



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# CLPD-IA. Diseño Optimizado del Patrón de Carga del Núcleo de Reactores LWR Asistido por Inteligencia Artificial

Rafael MIRÓ HERRERO

Instituto Universitario de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM)

Universitat Politècnica de València









[rmiro@upv.es](mailto:rmiro@upv.es)

Jornada I+D+i CSN



Madrid, 2 de febrero de 2023

## ÍNDICE

-  I. Introducción
-  II. Fundamentos de las simulaciones termohidráulicas y neutrónicas
-  III. Modelos de validación
-  IV. Resultados
-  V. Seguimiento de núcleo
-  VI. Redes Neuronales
-  VII. Algoritmo Genético
-  VIII. Trabajos en marcha y Conclusiones

## I. INTRODUCCIÓN

- Reactor nuclear de potencia de la **C. N. SURRY**
- Estado de Virginia en los Estados Unidos
- Dos reactores de 2441 MW térmicos / **824 MWe**
- **80 años de vida** de funcionamiento: 1973 → 2053
- De tecnología **Westinghouse** y explotado por la empresa *Dominion Generation*.



*Central Nuclear SURRY, Virginia, Estados Unidos*

## II. FUNDAMENTOS DE LAS SIMULACIONES TERMOHIDRÁULICAS Y NEUTRÓNICAS



Un **código termohidráulico**

resuelve las ecuaciones de

- Balance de masa
- Balance de momento
- Balance de energía

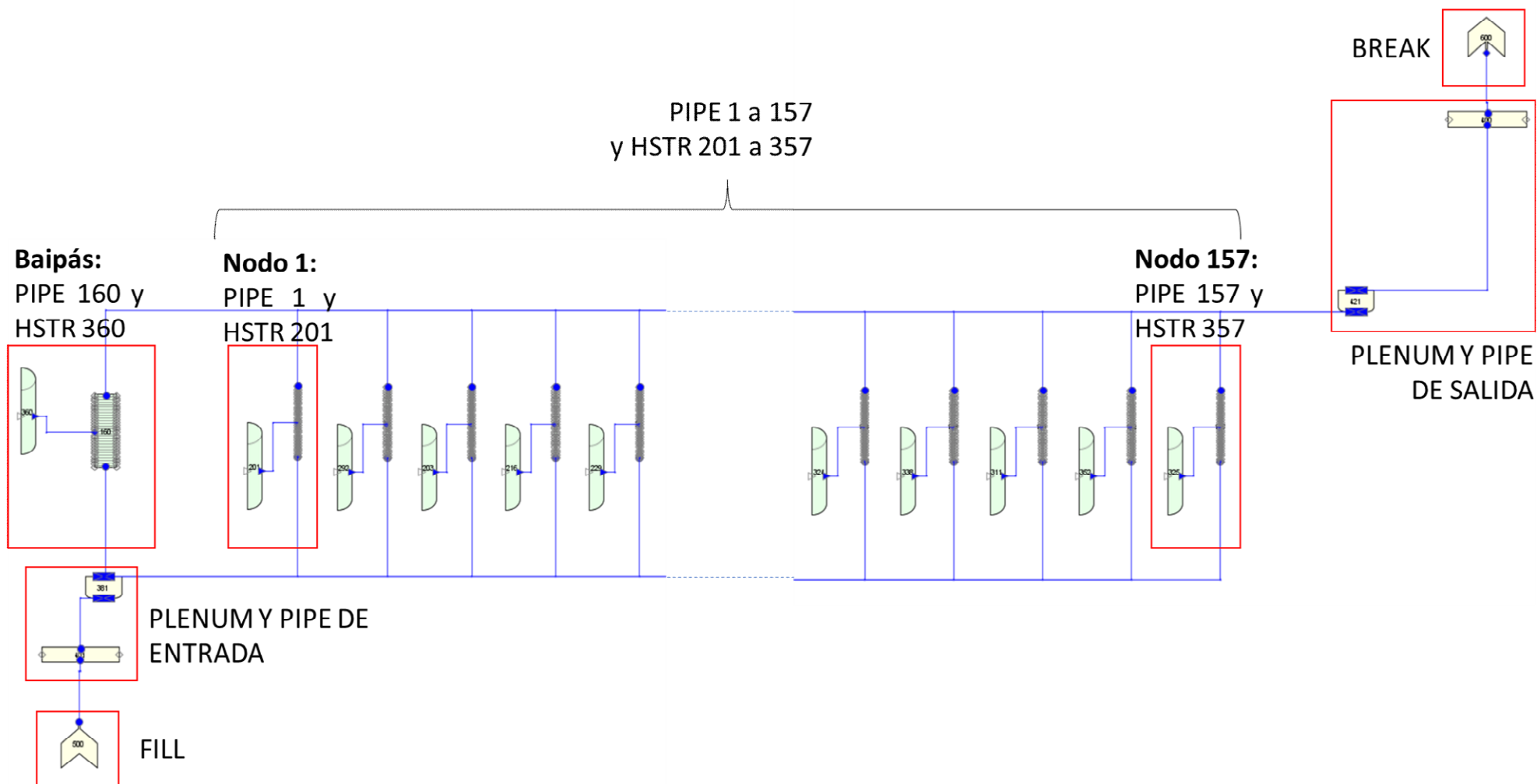
Un **código neutrónico** resuelve las

ecuaciones de

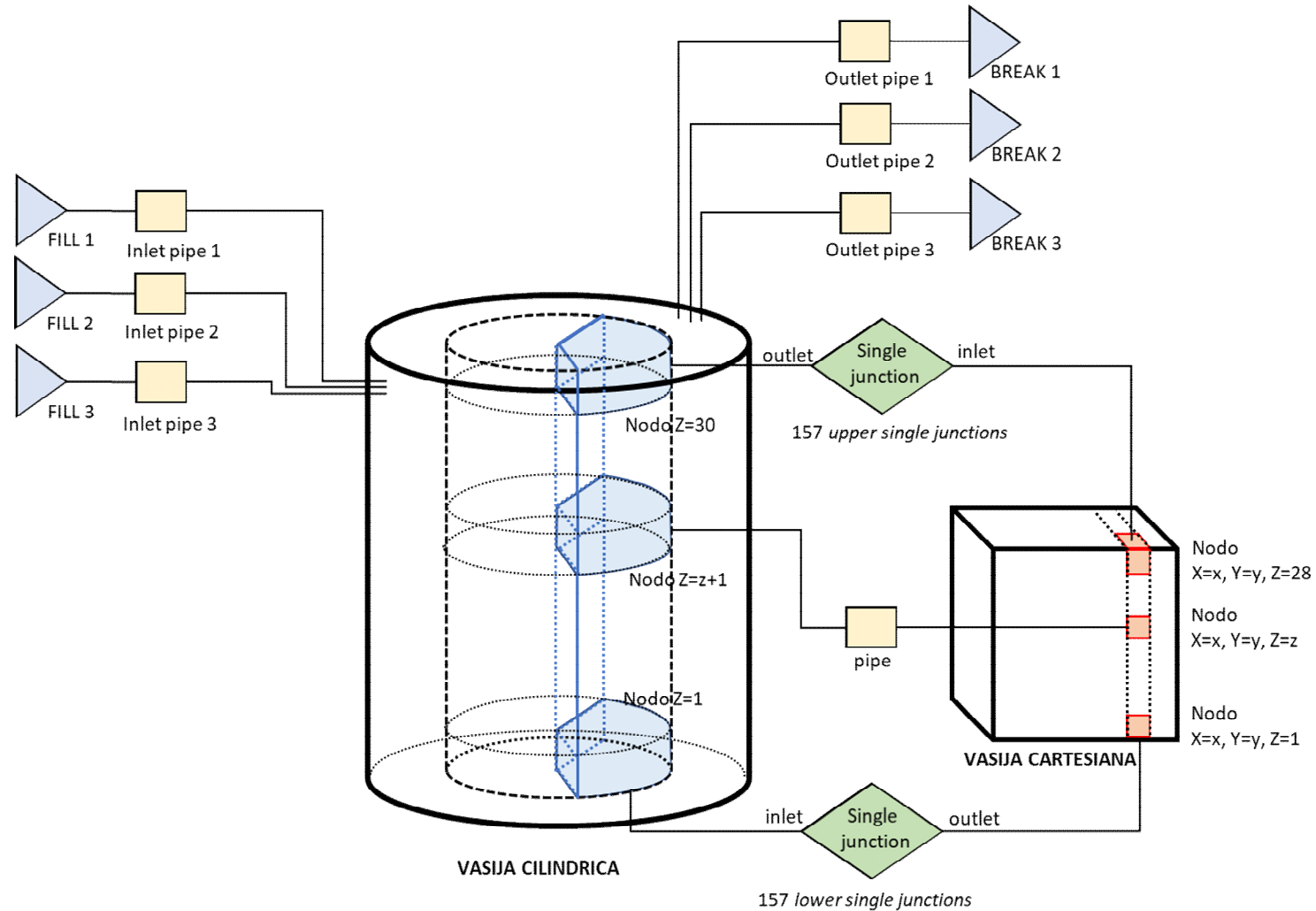
- Transporte
- Difusión neutrónica

- **TRACE (v5 p5):**
  - Código **termohidráulico tridimensional**
  - Entorno grafico *SNAP*
  - Régimen estacionario y transitorio
  - Se puede acoplar con el códigos neutrónicos: **PARCS, VALKIN**
- **PATHS (parcs-32m19co):**
  - Código **termohidráulico unidimensional**
  - Código en desarrollo
  - Régimen estacionario
  - Alta velocidad de cálculo
  - Se puede acoplar con el código neutrónico: **PARCS**
- **PARCS (parcs-32m19co):**
  - Código **neutrónico tridimensional**
  - Se puede acoplar con códigos termohidráulicos: **RELAP5, TRACE, PATHS**

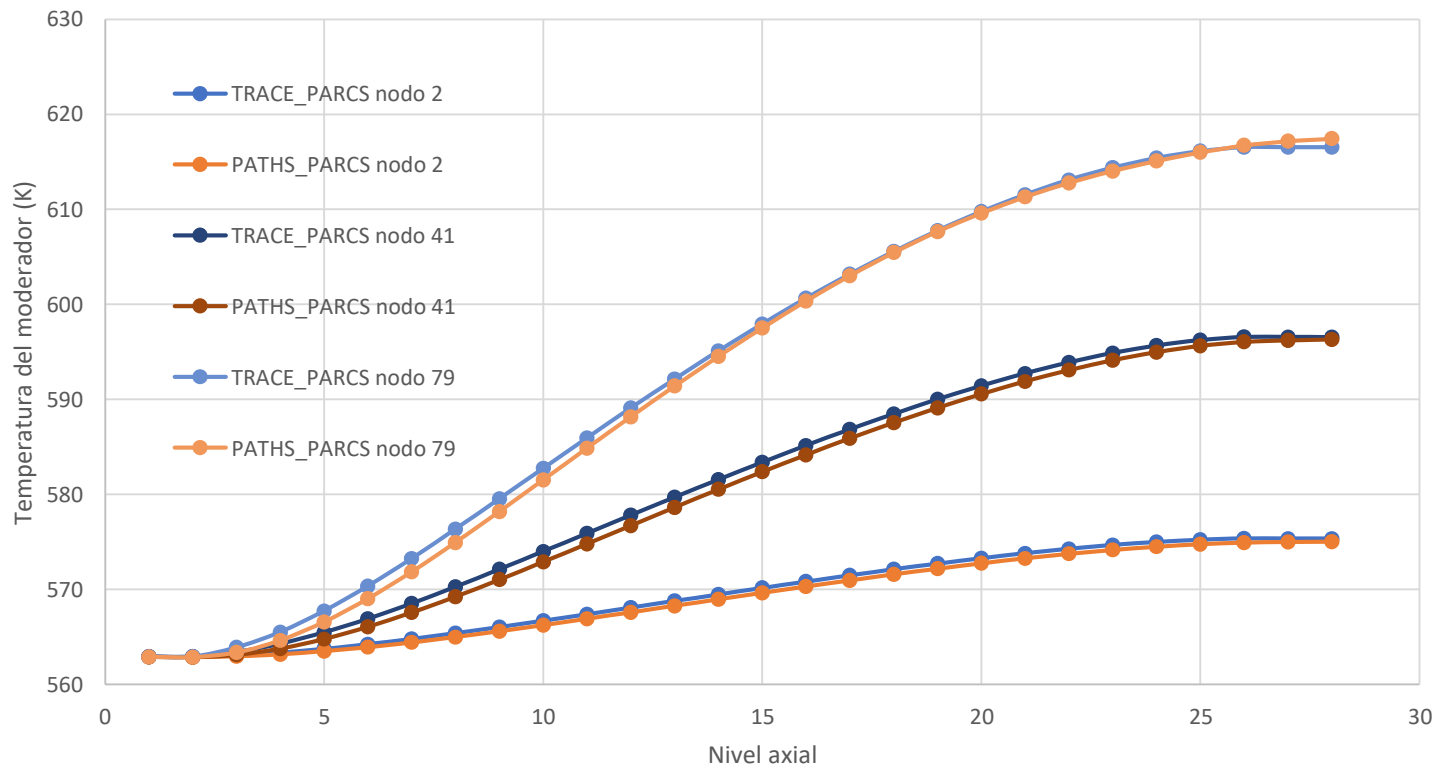
### III. MODELOS DE VALIDACIÓN\_ Modelo TRACE unidimensional



### III. MODELOS DE VALIDACIÓN\_ Modelo TRACE tridimensional



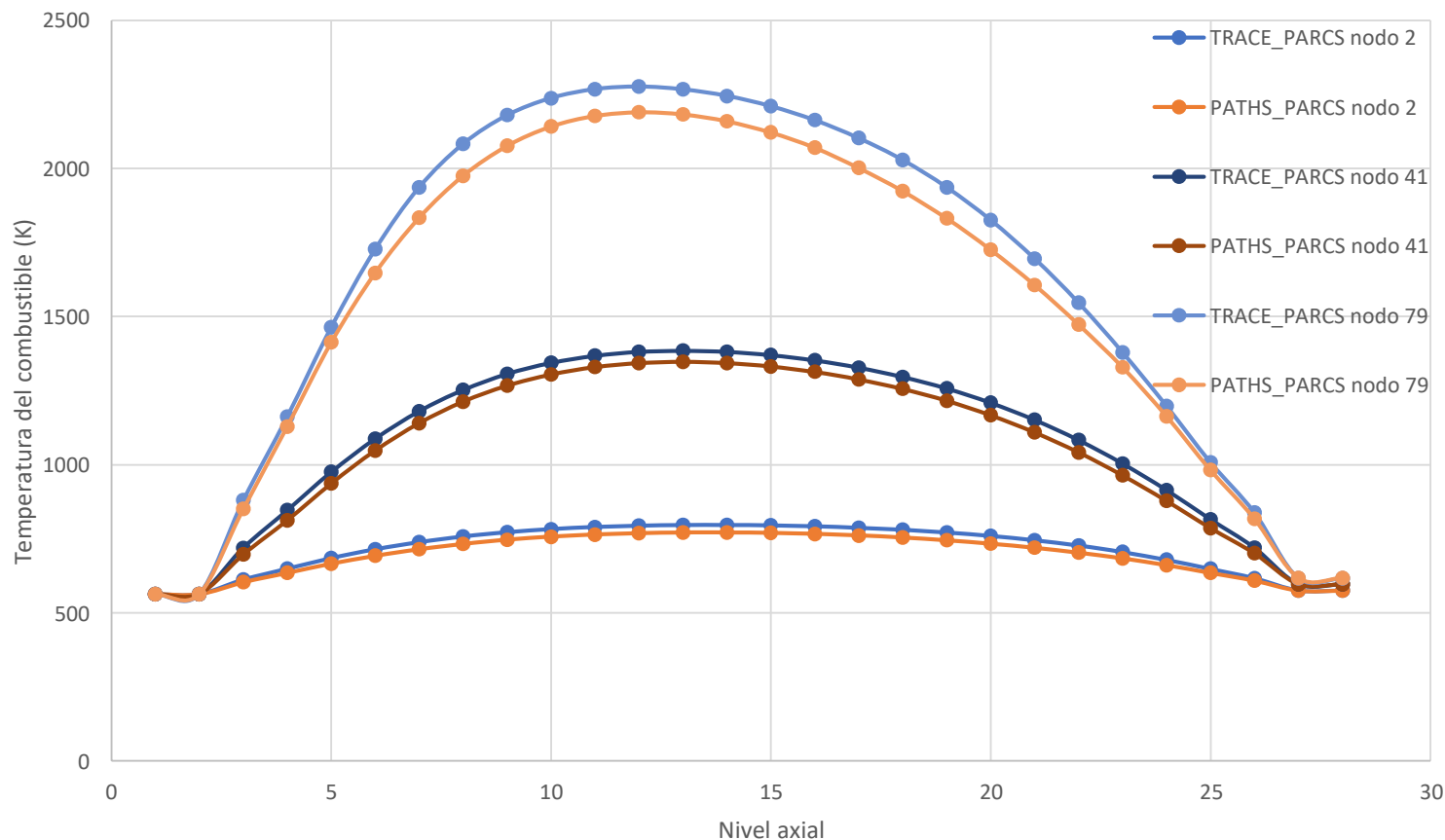
## IV. RESULTADOS\_ Modelo TRACE unidimensional: comparación de TRACE/PARCS con PATHS/PARCS



### Temperatura del moderador (K) en función del nivel axial

- La temperatura aumenta al pasar por el núcleo
- Cuanto más cerca del centro, mayor es el incremento de temperatura
- Diferencias relativas de 0.09 % (nodo 2), 0.19 % (nodo 41) y 0.24 % (nodo 79)

## IV. RESULTADOS\_ Modelo TRACE unidimensional: comparación de TRACE/PARCS con PATHS/PARCS

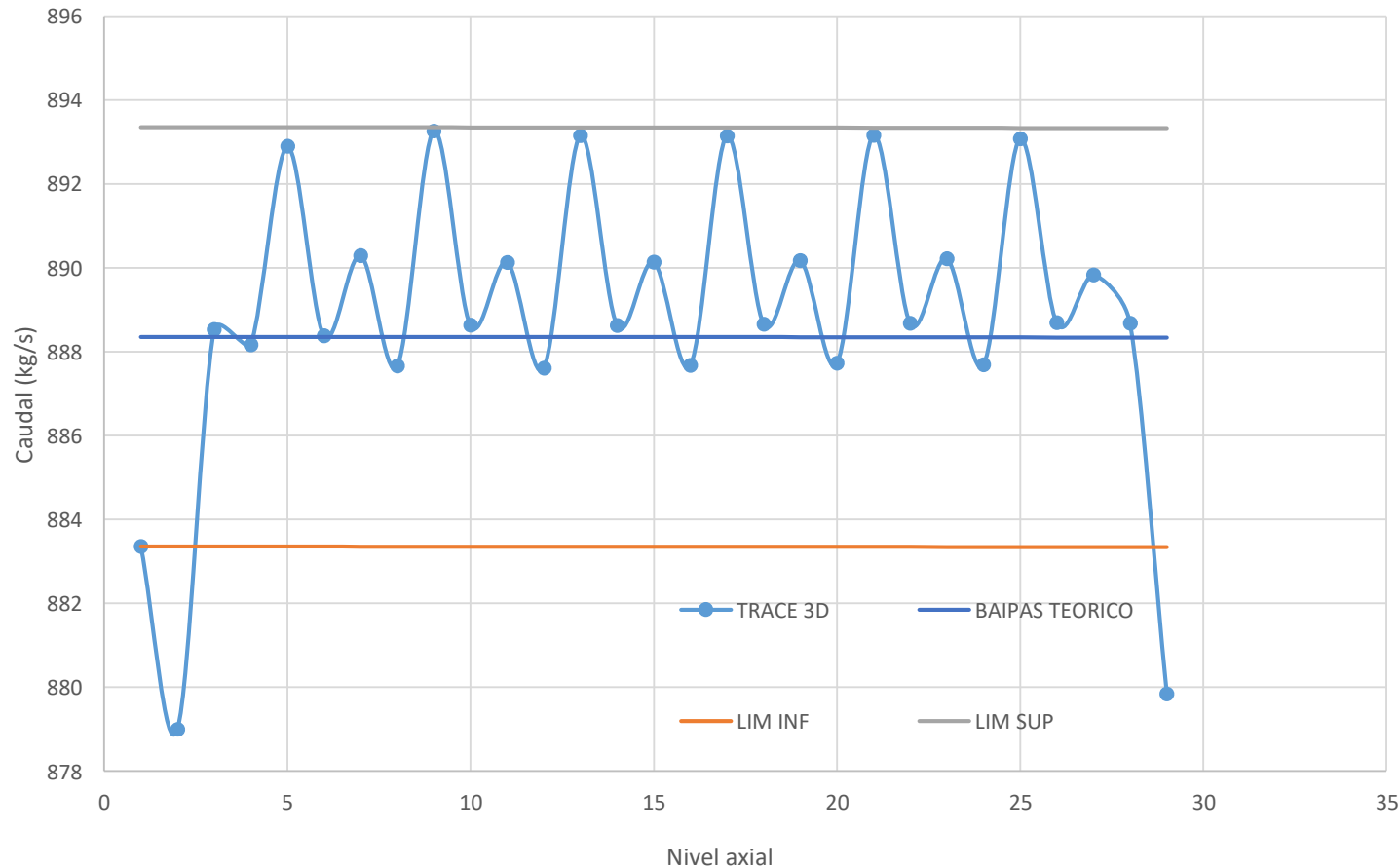


### Temperatura del combustible (K) en función del nivel axial

- La temperatura tiene una forma aproximada a una senoidal
- El máximo de la curva se sitúa alrededor del centro
- Cuanto más cerca del centro, mayor es este máximo
- Diferencias relativas de 3.5 % (nodo 2), 4.17 % (nodo 41) y 5.78 % (nodo 79)



## IV. RESULTADOS\_ Modelo TRACE tridimensional: validación de los caudales



### Caudal del Baipás

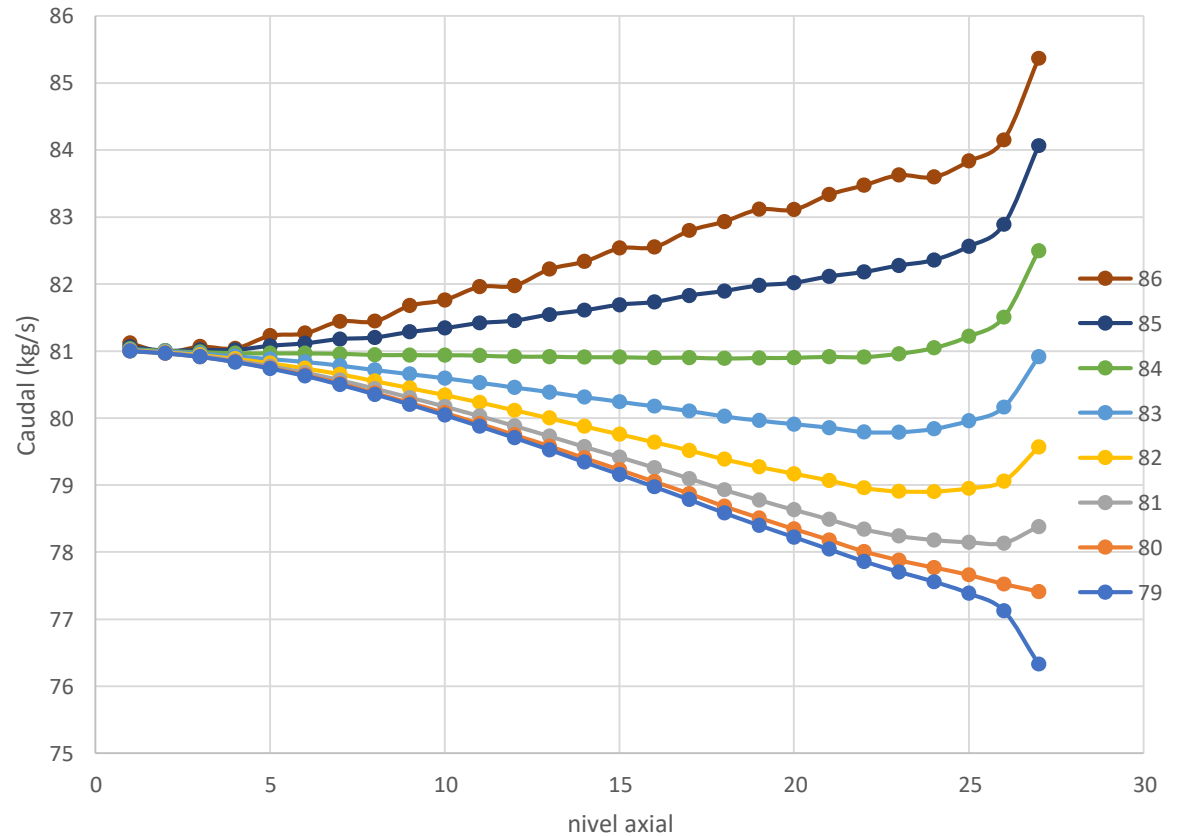
- Utilización del módulo *AdjustK* del programa *Resting*
- Limitación a 5 kg/s de diferencia con el valor de referencia
- **Objetivo** : limitar los fenómenos de *crossflow* entre el baipás y el núcleo

## IV. RESULTADOS\_ Modelo TRACE tridimensional: validación de los caudales



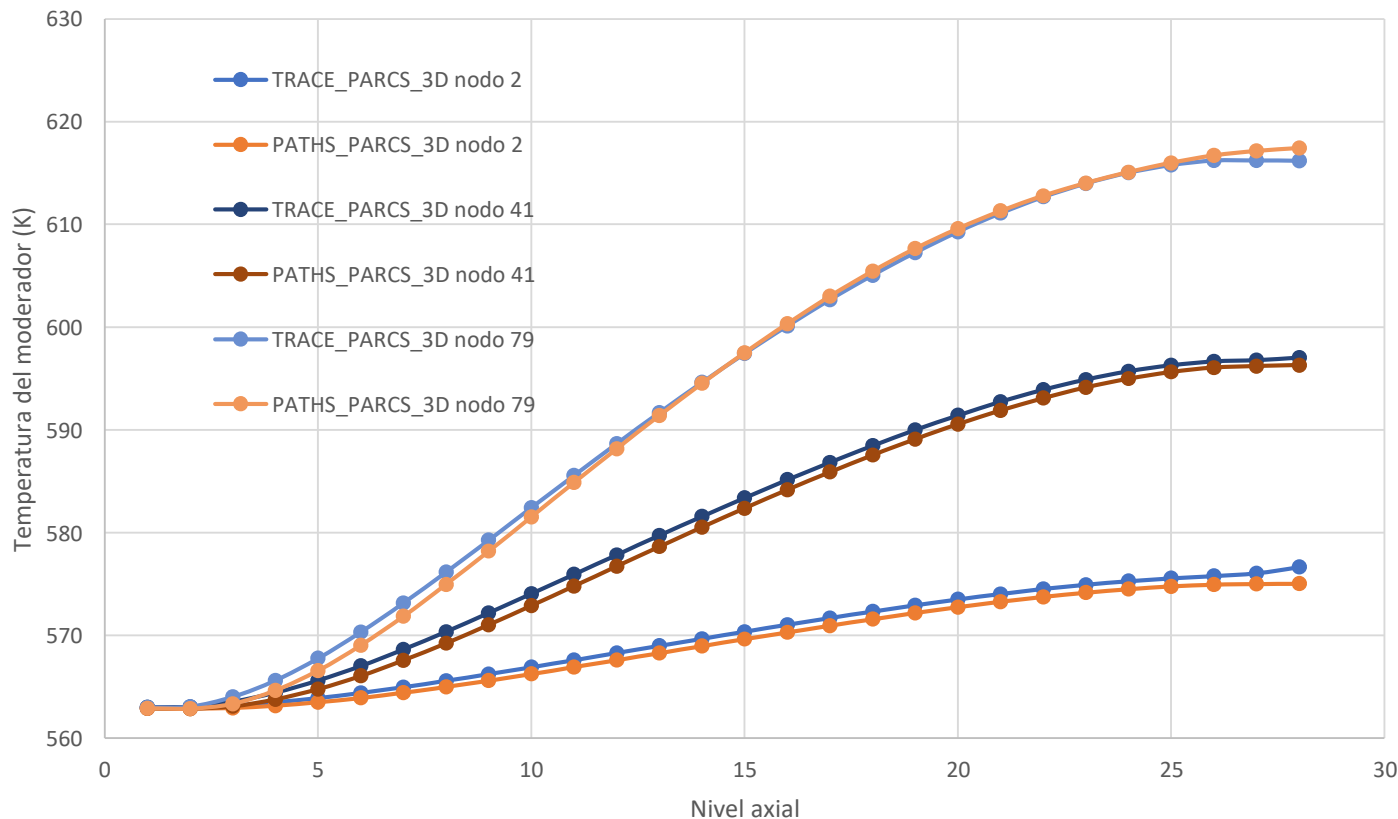
		EJE Y														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
EJE X	1							X1 Y7 1	X1 Y8 2	X1 Y9 3						
	2					X2 Y5 4	X2 Y6 5	X2 Y7 6	X2 Y8 7	X2 Y9 8	X2 Y10 9	X2 Y11 10				
	3				X3 Y4 11	X3 Y5 12	X3 Y6 13	X3 Y7 14	X3 Y8 15	X3 Y9 16	Xx Yy a	X3 Y11 18	X3 Y12 19			
	4			X4 Y3 20	X4 Y4 21	X4 Y5 22	X4 Y6 23	X4 Y7 24	X4 Y8 25	X4 Y9 26	X4 Y10 27	X4 Y11 28	X4 Y12 29	X4 Y13 30		
	5		X5 Y2 31	X5 Y3 32	X5 Y4 33	X5 Y5 34	X5 Y6 35	X5 Y7 36	X5 Y8 37	X5 Y9 38	X5 Y10 39	X5 Y11 40	X5 Y12 41	X5 Y13 42	X5 Y14 43	
	6		X6 Y2 44	X6 Y3 45	X6 Y4 46	X6 Y5 47	X6 Y6 48	X6 Y7 49	X6 Y8 50	X6 Y9 51	X6 Y10 52	X6 Y11 53	X6 Y12 54	X6 Y13 55	X6 Y14 56	
	7	X7 Y1 57	X7 Y2 58	X7 Y3 59	X7 Y4 60	X7 Y5 61	X7 Y6 62	X7 Y7 63	X7 Y8 64	X7 Y9 65	X7 Y10 66	X7 Y11 67	X7 Y12 68	X7 Y13 69	X7 Y14 70	X7 Y15 71
	8	X8 Y1 72	X8 Y2 73	X8 Y3 74	X8 Y4 75	X8 Y5 76	X8 Y6 77	X8 Y7 78	X8 Y8 79	X8 Y9 80	X8 Y10 81	X8 Y11 82	X8 Y12 83	X8 Y13 84	X8 Y14 85	X8 Y15 86
	9	X9 Y1 87	X9 Y2 88	X9 Y3 89	X9 Y4 90	X9 Y5 91	X9 Y6 92	X9 Y7 93	X9 Y8 94	X9 Y9 95	X9 Y10 96	X9 Y11 97	X9 Y12 98	X9 Y13 99	X9 Y14 100	X9 Y15 101
	10		X10 Y2 102	X10 Y3 103	X10 Y4 104	X10 Y5 105	X10 Y6 106	X10 Y7 107	X10 Y8 108	X10 Y9 109	X10 Y10 110	X10 Y11 111	X10 Y12 112	X10 Y13 113	X10 Y14 114	
	11		X11 Y2 115	X11 Y3 116	X11 Y4 117	X11 Y5 118	X11 Y6 119	X11 Y7 120	X11 Y8 121	X11 Y9 122	X11 Y10 123	X11 Y11 124	X11 Y12 125	X11 Y13 126	X11 Y14 127	
	12			X12 Y3 128	X12 Y4 129	X12 Y5 130	X12 Y6 131	X12 Y7 132	X12 Y8 133	X12 Y9 134	X12 Y10 135	X12 Y11 136	X12 Y12 137	X12 Y13 138		
	13				X13 Y4 139	X13 Y5 140	X13 Y6 141	X13 Y7 142	X13 Y8 143	X13 Y9 144	X13 Y10 145	X13 Y11 146	X13 Y12 147			
	14					X14 Y5 148	X14 Y6 149	X14 Y7 150	X14 Y8 151	X14 Y9 152	X14 Y10 153	X14 Y11 154				
	15							X15 Y7 155	X15 Y8 156	X15 Y9 157						

Xx Yy  
a Nodo considerado en el estudio



- El caudal varía a lo largo del núcleo -> *crossflow*
- Cerca del centro reactor el caudal baja / Periferia del reactor, aumenta

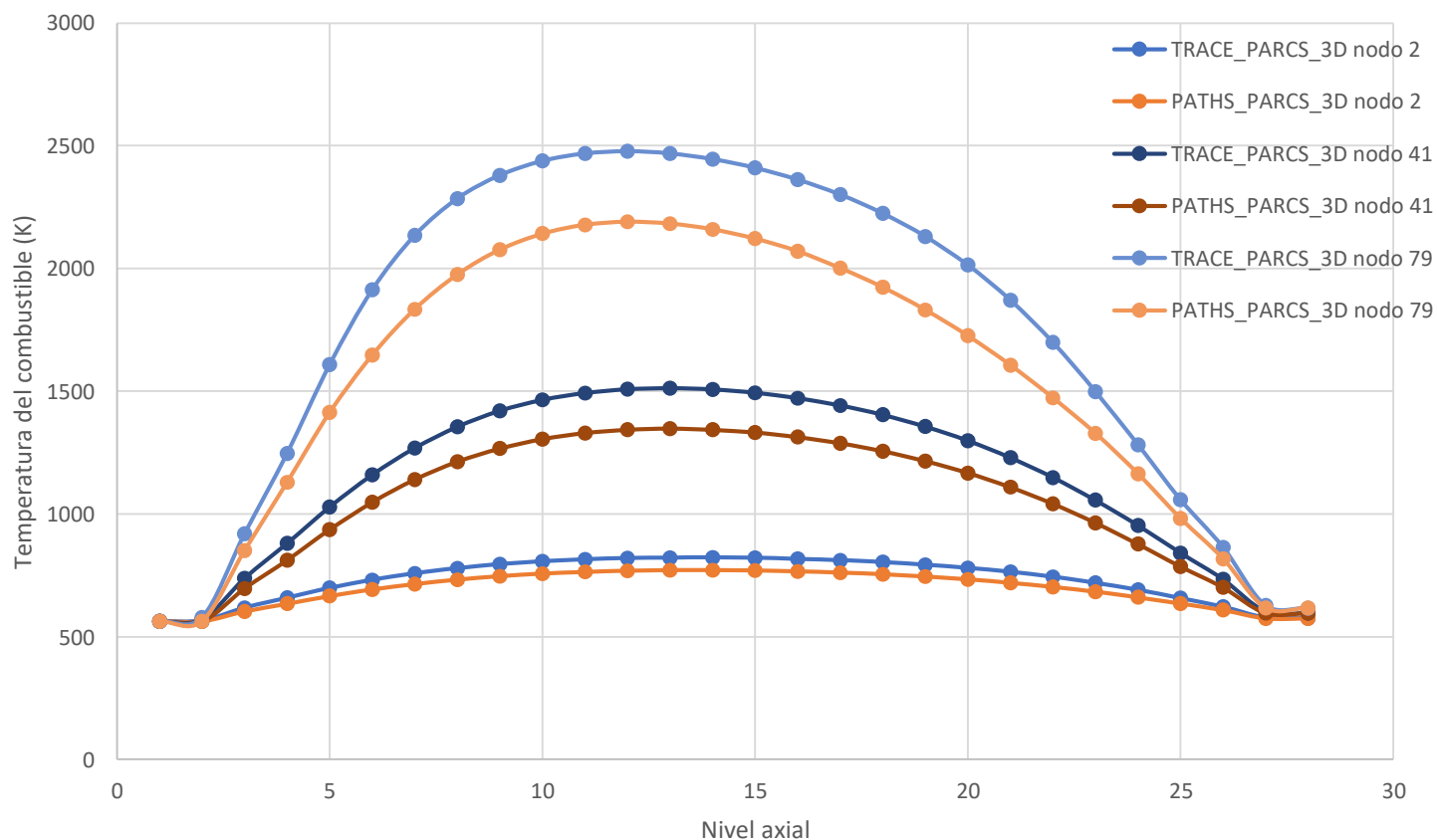
## IV. RESULTADOS\_ Modelo TRACE tridimensional: comparación de TRACE/PARCS con PATHS/PARCS



### Temperatura del moderador (K) en función del nivel axial

- La temperatura aumenta al pasar por el núcleo
- Cuanto más cerca del centro, mayor es el incremento de temperatura
- Diferencias relativas de 0.3 % (nodo 2), 0.2 % (nodo 41) y 0.22 % (nodo 79)

## IV. RESULTADOS\_ Modelo TRACE tridimensional: comparación de TRACE/PARCS con PATHS/PARCS



### Temperatura del combustible (K) en función del nivel axial

- La temperatura tiene una forma senoidal
- El máximo de la curva se sitúa alrededor del centro
- Cuanto más cerca del centro, mayor es este máximo
- Diferencias relativas de 6.67 % (nodo 2), 12.3 % (nodo 41) y 16.7 % (nodo 79)

## V. SEGUIMIENTO DE NÚCLEO \_ Descripción del concepto



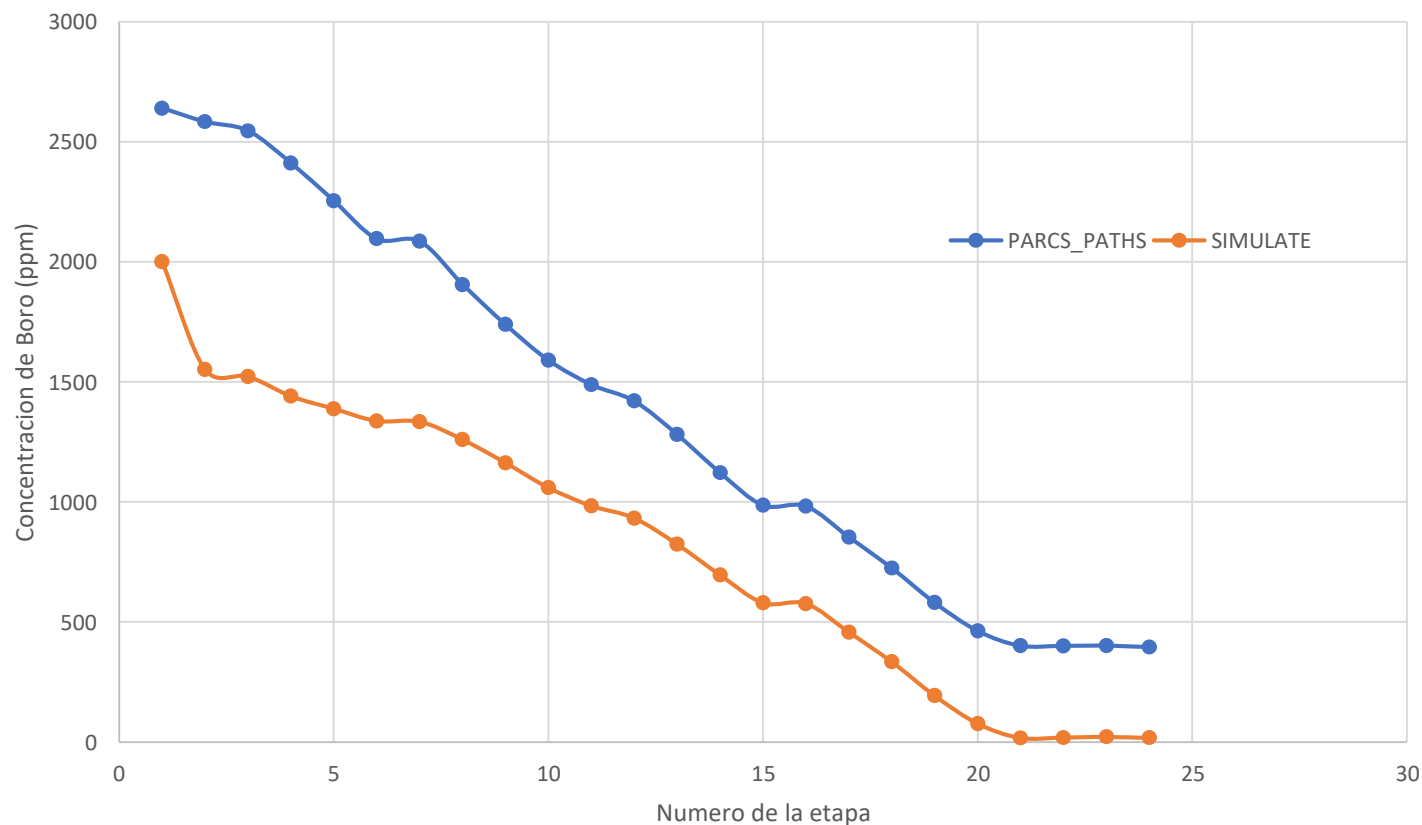
- Ciclo de un reactor = periodo entre dos recargas. De 12 a 24 meses.
- Seguimiento de núcleo = estudio de un ciclo de un reactor.
- Se divide el ciclo en etapas definidas por el incremento de quemado del combustible.
- Este quemado viene dado por :

$$Quemado = \frac{T_{etapa} \times P_{etapa}}{Loading}$$

Etapa	Burnup [GWd/MT]	Incremento burnup [GWd/MT]	P_etapa (%)	T_etapa (dias)
1	0,1531	0,1531	98,6	3,82
2	0,3558	0,2027	99,87	4,99
3	1,69	1,3342	99,78	32,89
4	2,8679	1,1779	99,9	29,00
5	4,0086	1,1407	99,9	28,08
6	4,0855	0,0769	99,83	1,89
7	5,3879	1,3024	100,23	31,96
8	6,6436	1,2557	99,86	30,93
9	7,7833	1,1397	100,16	27,99
10	8,594	0,8107	99,9	19,96
11	9,1418	0,5478	99,81	13,50
12	10,2796	1,1378	99,81	28,04
13	11,6236	1,344	100,01	33,05
14	12,7991	1,1755	99,81	28,97
15	12,8363	0,0372	99,7	0,92
16	13,9725	1,1362	99,96	27,96
17	15,1476	1,1751	99,96	28,91
18	16,4865	1,3389	100,16	32,88
19	17,6215	1,135	100,18	27,87
20	18,2378	0,6163	99,7	15,20
21	18,2781	0,0403	98,62	1,01
22	18,3103	0,0322	97,39	0,81
23	18,4303	0,12	95,73	3,08
TOTAL (dias)				453,70

*Etapas del ciclo*

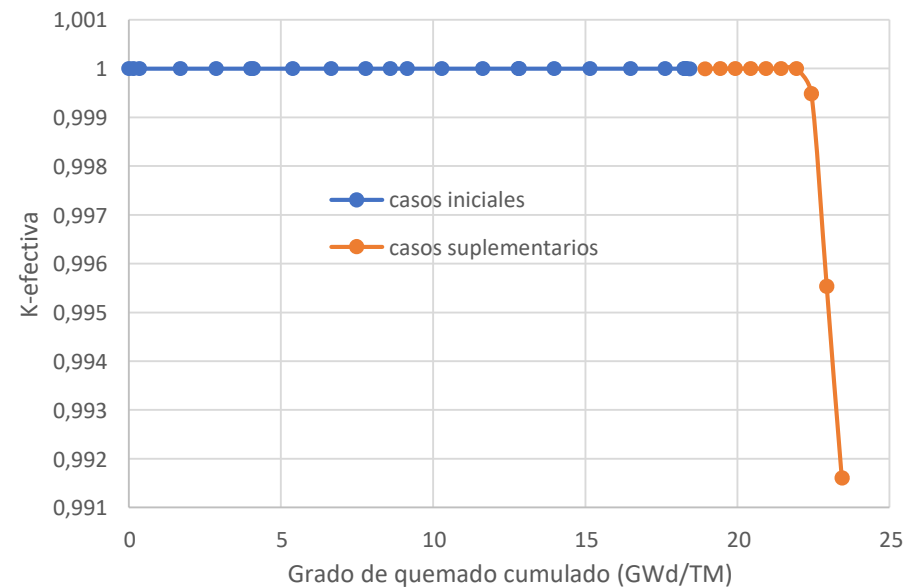
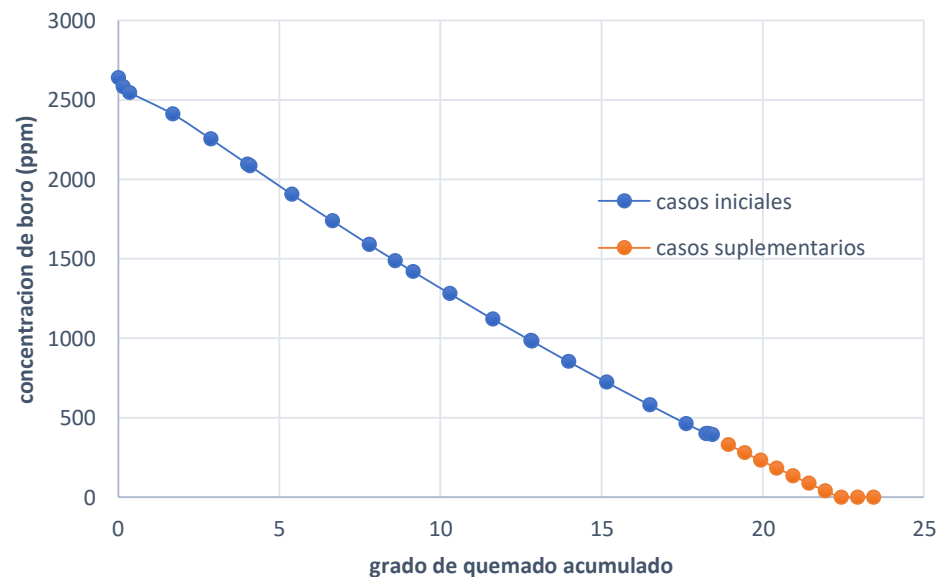
## V. SEGUIMIENTO DE NÚCLEO \_ Comparación con el modelo de referencia



### Concentración de boro (ppm) al lo largo del ciclo (etapa)

- Disminución en ambos modelos : la K efectiva esta fijada a 1
- Curvas muy diferentes : reactores modelados diferentes
- /!\ El modelo *PARCS/PATHS* no alcanza el final de su ciclo

## V. SEGUIMIENTO DE NÚCLEO \_ Estudio complementario



**Concentración de boro (ppm) al lo largo del ciclo (grado de quemado GWd/TM)**

- Disminución hasta alcanzar cero
- Progresión lineal

**K efectiva al lo largo del ciclo (grado de quemado GWd/TM)**

- Constante igual a 1 hasta ir bajando de manera brusca (no hay boro para compensar)

## V. SEGUIMIENTO DE NÚCLEO \_ Optimización de la disposición del combustible en el reactor



### Etapas del proceso

- Generación aleatoria de 25000 configuraciones (5 TB de información)
- Simulación automática de estos casos en los servidores del Instituto ISIRYM de la UPV
- Explotación de los resultados para una primera estimación del caso óptimo
- *Estudio futuro: uso de los datos como datos de entrada de una red neuronal*

0	0	0	0	0	0	22	22	22	22	22	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	22	22	22	7	7	7	22	22	22	0	0	0	0
0	0	0	22	22	7	8	6	2	6	8	7	22	22	0	0	0
0	0	22	22	7	6	3	2	4	2	3	6	7	22	22	0	0
0	22	22	7	2	3	2	3	2	3	2	3	2	7	22	22	0
0	22	7	6	3	2	3	1	3	1	3	2	3	6	7	22	0
22	22	8	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	8	22	22
22	7	6	2	3	1	3	2	3	2	3	1	3	2	6	7	22
22	7	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	7	22
22	7	6	2	3	1	3	2	3	2	3	1	3	2	6	7	22
22	22	8	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	8	22	22
0	22	7	6	3	2	3	1	3	1	3	2	3	6	7	22	0
0	22	22	7	2	3	2	3	2	3	2	3	2	7	22	22	0
0	0	22	22	7	6	3	2	4	2	3	6	7	22	22	0	0
0	0	0	22	22	7	8	6	2	6	8	7	22	22	0	0	0
0	0	0	0	22	22	22	7	7	7	22	22	22	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	22	22	22	22	22	0	0	0	0	0	0

*Patrón del núcleo del reactor*



## V. SEGUIMIENTO DE NÚCLEO \_ Optimización de la disposición del combustible en el reactor



### Estimación de un caso óptimo

- **Potencia máxima menor que un cierto valor**
  - Evita irregularidades de consumo
  - Criterio de seguridad
  - Valor común: 2.6 veces la media
- **Ciclo más largo posible**
  - Indica un aprovechamiento máximo del combustible
  - Consumo uniforme

rad_conf															
0	0	0	0	0	0	22	22	22	22	22	0	0	0	0	0
0	0	0	0	22	22	22	7	7	7	22	22	22	0	0	0
0	0	0	22	22	7	2	1	2	1	2	7	22	22	0	0
0	0	22	22	7	2	3	6	3	6	3	2	7	22	22	0
0	22	22	7	2	3	6	3	2	3	6	3	2	7	22	22
0	22	7	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	7	22
22	22	2	3	6	3	6	3	8	3	6	3	6	3	2	22
22	7	3	2	3	8	3	2	1	2	3	8	3	2	3	7
22	7	2	3	4	1	2	8	2	8	2	1	4	3	2	7
22	7	3	2	3	8	3	2	1	2	3	8	3	2	3	7
22	22	2	3	6	3	6	3	8	3	6	3	6	3	2	22
0	22	7	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	7	22
0	22	22	7	2	3	6	3	2	3	6	3	2	7	22	22
0	0	22	22	7	2	3	6	3	6	3	2	7	22	22	0
0	0	0	22	22	7	2	1	2	1	2	7	22	22	0	0
0	0	0	0	22	22	22	7	7	7	22	22	22	0	0	0
0	0	0	0	0	0	22	22	22	22	22	0	0	0	0	0

Mapa de combustible del caso 17603

### Caso 17603

- Potencia máxima de **2.5512 < 2,6**
- Ciclo más largo con una duración de **570.4 días** contra **569.5** para el peor caso

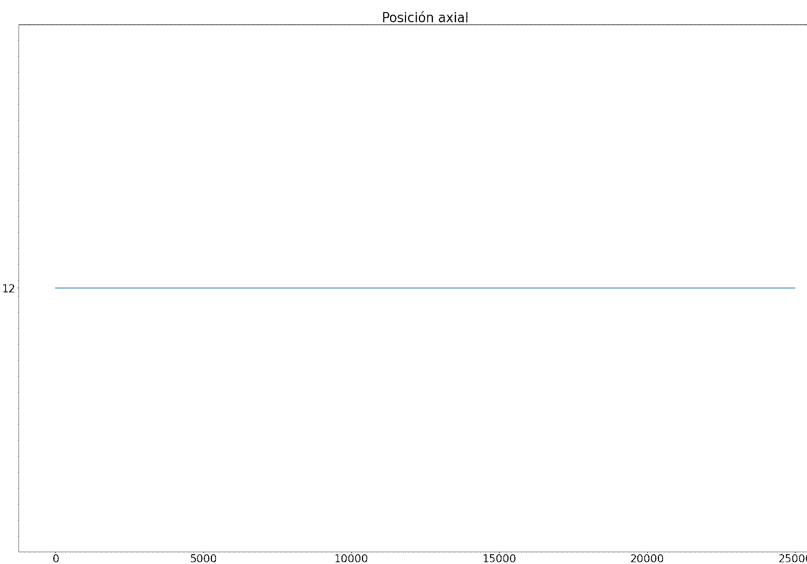
## VI. REDES NEURONALES

### \_ Preparación y comprensión de los datos: análisis

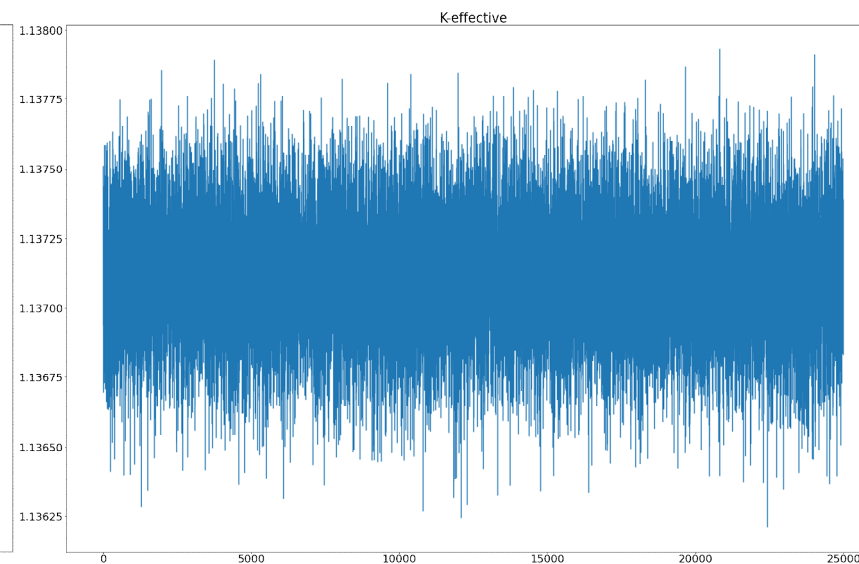


	K-effective	Radial_potencia	Axial_pot	Tres_D_pot
count	25000.000000	25000.000000	25000.000000	25000.000000
mean	1.137111	1.737108	1.354631	2.369725
std	0.000215	0.005503	0.000941	0.007086
min	1.136210	1.716200	1.351300	2.339200
25%	1.136970	1.733700	1.354000	2.365100
50%	1.137112	1.737500	1.354600	2.369900
75%	1.137254	1.740900	1.355200	2.374600
max	1.137932	1.757600	1.358700	2.398200

Valores estadísticos



Posición máxima en los casos



Distribución



## VI. REDES NEURONALES \_ Solución propuesta: redes neuronales *feedforward*



Dos redes neuronales: una para las tres potencias y la otra k-efectiva

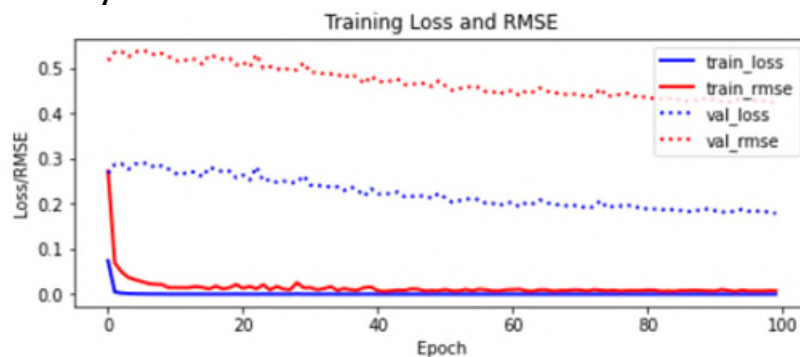
Primera:

Inicialmente:

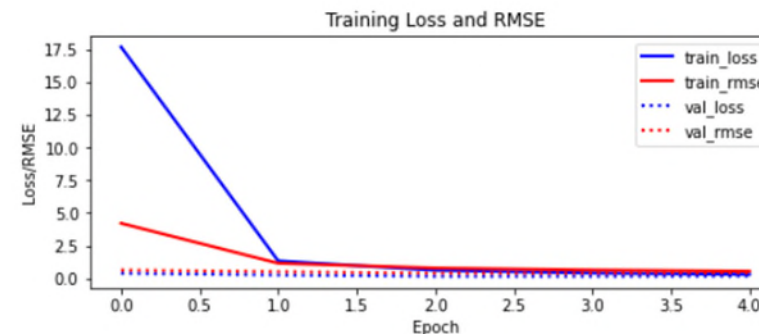
- 5 capas ocultas: 66, 59, 51, 46 y 41
- Función de activación *relu*:  $f(x) = \max(0, x)$
- Optimizador Adam
- *Epoch* y *batch size*: 100 y 64

Finalmente:

- *epoch* a 5 y el *batch size* a 1024



```
predicción
mape: 22.15724828024905
rmse: 0.42313131546267974
mae: 0.40783597343686623
```



```
predicción
mape: 22.606929618911742
rmse: 0.4110034552746237
mae: 0.3946487555054329
```

Gráficos de pérdida redes feedforward para potencias

## VI. REDES NEURONALES

\_ Solución propuesta: redes neuronales *feedforward*



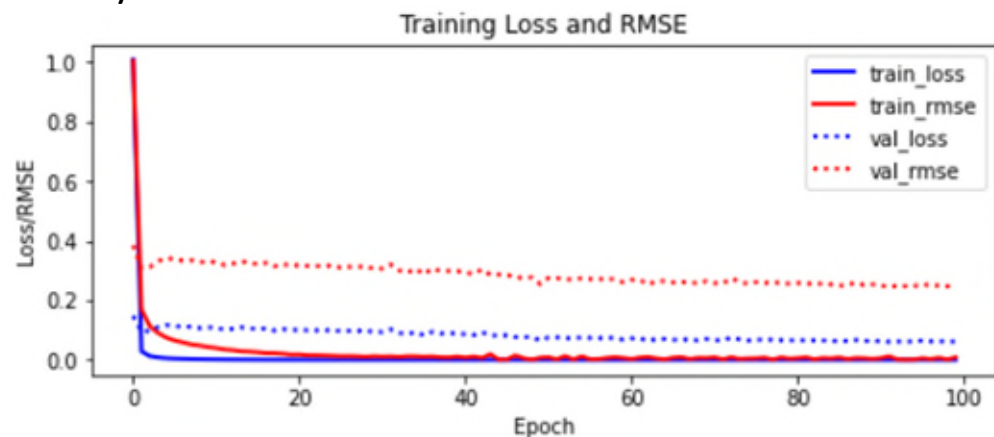
Segunda:

Inicialmente:

- Tres capas ocultas: 67, 50 y 45
- El resto de parámetros son iguales a la primera

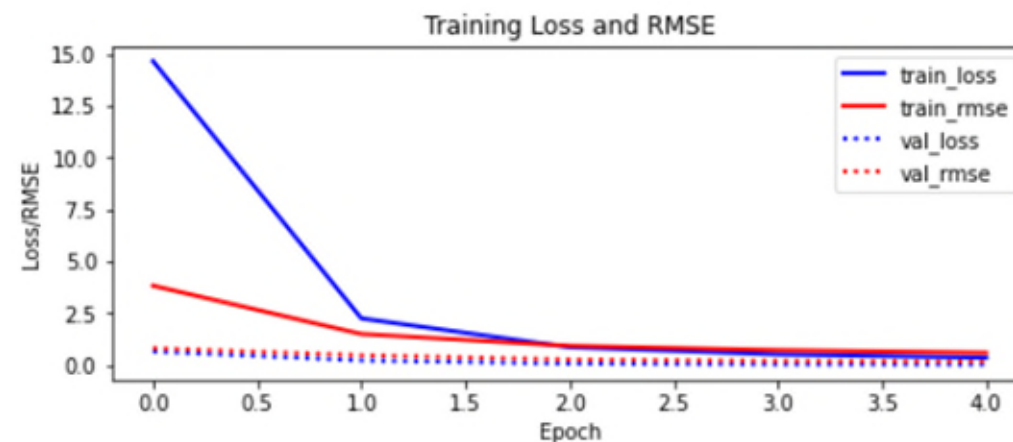
Finalmente:

- Dos capas ocultas 134 y 100 nodos
- *Epoch* a 5 y el *batch size* a 1024



predicción

mape: 21.802089562800525  
rmse: 0.2479144214668719  
mae: 0.2479141415991343



predicción

mape: 13.205890517676938  
rmse: 0.1801804508689389  
mae: 0.1501657440693299

Gráficos de pérdida redes feedforward para k-efectiva

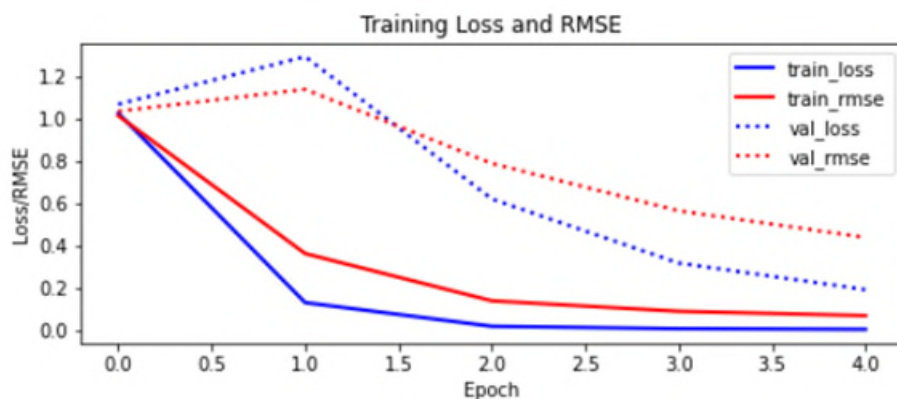
## VI. REDES NEURONALES

\_ Solución propuesta: redes neuronales convolucionales

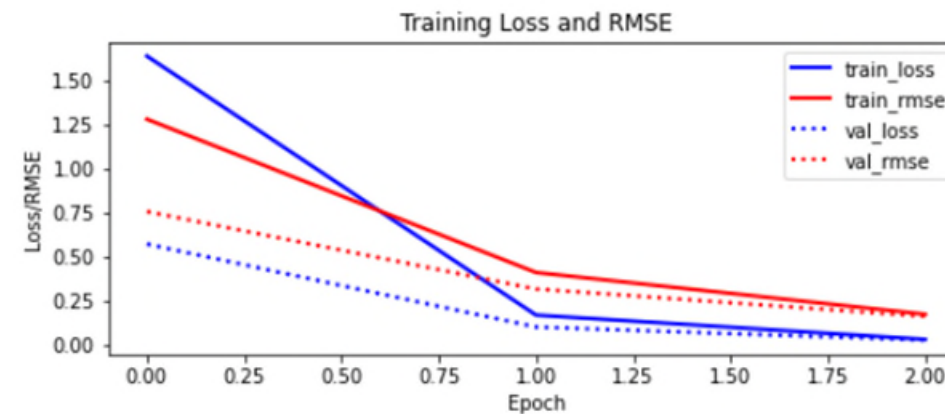


Primera de las redes:

- *filter size* de 32 para las redes neuronales
- *Average pool vs Max pool*



predicción  
mape: 21.018702499649184  
rmse: 0.4381274649836371  
mae: 0.3057832299306455



predicción  
mape: 8.498268291751945  
rmse: 0.16012963818571363  
mae: 0.1507239766524856

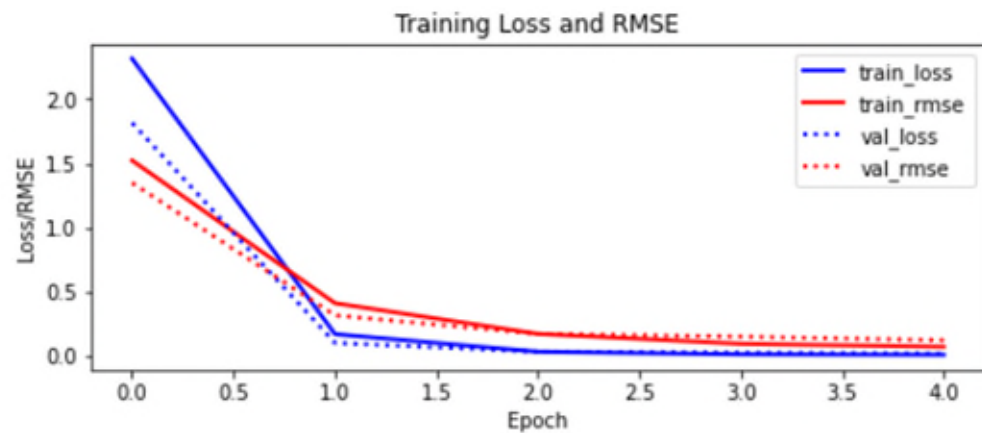
Gráficos redes convolucionales para el cálculo de potencias

## VI. REDES NEURONALES

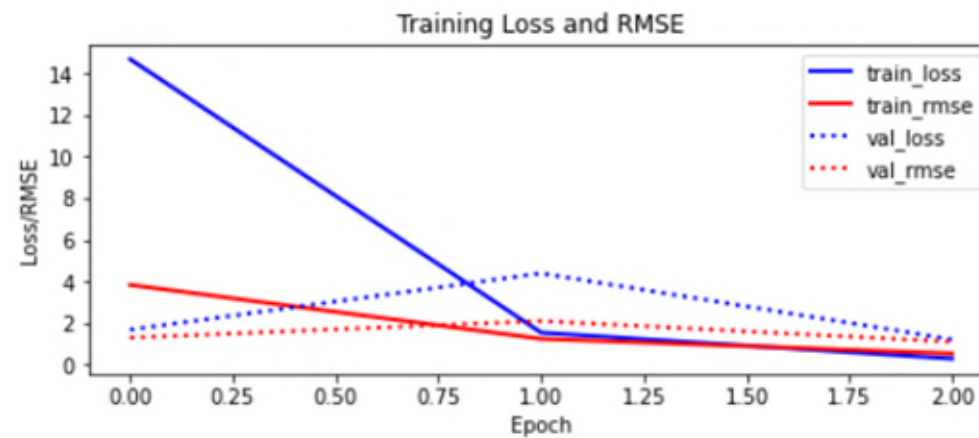
\_ Solución propuesta: redes neuronales convolucionales



Segunda: se han utilizado dos capas de filtro una 64 y otra de 128.



```
predicción
mape: 8.440164565386317
rmse: 0.11831770938751017
mae: 0.0959740820806784
```



```
predicción
mape: 96.18160738225285
rmse: 1.0987463908648296
mae: 1.0936923055124104
```

Gráficos de pérdida redes convolucionales para la k-efectiva

## VI. REDES NEURONALES

### \_ Resultados, propuesta



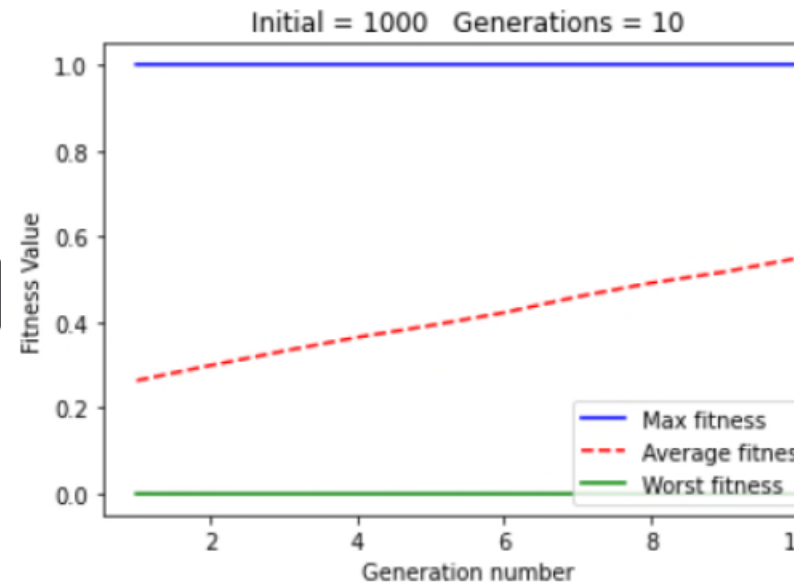
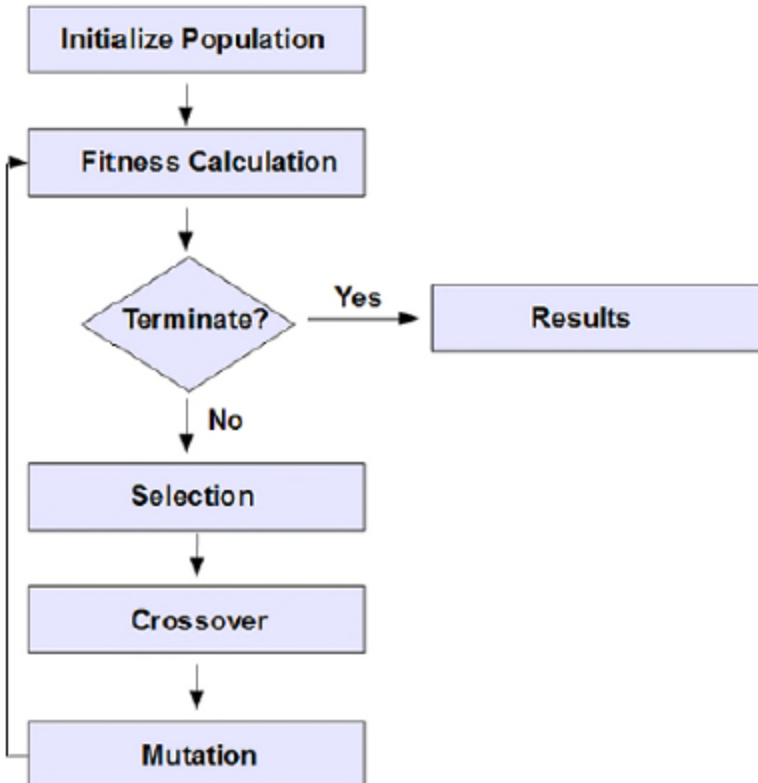
Reactores	Tiempo red neuronal	Tiempo PARCS
1	0.043 seg	2.066 seg
2	0.011 seg	2.089 seg
3	0.011 seg	2.082 seg
4	0.013 seg	2.065 seg
5	0.011 seg	2.075 seg
6	0.012 seg	2.068 seg
7	0.012 seg	2.085 seg
8	0.012 seg	2.093 seg
9	0.012 seg	2.064 seg
10	0.011 seg	2.093 seg

Coste computacional de los cálculos de la red neuronal respecto a PATHS/PARCS

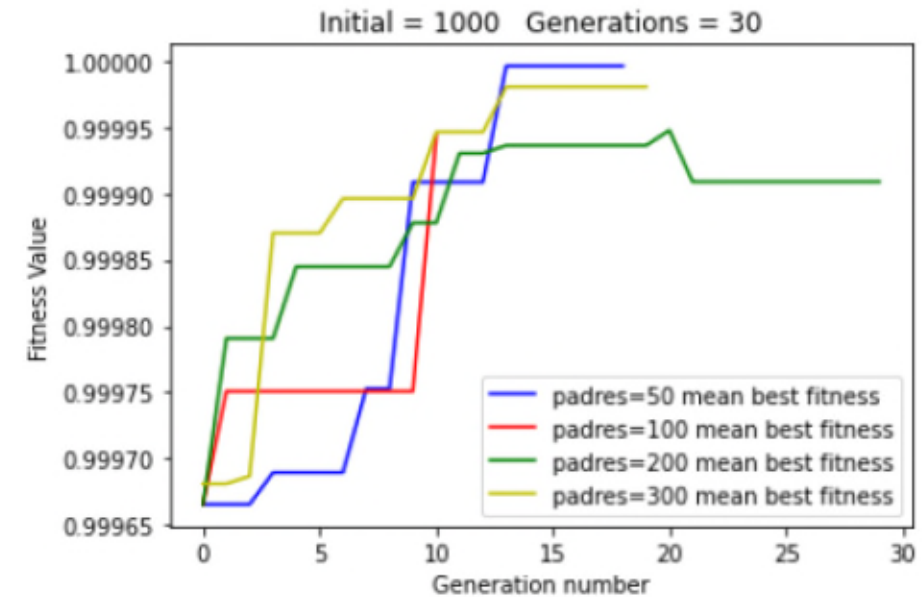
Red convolucional



## VII. ALGORITMO GENÉTICO \_ Optimización de la disposición del combustible en el reactor



Evolución del AG



Comparativa del número de padres escogidos

Esquema algoritmo genético



## VIII. TRABAJOS EN MARCHA Y CONCLUSIONES



- **Central BWR GE6**
- **Adaptación a de PWR y BWR a la nueva versión de PARCS v342**
- **Programación nuevas herramientas para :**
  - Analizar más variables como la PCT, CHF, etc.
- **Trabajos futuros**
  - Nuevo metamodelo con red neuronal
  - Optimización con algoritmo genético

## VIII. TRABAJOS EN MARCHA Y CONCLUSIONES



- **Modelos de validación**
  - 1D
  - 3D
  - Comparación de resultados
- **Desarrollo de un modelo de seguimiento de núcleo**
- **Explotación de varias herramientas para :**
  - Generación de 25000 casos
  - Simulación
  - Redes neuronales y AG
- **Trabajos futuros**
  - Analizar más variables como la PCT, CHF, etc.
  - Metamodelo con red neuronal
  - Optimización con algoritmo genético