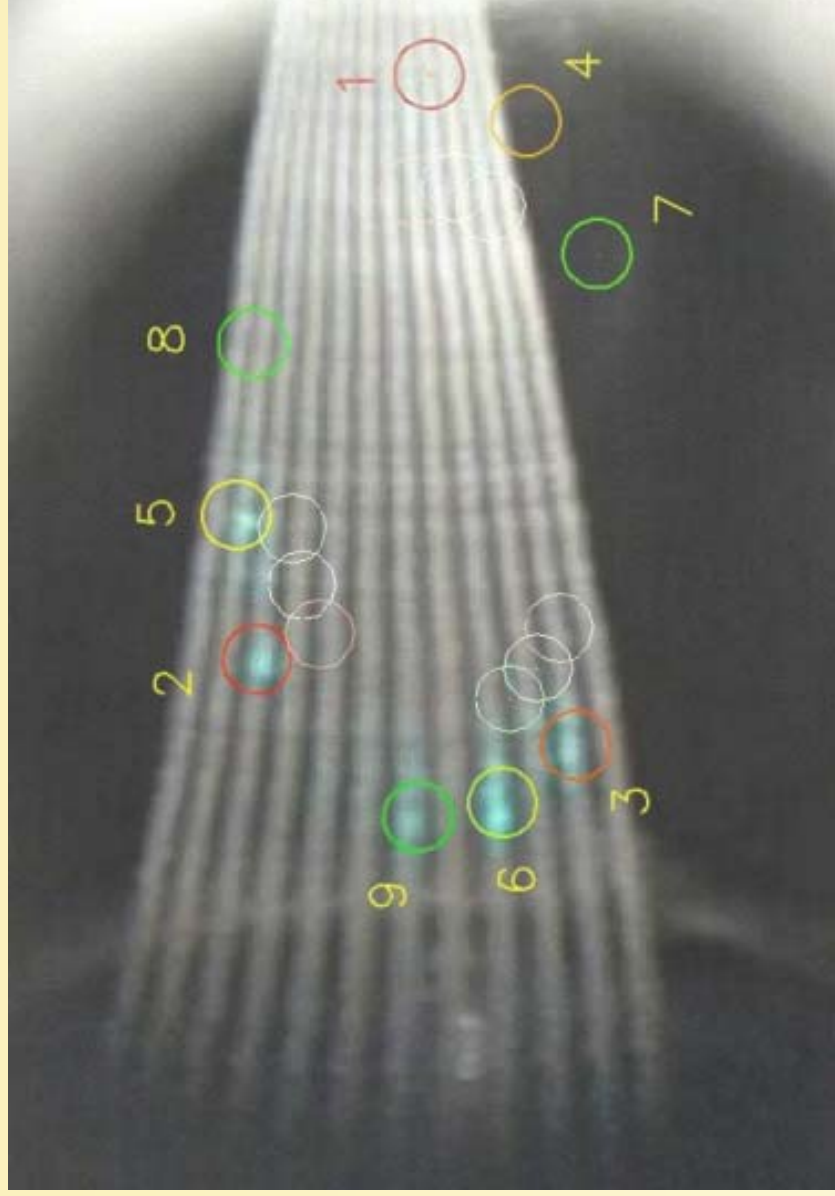
2▲ Interior : Filamento de bombilla halógena 10 W

Varilla fluorescente oscilante.

▼ Fósforo P24 3

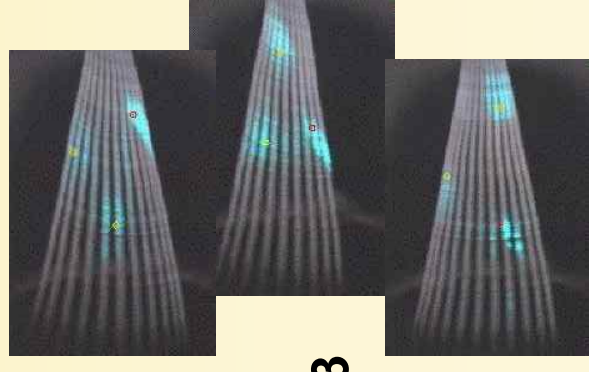


Experimento. Los cálculos eran correctos



Video del experimento.

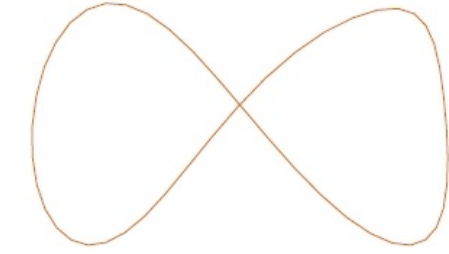
Pulso #202



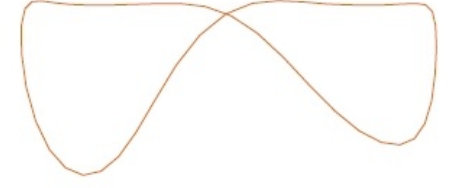
- Superposición de simulación-puntos reales. Los puntos azules son puntos de luz similares a los de una pantalla CRT(no plana).
- Es un rayo de electrones que choca sobre la varilla fluorescente oscilante y genera las superficies que habíamos simulado anteriormente, **SI TODA LA CONSTRUCCIÓN DEL STELLARATOR Y los CÁLCULOS SON CORRECTOS !!)**
- Los puntos simulados (círculos) concuerdan ~bien con los reales

Pulsos #128 127 126

Cómo se han generado las bobinas?



①



②



③



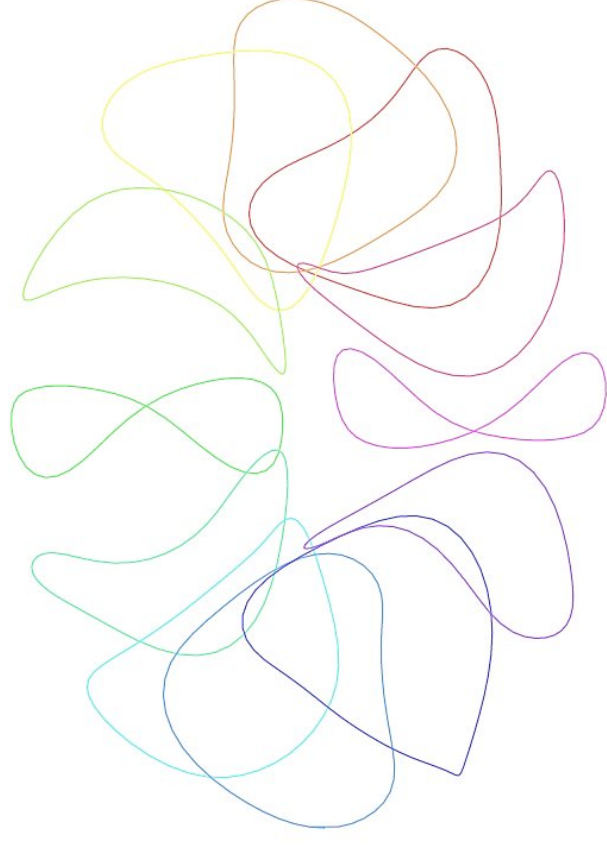
UST_1

Proceso :

- Se van ‘probando’ conjuntos de bobinas con deformaciones diferentes.
- Se elige el mejor.

El método :

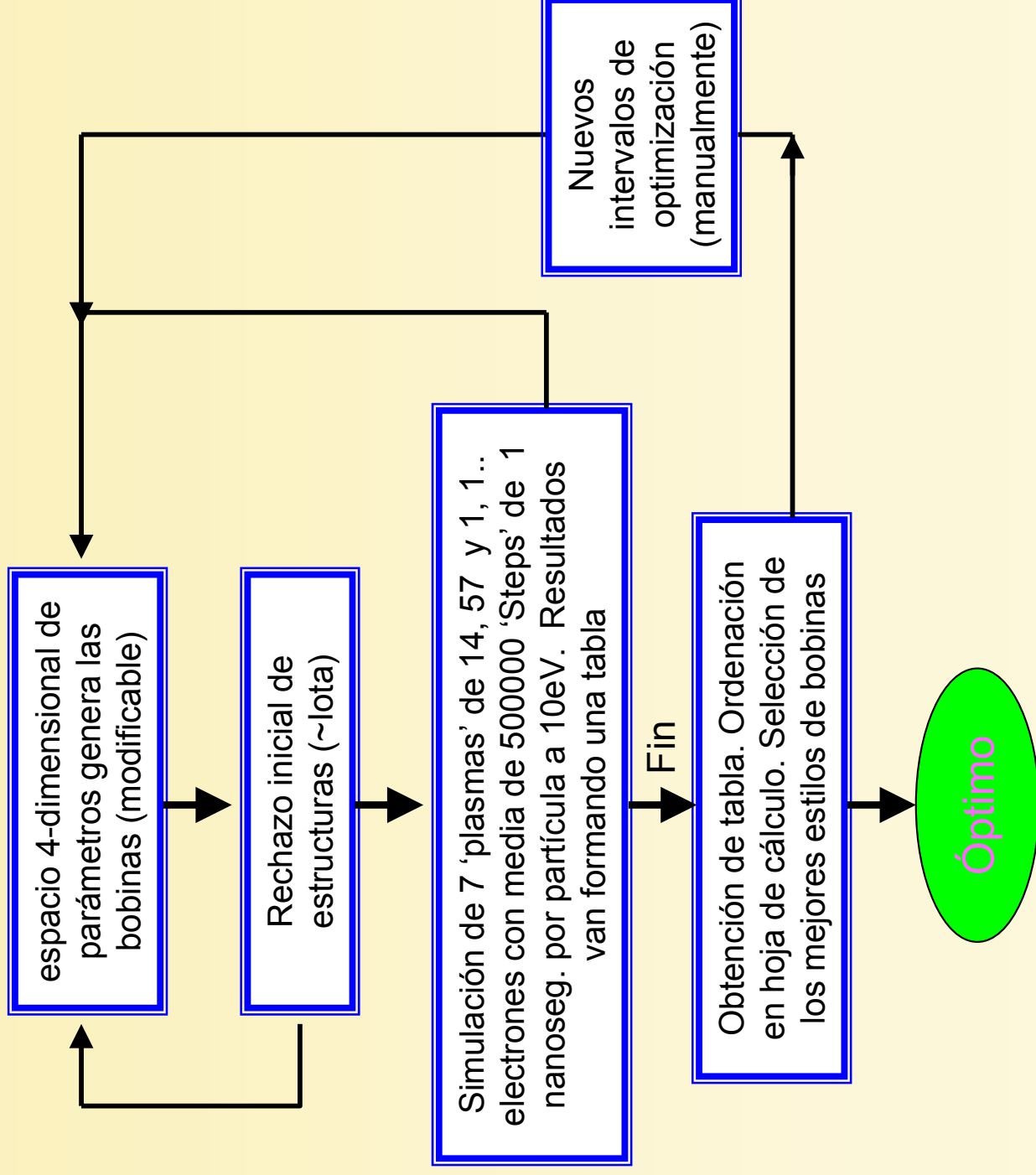
- Es un método actualmente poco utilizado, pero aún se utiliza en las fases finales de optimización.
- **Desventaja** : Necesaria gran potencia de cálculo.
- Una **ventaja** : Es posible obtener bobinas satisfactorias sin restricciones pre-impuestas.
- **Estilo evolución natural**. Selección de las ‘líneas’ evolutivas más favorables. Pero evol. = lenta y casual



Obtención de las bobinas (más técnicamente)

- **Prueba de bobinas**
- **Rápida** simulación de la órbita de cada partícula.
- El 'Rechazo inicial' acelera el proceso
- **Centenares de horas** de proceso si 5 dimensiones (~40000 estructuras de bobinas a probar). Requeriría decenas de PC's
- **De 6 a 27 PC-horas** para ~6000 estructuras de bobinas (4 parámetros=dimensiones)

▪ **Estos cálculos y simulaciones son muy adecuados para el Grid-supercomputador ZIVIS**



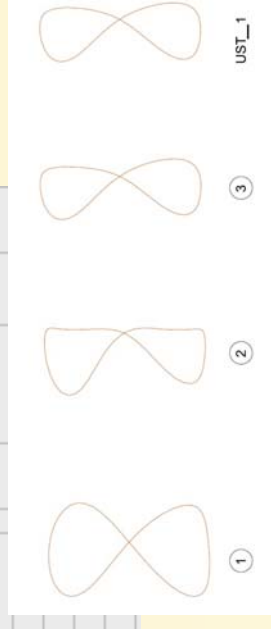
Obtención de bobinas. Tabla de resultados

Lo relevante de la tabla :

- Miles de tablas de resultados similares a ésta necesitan ser calculadas
- ZIVIS utiliza una potencia de cómputo sobrante que puede ser utilizada

Order lota_1	Ripple_1	%T Bmin	Desvia	Average	Rip	PlasmaSiz	lota_2	Speci	Speci	MinDistanc	Fr	Pitch	On	Pitch2	Pitch3	Pitch4	Hi	Positi	up/dwon	well
5	0,32121037	0,21300687	0,00374385	0,11439581	0,05125	0,33552672	9,98	10	0,009852	0	1,4	1,25	1,6	0,65	1	0,13	1,045	0,005		
73	0,32177544	0,19787124	0,00318734	0,11406053	0,05	0,33412121	9,75	9,82	0,007882	0	1,5	1,35	1,55	0,6	1	0,13	1,038	0,007		
65	0,32024554	0,20227083	0,00373036	0,10963253	0,05125	0,33327691	9,59	9,7	0,008333	0	1,5	1,3	1,55	0,65	1	0,13	1,041	0,011		
66	0,31997029	0,21509815	0,00312266	0,11926719	0,05125	0,33323999	9,88	9,96	0,008333	0	1,5	1,3	1,6	0,55	1	0,13	1,041	0,008		
58	0,31962951	0,21167492	0,00411215	0,11538991	0,05125	0,33303551	9,76	9,81	0,008784	0	1,5	1,25	1,6	0,6	1	0,13	1,042	0,006		
100	0,32221723	0,20706325	0,00441405	0,11215376	0,055	0,33275596	9,55	9,68	0,007348	0	1,55	1,35	1,55	0,6	1	0,13	1,033	0,013		
21	0,31750303	0,22302173	0,00378824	0,12245854	0,05	0,33218611	10,2	10,3	0,00895	0	1,4	1,35	1,6	0,55	1	0,13	1,046	0,002		
38	0,31735654	0,21121886	0,00379767	0,11032161	0,0525	0,33182238	9,74	9,83	0,008867	0	1,45	1,3	1,55	0,65	1	0,13	1,046	0,009	THIS	
46	0,31811712	0,20618378	0,00347575	0,11421107	0,0525	0,33172369	9,91	9,94	0,008416	0	1,45	1,35	1,55	0,6	1	0,13	1,043	0,004		
31	0,31552703	0,22044592	0,0037769	0,1160773	0,05125	0,33076228	9,89	9,98	0,009318	0	1,45	1,25	1,6	0,6	1	0,13	1,048	0,009		
39	0,31629678	0,22423351	0,00345106	0,12014642	0,0525	0,33013713	10	10,1	0,008867	0	1,45	1,3	1,6	0,55	1	0,13	1,044	0,006		
84	0,31663715	0,2027263	0,00370281	0,11769417	0,055	0,32961367	9,7	9,78	0,008056	0	1,55	1,25	1,6	0,55	1	0,13	1,041	0,009		
91	0,31780244	0,19299761	0,00414231	0,11246796	0,05375	0,32909387	9,54	9,63	0,00778	0	1,55	1,3	1,55	0,6	1	0,13	1,036	0,009		
99	0,31631804	0,20671245	0,00468787	0,11574988	0,055	0,32851403	9,66	9,76	0,007348	0	1,55	1,35	1,55	0,55	1	0,13	1,039	0,011		
83	0,3154783	0,19315352	0,00436111	0,10875171	0,0525	0,32830247	9,39	9,51	0,008056	0	1,55	1,25	1,55	0,65	1	0,13	1,041	0,013		
11	0,31369671	0,21665571	0,00410095	0,11192947	0,05125	0,32827982	9,9	9,98	0,009401	0	1,4	1,3	1,55	0,65	1	0,13	1,046	0,007		
4	0,31422598	0,2092244	0,0035935	0,11873827	0,05125	0,32806725	10	10,1	0,009852	0	1,4	1,25	1,6	0,6	1	0,13	1,044	0,006		
19	0,31346058	0,21258333	0,00432119	0,11584367	0,05	0,32744505	10,1	10,1	0,00895	0	1,4	1,35	1,55	0,6	1	0,13	1,045	0,003		
Cut																				
90	0,30859755	0,21014439	0,00433755	0,11578788	0,055	0,32115361	9,61	9,69	0,00778	0	1,55	1,3	1,55							
63	0,31314478	0,20095219	0,00297516	0,1167087	0,05625	0,32018027	9,75	9,83	0,008333	0	1,5	1,3	1,55							
18	0,30694923	0,2152499	0,00340183	0,12000274	0,0525	0,32006331	10,1	10,2	0,00895	0	1,4	1,35	1,55							
55	0,30714644	0,20132164	0,00371561	0,1123814	0,05375	0,31927263	9,61	9,72	0,008784	0	1,5	1,25	1,55							

- La bobina-conjunto 3 da como resultado la línea '21'. Mejorable
- La 1 y 2 serían eliminadas en la preselección inicial.
- La 'UST_1', línea '38' son las bobinas elegidas.
- Sólo 4 parámetros 'Pitch' y 7 variables a optimizar, por tanto decisión difícil.
- Más potencia de cómputo es necesaria para obtener un diseño mejorado.



Minimizando las partículas que escapan

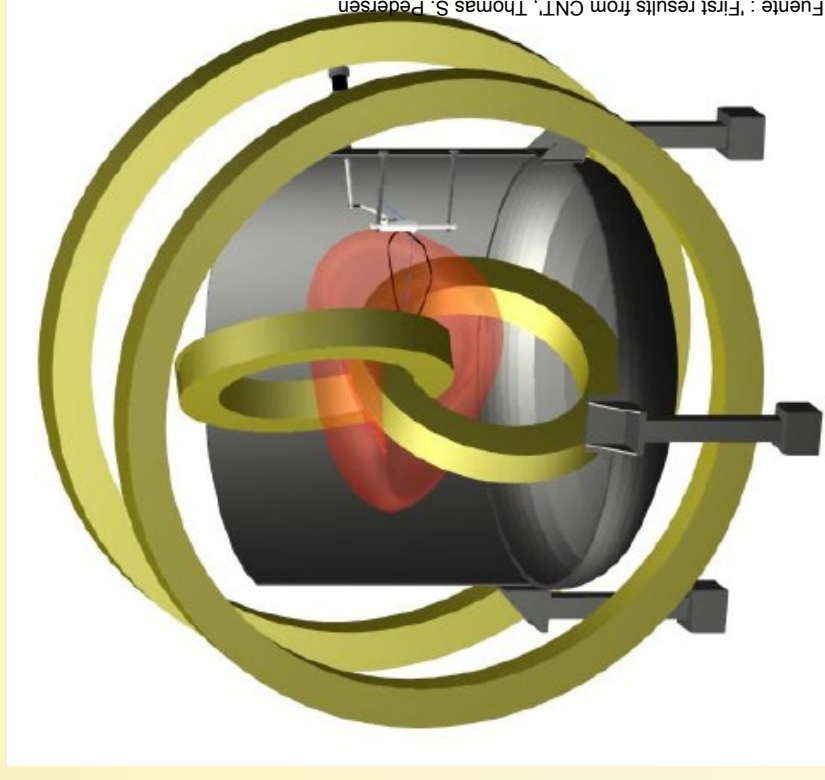
Lo ideal: Decirle al programa de simulación :
'dame la estructura de bobinas para la cual
escapan menos partículas'.

Pero **el PC podría tardar siglos
en dar una respuesta !!
(ZIVIS meses)**

Caso real :

- Simulación para el stellarator CNT (no el UST_1).
- Se simulan 'estructuras' con 9 ángulos y 6 relaciones de corrientes = 54 estructuras SÓLO!, (~6000!! en UST_1)
- 41 estructuras se evitaron en el 'Rechazo inicial'.
- 13 estructuras se simularon con **200 protones durante 5ms. Total 8 horas-PC.**
- La estructura llamada '6620' ganó el 'concurso'!!
Tardan en escapar 325 microsegundos.

Más info. en www.fusionvic.org , ver CNT



CNT stellarator = 'Columbia
non-neutral torus'

IV . Ideas finales

Mañana, construiremos un reactor para producir energía?

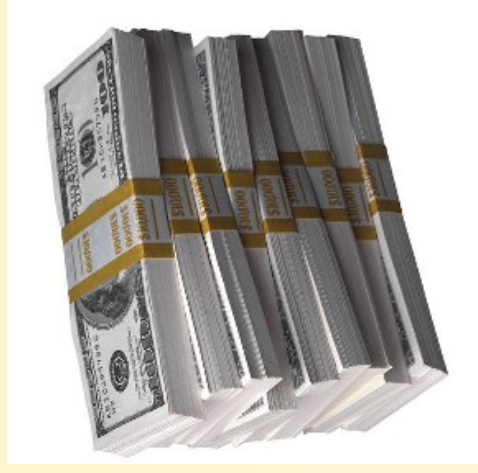
El reactor sería caro → energía cara (a precios actuales)

Porqué el coste es elevado?

- El tamaño ~30m de diám. exterior (stellarator)
- Las bobinas tienen que ser superconductoras :
 - resistir fuerzas enormes
 - muy exactas, errores < 0.2% (mejor < 0.1%)
- Se crean neutrones que :
 - * activan las paredes internas del 'donut' y ello complica las reparaciones y la operación.
 - * destruyen las paredes en 5 o 10 años (depende).
 - * hay que almacenar bastantes metales activados unos 100 años**.

• Hay que producir **tritio** en el reactor.

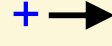
** Son metales estructurales, nada que ver con los residuos en la fisión-(centrales actuales de uranio)



Inversión alta



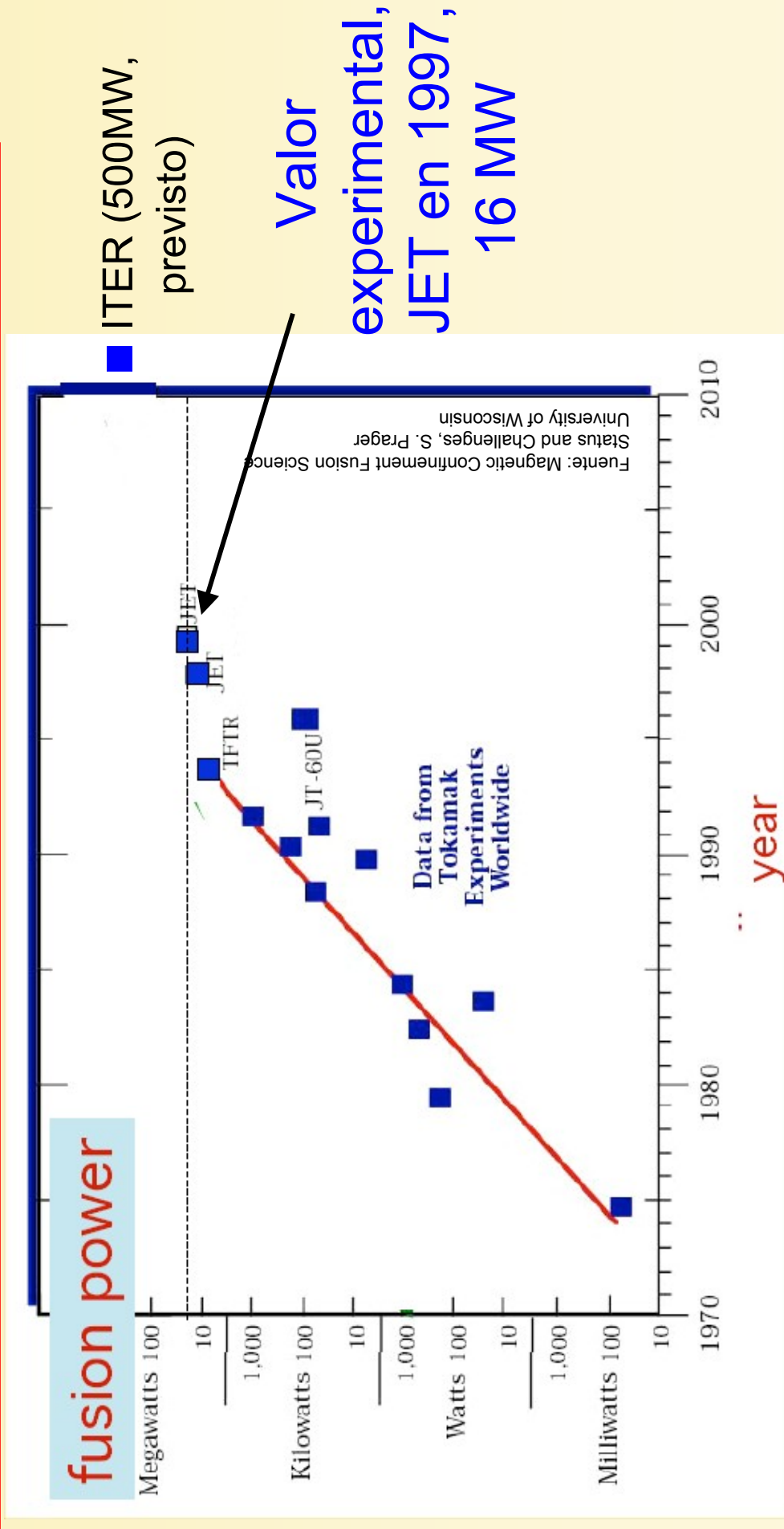
+ Dudas



NO inversión empresarial (por ahora)

pero, la fusión ya ha producido mucha energía

- No hay duda,
- la fusión ya ha generado energía, 16MW ,
- ITER producirá cientos de megavatios de energía



Alguna idea brillante ?

- Hacen falta **ideas creativas** y creíbles en fusión,

- para
 - **reducir costes,**
 - **simplificar diseños y**
 - **avanzar más rápido**



Fuego natural
(~rayos o calor)

Probaron,
fracasaron,
intentaron
nuevamente...
durante
cientos de
miles de años



Fuego a voluntad.
Intuición + técnica =
arte



unos cien años

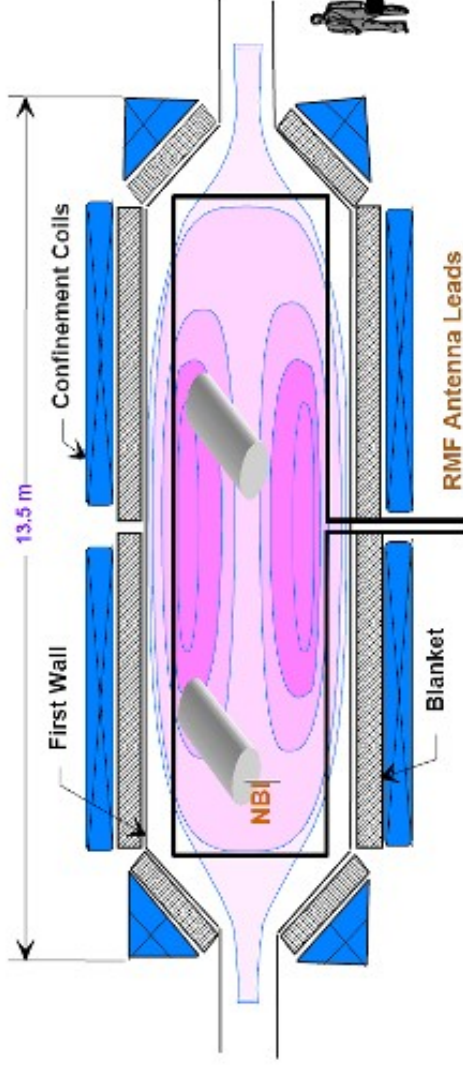


- Se invierte poco en **conceptos alternativos o innovadores.**

Quizás I+D a invertir = **Ahorro global futuro** x **Probabilidad de éxito** x **€I+D**

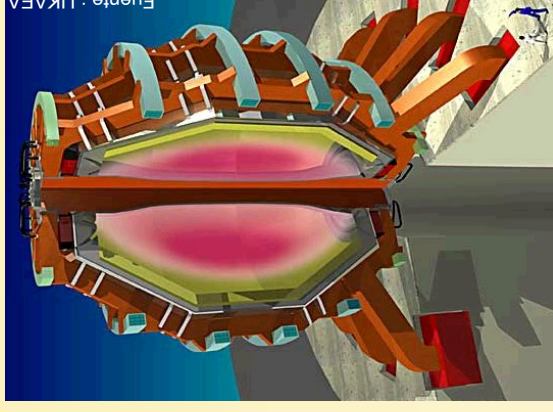
Dos buenas ideas (en mi opinión)

FRC : 'Field reversed configuration'



Fuente : 'Recent Progress on FRC', Houyang Guo, RFPPL

Spherical Tokamak 'creativo'



Fuente : UKAEA

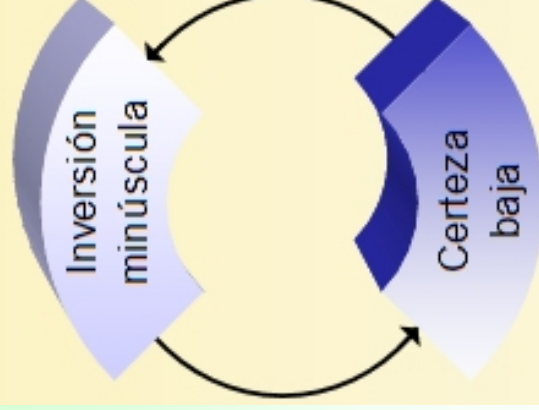
Ventajas de todos los ST:

- Pequeño tamaño → interés empresarial ya.
- ↓ tamaño ; ↑ Beta, ↓ B
- ↓↓ F , ↓ bobinas, fácil mantenimiento, continuo a ↓ CD → ↓ coste.

Ventajas (utilizando ^3He) :

- **~97% menos neutrones**, (Kulcinski, Santarius + otros).
- **~97% menos activación**.
- **No tritio** en la central.
- Fácil mantenimiento (lineal, no blanket).
- **Conversión directa** en electricidad
- ↓↓ activación del 'divertor' + fácil acceso, espacioso.
- Económico, ingeniería simple.

Inconveniente



Ventajas adicionales de los ST 'creativos' :

- Li-Walls : 10-100 veces menos residuos ↑ activados que en tokamak común, aún más fácil mantenimiento (APEX Interim Report)
- **PROTO-SPHERA** e ideas similares: aún menos residuos y más fácil mantenimiento.

Consumimos mucho, somos muchos →
necesitamos mucha energía limpia y barata →

La fusión es importante

Un gran ZIVIS es importante !!

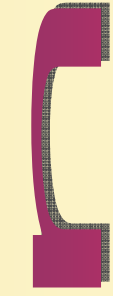
Más información en :

ZIVIS : <http://zivis.zaragoza.es>

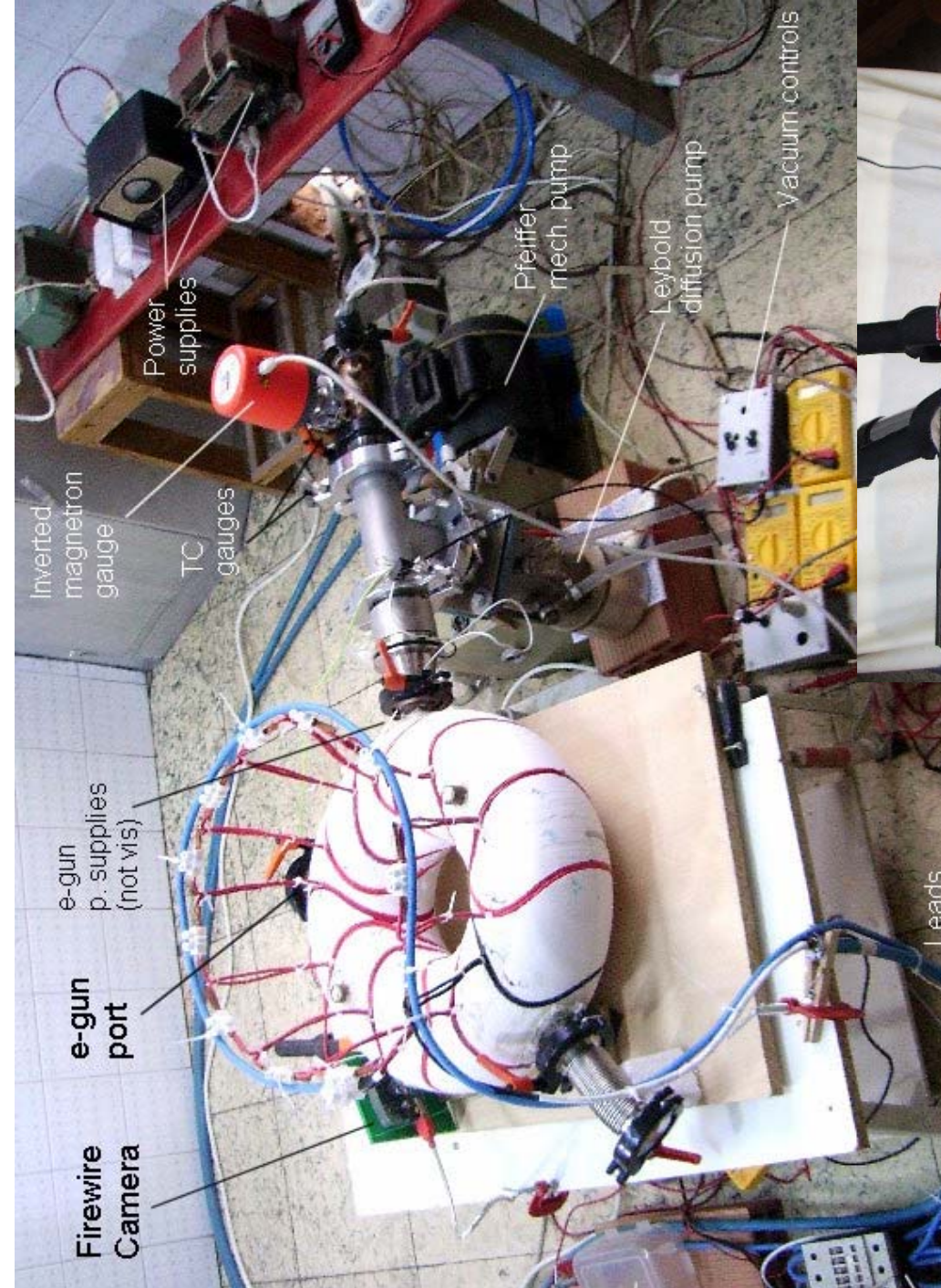
Fusión, (castellano) : www-fusion.ciemat.es/New_fusion/es/Fusion/

Fusión, (inglés) : www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/

UST_1 : www.fusionvic.org



Gracias



**Firewire
Camera**

**e-gun
port**

e-gun
p. supplies
(not vis)

Inverted
magnetron
gauge

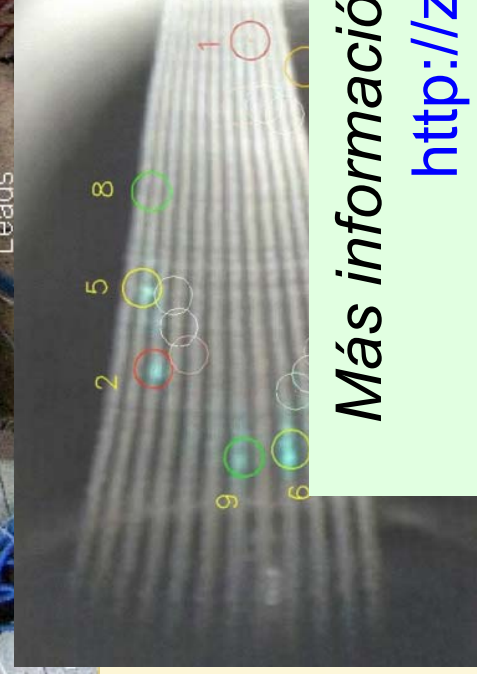
TC
gauges

Power
supplies

Pfeiffer
mech. pump

Leybold
diffusion pump


Vacuum controls



Leads

Más información en [www.fusionvic.org](http://zivis.zaragoza.es)
<http://zivis.zaragoza.es>

**Datos extra
para preguntas
y respuestas**



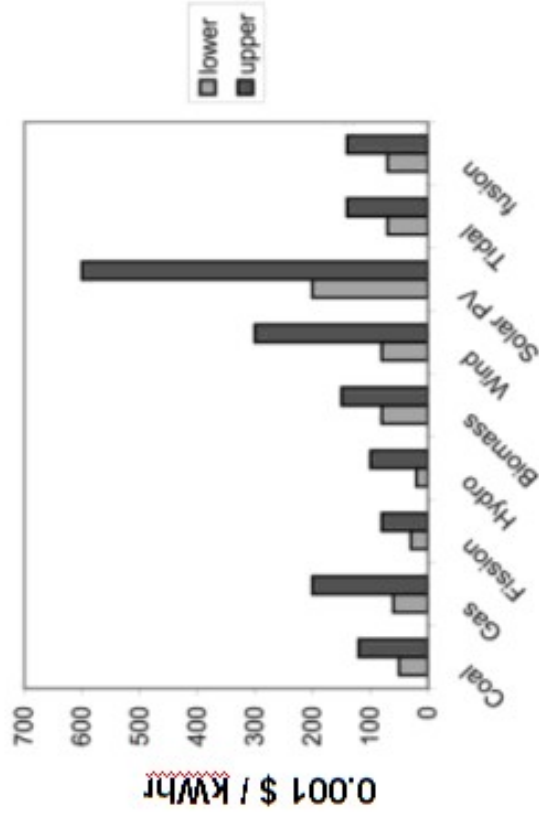
<http://www.manicore.com/> : Muchos datos. Reflexiones lúcidas. Incluye una opinión o enfoque que puede ser discutible.

<http://www.energybulletin.net/27344.html> : Resúmenes y links a artículos sobre diferentes combustibles y energías. Imparcial debido a la variedad de autores

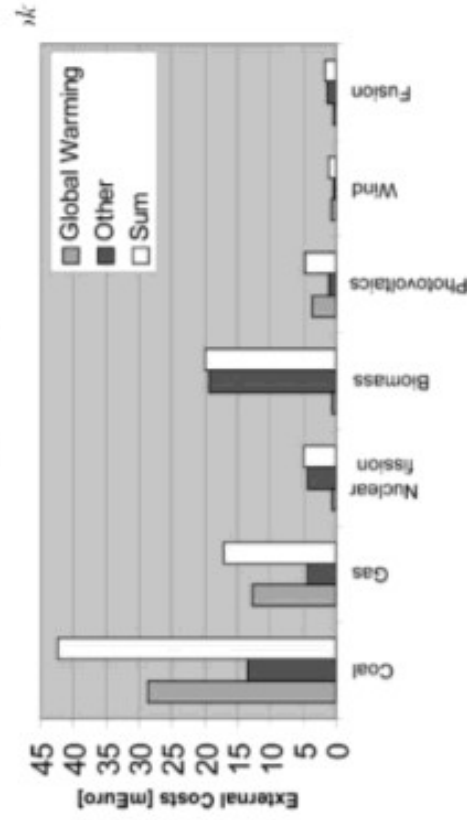
KEY WORLD ENERGY STATISTICS IEA 2006 : Resumen de datos sobre energía

Pathways to 2050 Energy & climate change , World Business Council for Sustainable Development : Incluye gráficos interesantes y un apartado de “Consumer choices” .

NOTA : Ahorro global = Σ disminución de costes para todas las futuras unidades productivas en relación a los costes presentes y futuros previstos (de instalación + mantenimiento + combustible)
Probabilidad de éxito : Aumenta con el paso del tiempo, conviene un alto valor lo mas pronto posible
f : factor dependiente de los recursos totales disponibles para I+D



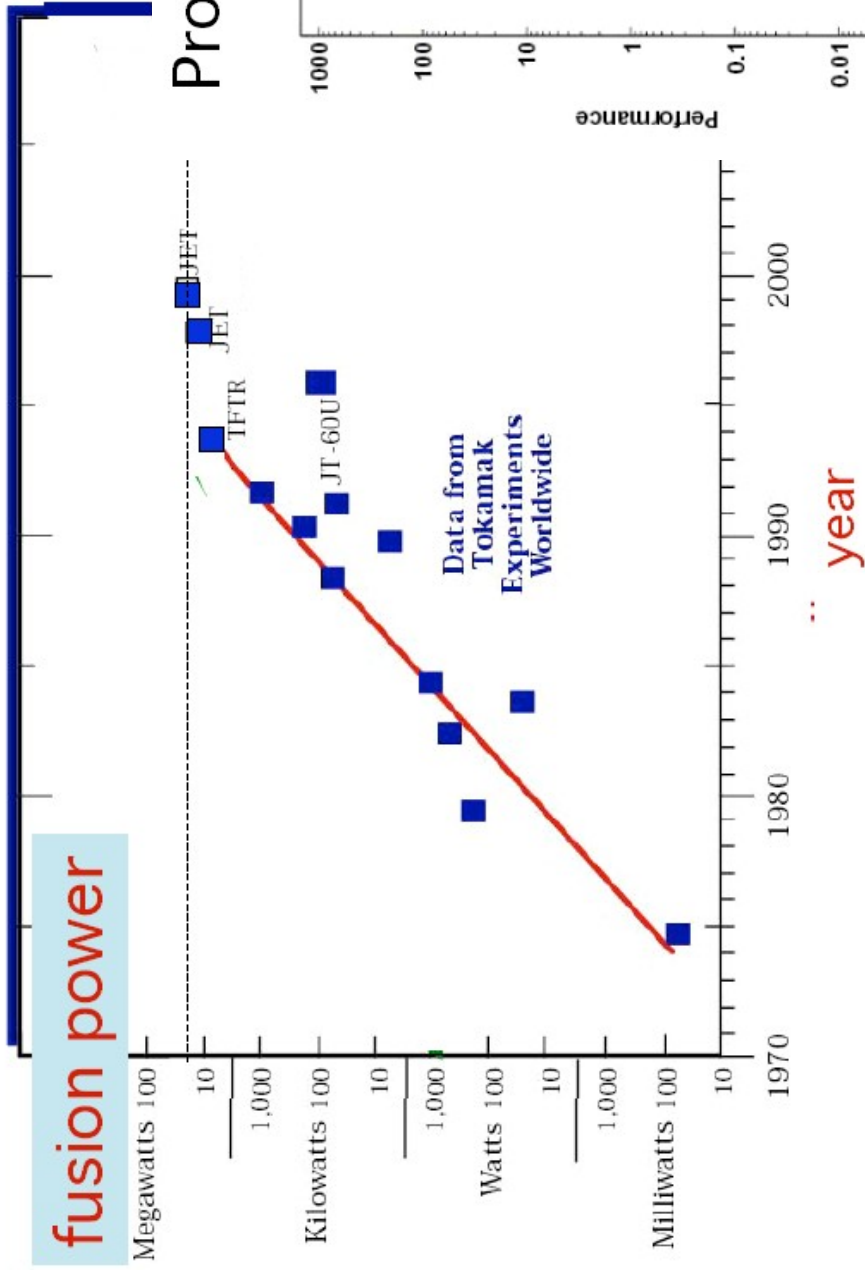
internal costs: costs of constructing, fuelling, operating, and disposing of power stations



external costs: “estimated” impact costs to the environment, public and worker health,

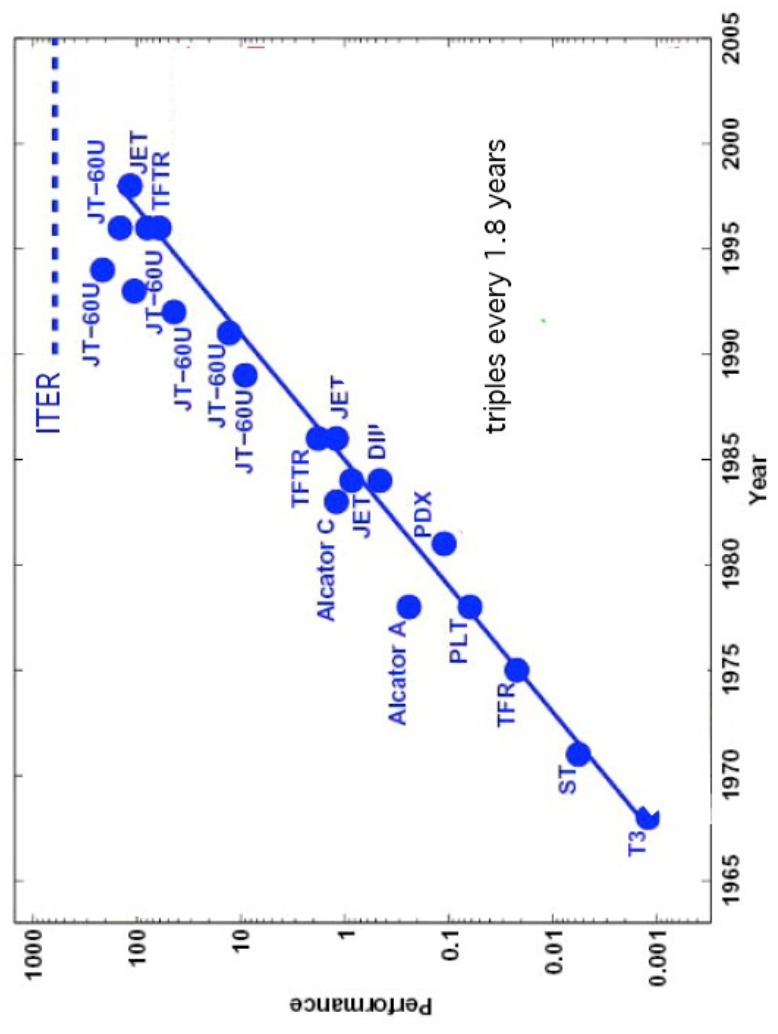
Prospects for fusion electricity, I. Cook et al. Fus. Eng. & Des. 63-34, pp25-33, 2002

Huge advance in plasma parameters

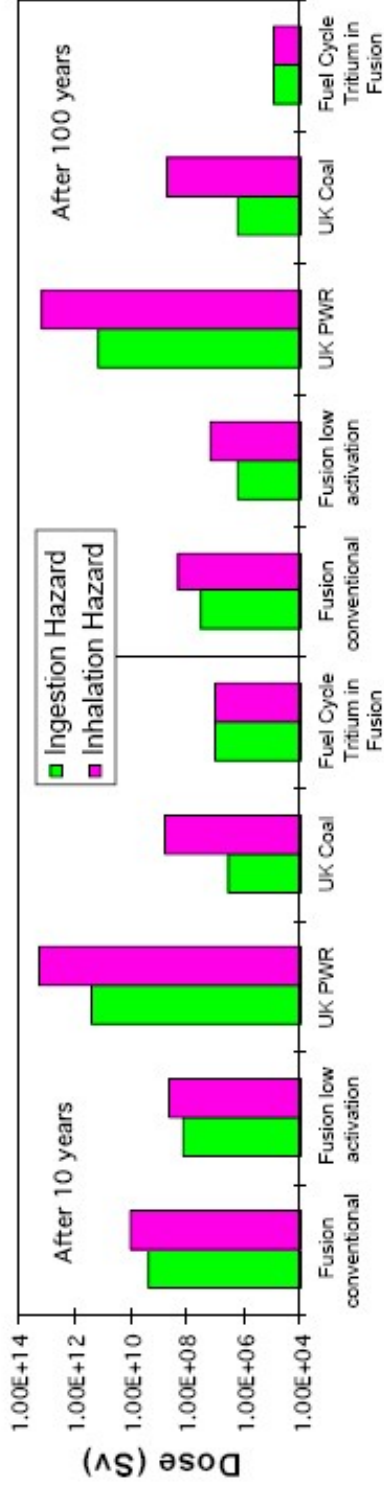


Magnetic Confinement Fusion Science
 Status and Challenges, S. Prager
 University of Wisconsin

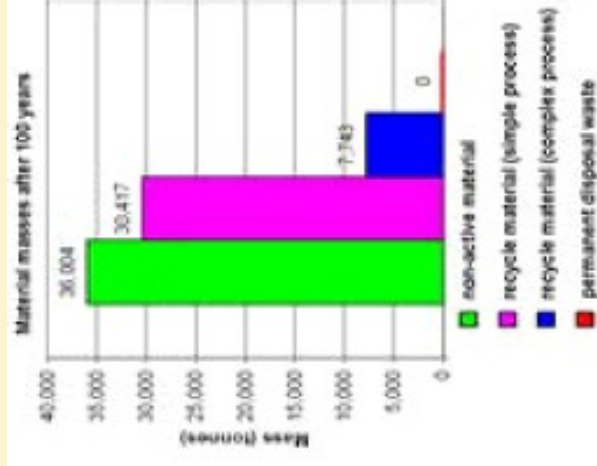
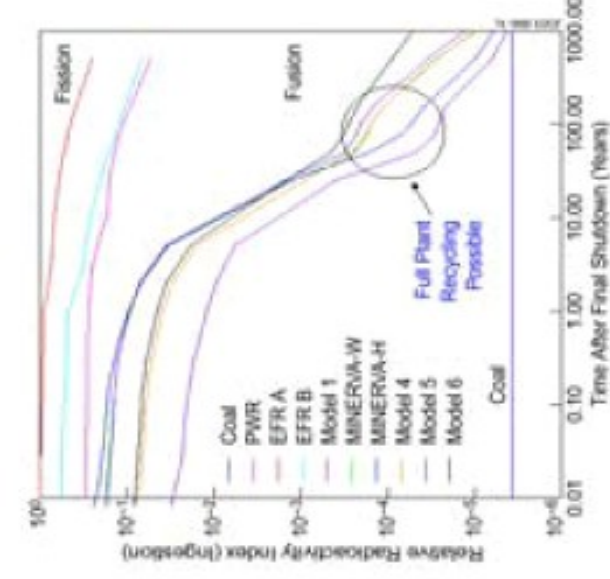
Progress of fusion triple product

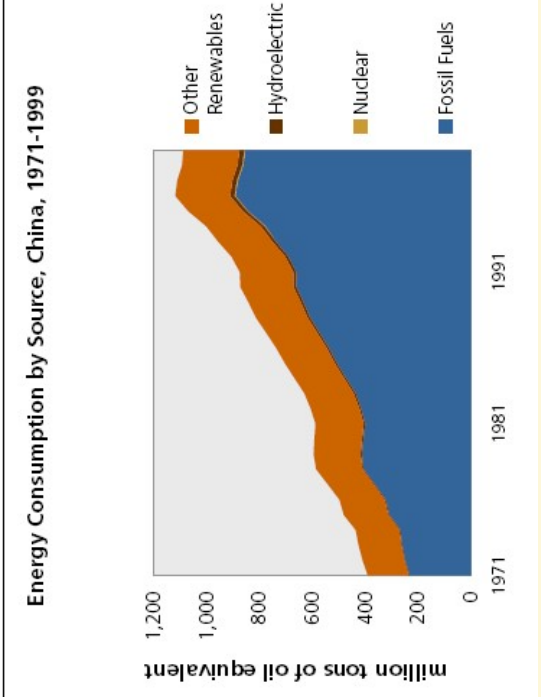
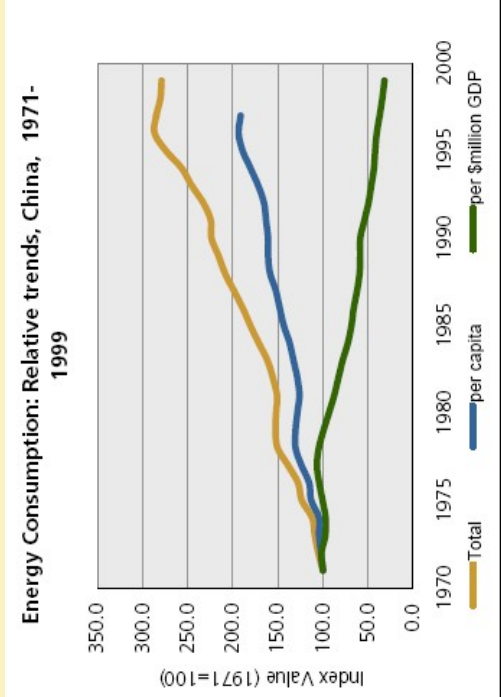
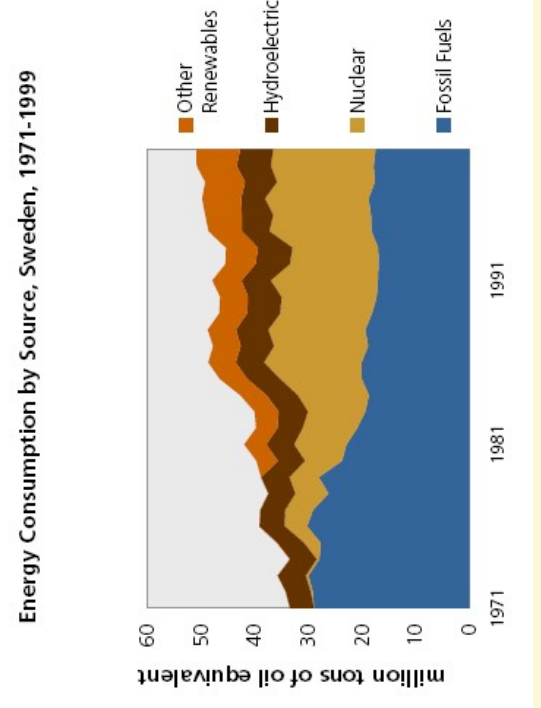
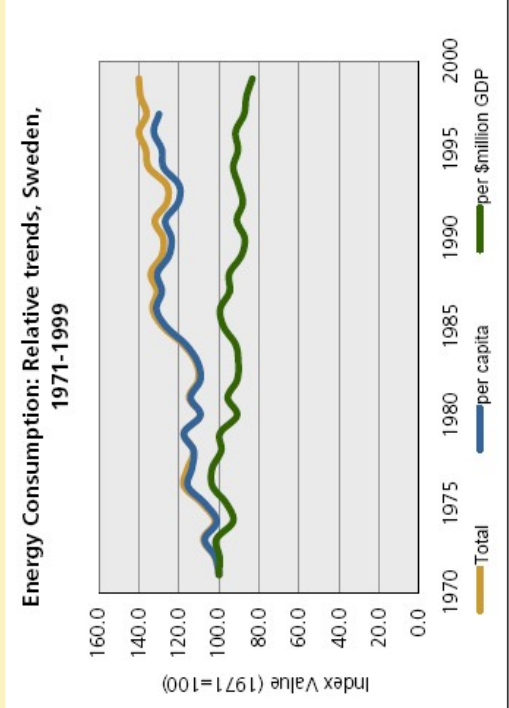
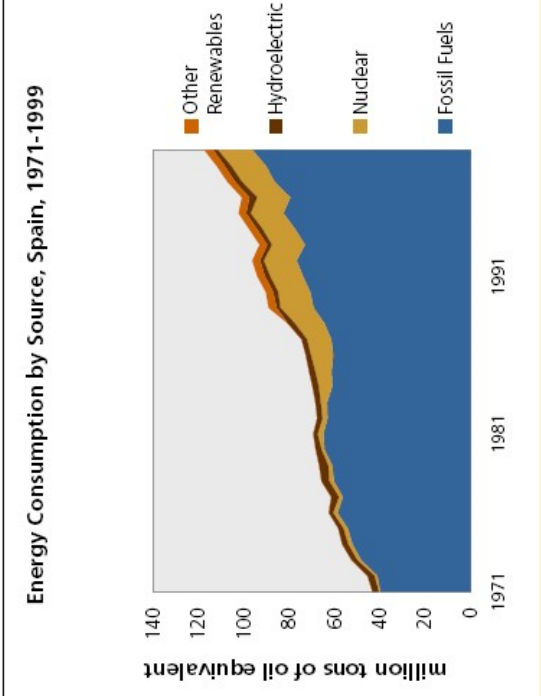
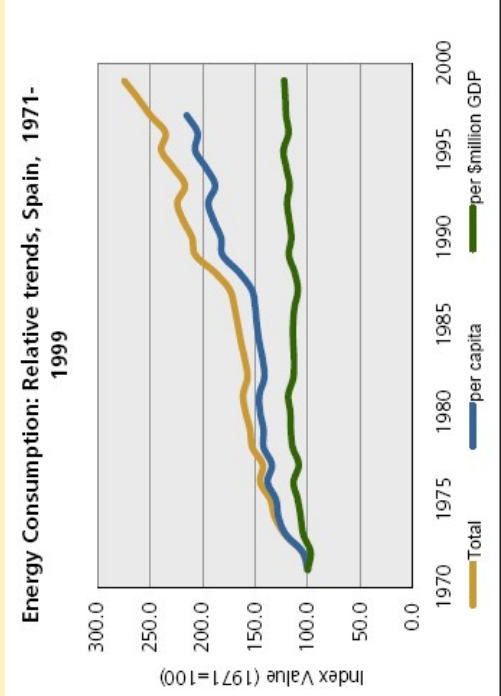


Comparison of Waste Hazards



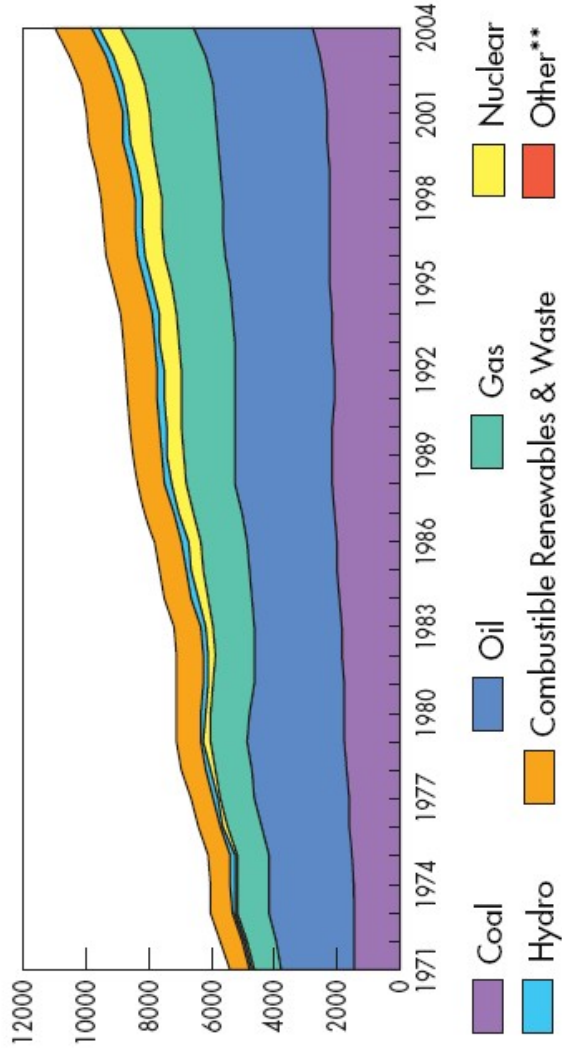
“Fusion Safety, Environment, and Regulatory Issues”, David Petti,
 From “A Study of the Environmental Impact of Fusion” (AERE R 13708, 1990)





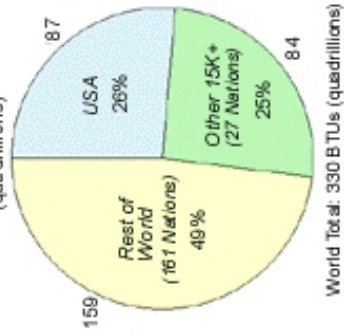
http://earthtrends.wri.org/maps_spatial/index.php?theme=1 World Resources Institute

Evolution from 1971 to 2004 of World Total Primary Energy Supply*
by Fuel (Mtoe)



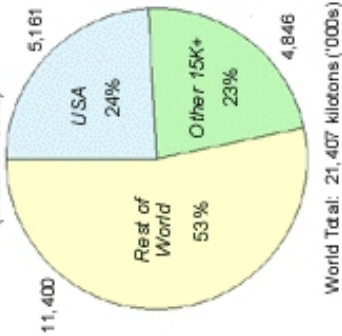
KEY WORLD Energy Statistics IEA 2006

BTU Consumption - 1995
(que trillones)



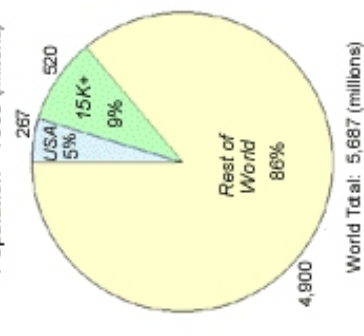
World Total: 330 BTUs (quadrillions)

CO2 Emissions - 1995
(kilotons - '000s)



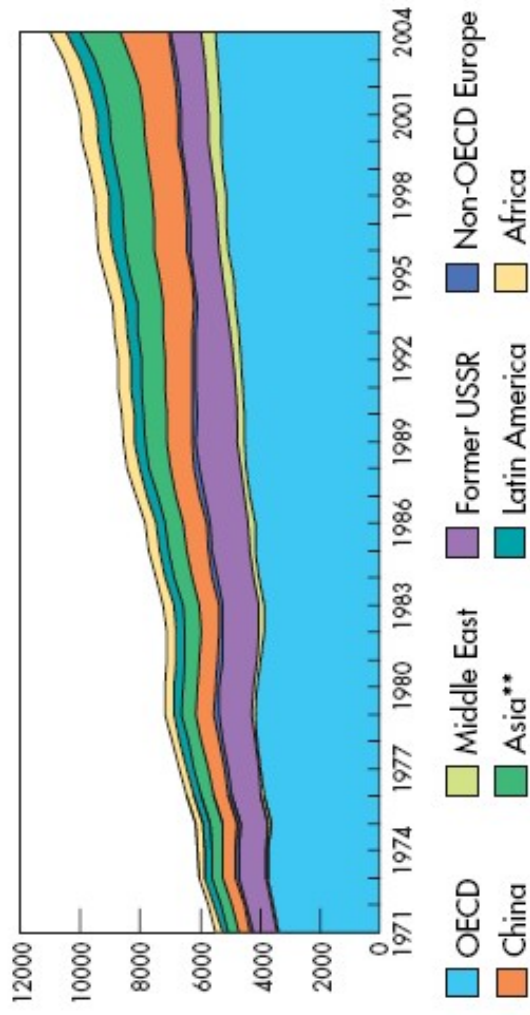
World Total: 21,407 kilotons ('000s)

Population - 1995 (millions)

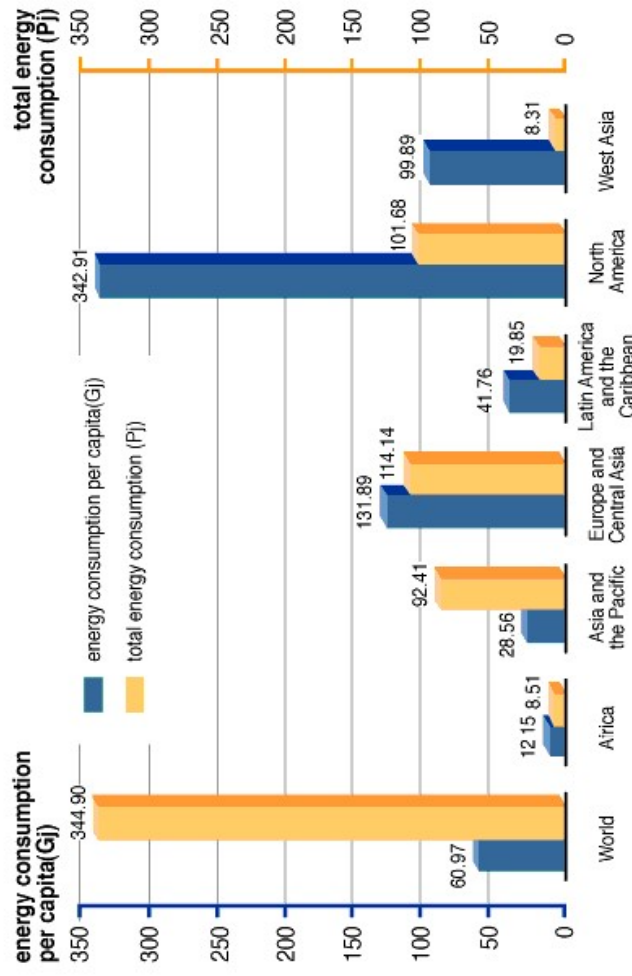


World Total: 5,687 (millions)

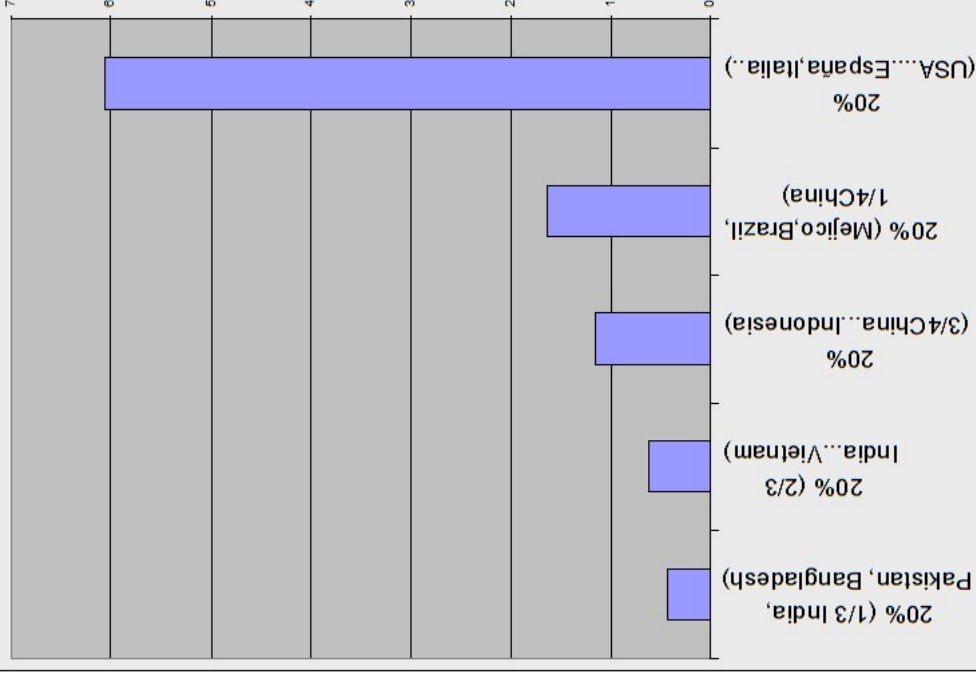
Evolution from 1971 to 2004 of World Total Primary Energy Supply*
by Region (Mtoe)



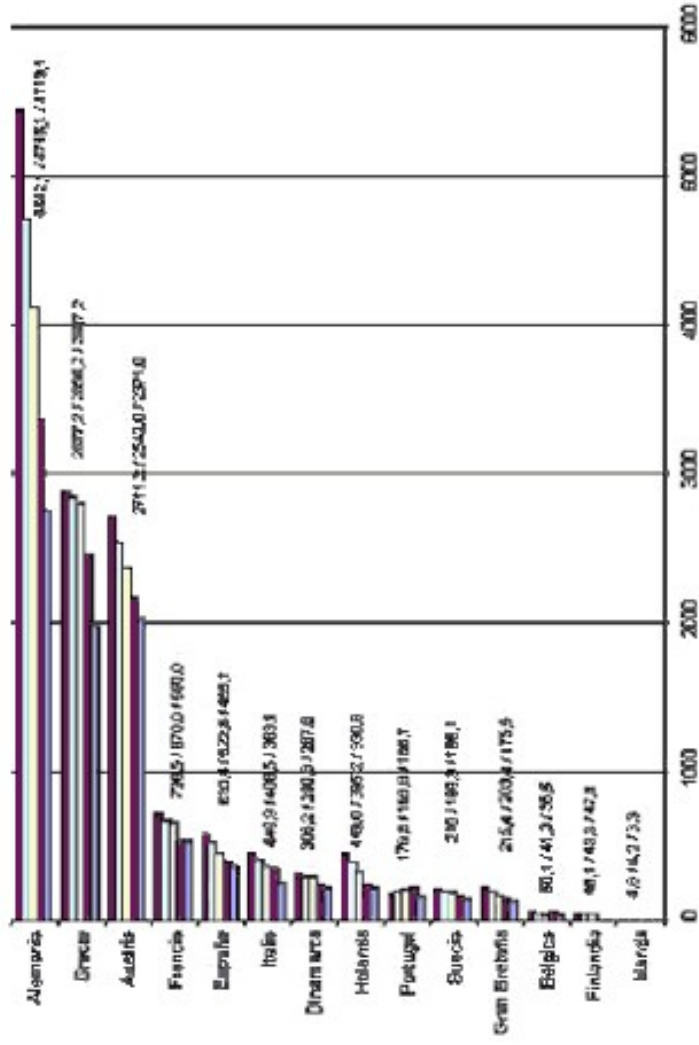
IEA 2006 . Note OECD = 1168M persons



Consumo energía (GToe)
por quintiles de población mundial
(Calculated from World Bank 2005)



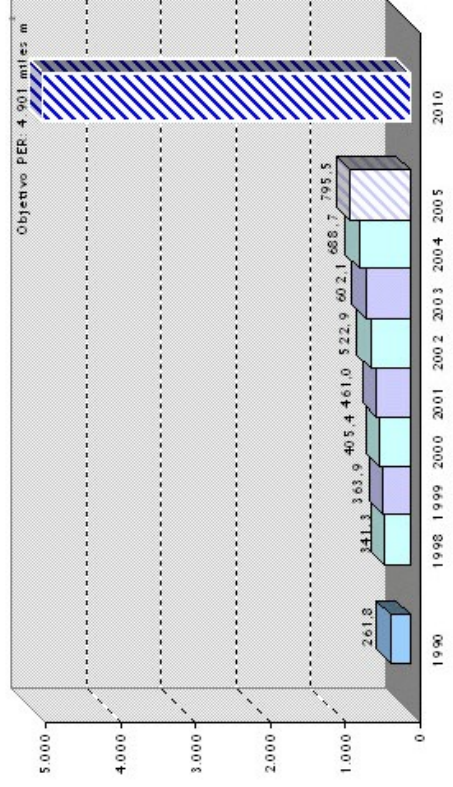
Superficie de captación solar térmica instalada en la UE (miles de m²)



Fuente: EurObserver / Sun in Action II / IDAE

Figura 1. Evolución de la potencia instalada en la UE el periodo 1999-2003

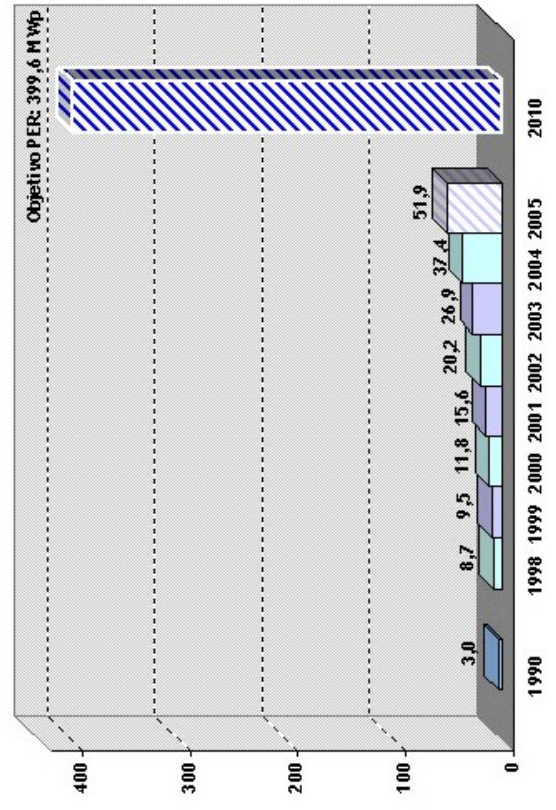
Superficie Instalada de Colectores Solares y Previsiones (miles de m²)



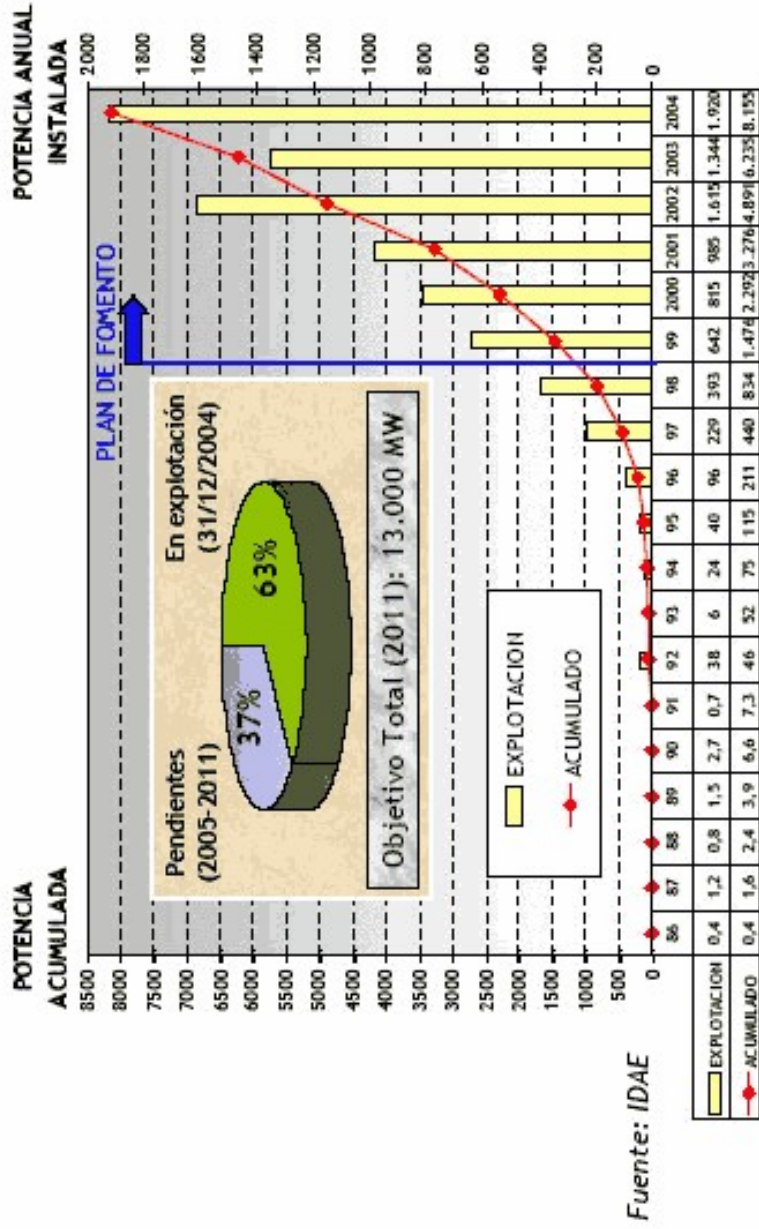
Nota: Si se añade la superficie solar instalada en proyectos bioclimáticos e instalaciones mixtas, la capacidad de captación solar se eleva a 797,42U m²

Fuente: IDAE. Datos Provisionales

Potencia Solar Fotovoltaica y Previsiones (MWP)



Fuente: IDAE. Datos Provisionales



Sector Eólico -Figura 4. Evolución de la potencia eólica instalada en España, y situación del cumplimiento del objetivo previsto en la Planificación Sectorial de Electricidad al 2011.

Figure 4. Renewable Power Capacities for Developing Countries, EU, and Top 6 Individual Countries, 2005

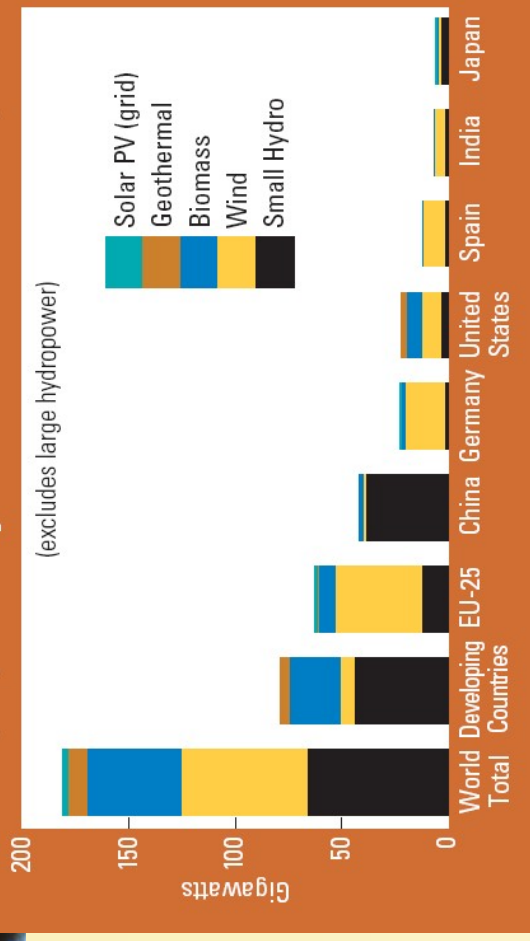


Figure 2. Wind Power Capacity, Top 10 Countries, 2005

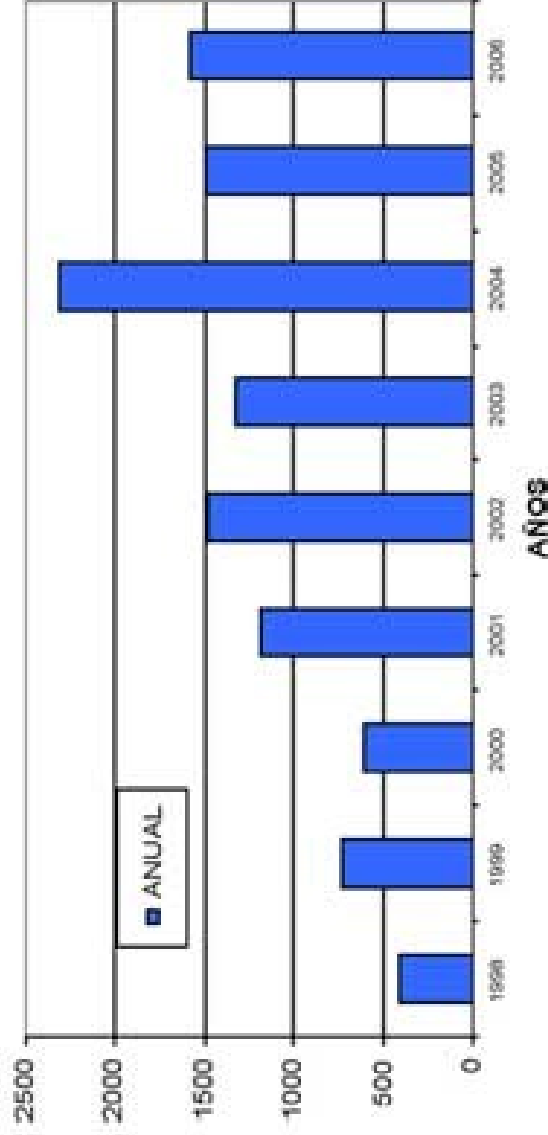


Renewable Energy Policy Network for the 21st Century

España 2005 Consumo eléctrico = 253 TWh , Produccion 2006 =22TWh

Country	Installed power in MW		production in 2002 (Twh)	hours of full power equivalent
	2001	2002		
Germany	8 754	12 001	19,4	1 869
Spain	3 337	4 830	7,66	1 875
Denmark	2 417	2 889	5,92	2 231
Italy	697	785	1,47	1 983
Netherlands	493	688	1,2	2 032
United Kingdom	474	552	1,48	2 884

**INCREMENTO ANUAL DE LA POTENCIA EÓLICA
INSTALADA EN ESPAÑA**



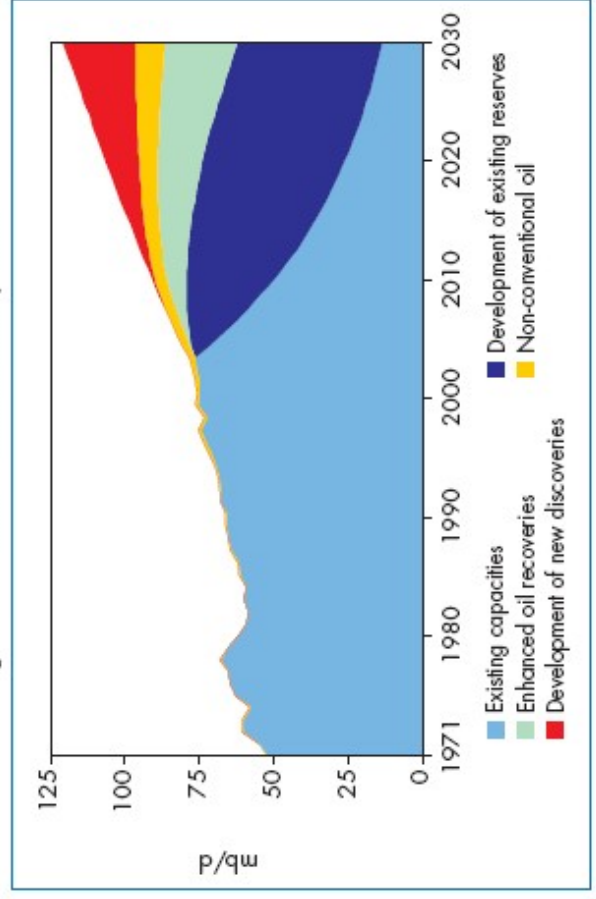
www.energias-renovables.com

Table 2. The dynamics of the development of wind energetics in the world based on the study Wind Force 12

Year	Average annual growth rate [%]	Annual new capacity [MW]	Cumulative new capacity [MW]	Annual wind electricity production [TWh]	Projected world electricity demand [TWh]	Wind power penetration of world electricity [%]
2002	25	7 227	32 037	64.5	16 233	0.40
2003	25	9 034	41 071	86.3	16 666	0.52
2004	25	11 292	52 363	110.1	17 110	0.64
2005	25	14 115	66 478	139.8	17 567	0.80
2006	25	17 644	84 122	184.2	18 035	1.02
2007	25	22 055	106 177	232.5	18 156	1.26
2008	25	27 569	133 746	292.9	19 010	1.54
2009	20	33 083	166 829	365.4	19 517	1.87
2010	20	39 699	206 528	452.3	20 037	2.26
2011	20	47 639	254 167	556.6	20 532	2.71
2012	20	57 167	311 333	763.6	21 040	3.63
2013	20	68 600	379 933	931.9	21 560	4.32
2014	20	82 320	462 253	1133.8	22 093	5.13
2015	15	94 668	556 922	1366.0	22 639	6.03
2016	15	108 868	665 790	1633.0	23 198	7.04
2017	15	125 199	790 988	1940.1	23 771	8.16
2018	10	137 718	928 707	2277.9	24 359	9.35
2019	10	151 490	1 080 197	2649.5	24 961	10.61
2020	0	151 490	1 231 687	3021.1	25 578	11.81
2030	0	151 490	2 592 424	6358.7	31 524	20.17
2040	0	151 490	3 082 167	8099.9	36 585	22.14

WIND FORCE 12 study, Global wind energy council- Greenpeace

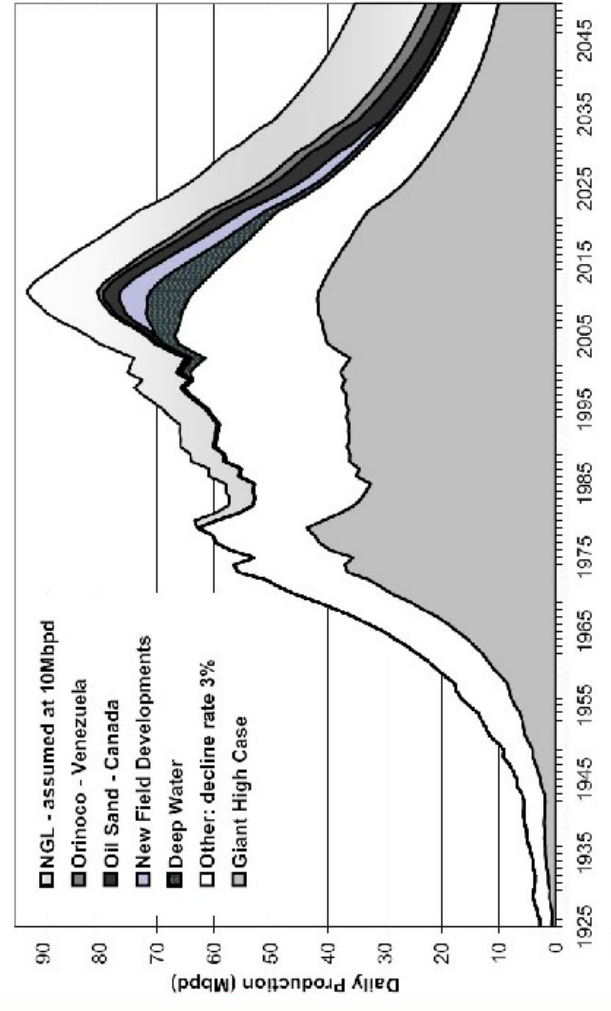
Figure 3.20: World Oil Production by Source



Falta referencia

Uppsala Hydrocarbon Depletion Study Group, UHDSG: www.tsl.uu.se/uhdsg

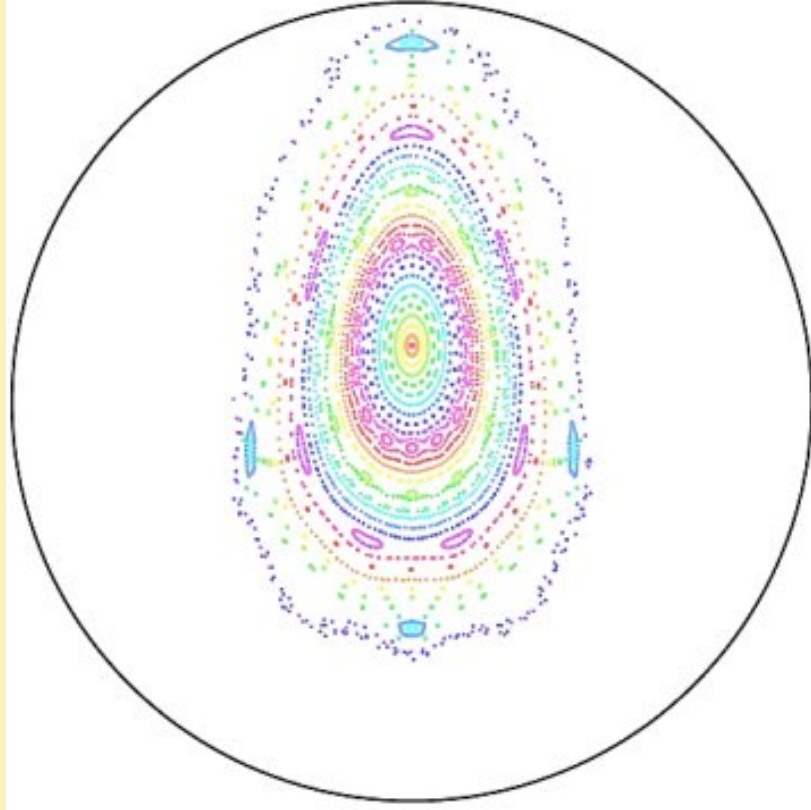
Figures from the thesis



Uppsala Univ.

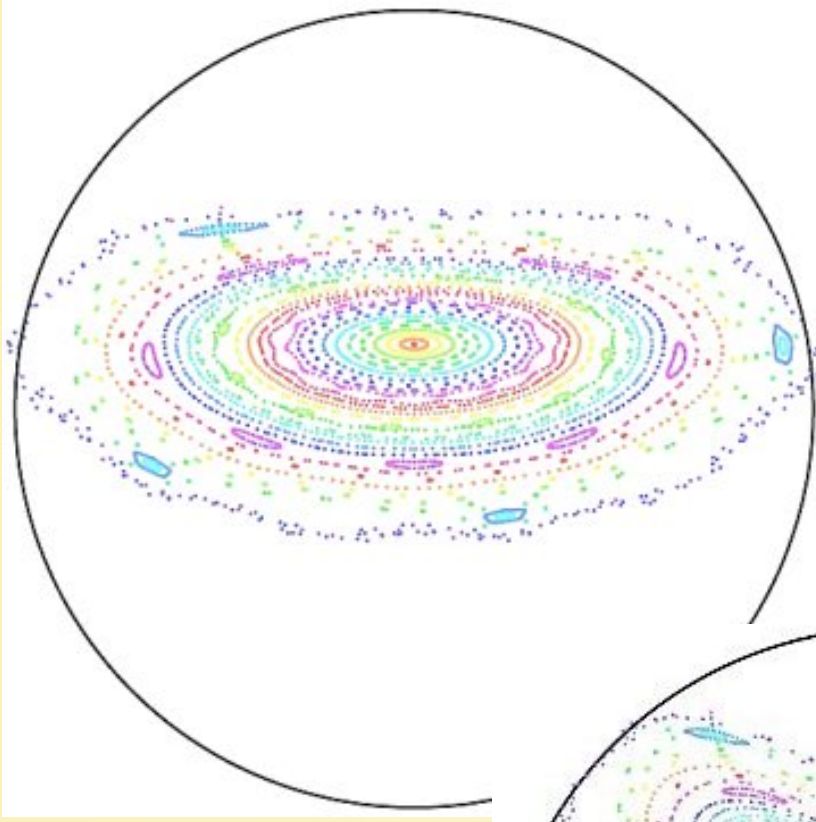


Parte de presentación CIEMAT



$\phi=0^\circ$

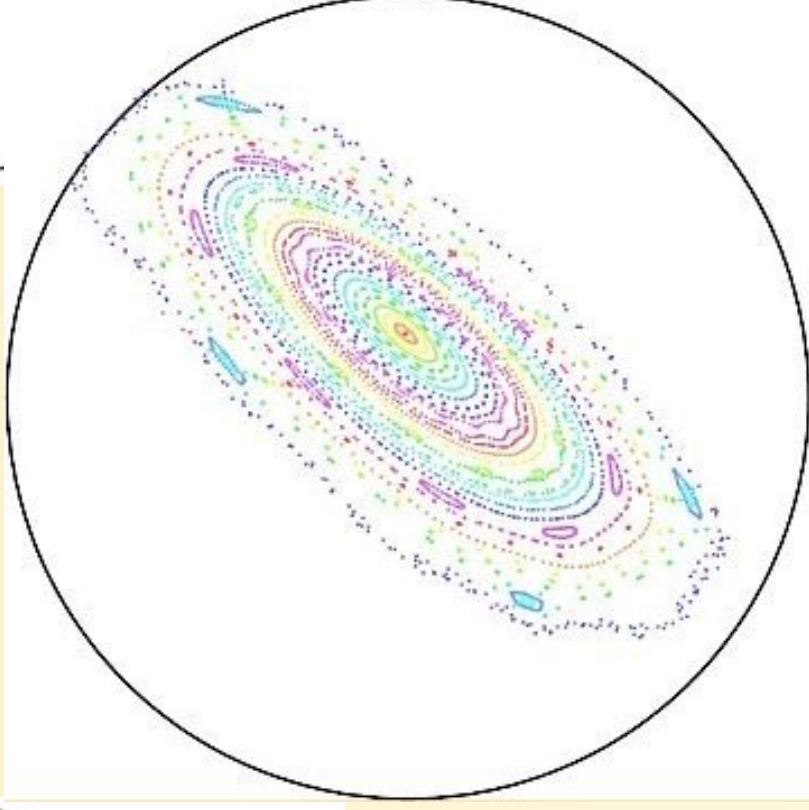
Superficies magnéticas en vacío.
Poincaré plots.
Simulación sin drifts.
SimPIMF code v2.3 es utilizado

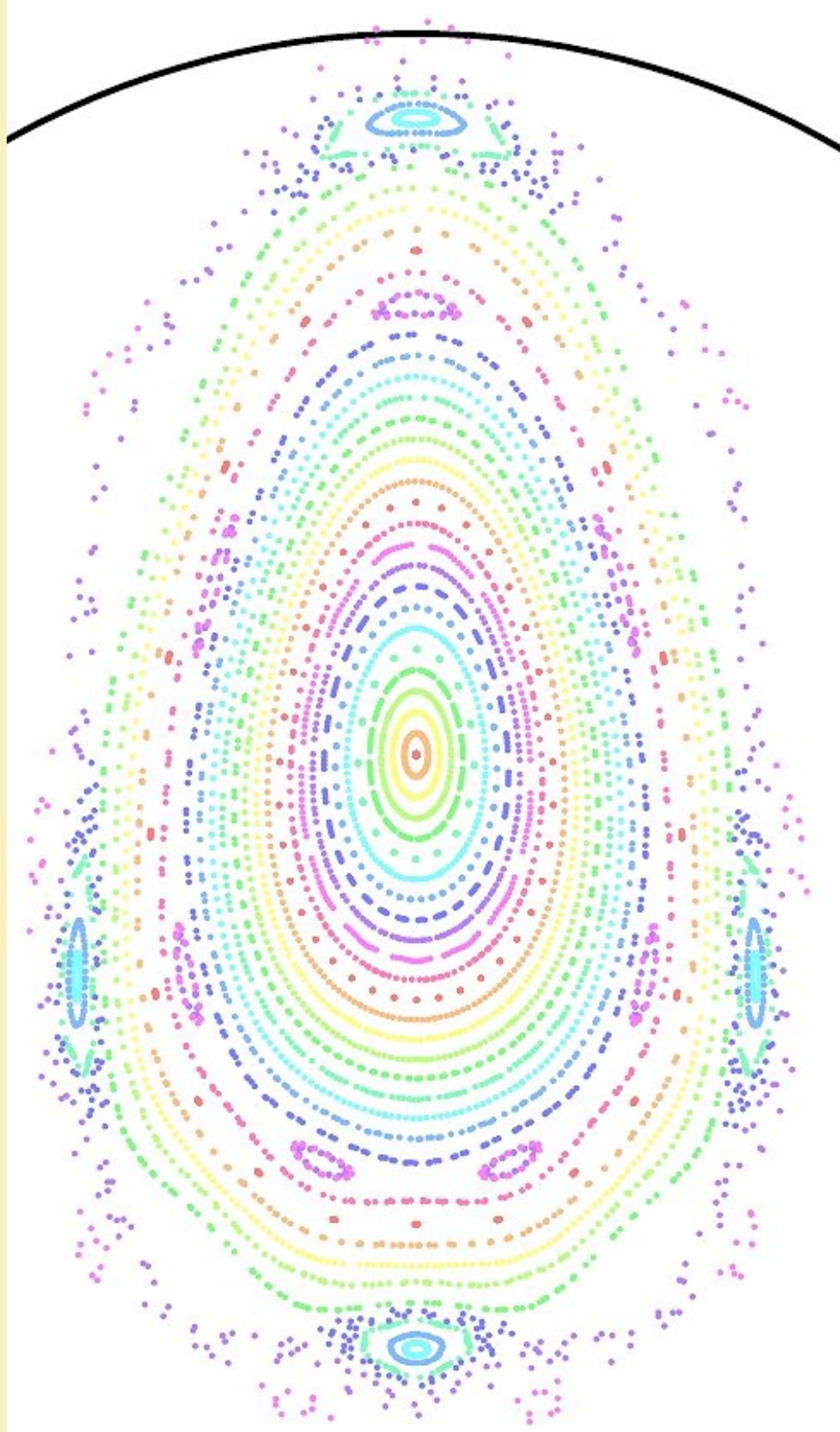


$\phi=90^\circ$

Nota : Circunferencia negra es la cara interna de la cámara de vacío.

$\phi=45^\circ$





$\phi=0^\circ$

Optimización : Evitar islas amplias estableciendo el perfil de lota debajo de 1/3 . La mayoría del plasma posee lota desde 0.32 a 0.27

Racionales:

- Racionales bajos son evitados, salvo :
 - $2/7 = 0.2857 \dots$ en magenta, es el de menor orden pero no excesivo.
 - Azul : $1/4$ racional, fuera de la LCFS
 - Región estocástica exterior

Simulación utilizando 'Grid' preciso $1/400m = 2.5mm$ de lado.

Características generales :

- Desarrollado en **JAVA**
- 15 módulos y 8250 líneas de código
- Desarrollado desde cero durante **1.5 años** de acuerdo a necesidades y conocimientos
- **Las salidas son ficheros** que pueden ser fácilmente transferidos o representados
- **Orientado a objetos**, fácilmente expansible y muy adecuado para estas simulaciones

Funciones y métodos:

- a) B en 3D . (Fuerzas en 3D, no en JAVA).
- b) Simulación de órbitas con y sin drifts, Larmor, campo E (lento).
 - Salidas: perfil de lota y de Pozo Magnético, Ripple y media de Ripple, Tamaño de Plasma, $\delta |B|_{min}$, % de partículas atrapadas, Min. distancia entre bobinas, 3D polígono de eje mag. , y superficies magnéticas.
- c) Generación paramétrica de bobinas 3D : Modular 'circular', HF ,TF y PF .
- d) Simulación de colisiones : Solo primeros resultados. Poco contrastado.

Validación y tests

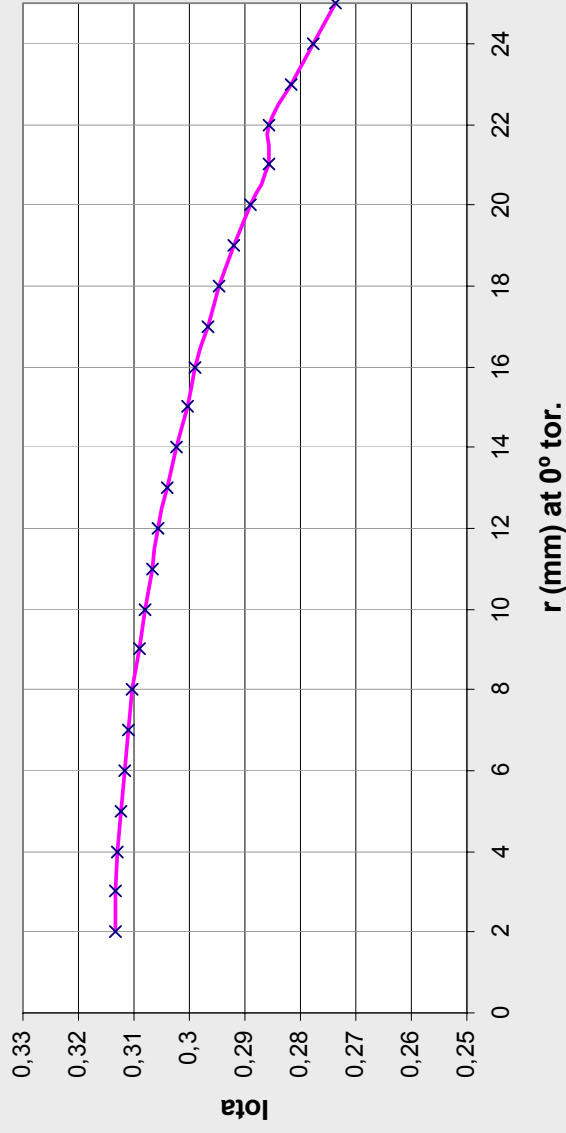
- a) Probado por recalcu de campo B y fuerzas en EAST y en bobinas en CTH.
- b) Mapeado en UST_1 (concordancia, pero todavía débil test). Ancho de bananas.
 - Cada salida necesita una comparación más a fondo con otros códigos y experimentos.

Orden	lota_1	Ripple_1	%T Bmin_Desvia	Average Rip	PlasmaSiz	lota_2	Specif	Specif	MinDistanc	Fr Pitch	On Pitch2	Pitch3	Pitch4	H Positi	up/dw/on	well				
5	0,32121037	0,21300687	0	0,00374385	0,11439581	0,05125	0,33552672	9,98	10	0,009852	0	1,4	1,25	1,6	0,65	1	0,13	1,045	0,005	
73	0,32177544	0,19787124	0	0,00318734	0,11406053	0,05	0,33412121	9,75	9,82	0,007882	0	1,5	1,35	1,55	0,6	1	0,13	1,038	0,007	
65	0,32024554	0,20227083	0	0,00373036	0,10963253	0,05125	0,33327691	9,59	9,7	0,008333	0	1,5	1,3	1,55	0,65	1	0,13	1,041	0,011	
66	0,31997029	0,21509815	0	0,00312266	0,11926719	0,05125	0,33323999	9,88	9,96	0,008333	0	1,5	1,3	1,6	0,55	1	0,13	1,041	0,008	
58	0,31962951	0,21167492	0	0,00411215	0,11538991	0,05125	0,33303551	9,76	9,81	0,008784	0	1,5	1,25	1,6	0,6	1	0,13	1,042	0,006	
100	0,32221723	0,20706325	0	0,00441405	0,11215376	0,055	0,33275596	9,55	9,68	0,007348	0	1,55	1,35	1,55	0,6	1	0,13	1,033	0,013	
21	0,31750303	0,22302173	0	0,00378824	0,12245854	0,05	0,33218611	10,2	10,3	0,00895	0	1,4	1,35	1,6	0,55	1	0,13	1,046	0,002	
38	0,31735654	0,21121886	0	0,00379767	0,11032161	0,0525	0,33182238	9,74	9,83	0,008867	0	1,45	1,3	1,55	0,65	1	0,13	1,046	0,009	THIS
46	0,31811712	0,20618378	0	0,00347575	0,11421107	0,0525	0,33172369	9,91	9,94	0,008416	0	1,45	1,35	1,55	0,6	1	0,13	1,043	0,004	
31	0,31552703	0,22044592	0	0,0037769	0,1160773	0,05125	0,33076228	9,89	9,98	0,009318	0	1,45	1,25	1,6	0,6	1	0,13	1,048	0,009	
39	0,31629678	0,22423351	0	0,00345106	0,12014642	0,0525	0,33013713	10	10,1	0,008867	0	1,45	1,3	1,6	0,55	1	0,13	1,044	0,006	
84	0,31663715	0,2027263	0	0,00370281	0,11769417	0,055	0,32961367	9,7	9,78	0,008056	0	1,55	1,25	1,6	0,55	1	0,13	1,041	0,009	
91	0,31780244	0,19299761	0	0,00414231	0,11246796	0,05375	0,32909387	9,54	9,63	0,00778	0	1,55	1,3	1,55	0,6	1	0,13	1,036	0,009	
99	0,31631804	0,20671245	0	0,00468787	0,11574988	0,055	0,32851403	9,66	9,76	0,007348	0	1,55	1,35	1,55	0,55	1	0,13	1,039	0,011	
83	0,3154783	0,19315352	0	0,00436111	0,10875171	0,0525	0,32830247	9,39	9,51	0,008056	0	1,55	1,25	1,55	0,65	1	0,13	1,041	0,013	
11	0,31369671	0,21665571	0	0,00410095	0,11192947	0,05125	0,32827982	9,9	9,98	0,009401	0	1,4	1,3	1,55	0,65	1	0,13	1,046	0,007	
4	0,31422598	0,2092244	0	0,0035935	0,11873827	0,05125	0,32806725	10	10,1	0,009852	0	1,4	1,25	1,6	0,6	1	0,13	1,044	0,006	
19	0,31346058	0,21258333	0	0,00432119	0,11584367	0,05	0,32744505	10,1	10,1	0,00895	0	1,4	1,35	1,55	0,6	1	0,13	1,045	0,003	
Cut																				
90	0,30859755	0,21014439	0	0,00433755	0,11578788	0,055	0,32115361	9,61	9,69	0,00778	0	1,55	1,3	1,55	0,55	1	0,13	1,041	0,009	
63	0,31314478	0,20095219	0	0,00297516	0,1167087	0,05625	0,32018027	9,75	9,83	0,008333	0	1,5	1,3	1,55	0,55	1	0,13	1,022	0,008	
18	0,30694923	0,2152499	0	0,00340183	0,12000274	0,0525	0,32006331	10,1	10,2	0,00895	0	1,4	1,35	1,55	0,55	1	0,13	1,043	0,007	
55	0,30714644	0,20132164	0	0,00371561	0,1123814	0,05375	0,31927263	9,61	9,72	0,008784	0	1,5	1,25	1,55	0,6	1	0,13	1,039	0,012	

Tabla resultado del último bucle con intervalos finos de optimización para UST_1

- La opción denotada con 'THIS' es la selección final para UST_1.
- Optimización de lota, perfil de lota, Tamaño de Plasma, B|min, Pozo Magnético, Ripple promedio, min. distancia entre bobinas.
- Sólo 4 parámetros de forma y 7 variables a optimizar, por tanto decisión no fácil.
- Más simulaciones son necesarias para obtener un diseño mejorado.

lota profile in UST_1, vacuum



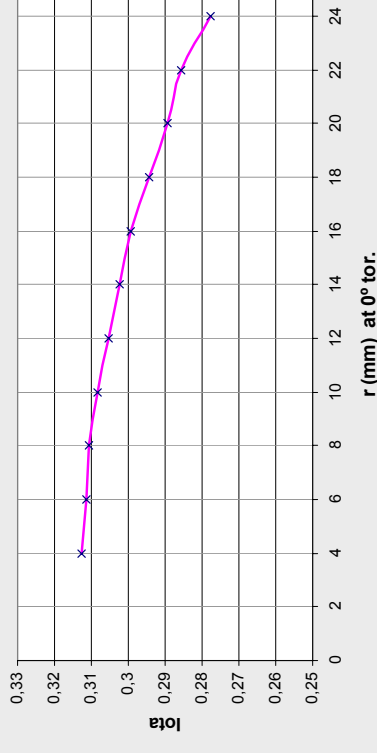
A) Perfil de lota : (Simulación precisa)

- **Shear bajo** pero no suficiente.
- **lota decreciente.** No adecuado, pero SimPIMF fue incapaz de obtener perfiles crecientes. ~ MHH2
- Sin embargo algunos perfiles más aplanados fueron encontrados.

El cálculo preciso de lotas + Pozo Magnético costó 1960 s pero el rápido 90 s

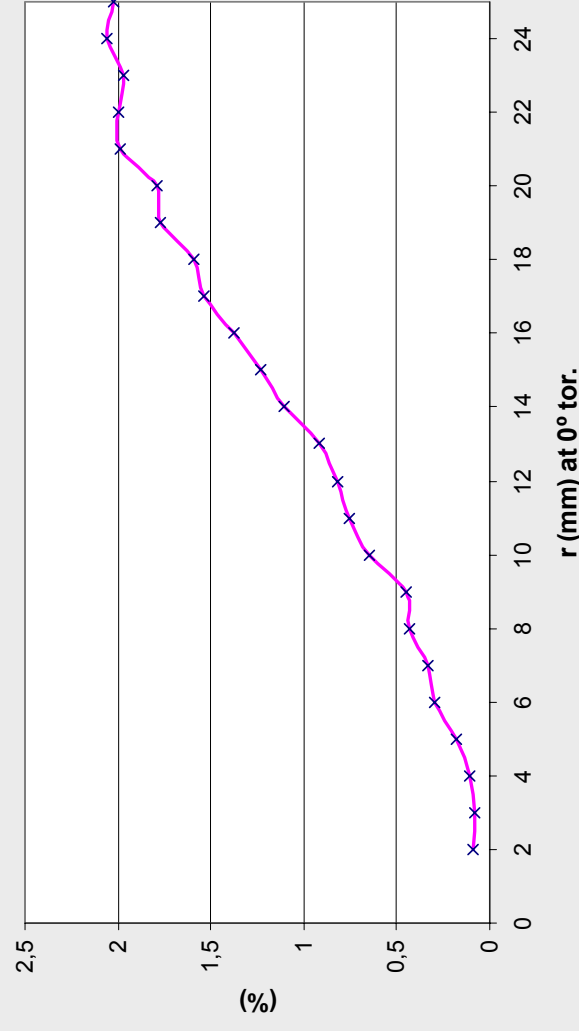
Notable pozo magnético , 2% en borde

lota profile in UST_1, vacuum



B) lota : Cálculo rápido, 90 s . Similar a A)

Magnetic Well Depth profile



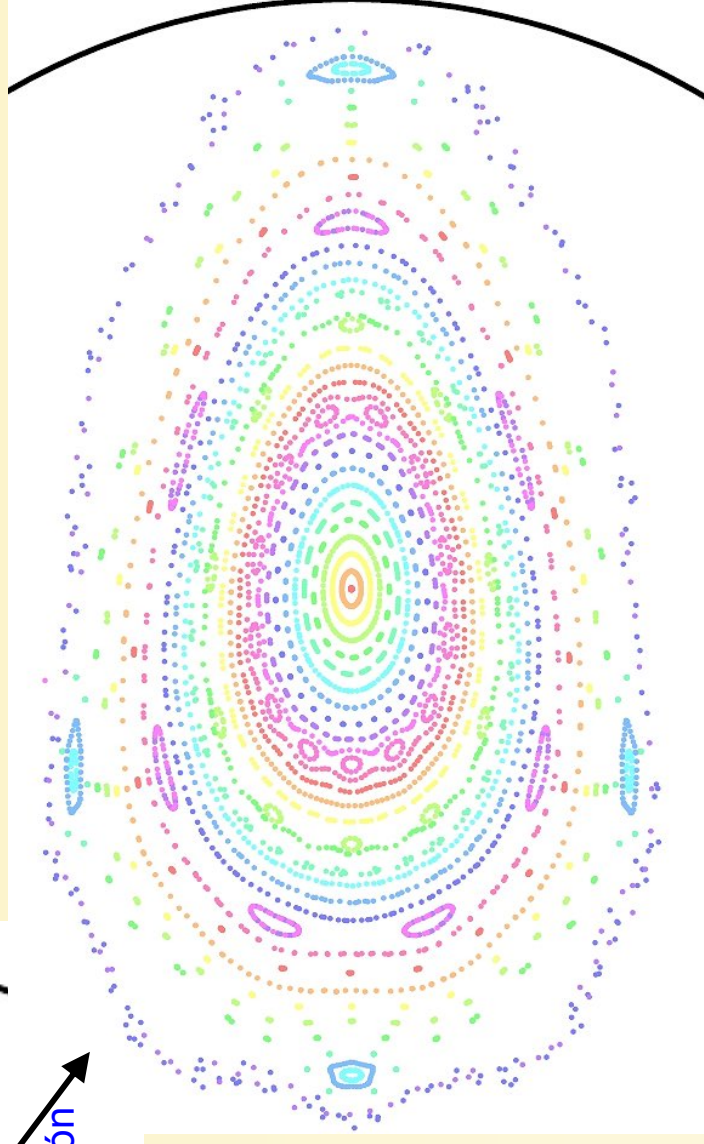


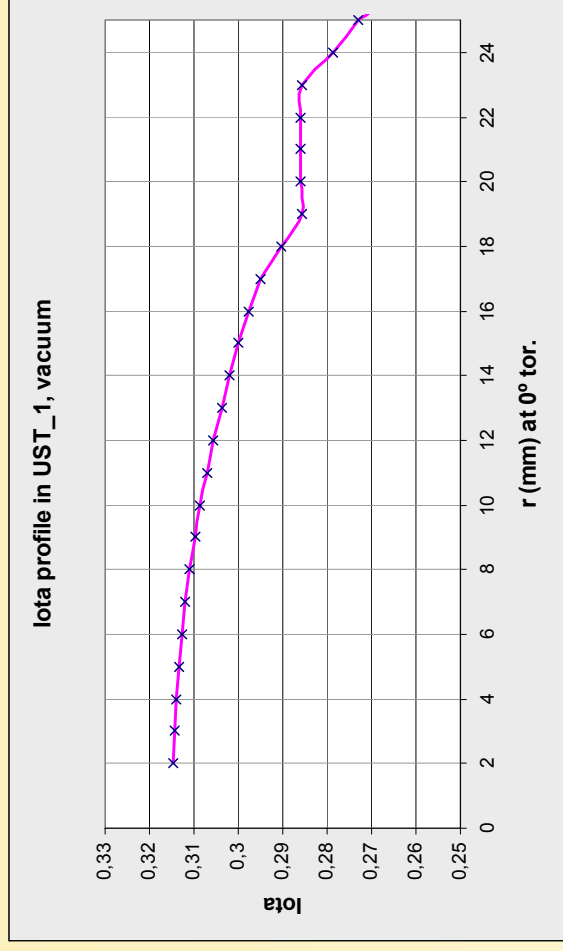
Optimización

Parámetros de forma 1.25 1.25 1.25 1.25 1.25
lota en el centro similar a UST_1

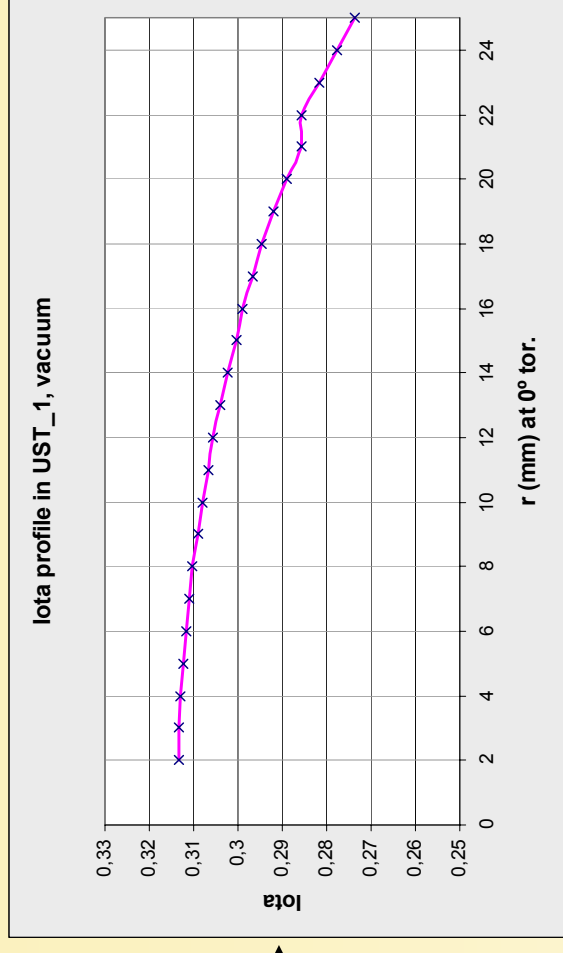
UST_1, parámetros de forma
1.45 1.3 1.55 0.65

- Mayor plasma.
- Región estocástica estrecha.

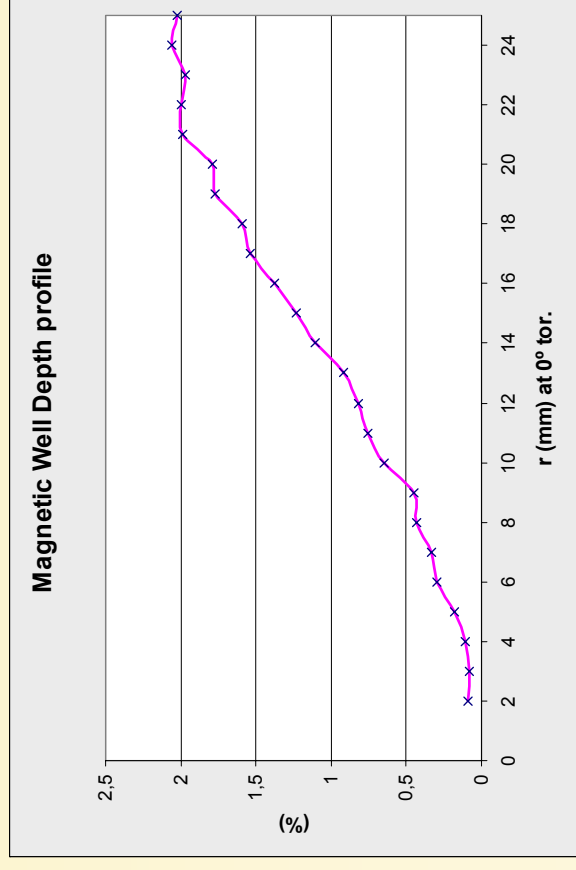
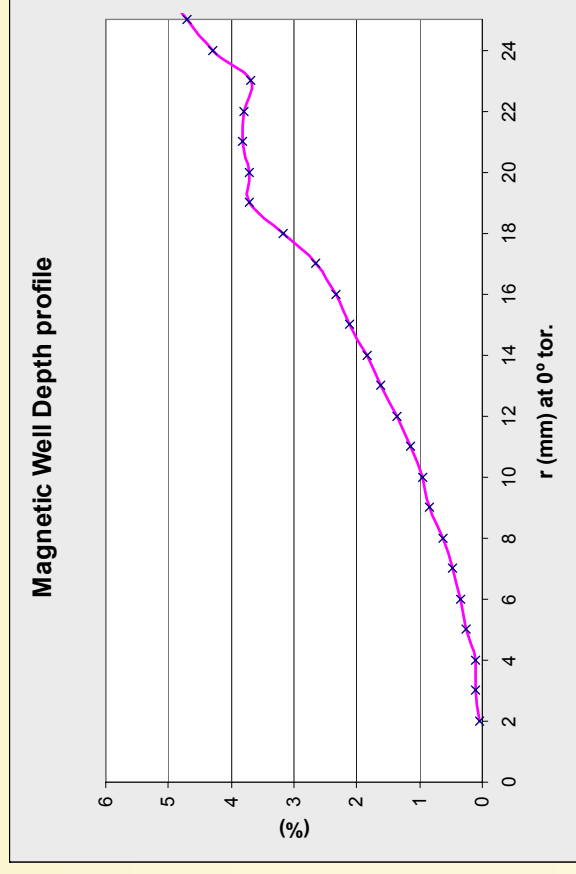


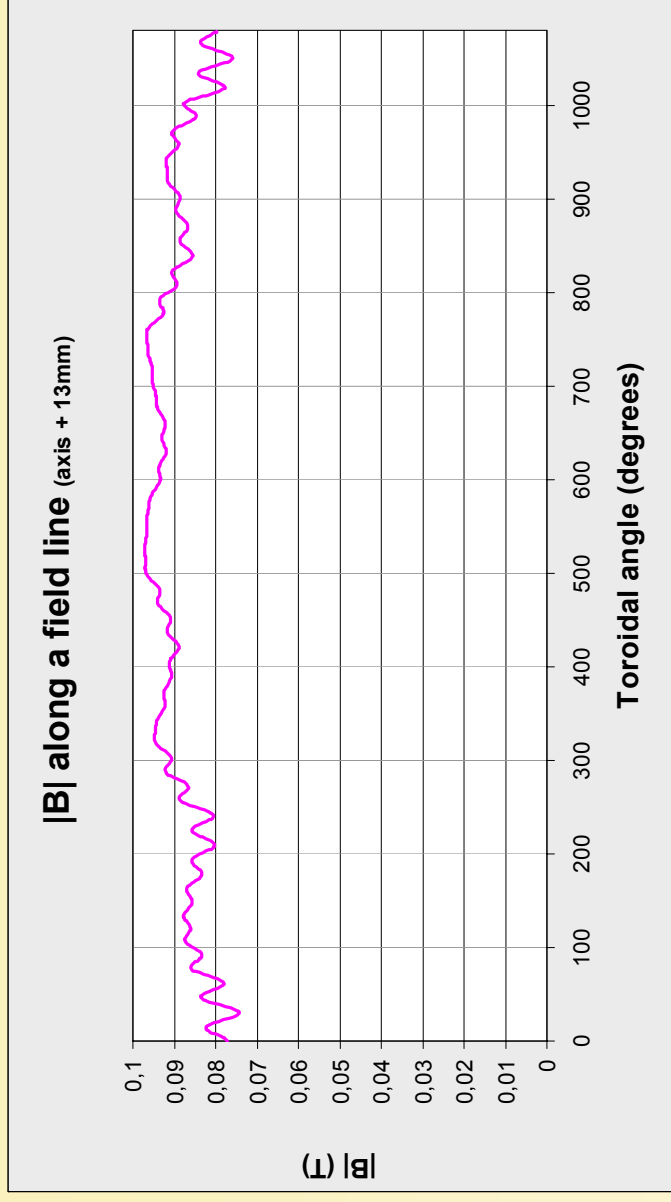


Configuración 'Natural' : 1.25 1.25 1.25 1.25



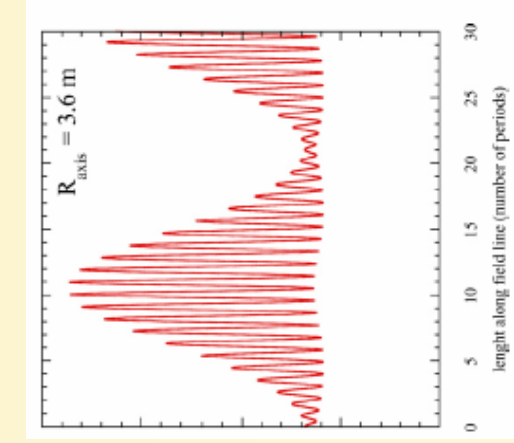
Config. UST_1 : 1.45 1.3 1.55 0.65





	4x1.25	UST_1
σ Bmin	0.0061	0.0038
Tamaño Plasma	0.42 L	1.1 L
Min. dist. bobinas	6.82 mm	8.9 mm
Ripple promedio	0.08	0.11

No todas las variables son las mejores, por ejemplo el Pozo Magnético se reduce

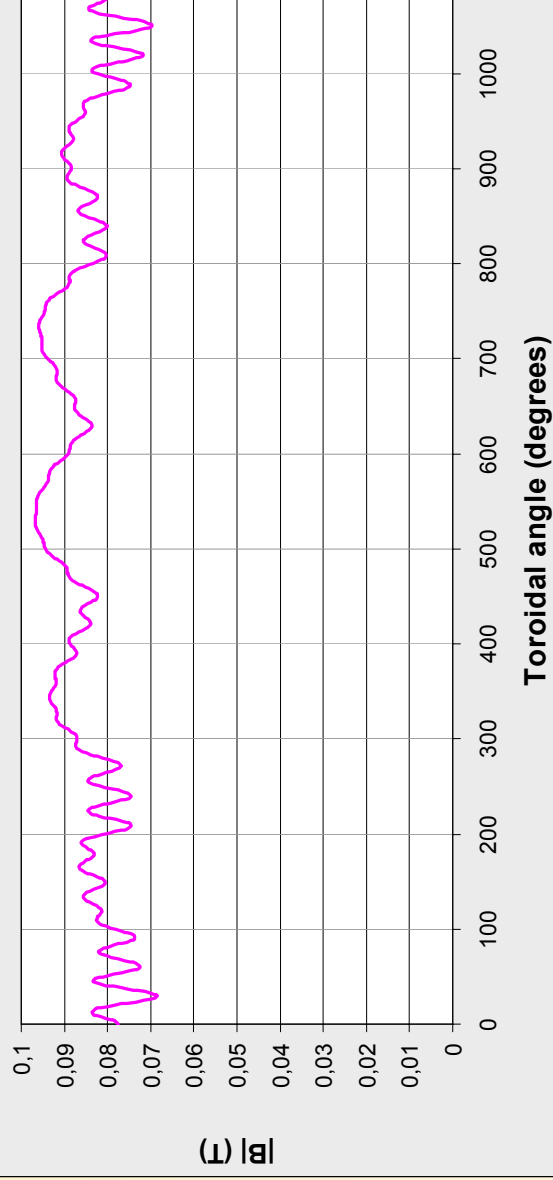


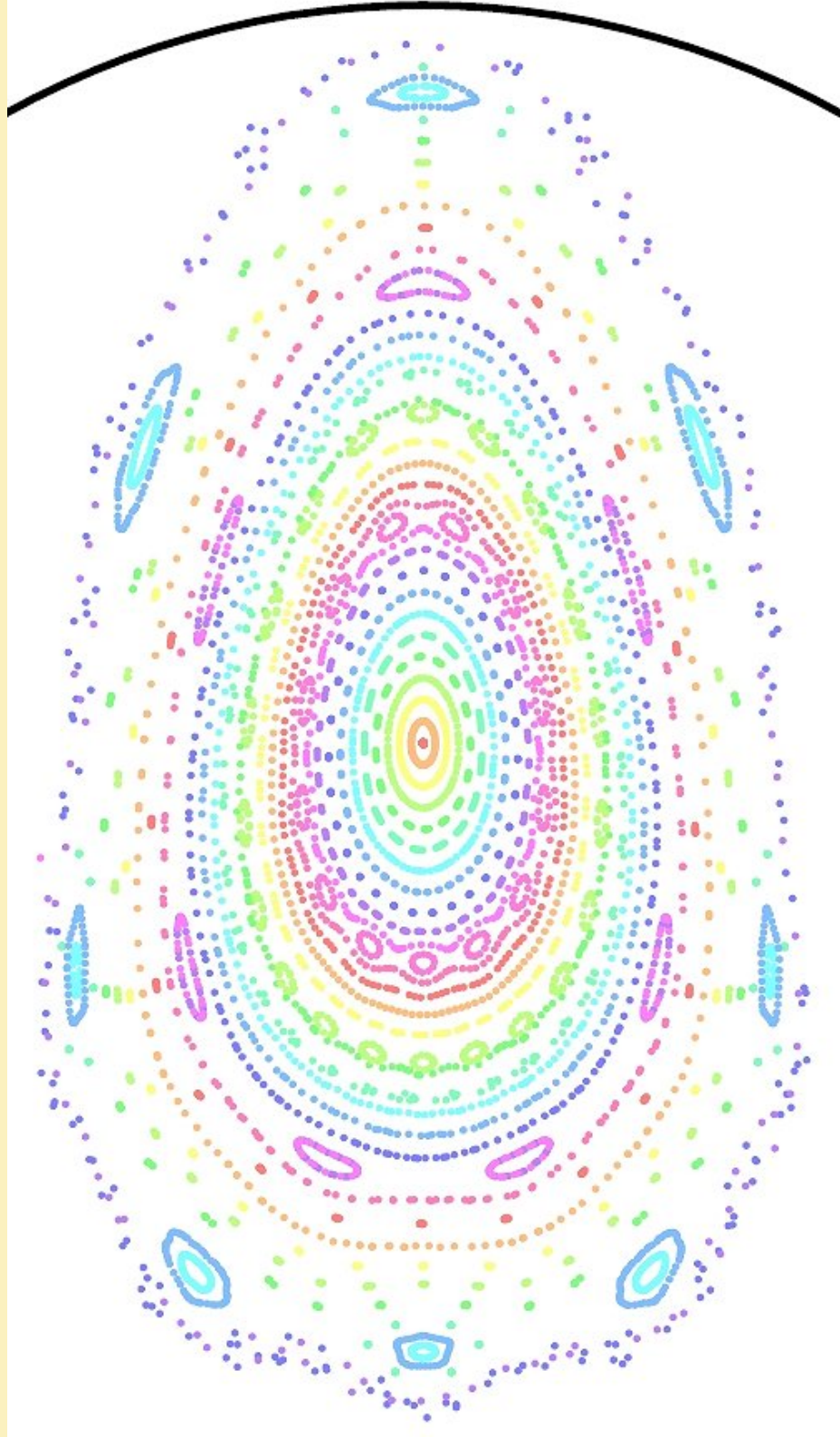
LHD, S. Murakami

4x1.25 bobinas →
UST_1 está lejos del objetivo, por ejemplo Bmin en el LHD mejorado

UST_1

|B| along a field line (axis + 13mm)





Racionales:

(de derecha a izq.)

Azul : $1/4 = 2/8$

No visible : $3/11$,
 $4/15$

Magenta : $2/7$

Verde : $3/10 = 6/20$

Magenta : $4/13$

No vis. verde : $5/16$

Precisión de lota :

Azul : $1/4$ calculado
 0.2500315

Magenta : $2/7 = 0.28571$
, calc. 0.2856076

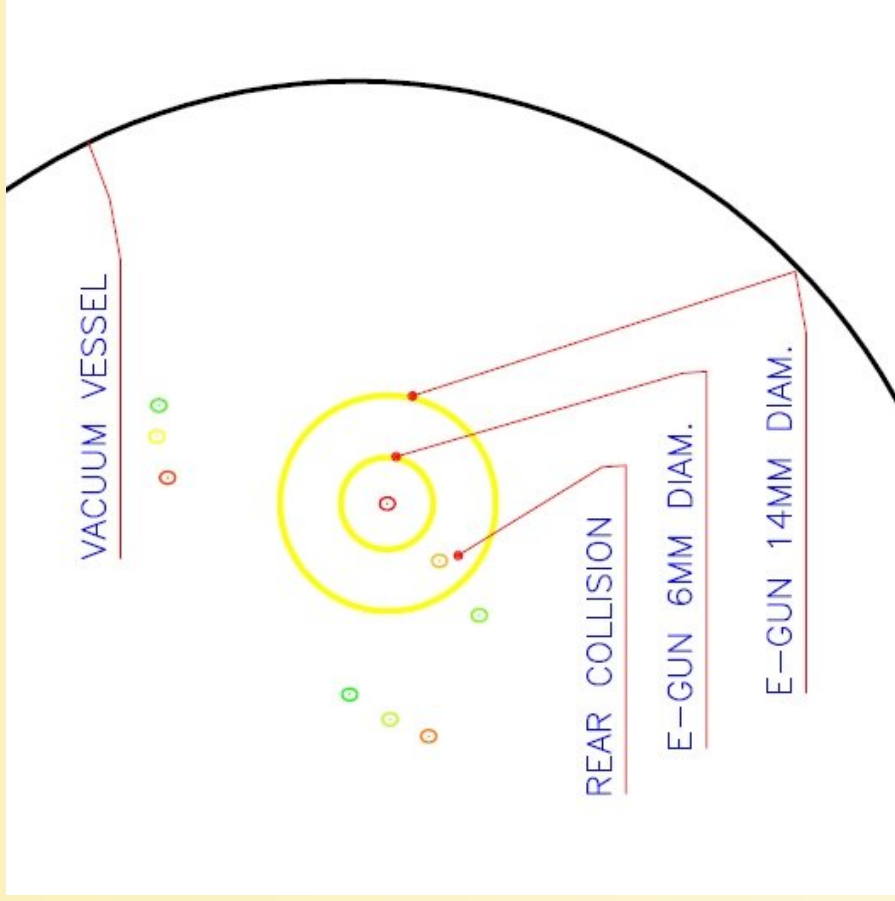
Verde : $3/10$ calc.
 0.2999538

Cada lota requiere 49 s

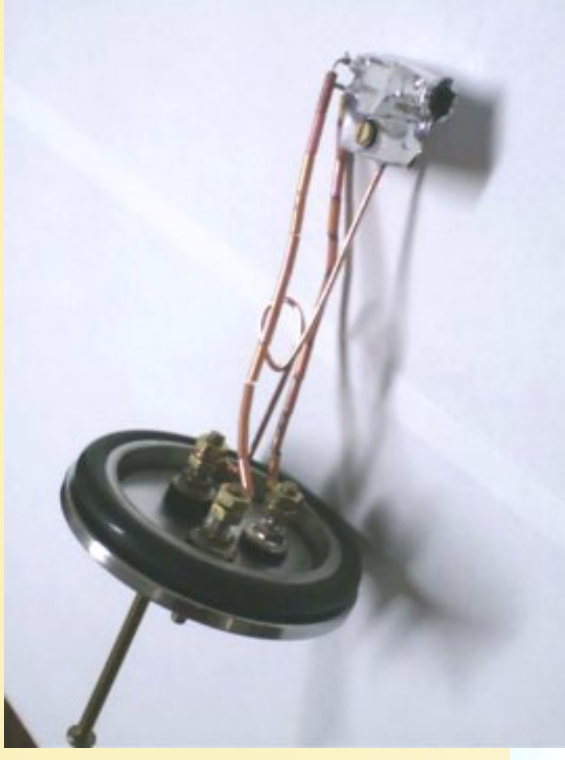
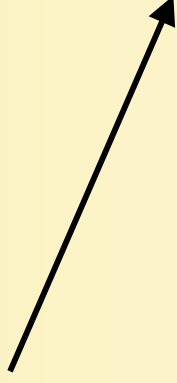
$\Phi=0^\circ$ Algunas islas independientes no aparecen automáticamente

B perturbado : Mayor δB parece obtenerse con 'Grid' basto. La figura se ha obtenido con grid $1/200$ m = 5mm de lado. Aparecen nuevas islas.





Muy pequeño
diámetro para
ver superficies
internas



Tercer
modelo de
e-gun : Diam.
externo=6mm.
Corriente del
rayo muy
baja.
Filamento de
tungsteno 10
W

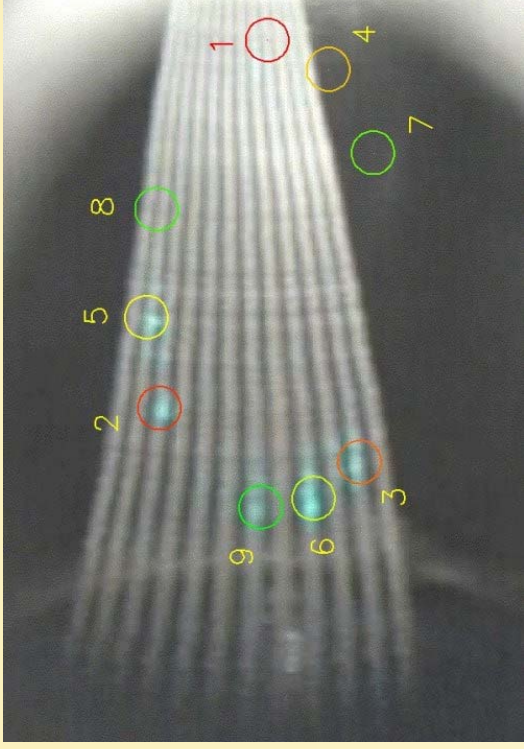
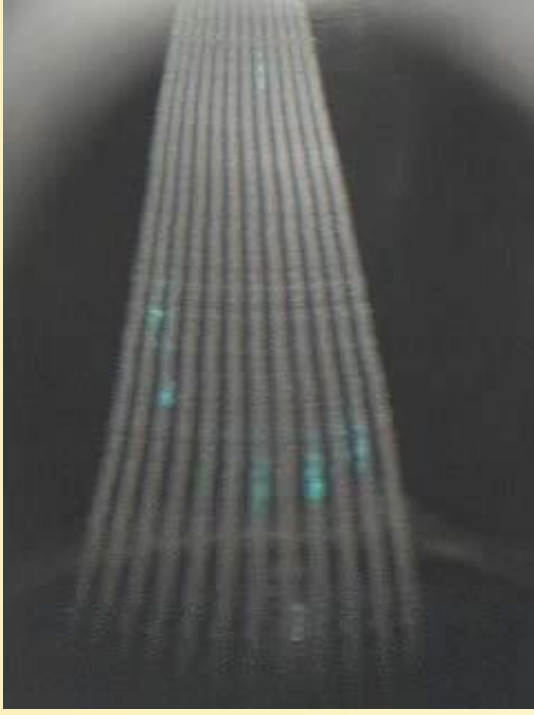
Colisión trasera. Colisión con el e-gun grande a la cuarta vuelta del rayo. En colores la secuencia de intersecciones del rayo con el plano poloidal del e-gun.

Información básica

- Las próximas imágenes se tomaron en el **pulso #198 y #202**, después de un largo proceso de mejoras.
- La cámara firewire es del más bajo coste (~calidad) en el mercado, 90€ y la **sensibilidad es baja**. La **inspección visual** tiene mucha mayor sensibilidad que la cámara.
- Un rayo de 40 eV da **insuficiente luminancia para ambos e-guns** y sólo > 80 eV es visible con el e-gun pequeño.
- Los drifts a ~90eV son enormes para UST_1 ($B_0 = 34$ mT para estos pulsos) por tanto las superficies magnéticas están notablemente desplazadas hacia el exterior y *lota* tiende a 1/3.

Información básica

- **UST_1 es muy pequeño**, así el diámetro del rayo ~1.5mm es excesivo aquí. Medidas de precisión son más difíciles que en un st. mayor.
- El **Recorrido Libre Medio** en el pobre vacío, 5mPa, sólo permite menos de 10 vueltas toroidales del rayo.
- **Duración del pulso** : 2.5 s.
- El cañón de elect. pequeño se **fundi**ó en el pulso #204 y el mapeado terminó temporalmente.
- El **efecto perspectiva** está corregido solo parcialmente.

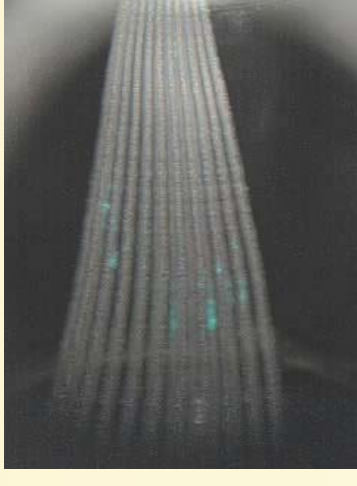
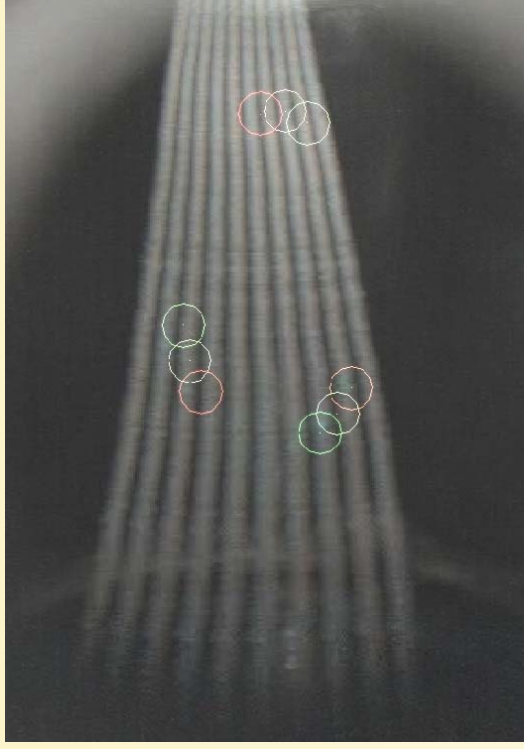
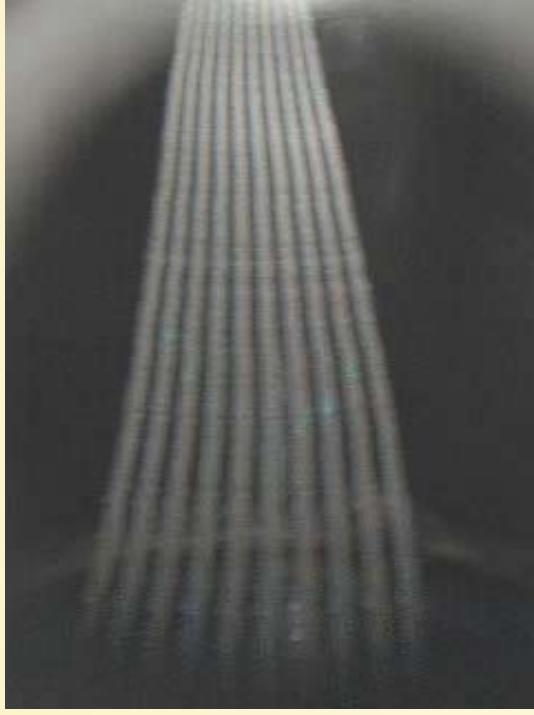


Pulso #202. (94eV).
Simulación obtenida
estableciendo el e-gun
en la posición aprox. real
medida y electrones a
94eV (simulación con
drifts).



N202_F70-135.mpg


◀ **Pulso #198.** Puntos
débiles (84eV). e-gun 2.3
mm más elevada que en
#202, así superficie más
interna. El e-gun es
'movido' verticalmente lo
mismo en el código.



Ambos pulsos superpuestos. Los puntos débiles aparecen incluso más tenues. ▶

Los resultados experimentales son todavía escasos y de baja calidad pero pueden obtenerse algunas conclusiones provisionales :

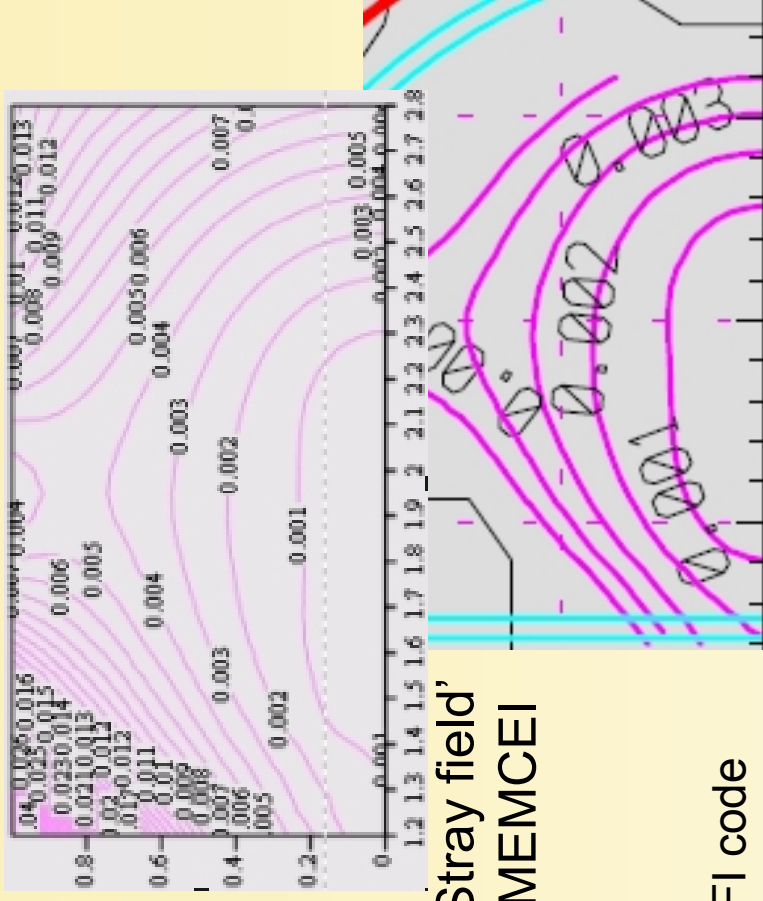
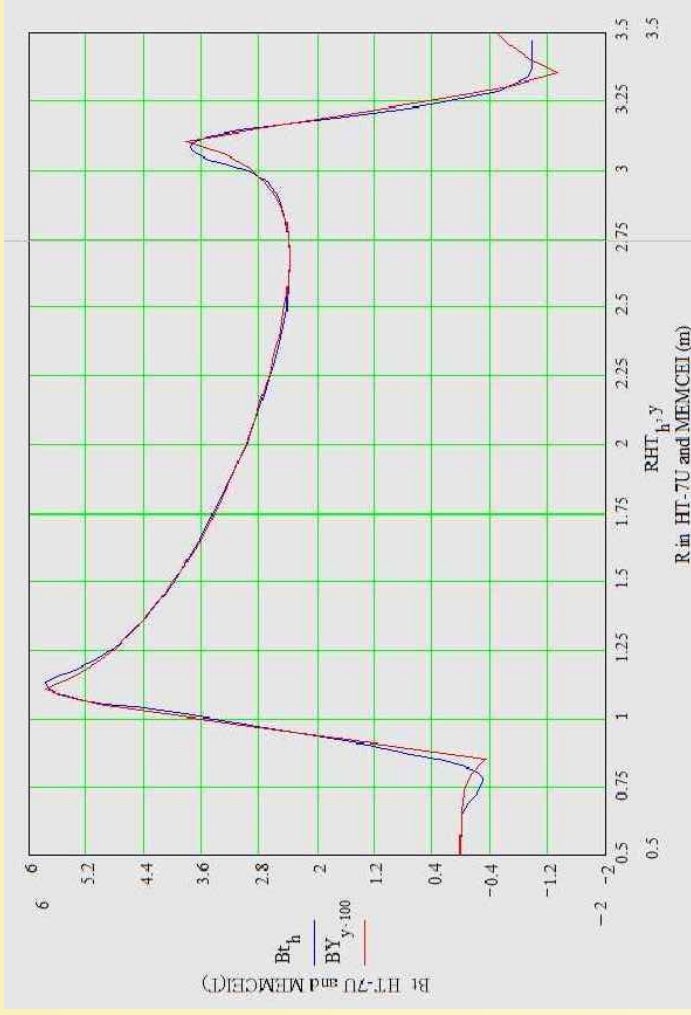
- **UST_1** posee un notable **grado de precisión** ← Se obtienen superficies magnéticas que concuerdan con las simulaciones.
- **El aparato mecanizador de stellarators fue una idea satisfactoria** ← El mecanizador de surcos para bobinas modulares funcionó y generó bobinas precisas a bajo coste.
- El código **SimPIMF** posee cierto **grado de precisión y corrección** ← de otro modo la concordancia entre los resultados experimentales y simulaciones sería totalmente improbable.
- **La optimización fue útil y correcta en cierto grado** ← SimPIMF no es totalmente incorrecto.
- **El tipo de stellarator elegido fue uno de los factibles.**
- **UST_1 es un stellarator.**



Descripción cronológica :

Evolución, alternativas, dificultades y
soluciones

El inicio de los cálculos en fusión



‘Stray field’
MEMCEI

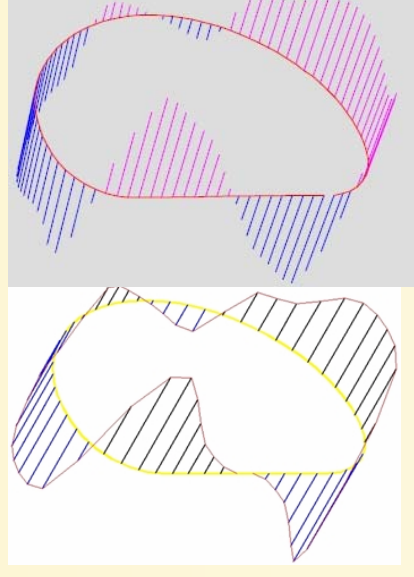
‘Stray field’ EAST team

Comparación de Becuatorial en EAST entre MEMCEI y EFFI code

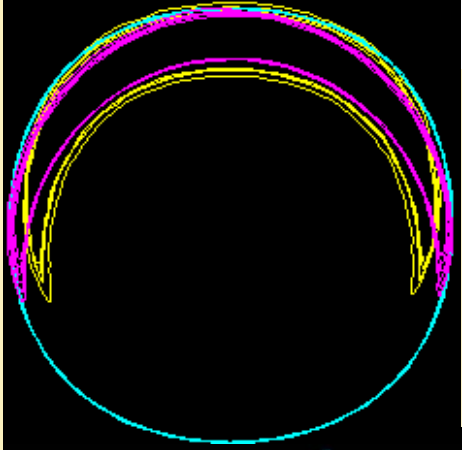
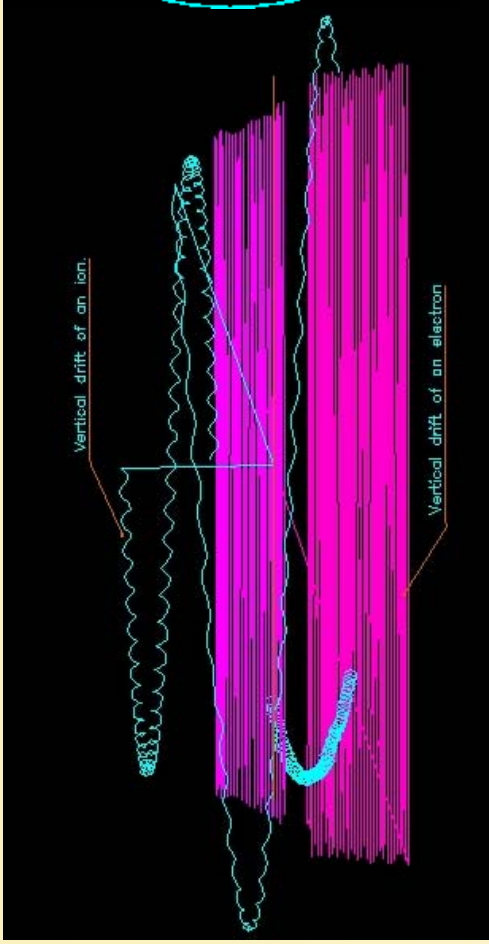
Febrero 2005 : MEMCEI v2.1 , 9440 elementos de corriente, 16 TF's, 13 lazos por TF, 50 ele. por lazo. Máquina : **EAST tokamak (HT-7U)** . Lenguaje : **VisualBasic + MC**

F centrado = **984.3** ton con MEMCEI v2.1 y **989.3** ton con EFFI code (equipo HT-7U)

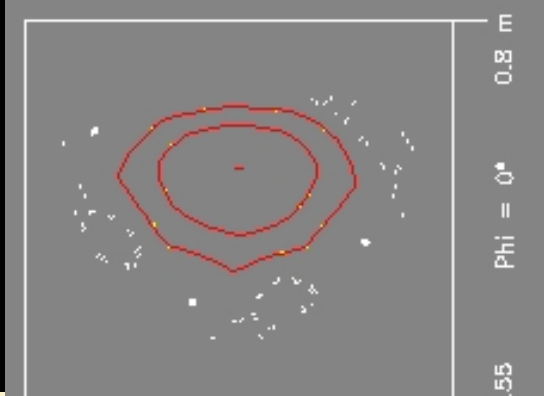
Mayo 2005 . **CTH torsatron** : Cálculo de fuerzas mútuas entre bobinas utilizando MEMCEI, para Greg Hartwell , Auburn University



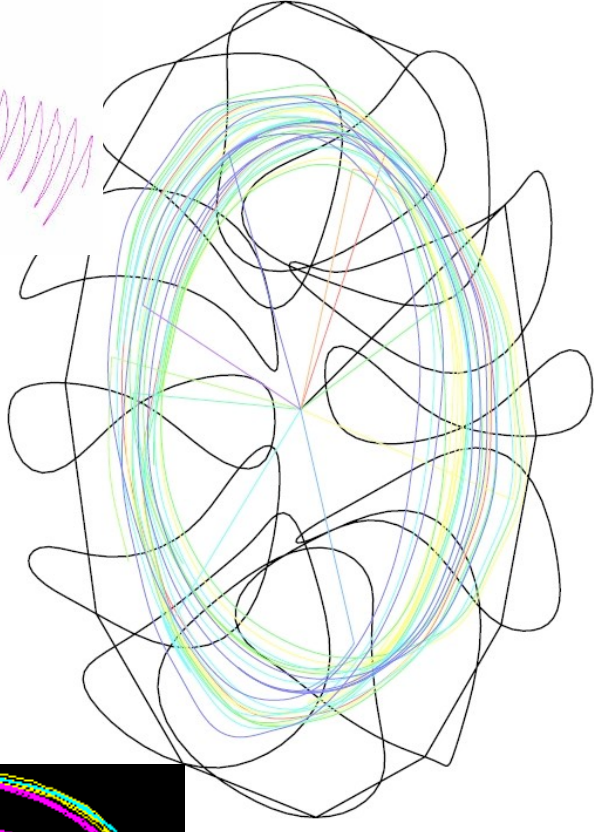
Evolución en simulación



← Marzo 2006
Órbita Banana en tokamak, tamaño ~UST_1



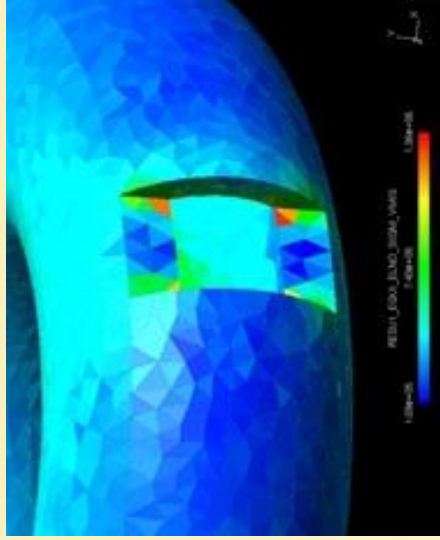
~Marzo 2005 : Simulación de 100 partículas con drifts durante 10µs , y superficies magnéticas.
Lenguaje : VB



Octubre 2006 ↑ : Simulación de 300 quasi-partículas con drifts, partículas atrapadas y colisiones (sólo 10 en el gráfico) durante 150µs en 30 minutos-PC. 'guiding centre method' mejorado, FAST. (Arriba) 'helically trapped particle' en coordenadas Boozer-like. Máquina : UST_1 . Lenguaje : JAVA



Desarrollo de la cámara de vacío



Julio 2005 Esfuerzo Von Mises alrededor de la boca.
Cálculo utilizando **ASTER-GMSH**. Máquina : ~UST_1



Julio 2005
Idea de bocas no protuberantes

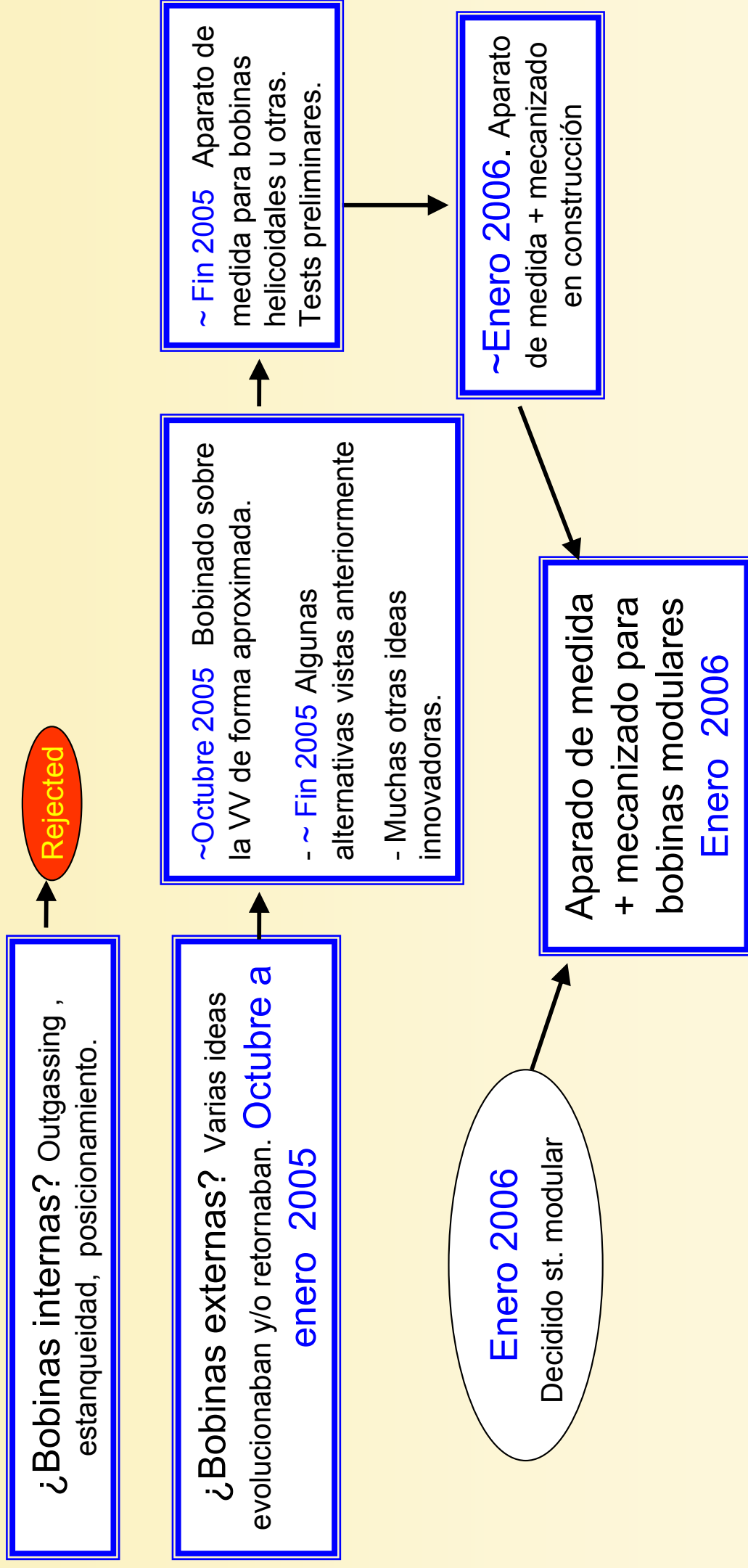


Octubre 2005
Una pieza de porcelana para probar las ideas.
Aparecieron grietas + posible excesivo outgassing → Idea abandonada



Febrero 2006
La cámara de vacío a prueba. (fugas, outgassing..)

- ¿Cómo producir bobinas modulares precisas a bajo coste?



Tareas presentes, futuras, cuestiones, dificultades

- Desarrollo del **Sistema de Calentamiento para UST_1** :
Algunas dificultades en antenas y transmisión + coste de las transiciones y guías de onda.
- Mejora del **Módulo de Colisiones** en SimPIMF para perfeccionar la simulación de partículas en UST_1 ~ transporte.
- **Puesta en marcha del RGA (AMETEK QUADLINK DYCOR** mass spectrometer). Dificultades : Instrumento de muy bajo coste sin garantía ni manual.
- ¿Es posible producir **bobinas modulares 3D-reales** precisas, estilo HSR-3, QPS ..., a bajo coste?

Tipo y Periodos	Bobinas modulares ; m=2
Superficie de bobinado	Circular pol. & tor. R = 119mm r=57mm
Numero de bobinas	12 (3 formas diferentes)
Espiras por bobina	6
Conductor	flexible, especial cobre 6mm ²
Estructura de la bobina	1 doble pancake por bobina, 3 capas
Tamaño del bobinado	7mm ancho x 10.5 mm profun.
Marco soportante	Marco compacto de escayola
Parámetros de forma	1.45 ; 1.3 ; 1.55 ; 0.65
Corriente, actual (ECH 2 nd)	335 A , 2 kA-vueltas
Corriente, prevista (ECH 1 st)	687 A , 4.1 kA-vueltas
Fuentes de alimentación, actuales	5 baterías DC 12V, ~17Kw suministrados a las bobinas



Las 12 bobinas modulares
acabadas. (Antes de la
instalación en el sistema)

Valores esperados calculados

- UST_1 es un proyecto enfocado en ingeniería
- Los cálculos físicos-plasma son solo estimaciones y la optimización (en las próximas páginas) es pobre a pesar del esfuerzo realizado

- Los parámetros son muy modestos, similar a cualquier otro st. pequeño y/o de bajo B

	Valores esperados	Observaciones y condiciones
ne=ni	orden de 10^{17} m^{-3}	Limitado por $\tau_E \sim P$ calent. y frec. de corte ECH
T_E	3,4 μs	ISS04 , e.f. = 1, $n = 1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, $P = 400\text{W}$, 0.1T
T_E	0,15 μs	Más real : e.f.=0.1, 0.04T
T_{Ep}	?? (480 μs)	SimPIMF v2.5 (inicial, no contrastado) , $T_e = 2\text{eV}$,
T_{Ee}	?? (4400 μs)	$T_i = 0.5\text{eV}$, $n = 1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, Solo flujo neocl. partículas
Te max	orden de 2 eV	$n = 2 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, $T_e = T_i$, $P = 400\text{W}$, e.f.=0.1 , 0.1T
Ti	< 2 eV, ~0.2-0.5eV	Debido a \uparrow drifts por vuelta tor. \rightarrow pérdidas directas
$\sim\beta$	~ 0 , <0.01%	$n = 1 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, $T_e = T_i = 2\text{eV}$, 0.1T , $\sim\text{WEGA}$