



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

**TRABAJO FIN DE MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE LA  
CENTRAL NUCLEAR DE RINGHALS  
MEDIANTE EL CÓDIGO ACOPLADO  
TERMOHIDRÁULICO-NEUTRÓNICO 3D  
TRACE/PARCS**

AUTOR: CHRISTOPHE GAURAT

TUTOR: RAFAEL MIRO HERRERO

COTUTORES: TERESA MARIA BARRACHINA CELDA  
NICOLÁS OLMO-JUAN

**Curso Académico: 2018-19**





### Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecerles a mi familia y a Joseph Conesa su apoyo durante mi carrera.

Por otro lado, me gustaría dar las gracias a Rafael Miró y a Teresa Barrachina, por las tutorías y por la confianza que me han dado y el hecho de que siempre han estado dispuestos a responder todas mis dudas.

También gracias a Nicolás Olmo por su ayuda y a mis compañeros de máster por las horas compartidas.





## RESUMEN

Los reactores de agua a ebullición BWR están sujeto a oscilaciones de potencia en condiciones de operación determinadas, particularmente en situaciones de alta potencia y bajo caudal. Debido a la imposibilidad de estudiar dicho problema en la propia planta, se han desarrollado diversos códigos *Best Estimate* que permiten representar inestabilidades para posteriormente analizarlas y llegar a conocer en profundidad sus causas. El método de simulación utilizado en el presente trabajo es el acoplamiento de los códigos TRACE/PARCS. Para comprobar la validez de dicho método, se va a representar un evento de inestabilidad que tuvo lugar en la central nuclear de Ringhals.

Se realiza un análisis de estabilidad tridimensional en el dominio temporal sobre el reactor Ringhals 1, mediante el código acoplado TRACE/PARCS. Se analiza el caso conocido como “*BOC 14 Record 9*” en el *NEA Ringhals I BWR Stability Benchmark*. Este punto de test fue clasificado como una oscilación fuera de fase y se encuentra en la región de inestabilidad del mapa de potencia-caudal.

Se quieren reproducir los resultados estacionarios y transitorios obtenidos en el *benchmark*, utilizando un modelo simple del núcleo y un modelo detallado de la vasija. Se configuran estos dos modelos para cumplir las condiciones de operación del *benchmark*. Se obtienen similitudes de caudales y perfiles de potencia que permiten otorgar validez los modelos realizados por TRACE y PARCS. A partir de este punto, se analizan transitorios sin y con perturbación. Las perturbaciones son cuatro movimientos de barras diferentes con el fin de perturbar regiones simétricas del núcleo. Los resultados de los transitorios muestran oscilaciones en fase y fuera de fase en el reactor.

Palabras Clave: **Reactor de agua en ebullición (BWR)**, **Ringhals**, **Simulación**, **Inestabilidad**, **Oscilación fuera de fase**, **Validación de código**, **Códigos acoplados**, **TRACE**, **PARCS**.



## ABSTRACT

*Boiling Water Reactors (BWR) are subject to power oscillations under determined operating conditions, especially in low mass flow situations with a sufficiently high power. Due to the impossibility of studying this problem in the plant itself, several Best Estimate codes have been developed that allow to represent instabilities to later analyze them and get to know in depth their causes. The simulation method used in the present work is the coupling of the TRACE / PARCS codes. In order to verify the validity of this method, an instability event that took place at the Ringhals nuclear power plant will be represented.*

*A three-dimensional stability analysis is performed in the time domain on the Ringhals 1 reactor, with TRACE/PARCS coupled code. The case known as "BOC 14 Record 9" in the NEA Ringhals I BWR Stability Benchmark is analyzed. This test point was classified as an out-of-phase oscillation and is located in the instability region of the power-flow map.*

*The objective of this work is to reproduce stationary and transient results obtained in the benchmark, using a simple model of the core and a detailed model of the vessel. These two models are configured to meet the operating conditions of the benchmark. Similarities of flow rates and power profiles are obtained that allow to validate the models made by TRACE and PARCS. From this point, transients without and with disturbance are analyzed. The disturbances are four different control rod movements in order to disturb symmetric regions of the core. The results of the transients show in phase and out of phase oscillations in the reactor.*

**Key Words:** **Boiling Water Reactor (BWR)**, **Ringhals**, **Simulation**, **Instability**, **Out-of-phase oscillation**, **Code validation**, **Coupled codes**, **TRACE**, **PARCS**.



## DOCUMENTOS INCLUIDOS EN EL TRABAJO FINAL DE MASTER

- Memoria
- Presupuesto

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>DOCUMENTO 1: MEMORIA</b> .....	<b>1</b>
1 Objetivo .....	3
2 Introducción .....	5
3 Estabilidad en un reactor de agua en ebullición .....	7
3.1 Mapa potencia-caudal.....	7
3.2 Eventos de inestabilidad en BWR.....	8
3.3 Mecanismos de oscilación.....	9
3.4 Necesidad de un análisis de estabilidad.....	11
4 Códigos de simulación .....	13
4.1 Código TRACE .....	14
4.2 Código PARCS .....	15
4.3 Parámetros relevantes .....	15
4.4 Otros códigos.....	17
5 Simulación de la estabilidad en el reactor Ringhals 1 .....	19
5.1 Descripción del caso .....	19
5.2 Representación del núcleo .....	20
5.3 Modelos termohidráulicos del reactor con SNAP .....	28
5.4 Procedimiento de la simulación .....	31
5.5 Punto de referencia de la simulación.....	33
5.6 Perturbaciones .....	41
5.6.1 Perturbación global .....	42
5.6.2 Perturbación regional A.....	43
5.6.3 Perturbación regional B.....	44
5.6.4 Perturbación regional C.....	45



6	Resultados de los transitorios sin perturbación.....	47
6.1	Caudal a través del núcleo .....	47
6.2	Potencia térmica del reactor .....	49
6.3	Presión en el reactor .....	51
6.4	LPRMs.....	51
6.4.1	<i>Benchmark</i> .....	53
6.4.2	Modelo de los canales.....	57
6.4.3	Modelo de la vasija.....	61
6.5	Perfil radial de la potencia.....	65
6.5.1	Modelo de los canales.....	66
6.5.2	Modelo de la vasija.....	68
6.6	Perfil axial de la potencia .....	70
6.7	Caudal en los canales .....	70
6.7.1	Modelo de los canales.....	72
6.7.2	Modelo de la vasija.....	76
7	Resultados de los transitorios con perturbación .....	81
7.1	Potencia del reactor .....	81
7.2	LPRMs.....	83
7.3	Perfil radial de la potencia.....	92
7.4	Perfil axial de la potencia .....	97
7.5	Caudal en los canales .....	98
8	Conclusiones.....	109
9	Trabajos futuros .....	111
10	Bibliografía y referencias.....	113
	<b>DOCUMENTO 2: PRESUPUESTO</b> .....	<b>117</b>
11	Presupuesto.....	119





## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa potencia-caudal característico de un BWR. Fuente: [11] .....	7
Figura 2: Esquema del mecanismo de oscilación en un canal. Fuente: [10].....	10
Figura 3: Esquema del mecanismo de oscilación en el núcleo. Fuente: [10].....	10
Figura 4 : Potencia y caudal en el reactor durante el ciclo 14. Fuente: [1].....	19
Figura 5 : Mapa potencia-caudal de Ringhals 1. Fuente: [1].....	20
Figura 6 : Mapa radial de los nodos .....	21
Figura 7: Amplitudes de los modos según la descomposición modal del <i>Record 9</i> . Fuente: [19] .....	22
Figura 8 : Representación plana y 3D del modo fundamental. Fuente: [16] .....	23
Figura 9 : Representación plana y 3D del primer modo. Fuente: [16].....	23
Figura 10 : Representación plana y 3D del segundo modo. Fuente: [16].....	23
Figura 11 : Mapa termohidráulico.....	24
Figura 12 : Mapa de las barras de control.....	25
Figura 13 : Mapa radial de los LPRMs .....	27
Figura 14 : Modelo de los canales con SNAP.....	29
Figura 15 : Modelo de la vasija con SNAP .....	30
Figura 16 : Procedimiento de la simulación .....	32
Figura 17: Circulación del agua en la vasija.....	35
Figura 18: Perfil axial de la potencia relativa según el <i>benchmark</i> y los dos modelos termohidráulicos .....	38
Figura 19: Representación del perfil radial de la potencia relativa según el <i>benchmark</i> .....	39
Figura 20: Representación del perfil radial de la potencia relativa según el modelo de los canales ...	39
Figura 21: Representación del perfil radial de la potencia relativa según el modelo de la vasija .....	39
Figura 22 : Movimiento de las barras de control .....	41
Figura 23 : Distribución de los bancos para la perturbación global.....	42
Figura 24 : Distribución de los bancos para la perturbación regional A .....	43
Figura 25 : Distribución de los bancos para la perturbación regional B.....	44
Figura 26 : Distribución de los bancos para la perturbación regional C.....	45
Figura 27: Caudal másico a través del núcleo según el <i>benchmark</i> y los dos modelos termohidráulicos .....	48
Figura 28: Señal del APRM medio según el <i>benchmark</i> .....	49



Figura 29: Potencia térmica del reactor para los dos modelos termohidráulicos .....	50
Figura 30: Presión en el reactor según el <i>benchmark</i> y los dos modelos termohidráulicos.....	51
Figura 31: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a las posiciones axiales 1 y 3 según el <i>benchmark</i> .....	53
Figura 32: Señal de los LPRMs 5 y 12, 9 y 14, 30 y 25, 34 y 28 a las posiciones axiales 1 y 3 según el <i>benchmark</i> .....	54
Figura 33: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 1 según el <i>benchmark</i> .....	55
Figura 34: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 3 según el <i>benchmark</i> .....	56
Figura 35: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a las posiciones axiales 1 y 3 para el modelo de los canales .....	57
Figura 36: Señal de los LPRMs 5/12, 9/14, 30/25, 34/28 a las posiciones axiales 1 y 3 para el modelo de los canales .....	58
Figura 37: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 1 para el modelo de los canales.....	59
Figura 38: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 3 para el modelo de los canales.....	60
Figura 39: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a las posiciones axiales 1 y 3 para el modelo de la vasija	61
Figura 40: Señal de los LPRMs 5/12, 9/14, 30/25, 34/28 a las posiciones axiales 1 y 3 para el modelo de la vasija .....	62
Figura 41: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 1 para el modelo de la vasija.....	63
Figura 42: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 3 para el modelo de la vasija.....	64
Figura 43: Potencia relativa en los nodos 151/239, 166/248, 607/525, 622/534 para el modelo de los canales.....	66
Figura 44: Potencia relativa en los nodos 151, 166, 607, 622 para el modelo de los canales .....	67
Figura 45: Potencia relativa en los nodos 151/239, 166/248, 607/525, 622/534 para el modelo de la vasija.....	68
Figura 46: Potencia relativa en los nodos 151, 166, 607, 622 para el modelo de la vasija.....	69
Figura 47: Potencia relativa en los planos 11 y 17 para los dos modelos termohidráulicos .....	70
Figura 48: Caudal de entrada y de salida en los canales 109, 120, 139 y 163 para el modelo de los canales.....	72
Figura 49: Caudal de entrada y de salida en los canales 109/105, 120/122, 139/141, 163/160 para el modelo de los canales .....	73
Figura 50: Caudal de entrada en los canales 109, 120, 139 y 163 para el modelo de los canales.....	74
Figura 51: Caudal de salida en los canales 109, 120, 139 y 163 para el modelo de los canales .....	75
Figura 52: Caudal de entrada y de salida en los canales 109, 120, 139 y 163 para el modelo de la vasija .....	76



Figura 53: Caudal de entrada y de salida en los canales 109/105, 120/122, 139/141, 163/160 para el modelo de la vasija.....	77
Figura 54: Caudal de entrada en los canales 109, 120, 139 y 163 para el modelo de la vasija .....	78
Figura 55: Caudal de salida en los canales 109, 120, 139 y 163 para el modelo de la vasija.....	79
Figura 56 : Evolución de la potencia del reactor con las perturbaciones .....	82
Figura 57: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 1 a raíz de la perturbación global.....	84
Figura 58: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 1 a raíz de la perturbación regional A.	85
Figura 59: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 1 a raíz de la perturbación regional B.	86
Figura 60: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 1 a raíz de la perturbación regional C.	87
Figura 61: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 3 a raíz de la perturbación global.....	88
Figura 62: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 3 a raíz de la perturbación regional A.	89
Figura 63: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 3 a raíz de la perturbación regional B.	90
Figura 64: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 3 a raíz de la perturbación regional C.	91
Figura 65: Potencia relativa en los nodos 151, 166, 607, 622 a raíz de la perturbación global.....	93
Figura 66: Potencia relativa en los nodos 151, 166, 607, 622 a raíz de la perturbación regional A .....	94
Figura 67: Potencia relativa en los nodos 151, 166, 607, 622 a raíz de la perturbación regional B .....	95
Figura 68: Potencia relativa en los nodos 151, 166, 607, 622 a raíz de la perturbación regional C .....	96
Figura 69: Potencia relativa en los planos 11 y 17 a raíz de cada perturbación .....	97
Figura 70: Caudal de entrada en los canales 109, 120, 139 y 163 a raíz de la perturbación global .....	99
Figura 71: Caudal de entrada en los canales 109, 120, 139 y 163 a raíz de la perturbación regional A .....	100
Figura 72: Caudal de entrada en los canales 109, 120, 139 y 163 a raíz de la perturbación regional B .....	101
Figura 73: Caudal de entrada en los canales 109, 120, 139 y 163 a raíz de la perturbación regional C .....	102
Figura 74: Caudal de salida en los canales 109, 120, 139 y 163 a raíz de la perturbación global.....	103
Figura 75: Caudal de salida en los canales 109, 120, 139 y 163 a raíz de la perturbación regional A	104
Figura 76: Caudal de salida en los canales 109, 120, 139 y 163 a raíz de la perturbación regional B	105
Figura 77: Caudal de salida en los canales 109, 120, 139 y 163 a raíz de la perturbación regional C	106





## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros relevantes de TRACE y PARCS .....	16
Tabla 2 : Condiciones del caso <i>BOC 14 Record 9</i> . Fuente: [1] .....	19
Tabla 3 : Coeficientes de ponderación axial de los detectores .....	26
Tabla 4 : Componentes del modelo de los canales .....	29
Tabla 5 : Componentes del modelo de la vasija .....	30
Tabla 6 : Listado de los casos simulados .....	31
Tabla 7: Resumen de los puntos de referencia .....	34
Tabla 8: Resultados del caso estacionario acoplado para los dos modelos termohidráulicos .....	37
Tabla 9: Presión en el domo de vapor y temperatura en el <i>plenum</i> inferior de los puntos de referencia .....	40
Tabla 10 : Posición inicial de las barras de control.....	41
Tabla 11: Frecuencia de oscilación de la potencia del reactor sin perturbación .....	49
Tabla 12: Tabla comparativa de la señal de los LPRMs según el <i>benchmark</i> y los dos modelos termohidráulicos .....	52
Tabla 13: Tabla comparativa de la potencia relativa en los nodos para los dos modelos termohidráulicos .....	65
Tabla 14: Tabla comparativa de la potencia axial para los dos modelos termohidráulicos.....	70
Tabla 15: Tabla comparativa de los caudales másicos con los dos modelos termohidráulicos.....	71
Tabla 16 : Frecuencia de oscilación de la potencia del reactor con perturbaciones .....	81
Tabla 17 : Tabla comparativa de la señal de los LPRMs con las perturbaciones .....	83
Tabla 18: Tabla comparativa de la potencia en los nodos con las perturbaciones.....	92
Tabla 19: Tabla comparativa de la potencia axial con las perturbaciones.....	97
Tabla 20 : Tabla comparativa de los caudales másicos con las perturbaciones .....	98
Tabla 21: Presupuesto total .....	120



## LISTA DE ABREVIATURAS

PWR: Reactor de agua a presión / *Pressurized Water Reactor*

BWR: Reactor de agua en ebullición / *Boiling Water Reactor*

TRACE: *TRAC/RELAP Advanced Computational Engine*

PARCS: *Purdue Advanced Reactor Core Simulator*

SSA: *Steady State Alone Calculation*

CSS: *Coupled Steady-state Simulation*

CTR: *Coupled Transient Simulation*

USNRC: *U.S. Nuclear Regulatory Commission*

LPRM: *Local Power Range Monitor*

APRM: *Average Power Range Monitor*

TFM: Trabajo de Fin de Master

UPV: Universitat Politècnica de València.







# DOCUMENTO 1: MEMORIA





# 1 Objetivo

El objetivo del presente trabajo es la validación de la metodología TRACE/PARCS para la simulación de una inestabilidad fuera de fase en un BWR. Para su realización se ha diseñado un modelo en TRACE de una central nuclear real tipo BWR, concretamente la central nuclear de Ringhals 1. Los cálculos se han realizado mediante el acoplamiento del código TRACE/PARCS sobre un punto situado en la zona de inestabilidad del mapa de caudal-potencia que define la operación de dicha central, donde se encuentra una oscilación fuera de fase.

Las herramientas de simulación son dos códigos desarrollados por la USNRC que permiten la simulación de transitorios inestables en tiempos computacionales razonables. Los resultados obtenidos mediante el acoplamiento de los códigos TRACE/PARCS para los modelos realizados, tanto el modelo de los canales como el modelo del reactor detallado, se analizan con el objetivo de validar dicho procedimiento para la simulación de transitorios asimétricos.

Los pasos a seguir son los siguientes:

- Configurar los códigos TRACE y PARCS
- Reproducir las condiciones de operación del *BOC 14 Record 9* del *benchmark* de Ringhals 1
- Simular transitorios sin y con perturbación
- Comparar los resultados con los datos disponibles en el *benchmark*
- Destacar el fenómeno de oscilación fuera de fase
- Validar la metodología TRACE/PARCS

Para la validación de los resultados se toma como referencia el *benchmark* del mismo caso. El presente trabajo se inscribe en la continuidad de los trabajos previos realizados mediante RELAP/PARCS y TRACE/PARCS en el Departamento de Ingeniería Química y Nuclear de la Universitat Politècnica de València.





## 2 Introducción

Los reactores de agua en ebullición (BWR), junto con los reactores de agua a presión (PWR), son las principales fuentes de energía eléctrica de origen nuclear. Las centrales BWR están más sujetos a inestabilidades que los PWR debido a la circulación de un flujo bifásico en el reactor. Durante el desarrollo de las centrales BWR hubo una considerable preocupación sobre el posible efecto producido por las oscilaciones hidráulicas causadas por un acoplamiento neutrónico/termohidráulico y su mecanismo de realimentación. En las últimas décadas, aproximadamente treinta eventos de inestabilidad ocurrieron en las centrales BWR, tantos eventos controlados (test de estabilidad, por ejemplo) como eventos imprevistos (inestabilidad durante el arranque de una bomba de recirculación, por ejemplo). Para ciertas condiciones en el reactor, la potencia empieza a oscilar y con ella, otros parámetros como el caudal, la presión o la fracción de hueco.

En los últimos años se han desarrollado códigos informáticos capaces de simular transitorios e inestabilidades en reactores nucleares. En algunas centrales BWR, se provocan oscilaciones con el fin de establecer bases de datos experimentales. Uno de estos tests se realizó en el reactor Ringhals 1 en diferentes puntos de operación dentro de la zona de inestabilidad del mapa potencia-caudal. Los datos han sido reunidos en el *NEA Ringhals 1 BWR Stability Benchmark* y puesto a disposición de la comunidad científica. Permiten validar modelos y códigos computacionales a partir de situaciones reales que ocurrieron en el reactor.

Siguiendo esta perspectiva, el presente trabajo se enfoca a comprobar que el modelo computacional realizado mediante los códigos *best-estimate* TRACE/PARCS es capaz de simular el transitorio que tuvo lugar en la central y así poder validarlos. En este trabajo se utilizan los datos del *benchmark* para determinar las condiciones de operación y luego se realiza un análisis tridimensional, en el dominio temporal, de la estabilidad del reactor BWR de Ringhals I, mediante el código acoplado TRACE/PARCS.

La presente memoria tiene la siguiente estructura:

- El capítulo 3 presenta los principales efectos físicos que provocan oscilaciones en un BWR y así justifica por qué se realiza un análisis de estabilidad en un BWR.
- El capítulo 4 realiza una breve introducción de los dos códigos utilizados y del acoplamiento de códigos.
- El capítulo 5 comprende la parte principal del trabajo ya que se describe el caso de estudio, los modelos termohidráulico y neutrónico, los métodos de perturbación y el procedimiento del análisis.
- Los capítulos 6 y 7 muestran los resultados obtenidos y se explican.
- Los capítulos 8 y 9 presentan las conclusiones del trabajo e indican unas posibles líneas de investigación que se pueden seguir a partir del presente trabajo.
- El capítulo 11 propone un presupuesto al análisis.



### 3 Estabilidad en un reactor de agua en ebullición

En este capítulo se plantea generalidades sobre la estabilidad en las centrales BWR, en particular el mapa potencia-caudal en los BWR, algunos eventos de inestabilidad y los mecanismos de oscilación y se justifica la necesidad de un análisis de estabilidad. Se puede encontrar información adicional en las referencias [9, 10, 11].

#### 3.1 Mapa potencia-caudal

Los fenómenos de oscilación tienen más probabilidad de ocurrir en condiciones de bajo caudal y alta potencia. Hoy en día, la investigación está centrada en determinadas regiones del mapa de potencia-caudal de los reactores El mapa potencia-caudal de un reactor representa las zonas de operación permitida y las zonas de exclusión en función de la potencia y del caudal en el núcleo. La potencia en ordenadas y el caudal en abscisas se expresan en porcentaje de los valores nominales. En el mapa, se puede ver también isocurvas correspondientes a situaciones particulares como la línea del SCRAM o las líneas de posición de las barras de control.

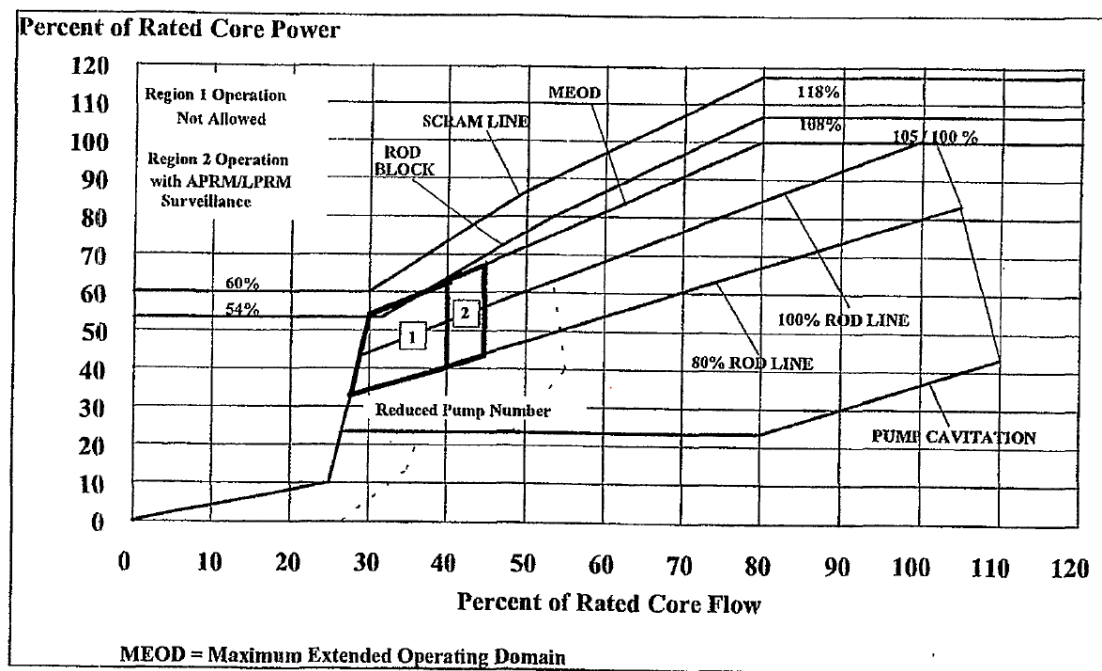


Figura 1: Mapa potencia-caudal característico de un BWR. Fuente: [11]

En la figura 1, se distingue dos zonas con líneas gruesas donde el reactor no puede operar en condiciones normales. Estas zonas se encuentran entre la línea correspondiente a una posición de las barras de control del 80% y la línea del MEOD. En la zona 1, no se permite la operación. Esta situación corresponde a un caudal bajo del 40%. En la zona 2, se permite la operación con la vigilancia de los detectores APRM y LPRM. Esta situación corresponde a un caudal bajo del 45%.



## 3.2 Eventos de inestabilidad en BWR

Existen dos tipos de eventos de inestabilidad, aquellos que han tenido lugar de forma inadvertida y los que han sido provocados de forma controlada para obtener datos experimentales y poder realizar distintos estudios a partir de dichos datos.

En el primer grupo se encuentran eventos como el ocurrido en la central LaSalle 2, Estados Unidos en 1988. Durante un test rutinario de mantenimiento, un técnico de instrumentación causó inadvertidamente una parada de las dos bombas de recirculación. Como consecuencia, el caudal másico de recirculación se redujo rápidamente del 76% al 29% del valor nominal, entrando así en condiciones de circulación natural. A su vez, algunas de las líneas de extracción de vapor hacia los precalentadores se aislaron, desembocando en un enfriamiento del caudal de alimentación al núcleo. Entre cuatro y cinco minutos después, se observaron oscilaciones de potencia superiores hasta un 50% respecto al valor nominal y aproximadamente a los 7 minutos desde el disparo de bombas, tuvo lugar el SCRAM. La potencia alcanzó un valor del 118% respecto de la nominal. Este evento ha sido clasificado como una oscilación en fase [9,11].

Dos eventos de inestabilidad ocurrieron en la central de Caorso, Italia en 1982 y en 1984. El primero evento tuvo lugar durante el arranque del reactor, con una potencia de 53,5% y un caudal de 38%. El punto de operación del reactor se encuentra en una zona inestable del mapa potencia-caudal y por efecto las oscilaciones divergieron. El SCRAM se produjo cuando la señal del APRM alcanzó 120% de la potencia. El segundo evento tuvo lugar después un transitorio de una bomba de recirculación y la pérdida de algunos precalentadores. El flujo de neutrones empezó a oscilar debido al agua de alimentación fría y a la distribución axial de potencia con picos. Estos eventos han sido clasificados como oscilaciones fuera de fase [11].

En el segundo grupo se encuentran eventos como el ocurrido en la central de Forsmark, Suecia en 1989. Se realizaron varios tests con puntos de operación alrededor del límite de estabilidad. Cuando la potencia fue 71% con un caudal de 4700 kg/s, el operador cambió de punto de operación utilizando el modo de control de la potencia. Después de una reducción del caudal en el núcleo, la potencia empezó a oscilar con una amplitud que aumentó de  $\pm 20\%$  en 20 segundos. A este momento, la potencia fue 63% con un caudal de 3700 kg/s. La oscilación siguió aumentando con una amplitud  $\pm 25\%$  en 18 segundos produciendo el SCRAM automático del reactor. La frecuencia de oscilación fue 0,4 Hz. Este evento ha sido clasificado como una oscilación en fase.

En la central Peach Bottom 2, Estados Unidos en 1977, unos tests de estabilidad a bajo caudal fueron realizados sobre la línea de potencia-caudal nominal en el extremo de bajo caudal, y sobre la línea de caudal-potencia que corresponde a la mínima velocidad de las bombas de recirculación en la región del mapa caudal-potencia donde las oscilaciones tienen una probabilidad mayor. Este evento ha sido clasificado como una oscilación fuera de fase. Es el objeto de un Trabajo Final de Master desarrollado en la Universitat Politècnica de València [9].

El evento en la central de Ringhals ha sido clasificado como una mezcla de oscilaciones en fase y fuera de fase. Es el objeto del presente trabajo y será detallado en el capítulo 5.





### 3.3 Mecanismos de oscilación

En 1956, un ingeniero electrónico del proyecto Dresden identificó el BWR como un amplificador con retroalimentación, lo que puede ser inestable si la fase de la señal de retroalimentación alcanza 180 grados con una ganancia de 1. En este caso, la retroalimentación sería regenerativa y provocaría una inestabilidad.

Hoy en día, los reactores BWR se consideran como sistemas de acoplamiento neutrónico/termohidráulico, con una realimentación entre ambos campos. Como todo sistema con realimentación, el comportamiento del reactor puede ser estable o inestable. El comportamiento será estable si en caso de perturbación, ésta es amortiguada con el tiempo. En cambio, si dicha perturbación se amplifica con el tiempo, el comportamiento será inestable. Cabe la posibilidad de que la oscilación producida mantenga una amplitud constante de forma indefinida, lo que se conoce como ciclo límite.

El agua que circula dentro del núcleo tiene dos funciones. Primero el agua funciona como refrigerante para extraer el calor generado en el núcleo. Segundo el agua funciona como moderador para reducir la energía de los neutrones rápidos hasta que se convierten en neutrones térmicos y alimenten el proceso de fisión nuclear. En un BWR, el agua pasando en los canales se evapora porque se consume la energía de fisión. Al cambiar de fase, también cambia la densidad del agua. El cambio que se produce en la densidad del moderador afecta fuertemente a la dinámica del reactor y particularmente la reactividad.

En un medio multiplicativo, la reactividad expresa la desviación entre el estado del medio y su estado crítico. Los valores positivos de esta magnitud corresponden a estados supercríticos y los negativos a estados subcríticos. Una reactividad nula corresponde a la criticidad del medio. En un reactor nuclear, la reactividad se ve afectada por la variación de la temperatura del combustible, de la temperatura del moderador, de la temperatura del refrigerante, de la fracción de huecos, de la concentración de boro y de la posición de las barras de control.

Las inestabilidades del tipo acoplamiento termohidráulico-neutrónico se conocen también como inestabilidades de reactividad porque la reactividad se ve afectada debido a los cambios en la fracción de huecos. El efecto es producido por una onda de densidad causada por el retraso equivalente al ritmo de los huecos que viajan a través del canal. Si el retraso es suficientemente largo, o el coeficiente de realimentación de huecos es suficientemente alto, la configuración del reactor se vuelve inestable, y el flujo de neutrones oscila con una frecuencia cercana a la inversa de la constante de tiempo de la onda de densidad.

Al ocurrir una inestabilidad, lo que aparece en el núcleo es una oscilación. Se conocen dos tipos de oscilaciones dentro de las inestabilidades acopladas:

- Oscilación en fase: todas las variables (potencia, caudal másico, presión, etc.) oscilan en fase en todos los canales definiendo un ciclo límite. También se conoce como una oscilación del núcleo completo.
- Oscilación fuera de fase: la potencia de una mitad del núcleo oscila fuera de fase respecto a la potencia de la otra mitad, es decir en un mismo tiempo, una parte del núcleo opera a alta

potencia mientras que la otra tiene un nivel muy bajo. El caudal en los canales de las dos mitades oscila también fuera de fase así, en el lado que exista alta potencia se tendrá un caudal bajo y viceversa. En cada paso de tiempo las regiones invierten su estado.

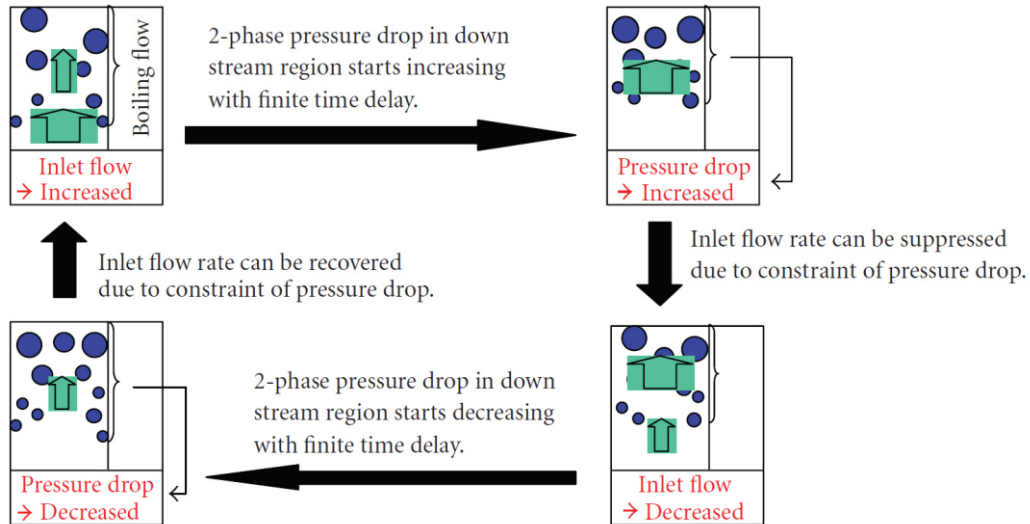


Figura 2: Esquema del mecanismo de oscilación en un canal. Fuente: [10]

En la figura 2, se ve el mecanismo de oscilación en un canal. La inestabilidad en un canal en ebullición es equivalente a una oscilación de la densidad del refrigerante, con una caída de presión constante a lo largo del canal. Hay que tener en cuenta que la caída de presión en un flujo bifásico es más importante que en un flujo de una fase para las condiciones de alta potencia y bajo caudal. La formación de vapor en el canal afecta a la caída de presión y provoca una oscilación del caudal a la entrada del canal.

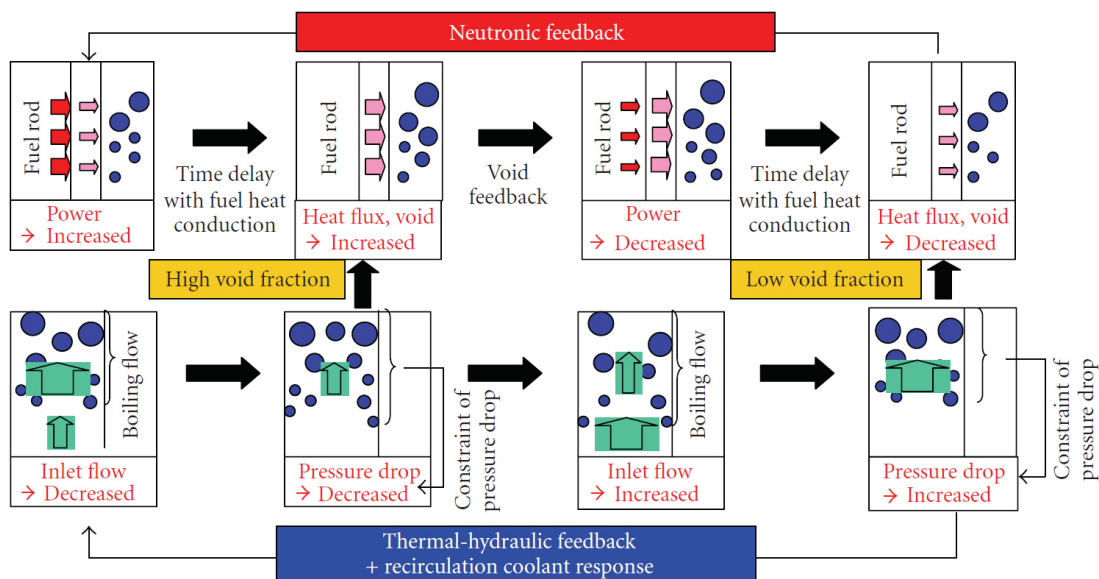


Figura 3: Esquema del mecanismo de oscilación en el núcleo. Fuente: [10]



Las inestabilidades del tipo acoplamiento termohidráulico-neutrónico están clasificada en dos grupos: las inestabilidades global y regional. En el primero grupo, la potencia oscila en fase en todo el núcleo mientras que en el segundo grupo la potencia en la mitad del núcleo oscila fuera de fase respecto a la otra mitad. La potencia oscila debido a la realimentación negativa de la fracción de hueco y al retraso en la conducción del calor del combustible (temperatura Doppler). Cuando una oscilación de potencia se sincroniza con una oscilación de densidad, se excitan las dos como lo describe la figura 3. La frecuencia de oscilación se encuentra entre 0,3Hz y 0,6Hz. La oscilación de potencia como la oscilación de densidad está inestable para las condiciones de alta potencia y bajo caudal.

### 3.4 Necesidad de un análisis de estabilidad

La USNRC elaboró varios criterios de diseño para establecer los requisitos mínimos en el diseño de una central nuclear. A continuación, se cita cuatro criterios de interés para justificar de la necesidad de un análisis de estabilidad.

*“Criterion 10 - Reactor design. The reactor core and associated coolant, control, and protection systems shall be designed with appropriate margin to assure that specified acceptable fuel design limits are not exceeded during any condition of normal operation, including the effects of anticipated operational occurrences.*

*Criterion 11 - Reactor inherent protection. The reactor core and associated coolant systems shall be designed so that in the power operating range the net effect of the prompt inherent nuclear feedback characteristics tends to compensate for a rapid increase in reactivity.*

*Criterion 12 - Suppression of reactor power oscillations. The reactor core and associated coolant, control, and protection systems shall be designed to assure that power oscillations which can result in conditions exceeding specified acceptable fuel design limits are not possible or can be reliably and readily detected and suppressed.*

*Criterion 13 - Instrumentation and control. Instrumentation shall be provided to monitor variables and systems over their anticipated ranges for normal operation, for anticipated operational occurrences, and for accident conditions as appropriate to assure adequate safety, including those variables and systems that can affect the fission process, the integrity of the reactor core, the reactor coolant pressure boundary, and the containment and its associated systems. Appropriate controls shall be provided to maintain these variables and systems within prescribed operating ranges.” [12]*

El criterio 12 esta utilizado para demostrar la estabilidad de un reactor. El diseño del reactor debe impedir o detectar y suprimir las oscilaciones de la potencia [15].





## 4 Códigos de simulación

Existen una gran variedad de códigos informáticos en el ámbito de la seguridad nuclear. Unos de los últimos desarrollados por la USNRC es el sistema de códigos TRACE/PARCS, con el fin de realizar análisis de estabilidad en reactores BWR. El desarrollo de dos códigos acoplados necesita un proceso de validación a partir de los datos de *benchmark*.

Para realizar los análisis de seguridad en las centrales nucleares se utilizan códigos *Best Estimate* (BE). La metodología *Best Estimate* (literalmente Mejor Estimación) es basada en simulaciones de los eventos transitorios con códigos computacionales cuyos modelos físicos están basados en resultados experimentales, modelos matemáticos realistas y suposiciones de la evolución del evento acordes con el conocimiento y la experiencia. El desarrollo de códigos computacionales de mejor estimación para análisis termohidráulicos, neutrónicos, de acoplamiento entre ellos, y de accidentes severos, ha sido un paso fundamental en la reducción de suposiciones y modelos netamente conservadores, y en la mejora del entendimiento de los fenómenos involucrados en la evolución de los transitorios. Esto se ha traducido en un conocimiento más detallado de las diversas fuentes de incertidumbre a considerar durante la simulación de un transitorio, y de la influencia de cada parámetro incierto en cada evento en particular. El análisis de incertidumbre sustituye al uso de márgenes conservadores [14].

Los códigos *best estimate* permiten simular dos tipos de casos:

- Caso estacionario: es la determinación del valor nominal estable de uno o más parámetros importantes de operación de una central nuclear.
- Caso transitorio: es cualquier variación significativa respecto al valor nominal estable de uno o más parámetros importantes de operación de una central nuclear.

Existen dos clases de códigos que permiten una evaluación de la estabilidad de un BWR:

- Códigos en el dominio de la frecuencia, cuyo propósito es el análisis de estabilidad lineal de un BWR con una computación rápida y sin difusión numérica. Están basados en la linealización y la aplicación de la transformación de Laplace.
- Códigos en el dominio temporal, que incluyen herramientas de análisis específicas que permiten la simulación de transitorios. La computación está más lenta que la del dominio de la frecuencia y la difusión numérica depende del modelo numérico. Estos códigos permiten trabajar con los sistemas no lineales y 3D.

El comportamiento dinámico de un BWR se describe mediante un modelo no lineal, así pues, es necesario la aplicación de un código computacional que permita modelar este tipo de sistemas, por lo tanto, es interesante trabajar en el dominio del tiempo.

El presente trabajo se ha realizado con los códigos *best-estimate* TRACE y PARCS.



## 4.1 Código TRACE

TRACE (*TRAC/RELAP Advanced Computational Engine*) es la última versión de una serie de códigos termohidráulicos *best-estimate* desarrollados por la *U.S. Nuclear Regulatory Commission* para el análisis del comportamiento neutrónico y termohidráulico tanto para transitorios como para estacionarios en reactores de agua ligera [3, 5, 6]. Es el producto de un gran esfuerzo para combinar las capacidades de los cuatro códigos principales desarrollados por la NRC (TRAC-P, TRAC-B, RELAP5 y RAMONA) en un único código. En este trabajo, se utiliza la versión 5 de TRACE con el *patch* 3. El método de cálculo es el método SETS que permite ajustar el paso de tiempo con el fin de obtener un número de Courant cerca de 1 y de reducir la difusión numérica. El propósito del método SETS es eliminar el límite de estabilidad de Courant con la mínima cantidad de alteraciones posibles sobre el método semi-implícito.

El código resuelve un sistema de seis ecuaciones para un flujo bifásico:

- Ecuación de conservación de la masa para la fase líquida y la fase gaseosa.
- Ecuación de conservación del momento para la fase líquida y la fase gaseosa.
- Ecuación de conservación de la energía para la fase líquida y la fase gaseosa.

Se encarga también del cálculo de la transferencia de calor entre el combustible y el refrigerante.

Debido a las ecuaciones en las que se basa TRACE para realizar el cálculo, es muy difícil simular oscilaciones. La razón es la difusión numérica. Para medir dicha difusión, se utiliza el número de Courant, que es la relación entre la velocidad, el paso de tiempo y el tamaño de nodo. Su relación se expresa de la siguiente forma:

$$C = \frac{u * \Delta t}{\Delta x} \quad (1)$$

De esta forma, la difusión numérica será menor, cuanto más cercano sea el número de Courant a 1 [7].

TRACE usa un sistema basado en componentes para modelar el reactor nuclear y los sistemas asociados. Cada pieza puede ser representada como un componente, y cada componente puede nodalizarse en celdas en las que las ecuaciones de fluidos, conducción de calor y energía cinética son promediadas.

El fichero de entrada o *input* de TRACE se divide en *cards* donde se incluyen los parámetros de entrada y sus valores. La *main data card* contiene los parámetros de definición del problema, los parámetros de cálculo y de convergencia y la lista de los componentes. La *control system card* contiene los parámetros de control. La *component data card* contiene los parámetros de cada componente. La *time steps card* contiene los parámetros de tiempo de simulación y de edición de resultados. El fichero ejecutable con la extensión *.exe* tiene que estar en la misma carpeta que el *input*.

TRACE tiene la posibilidad de seguir un cálculo a partir de los resultados de un cálculo anterior. Los resultados se guardan en fichero *restart* y pueden servir de punto de partida para un nuevo cálculo.



## 4.2 Código PARCS

PARCS (*Purdue Advanced Reactor Core Simulator*) es un código neutrónico desarrollado por la USNRC. En este trabajo se utiliza la versión 3. El método de resolución es un híbrido entre *Analytical Nodal Method/Nodal Expansion Method* (ANM/NEM). El código resuelve la ecuación de la difusión en función del tiempo para un sistema multigrupo de neutrones en una geometría tridimensional teniendo en cuenta los neutrones precursores y diferidos. Se considera dos grupos de neutrones instantáneos y seis grupos de diferidos. Las condiciones de contorno para la ecuación de la difusión son de flujo nulo en la superficie exterior del reflector. PARCS calcula también las distribuciones de potencia en función del tiempo [2, 4].

El fichero de entrada o *input* de PARCS se divide en *cards* donde se incluyen los parámetros de entrada y sus valores. La *control card* contiene los parámetros de definición del problema. La *param card* contiene los parámetros de cálculo y de convergencia. La *xsec card* contiene los parámetros de las secciones eficaces. La *geom card* contiene la geometría del núcleo. La *TH card* contiene los parámetros del modelo termohidráulico. La *tran card* contiene los parámetros de definición del transitorio y los movimientos de barras de control.

Además del fichero del *input*, se puede añadir ficheros externos y tienen que estar en la misma carpeta que el *input*. PARCS tiene la posibilidad de seguir un cálculo a partir de los resultados de un cálculo anterior. Los resultados se guardan en fichero *restart* y pueden servir de punto de partida para un nuevo cálculo. El fichero *GEOM\_LWR* define la geometría del núcleo para cada plano, la posición de las barras de control y la posición de los detectores. El nombre del fichero tiene que aparecer en la *geom card*. El fichero *Nemtabr* define los valores de las secciones eficaces para los nodos rodeado por barras de control (*rodded cross sections*). El fichero *Nemtab* define los valores de las secciones eficaces para los nodos no rodeados por barras de control (*unrodded cross sections*). El fichero *3D\_Xenon\_Number\_Density* define los valores de la densidad del Xenón. Estos ficheros tienen que aparecer en la *xsec card*.

TRACE y PARCS están acoplados, lo que significa que intercambian información en cada paso de tiempo. De un lado, TRACE calcula la temperatura y densidad del moderador y la temperatura del combustible en cada paso de tiempo y se las envía a PARCS. Del otro lado PARCS evalúa el impacto de dichas variables en las secciones eficaces y calcula la distribución de potencia para el mismo paso de tiempo. Con los datos que PARCS le devuelve a TRACE, éste resuelve la ecuación de la transferencia de calor en los componentes del núcleo. Para activar (o desactivar) el proceso acoplado, hay que asignar un 1 (o un 0) al parámetro *itdmr* en el *input* de TRACE.

Para que se coincide la discretización espacial/estructura nodal del problema en PARCS y en TRACE, hay que aportar un mapa de correspondencia entre los nodos termohidráulicos y los nodos neutrónicos. Este mapa se llama MAPTAB y tiene que estar en la misma carpeta que los ficheros de entrada

## 4.3 Parámetros relevantes

En esta sección se detalla los parámetros relevantes para desarrollar este trabajo.

Parámetros		Valor	Descripción	
TRACE	Main data card	<i>itdmr</i>	0	Sin acoplar
			1	Con acoplamiento
		<i>nosets</i>	0	Método de cálculo SETS
		<i>dstep</i>	0	Cálculo inicial
			-1	Calculo con <i>restart</i>
		<i>stdyst</i>	1	Estacionario
			0	Transitorio
		<i>transi</i>	0	Estacionario
	1		Transitorio	
	<i>epss</i>	10E-3	Criterio de convergencia para el caso estacionario	
	Time steps card	<i>dtmin</i>	1,00E-15	Paso de tiempo mínimo (s)
		<i>dtmax</i>	0,01 / 0,001	Paso de tiempo máximo (s)
		<i>tend</i>	180	Duración del problema (s)
		<i>edint</i>	5	<i>Long-print edit interval (s)</i>
<i>gfint</i>		0,1 / 0,01	<i>Intervalo de edición de gráficos (s)</i>	
<i>dmpint</i>		10	<i>Restart-dump edit interval (s)</i>	
<i>sedint</i>		0,1	<i>Short-print edit interval (s)</i>	
PARCS	Control card	<i>CORE_TYPE</i>	BWR	Tipo del reactor
		<i>CORE_POWER</i>	72,6	Potencia inicial del reactor en %
		<i>BANK_POS</i>	0 hasta 100	Posición inicial de las barras de control (0% <i>in</i> , 100% <i>out</i> )
		<i>DETECTOR</i>	F	Calculo sin LPRMs
			T	Calculo con LPRMs
		<i>TRANSIENT</i>	F	Estacionario
			T	Transitorio
		<i>RESTART</i>	F	Cálculo inicial
	T		Calculo con <i>restart</i>	
	<i>fichiero.parcs_rst</i>		Nombre del fichero del <i>restart</i>	
	<i>Param card</i>	<i>NODAL_KERN</i>	HYBRID	Método híbrido ANM/NEM
	<i>Xsec card</i>	<i>EFIL_XS_UR</i>	<i>nemtab</i>	<i>External file for unrodded cross sections</i>
		<i>EFIL_XS_R</i>	<i>nemtabr</i>	<i>External file for rodded cross sections</i>
		<i>EFIL_XENON</i>	<i>fichiero.txt</i>	<i>External file for Xenon Number Density in PBTT Benchmark</i>
<i>Geom card</i>	<i>file</i>	<i>GEOM_LWR</i>	Fichero externo de la geometría del núcleo	
<i>Tran card</i>	<i>move_bank</i>	1 0 100	Movimiento de las barras de control (banco, tiempo (s), posición %)	

Tabla 1: Parámetros relevantes de TRACE y PARCS





## 4.4 Otros códigos

SNAP (*Symbolic Nuclear Analysis Package*) consiste en una aplicación que integra en sí misma un conjunto de herramientas para simplificar el análisis de simulaciones termohidráulicas mediante diferentes códigos. Esta aplicación permite una gran flexibilidad en la creación y edición de entradas para los códigos termohidráulicos más empleados en el análisis de accidentes en centrales nucleares además de permitir una gran funcionalidad en la ejecución, seguimiento e interacción con los códigos y sus resultados.

El código RELAP5 (*Reactor Excursion and Leak Analysis Program*) fue desarrollado por el INEL y la U.S. Nuclear Regulatory Commission como apoyo a cálculos de licenciamiento, evaluación de guías y procedimientos de operación de emergencia, diseño y análisis de experimentos, así como para la simulación y análisis de transitorios en plantas nucleares. Se trata de un código que permite analizar el comportamiento dinámico del sistema de refrigeración de un reactor durante un transitorio. RELAP5 puede ser utilizado en el estudio de una amplia gama de transitorios tanto de tipo hidráulico como térmico siendo también posible su uso en sistemas no nucleares.

VALKIN es un código neutrónico 3D, desarrollado en la Universitat Politècnica de València, capaz de integrar la ecuación temporal de la difusión neutrónica, dentro del núcleo del reactor, mediante una aproximación de dos grupos de energía, utilizando un método nodal-modal. El código requiere valores de secciones eficaces nodales, así como la geometría y un número específico de parámetros como entrada. Con este código es posible obtener la evolución temporal del flujo neutrónico y sus armónicos (modos) durante un transitorio [7, 16, 17, 18].



## 5 Simulación de la estabilidad en el reactor Ringhals 1

### 5.1 Descripción del caso

Ringhals 1 es un reactor BWR diseñado por ABB y situado en Suecia. Su potencia térmica nominal es 2270 MW lo que corresponde a 100% de la potencia. El caudal másico nominal a través del núcleo es 7000kg/s lo que corresponde a 100% del caudal. Desde 1990 hasta 1993, se realizaron tests de estabilidad compuestos por 4 ciclos y 41 puntos de operación. En 1994, se comunicó el *benchmark* de los resultados a la comunidad científica. En este trabajo, se analiza el caso conocido como el punto de operación del *BOC 14 Record 9* del *NEA Ringhals I BWR Stability Benchmark* [1]. Este punto de test se clasificó como una oscilación fuera de fase. Las condiciones de operación del punto estudiado se resumen en la tabla 2.

Potencia térmica		Caudal másico en el núcleo		Caudal del bypass	Frecuencia	Decay ratio
MWt	%	kg/s	%	kg/s	Hz	-
1648	72,6	3694	52,77	430	0,56	0,8

Tabla 2 : Condiciones del caso *BOC 14 Record 9*. Fuente: [1]

El ciclo 14 duró cuatro días durante los que se tomaron 8 registros de medidas. La figura 4 representa el histórico de potencia y caudal del ciclo 14. Se puede ver que el punto 9 corresponde a un aumento de la potencia y una reducción del caudal.

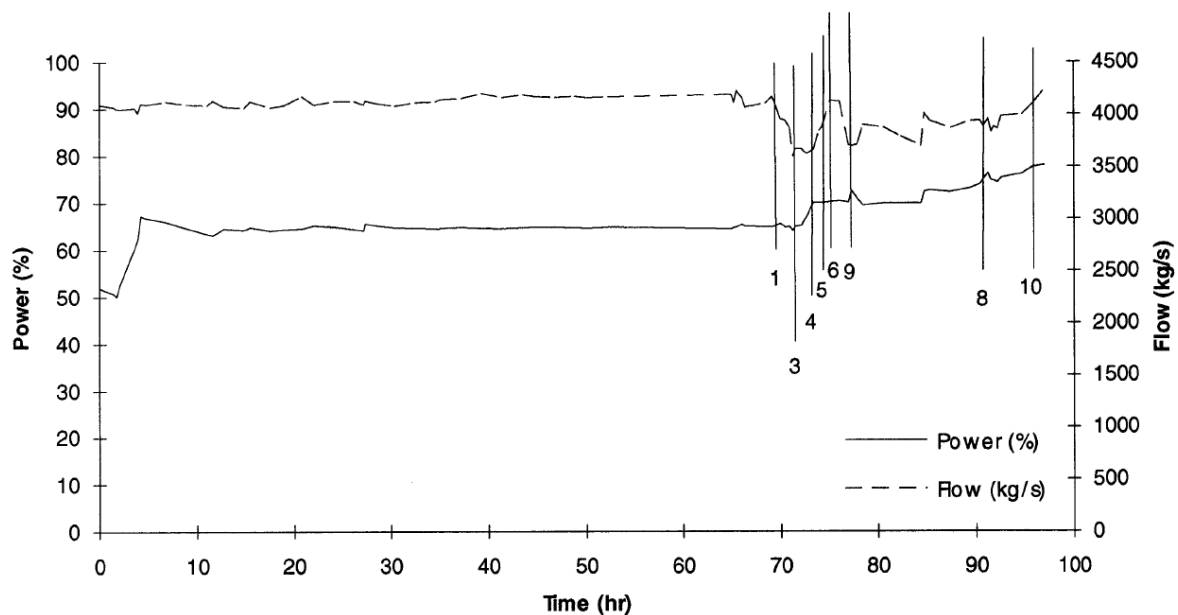


Figura 4 : Potencia y caudal en el reactor durante el ciclo 14. Fuente: [1]

En el mapa potencia-caudal (Figura 5), aparecen los puntos de operación de todos los ciclos. La línea representa el límite de operación del reactor. El punto 9 del ciclo 14 (en rojo) se encuentra en una región donde las inestabilidades son muy probables.

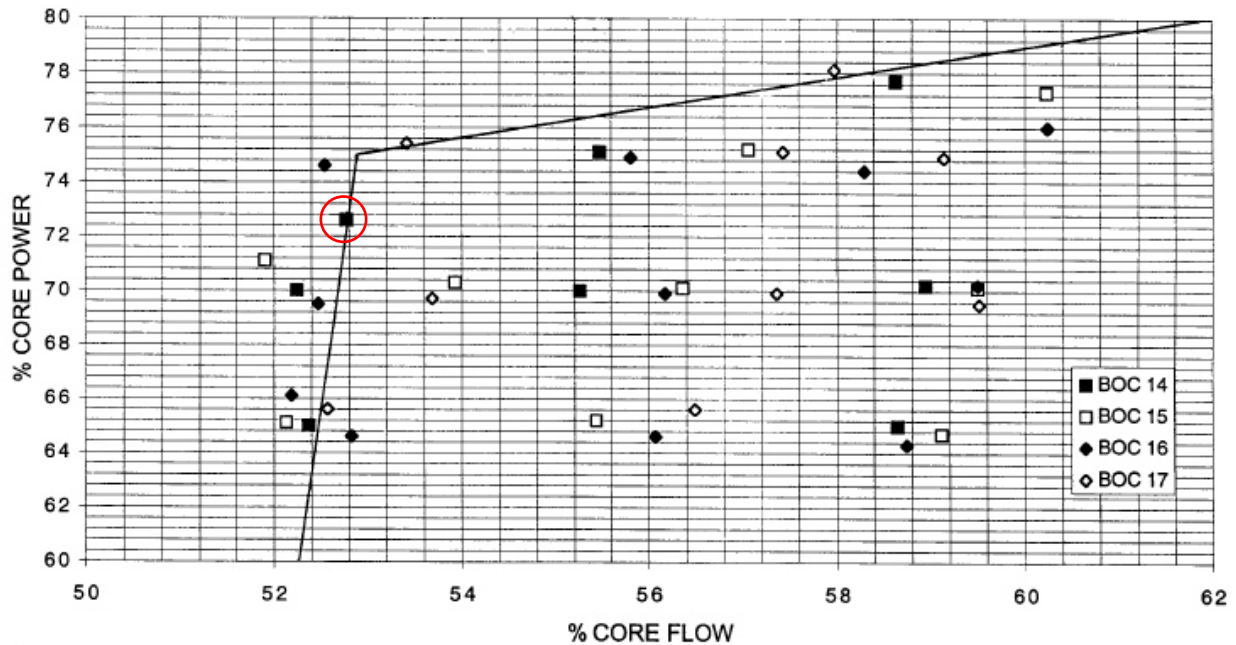


Figura 5 : Mapa potencia-caudal de Ringhals 1. Fuente: [1]

## 5.2 Representación del núcleo

La nodalización y el *mapping* del problema es el resultado de un trabajo previo [7, 16, 17, 18]. La nodalización es la división del problema en celdas donde se promedian las variables físicas. Un tamaño de celda pequeño aumenta el número de celdas y así la precisión de las variables, pero también aumenta el tiempo de computación. Hay que encontrar el equilibrio entre precisión de los cálculos y tiempo de computación razonable. El *mapping* que representa la relación entre la termohidráulica y la neutrónica se ha basado en la forma espacial de los modos Lambda. Dichos modos han sido calculados previamente mediante el código VALKIN, desarrollado íntegramente en la UPV. Se demuestra que utilizando dicho *mapping* se desacoplan canales que pueden tener distinto tipo de oscilación, de forma que los patrones de oscilación obtenidos son libres.



Las secciones eficaces, utilizadas por el código neutrónico, se han obtenido mediante la metodología SIMTAB desarrollada en la UPV junto con Iberdrola. Los conjuntos de secciones eficaces generados constan de 1303 composiciones diferentes, considerando 53 tipos diferentes de elementos combustibles. Las condiciones de Xenón consideradas en la simulación vienen dadas por la condiciones 3D obtenidas con el código SIMULATE-3.

El mapa de equivalencia entre las nodalizaciones termohidráulica y la neutrónica (*mapping*) está basado en la forma espacial del fundamental, primer y segundo armónico de la potencia del reactor, calculados mediante el código VALKIN. Se escoge este *mapping* para no condicionar el patrón de oscilación del núcleo del reactor. Las Figuras 8 a 10 muestran los primeros tres modos Lambda calculados con VALKIN. La representación plana del primer y segundo armónico de la potencia divide el núcleo en cuatro cuadrantes.

La forma del primer armónico divide el núcleo en dos partes según una línea horizontal. La amplitud del primer modo en la mitad superior es de signo contrario al de la mitad inferior, es decir que el primer modo en la mitad superior oscila con un desfase de  $180^\circ$  (oposición de fase) respecto a la mitad inferior. Entonces si se excita el primer modo, la potencia en los dos cuadrantes de la mitad superior oscila en fase mientras que oscila en oposición de fase respecto a la mitad inferior. La forma del segundo armónico divide el núcleo en dos partes según una línea vertical. La amplitud del segundo modo en la mitad derecha es de signo contrario al de la mitad izquierda, es decir que el segundo modo en la mitad derecha oscila con un desfase de  $180^\circ$  (oposición de fase) respecto a la mitad izquierda. Entonces si se excita el segundo modo, la potencia en los dos cuadrantes de la mitad derecha oscila en fase mientras que oscila en oposición de fase respecto a la mitad izquierda.

En cuanto al fundamental, la amplitud de oscilación está muy pequeña respecto al valor medio del fundamental, entonces se puede descuidar la contribución del fundamental a la oscilación. En la figura 7, se ve las amplitudes del fundamental y de los dos primeros modos, siendo el primer modo con la mayor amplitud de oscilación [19]. Entonces se puede esperar que la potencia en los dos cuadrantes de la mitad superior oscila en fase mientras que oscila en oposición de fase respecto a la mitad inferior.

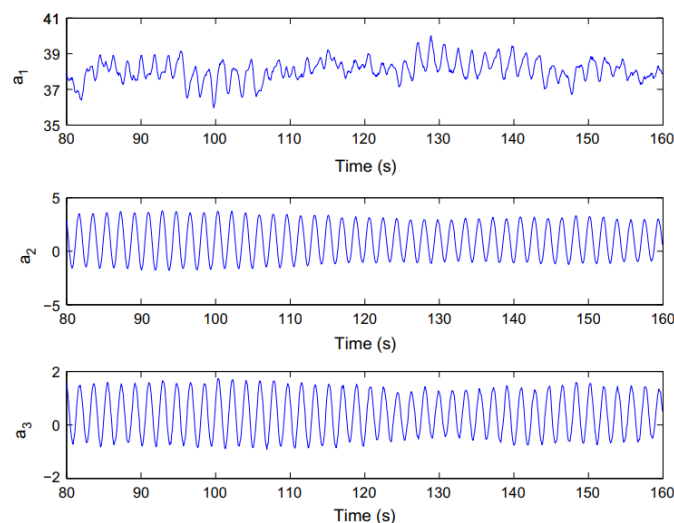


Figura 7: Amplitudes de los modos según la descomposición modal del *Record 9*. Fuente: [19]

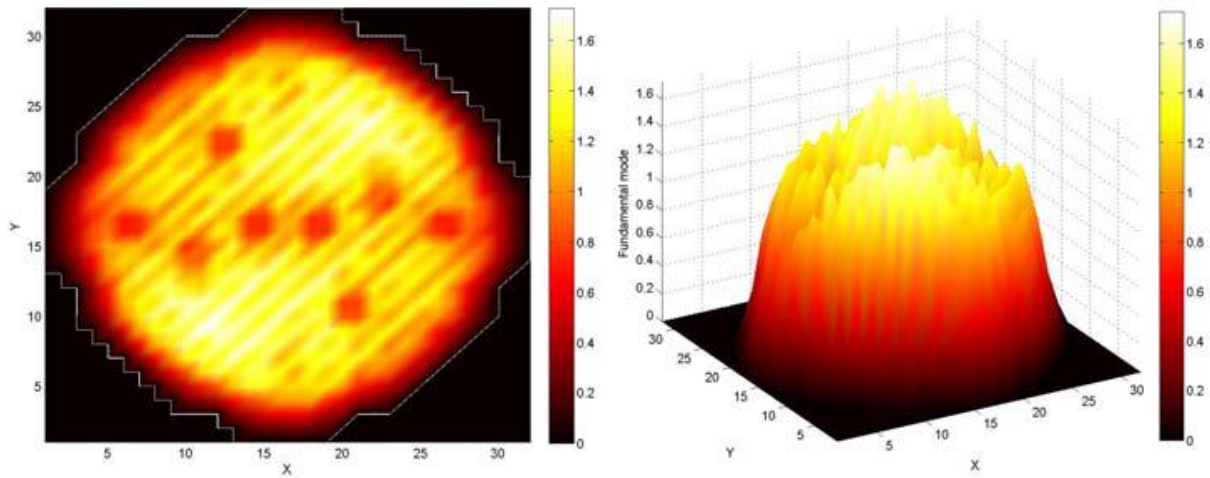


Figura 8 : Representación plana y 3D del modo fundamental. Fuente: [16]

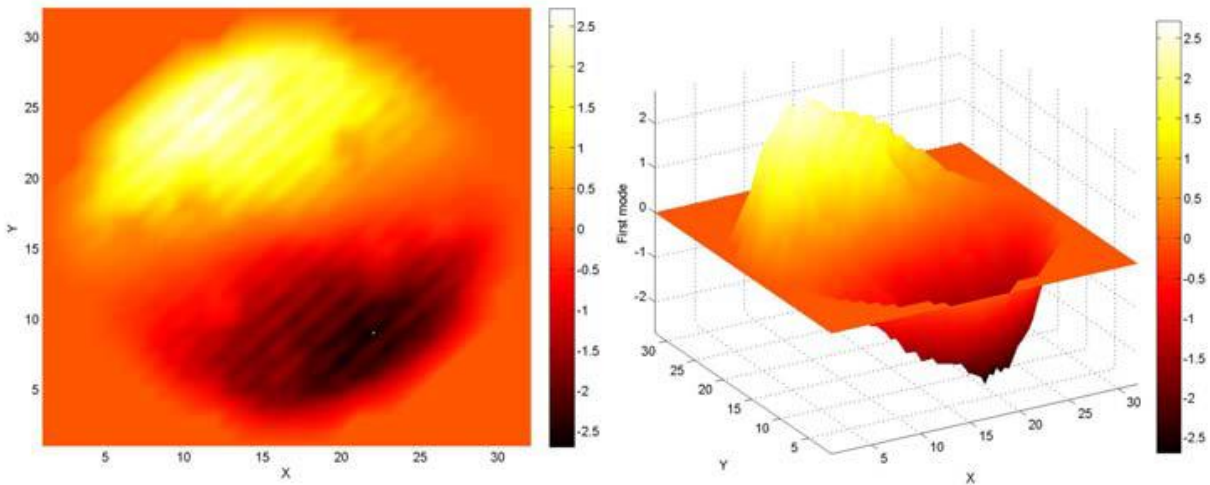


Figura 9 : Representación plana y 3D del primer modo. Fuente: [16]

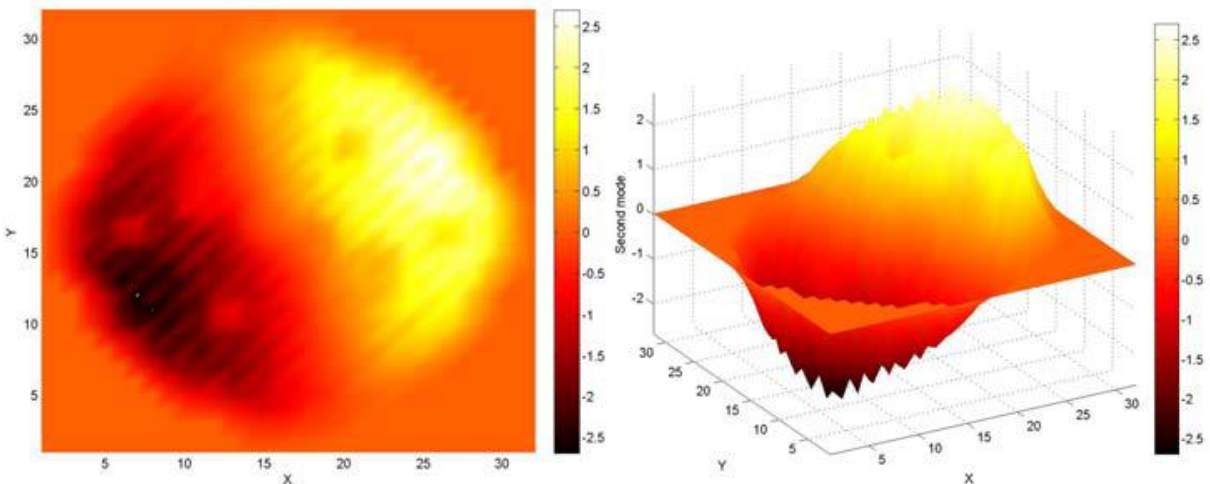


Figura 10 : Representación plana y 3D del segundo modo. Fuente: [16]

Teniendo en cuenta los tres primeros armónicos, se la modeliza el mapa termohidráulico. Se divide el mapa en cuadrantes según el primero y el segundo armónicos, luego se agrupa los elementos de combustible según el valor del modo fundamental y las características del combustible. Así, el resultado se compone de 72 canales termohidráulicos, 71 canales representan el núcleo activo y el último representa el bypass. Los canales estudiados se resaltan en un cuadrado negro y cada uno se sitúa en un cuadrante en la figura 11. La distribución de canales en el mapa en función de los modos lambda busca evitar posibles desviaciones en los armónicos debido a las simplificaciones realizadas.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32								
1													250	250	250	250	250	250	250	250																				
2												250	250	158	158	158	162	158	162	250	250																			
3									250	250	250	250	162	161	161	157	161	157	157	162	250	250	250	250																
4								250	250	140	145	158	157	155	155	165	165	165	155	157	158	162	158	250	250															
5								250	250	140	143	143	157	166	167	168	166	166	166	166	165	157	157	161	162	250	250													
6								250	250	145	139	137	150	151	160	163	168	167	156	167	156	167	159	164	163	161	162	250	250											
7								250	250	145	143	148	150	152	138	170	156	169	160	167	167	168	168	165	165	163	161	162	250	250										
8								250	250	145	143	149	150	153	138	153	142	170	168	169	160	169	156	168	156	167	153	165	163	161	158	250	250							
9								250	250	145	139	148	150	152	142	154	153	153	160	170	160	169	160	169	167	166	166	167	156	165	155	157	162	250	250					
10								250	145	139	147	150	152	142	153	138	154	138	170	160	170	156	169	167	159	155	166	160	167	160	165	163	161	158	250					
11								250	145	139	149	150	142	153	153	153	142	154	160	170	160	170	156	167	159	159	166	167	160	168	166	164	157	158	250					
12								250	250	140	139	150	138	152	152	142	142	152	138	154	160	169	160	170	168	166	156	167	156	167	160	167	159	157	121	250	250			
13								250	250	145	143	147	142	152	138	151	137	142	150	152	152	170	156	169	156	169	160	167	160	168	167	167	156	131	128	124	126	250	250	
14								250	140	143	136	148	150	138	151	149	147	147	151	138	151	160	169	156	168	156	168	167	167	160	168	131	131	118	130	127	124	125	250	
15								250	145	143	146	148	148	149	137	150	141	147	141	151	141	149	160	167	159	167	160	168	123	132	118	131	130	129	118	128	118	124	126	250
16								250	145	139	146	147	141	141	149	149	150	141	150	149	141	137	149	165	159	122	131	119	132	119	131	118	122	118	128	118	124	126	250	
17								250	145	143	137	147	136	141	137	150	138	151	138	149	141	104	111	112	118	122	131	132	122	131	130	130	122	122	128	127	120	126	250	
18								250	140	143	146	137	148	149	150	137	150	141	114	105	113	104	113	105	131	122	132	123	128	122	131	118	130	130	130	127	124	126	250	
19								250	144	143	146	148	137	150	112	114	105	113	113	115	101	114	101	115	105	132	119	132	128	128	130	132	119	131	129	117	124	121	250	
20								250	250	145	143	147	112	101	113	113	114	105	113	105	115	101	115	101	116	133	133	132	123	119	132	119	133	123	129	124	126	250	250	
21								250	250	103	102	104	113	105	113	101	113	100	113	114	116	105	115	105	135	119	133	123	123	133	133	119	131	120	121	250	250			
22								250	103	102	110	112	114	105	113	112	104	104	113	101	116	105	116	105	135	123	134	134	134	123	132	130	120	126	250					
23								250	103	106	109	111	104	113	104	112	100	104	114	115	101	116	105	116	119	135	119	134	123	133	131	129	120	126	250					
24								250	250	108	102	100	111	101	113	112	112	113	115	105	115	105	116	105	134	134	135	123	133	132	129	120	126	250	250					
25								250	250	103	106	109	111	104	113	101	114	101	115	105	115	114	116	105	134	119	134	131	130	124	126	250	250							
26								250	250	108	106	109	111	111	113	113	114	113	113	105	114	101	116	119	133	131	129	124	126	250	250									
27								250	250	108	106	109	110	104	113	101	113	101	113	101	113	114	115	105	132	130	118	120	126	250	250									
28								250	250	108	106	102	102	111	112	112	112	112	112	114	113	112	100	124	124	121	250	250												
29								250	250	103	108	108	106	100	111	111	111	111	100	100	106	103	108	121	250	250														
30								250	250	250	250	250	250	108	102	102	106	102	106	106	106	108	250	250	250	250														
31								250	250	107	103	108	103	103	103	250	250																							
32								250	250	250	250	250	250	250	250	250	250																							

Figura 11 : Mapa termohidráulico



Se agrupan las barras de control por bancos en función de la composición y de la posición inicial de cada barra de control. Cada barra actúa sobre 4 nodos. La figura 12 muestra la posición radial de los 14 bancos

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32				
1													0	0	0	0	0	0	0	0																
2												0	0	12	12	12	12	12	12	12	0	0														
3								0	0	0	0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0	0	0											
4							0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0										
5						0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0									
6					0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	5	5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0								
7				0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	5	5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0							
8			0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	6	6	13	13	8	8	12	12	9	9	12	12	12	12	12	0	0						
9			0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	6	6	13	13	8	8	12	12	9	9	12	12	12	12	12	12	0	0	0				
10			0	12	12	12	12	12	9	9	12	12	7	7	12	12	10	10	12	12	3	3	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0			
11			0	12	12	12	12	12	9	9	12	12	7	7	12	12	10	10	12	12	3	3	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0			
12		0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	12	12	7	7	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0			
13	0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	12	12	7	7	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0		
14	0	12	12	12	12	12	12	8	8	1	1	11	11	12	12	13	13	12	12	12	12	12	12	12	6	6	12	12	12	12	12	12	12	0		
15	0	12	12	12	12	12	12	8	8	1	1	11	11	12	12	13	13	12	12	12	12	12	12	6	6	12	12	12	12	12	12	12	12	0		
16	0	12	12	12	12	4	4	13	13	10	10	12	12	2	2	13	13	2	2	12	12	10	10	13	13	4	4	12	12	12	12	12	0			
17	0	12	12	12	12	4	4	13	13	10	10	12	12	2	2	13	13	2	2	12	12	10	10	13	13	4	4	12	12	12	12	12	0			
18	0	12	12	12	12	12	12	6	6	12	12	12	12	12	12	13	13	12	12	11	11	1	1	8	8	12	12	12	12	12	12	12	12	0		
19	0	12	12	12	12	12	12	6	6	12	12	12	12	12	12	13	13	12	12	11	11	1	1	8	8	12	12	12	12	12	12	12	12	0		
20	0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	7	7	12	12	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0		
21		0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	7	7	12	12	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0			
22			0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	3	3	12	12	10	10	12	12	7	7	12	12	9	9	12	12	12	12	12	12	0			
23			0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	3	3	12	12	10	10	12	12	7	7	12	12	9	9	12	12	12	12	12	12	0			
24			0	0	0	12	12	12	12	12	12	9	9	12	12	8	8	13	13	6	6	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0					
25				0	0	12	12	12	12	12	12	9	9	12	12	8	8	13	13	6	6	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0				
26				0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	14	14	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0						
27					0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	14	14	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0							
28						0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0									
29							0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0										
30								0	0	0	0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0	0	0											
31												0	0	12	12	12	12	12	12	0	0															
32												0	0	0	0	0	0	0	0																	

Figura 12 : Mapa de las barras de control

El código neutrónico PARCS ofrece la opción de simular las señales de los LPRMs. Los detectores LPRM (*Local Power Range Monitor*) miden el flujo neutrónico en posiciones locales dentro del núcleo [20]. La distribución del flujo neutrónico es relacionado con la distribución de la potencia térmica, así se puede conocer la potencia relativa en diferentes puntos del núcleo. Los APRMs (*Average Power Range Monitor*) proporcionan valores promediados de los LPRMs. La señal de los LPRMs es la única variable local del transitorio disponible en el benchmark y que se puede simular con PARCS. Entonces se centra en análisis en las señales de los LPRMs para comparar la simulación con la realidad en planta. En el benchmark, la amplitud de las señales está dada en porcentaje de la potencia nominal por nodos activos mientras que PARCS da la amplitud relativa en tanto por uno.

Para realizar un análisis en mayor profundidad de las oscilaciones de potencia, se analizan las señales simuladas de los LPRMs situados en regiones simétricas del núcleo. Se trata de hacer coincidir las posiciones de los LPRMs con los nodos del modelo. Existen 144 LPRMs distribuidos en 4 niveles axiales y 36 posiciones radiales dentro del núcleo del reactor (36 series o columnas de 4 detectores). Dentro de un plano radial, cada LPRM se sitúa en medio de cuatro elementos de combustible, es decir en medio de cuatro nodos. También, cada nivel axial de LPRM se sitúa en medio de dos planos de nodos. Para sacar los valores de los LPRMs, hay que ponderar los valores de las señales de los nodos. La ponderación radial para los cuatro nodos rodeando un LPRM es 0,25 (25%). La ponderación axial se puede calcular con las informaciones del *benchmark*. En el reactor Ringhals 1, las posiciones axiales de los detectores desde la parte superior del núcleo son 58,4 cm; 138,7 cm; 219,0 cm y 229,3 cm. En la tabla 3, se calcula la ponderación axial de los dos planos rodeando un LPRM. Se define la posición radial de los LPRMs en fichero GEOM\_LWR con el parámetro DET\_XY\_LOC, los planos asociados con el parámetro DET\_Z\_LOC, la ponderación de estos planos con el parámetro DET\_Z\_WEI y el nombre de los detectores con el parámetro DET\_NAME.

Posición axial de los detectores	Planos	Ponderación axial
1	10	0,1
	11	0,9
2	11	0,4
	12	0,6
3	17	0,9
	18	0,1
4	22	0,5
	23	0,5

Tabla 3 : Coeficientes de ponderación axial de los detectores

La figura 13 muestra la posición de los LPRMs en el mapa de nodos. Se analiza la señal de 4 LPRMs, cada uno se sitúa en el centro de un cuadrante, lejos de las líneas de simetría de los armónicos donde se anulan las oscilaciones fuera de fase. Los LPRMs seleccionados para el análisis de señal son los números 5, 9, 30 y 34, pertenecientes a cada uno de los cuadrantes del núcleo. La posición de estos cuatro LPRM se resalta en rojo en la figura 13.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32		
1													0	0	0	0	0	0	0	0														
2												0	0	0	0	0	0	0	0	0	0													
3									0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4							0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5						0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	2	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6					0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	2	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
9		0	0	4	4	0	0	5	5	0	0	6	6	0	0	7	7	0	0	8	8	0	0	9	9	0	0	0	0	0	0	0	0	
10		0	0	4	4	0	0	5	5	0	0	6	6	0	0	7	7	0	0	8	8	0	0	9	9	0	0	0	0	0	0	0	0	
11		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
12		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
13	0	0	0	0	10	10	0	0	11	11	0	0	12	12	0	0	13	13	0	0	14	14	0	0	15	15	0	0	16	16	0	0	0	
14	0	0	0	0	10	10	0	0	11	11	0	0	12	12	0	0	13	13	0	0	14	14	0	0	15	15	0	0	16	16	0	0	0	
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	17	17	0	0	18	18	0	0	19	19	0	0	20	20	0	0	21	21	0	0	22	22	0	0	23	23	0	0	0	
18	0	0	0	0	17	17	0	0	18	18	0	0	19	19	0	0	20	20	0	0	21	21	0	0	22	22	0	0	23	23	0	0	0	
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
21		0	0	0	24	24	0	0	25	25	0	0	26	26	0	0	27	27	0	0	28	28	0	0	29	29	0	0	0	0	0	0	0	
22		0	0	0	24	24	0	0	25	25	0	0	26	26	0	0	27	27	0	0	28	28	0	0	29	29	0	0	0	0	0	0	0	
23		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
24		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
25				0	0	0	0	0	30	30	0	0	31	31	0	0	32	32	0	0	33	33	0	0	34	34	0	0	0	0	0	0	0	
26				0	0	0	0	0	30	30	0	0	31	31	0	0	32	32	0	0	33	33	0	0	34	34	0	0	0	0	0	0	0	
27				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
28				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
29				0	0	0	0	0	0	0	0	35	35	0	0	36	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
30				0	0	0	0	0	0	0	0	35	35	0	0	36	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
31												0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
32												0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Figura 13 : Mapa radial de los LPRMs



### 5.3 Modelos termohidráulicos del reactor con SNAP

Se quieren reproducir los resultados obtenidos en el *benchmark* con los códigos acoplados TRACE/PARCS utilizando un modelo de reactor detallado. Se utiliza el programa SNAP *Model Editor* para construir los modelos. Primero se modela el núcleo del reactor (figura 14 y tabla 4). Este modelo se compone de 72 canales termohidráulicos, 71 canales con elementos de combustible y uno canal que corresponde al *bypass*. Los canales están conectados a un *plenum* superior e inferior. Los componentes *fill* y *break* definen las condiciones de contorno y representan respectivamente la entrada y la salida del refrigerante. En este modelo, se representa el *bypass* con un componente *chan*.

Segundo, se añade el resto de los componentes de la vasija y se modela el reactor completo (figura 15 y tabla 5). El modelo de la vasija incluye el núcleo del reactor, un lazo de recirculación, el *downcomer*, el separador, el secador y la línea de vapor. En este modelo, el *bypass* está incluido en el componente *vessel*. La vasija contiene un sector azimutal, 2 sectores radiales y 11 niveles axiales:

- Nivel 1 y 2: *Plenum* inferior
- Nivel 3: Placa del núcleo
- Nivel 4 y 5: *Bypass* del núcleo
- Nivel 6: *Plenum* superior
- Nivel 7 y 8: Separador y secador de vapor
- Nivel 9, 10 y 11: Domo de vapor

Las figuras 14 y 15 son vistas simbólicas de los modelos. El separador y los canales están fuera de la vasija por claridad, pero es claro que estos elementos están dentro de la vasija en la realidad.

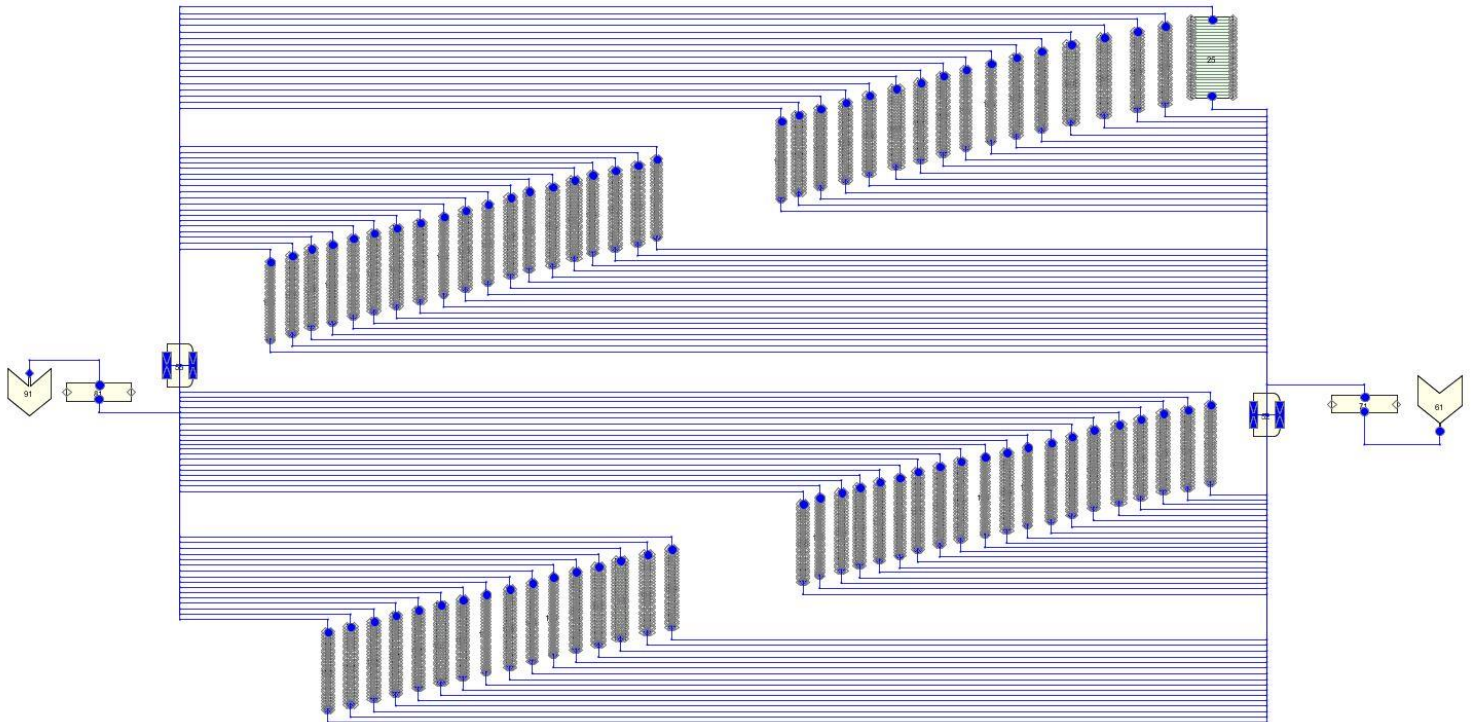


Figura 14 : Modelo de los canales con SNAP

Número del componente	Nombre del componente
25	<i>Bypass</i>
35	Estructura de calor del <i>bypass</i>
50	<i>Channels power</i>
51	<i>Bypass power</i>
52	<i>Plenum de entrada</i>
53	<i>Plenum de salida</i>
61	<i>Fill</i>
71	Tubería de entrada
81	Tubería de salida
91	<i>Break</i>
100, 101,..., 169, 170	<i>Channels</i>

Tabla 4 : Componentes del modelo de los canales



## 5.4 Procedimiento de la simulación

Una vez construido el modelo, hay que configurarlo con las condiciones iniciales y de contorno. Es necesario ajustar el caudal másico en los canales según la distribución del punto de referencia. Para esto, se ajustan los coeficientes de presión que cambian la pérdida de presión dentro de un canal. El punto crítico en este paso consiste en definir unos adecuados coeficientes de fricción en el bypass para que la distribución del caudal por el bypass y el resto de canales sea la esperada. Una vez obtenida dicha distribución, se tiene el estacionario de TRACE deseado.

Luego se acopla TRACE con PARCS a partir de los resultados del estacionario de TRACE contenido en el fichero *restart*. Para que TRACE llame al *restart*, se inicializa la variable *dstep* a -1. Para que TRACE llame a PARCS, se inicializa la variable *itdmr* a 1. En este caso, se requieren todos los ficheros nombrados anteriormente (*nemtab*, *nemtabr*, *MAPTAB*, *GEOM\_LWR*...). El fichero *MAPTAB* es el enlace entre ambos códigos. Se comprueba que la distribución de potencia radial y axial es similar a la del punto de referencia.

Cuando se obtienen las condiciones del *benchmark*, se simula un transitorio nulo y luego un transitorio con perturbación. Para esto, se inicializa la variable *transi* a 1 y la variable *transcient* a T. Como las condiciones de operación se encuentran en la región límite del mapa potencia-caudal, cualquier transitorio describe una inestabilidad.

Siguiendo el procedimiento de la figura 16, se simulan los casos de la tabla 6 y se guardan para analizarlos posteriormente. Solo se lanza el transitorio sin perturbación con el modelo de los canales, no se lanzan los casos con perturbación porque no tiene sentido simular un transitorio cuando el caudal a través del núcleo está fijado por una condición de contorno. En la realidad el caudal a través del núcleo oscila como lo muestra los resultados del *benchmark* (ver figura 27).

Modelo	Simulación	Código	Perturbación
Canales	Estacionario	TRACE	-
	Estacionario	TRACE/PARCS	-
	Transitorio	TRACE/PARCS	-
Vasija	Estacionario	TRACE	-
	Estacionario	TRACE/PARCS	-
	Transitorio	TRACE/PARCS	-
	Transitorio	TRACE/PARCS	Global
	Transitorio	TRACE/PARCS	Regional A
	Transitorio	TRACE/PARCS	Regional B
	Transitorio	TRACE/PARCS	Regional C

Tabla 6 : Listado de los casos simulados

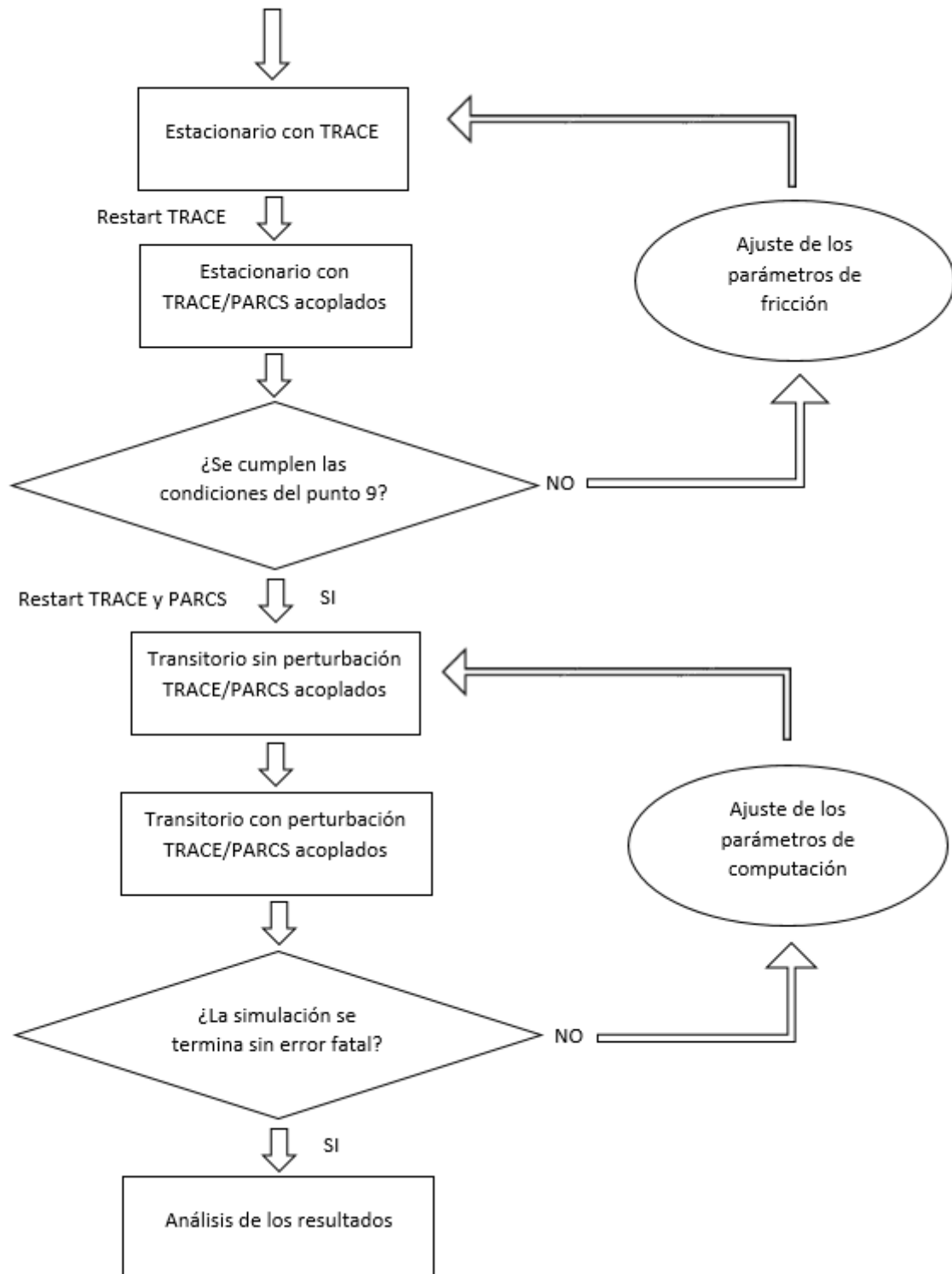


Figura 16 : Procedimiento de la simulación



La simulación proporciona una gran cantidad de datos. Con el fin de explotar los resultados, se utiliza los siguientes archivos de salida: el archivo *.xtv* para la potencia del reactor, los caudales y la presión; el archivo *LPRM\_PARCS* para las señales de los LPRMs; el archivo *.parcs\_out* para el perfil axial y radial de la potencia relativa.

## 5.5 Punto de referencia de la simulación

A partir de las informaciones del *benchmark*, se configuran los dos códigos. El código neutrónico PARCS siendo el mismo para los dos modelos termohidráulicos, se configura en primero. La potencia térmica de operación  $P_{ref}$  es 1648 MWt, lo que corresponde a 72,6 % de la potencia nominal. Se afecta este valor al parámetro  $CORE_{POWER}$ . Se calcula también los parámetros  $FA_{POWPIT}$  y  $FLOW_{COND}$ , que corresponden respectivamente a la potencia nominal media y al caudal medio por nodos, dividiendo la potencia térmica y el caudal por el número de nodos activos. La potencia asignada en PARCS es la potencia de referencia cuando se acoplan los dos códigos. Las siguientes ecuaciones son los resultados de la configuración de PARCS.

$$P_{ref} = 2270 * \frac{72,6}{100} = 1648 \text{ MWt} \quad (2)$$

$$CORE_{POWER} = 72,6 \% \quad (3)$$

$$FA_{POWPIT} = \frac{2270}{648} = 3,50308 \text{ MWt} \quad (4)$$

$$FLOW_{COND} = \frac{3694}{648} = 5,70062 \text{ kg/s} \quad (5)$$

A continuación, se configura el código termohidráulico TRACE del modelo de los canales. El caudal a través del núcleo  $Core_{can}$  es una condición de contorno que corresponde al parámetro *flowin* del componente *FILL*. Una vez fijado el caudal a través del núcleo, se ajusta el caudal del *bypass*  $Bypass_{can}$  y de los 71 canales mediante el coeficiente de fricción *kfac* a la entrada de los componentes y se calcula el caudal total de los canales  $Chan_{can}$ . Las siguientes ecuaciones son los resultados de la configuración de TRACE para el modelo de los canales.

$$flowin = Core_{can} = 3694 \frac{kg}{s} \quad (6)$$

$$Bypass_{can} = 430,24 \frac{kg}{s} \quad (7)$$

$$Chan_{can} = \sum_{i=100}^{170} Caudal_i = Core_{can} - Bypass_{can} = 3263,76 \frac{kg}{s} \quad (8)$$

En el modelo de la vasija, el caudal a través del núcleo no es una condición de contorno debido al lazo de realimentación pero se puede configurar el caudal de alimentación de la vasija mediante el parámetro  $flowin$  del componente  $FILL$ . La convergencia del problema de la vasija se obtiene con un caudal de entrada igual a 791,52 kg/s. Se quiere fijar el caudal a través del núcleo  $Core_{vas}$ , el caudal del bypass  $Bypass_{vas}$  y el caudal en los 71 canales mediante el coeficiente de fricción  $kfac$  a la entrada de los componentes. Se ajusten los coeficientes de fricción partiendo de los valores hallados en el modelo de los canales. Con el fin de simular el comportamiento del reactor con similitud al *benchmark*, se fija el caudal a través del núcleo mediante los coeficientes de fricción  $cfzlz_3$  y  $cfzvz_3$  del nivel 3 del componente  $VESSEL$  junto con  $cfzlz_4$  y  $cfzvz_4$  del nivel 4 y con  $cfzlz_2$  y  $cfzvz_2$  del nivel 2 para un ajuste más fino. Así se encuentra el punto de operación para el modelo de la vasija equivalente a lo del *benchmark*. Las siguientes ecuaciones son los resultados de la configuración de TRACE para el modelo de los canales.

$$flowin = 791,52 \frac{kg}{s} \quad (9)$$

$$cfzlz_2 = cfzvz_2 = 3,0 \quad (10)$$

$$cfzlz_3 = cfzvz_3 = 8,6 \quad (11)$$

$$cfzlz_4 = cfzvz_4 = 1,0 \quad (12)$$

$$Bypass_{vas} = 434,29 \frac{kg}{s} \quad (13)$$

$$Core_{vas} = 3693,62 \frac{kg}{s} \quad (14)$$

$$Chan_{vas} = \sum_{i=100}^{170} Caudal_i = Core_{vas} - Bypass_{vas} = 3259,33 \frac{kg}{s} \quad (15)$$

La tabla 7 resume los puntos de referencia de los dos modelos termohidráulicos. Los dos modelos se ajustan perfectamente al punto de operación del *BOC 14 Record 9*.

Modelo	Potencia (MWt)	Caudal másico (kg/s)		
		Núcleo	Canales	Bypass
<i>BOC 14 Record 9</i>	1648	3694	3264	430
Modelo Canales	1648	3694	3263,76	430,24
Modelo Vasija	1648	3693,62	3259,33	434,29

Tabla 7: Resumen de los puntos de referencia





Canal	BOC 14 Record 9	Modelo Canales		Modelo Vasija	
	Caudal (kg/s)	Caudal (kg/s)	Desviación %	Caudal (kg/s)	Desviación %
100	39,10	38,55	-1,39	39,19	0,25
101	80,48	80,37	-0,14	80,50	0,01
102	36,86	36,77	-0,25	36,84	-0,06
103	34,99	34,21	-2,23	34,99	0,01
104	57,27	56,14	-1,96	57,29	0,04
105	111,18	108,44	-2,46	105,83	-4,81
106	48,97	47,90	-2,17	49,05	0,17
107	3,63	3,57	-1,71	3,63	0,10
108	40,13	38,61	-3,78	40,11	-0,04
109	22,88	22,80	-0,35	22,85	-0,14
110	11,28	11,26	-0,19	11,19	-0,85
111	55,61	55,26	-0,62	54,76	-1,53
112	70,91	69,55	-1,93	68,59	-3,27
113	133,02	125,69	-5,51	123,10	-7,45
114	68,38	64,44	-5,77	63,01	-7,85
115	56,96	52,00	-8,71	51,60	-9,41
116	45,95	41,87	-8,90	41,44	-9,83
117	5,52	5,52	-0,06	5,49	-0,60
118	51,63	51,05	-1,13	51,61	-0,04
119	69,01	67,50	-2,19	69,09	0,11
120	27,46	27,19	-1,00	27,46	-0,01
121	20,85	20,51	-1,64	20,91	0,28
122	45,93	45,34	-1,30	46,02	0,19
123	55,99	55,22	-1,37	54,03	-3,50
124	53,30	52,75	-1,03	53,18	-0,22
125	3,55	3,56	0,32	3,56	0,29
126	42,77	40,47	-5,38	42,79	0,04
127	17,27	17,09	-1,06	17,23	-0,22
128	40,00	39,62	-0,96	39,91	-0,23
129	33,96	33,92	-0,12	33,95	-0,03
130	61,12	60,98	-0,23	60,45	-1,10
131	81,39	78,62	-3,40	77,35	-4,97
132	63,88	60,31	-5,59	59,06	-7,56
133	47,56	44,71	-6,00	43,73	-8,04
134	41,49	38,74	-6,62	37,81	-8,88
135	20,20	18,27	-9,56	18,02	-10,83
136	11,15	10,88	-2,37	11,26	1,03
137	51,79	50,99	-1,56	51,78	-0,03
138	63,22	63,09	-0,21	63,17	-0,08

139	23,04	22,29	-3,25	23,13	0,38
140	17,05	16,20	-5,02	16,98	-0,45
141	57,26	55,92	-2,35	57,36	0,17
142	50,11	49,29	-1,63	48,16	-3,88
143	53,35	52,76	-1,11	53,50	0,27
144	3,55	3,48	-1,78	3,64	2,57
145	51,08	48,27	-5,50	51,14	0,10
146	22,98	22,68	-1,29	22,99	0,04
147	45,71	45,36	-0,76	45,69	-0,05
148	39,27	38,59	-1,73	39,40	0,34
149	60,61	60,05	-0,92	59,36	-2,07
150	86,74	83,81	-3,38	82,41	-5,00
151	37,00	34,67	-6,32	33,88	-8,45
152	47,57	44,71	-6,01	43,73	-8,07
153	41,49	38,44	-7,36	37,78	-8,94
154	20,20	18,25	-9,65	17,99	-10,95
155	28,48	28,01	-1,66	28,47	-0,03
156	86,27	86,12	-0,17	86,25	-0,02
157	51,62	51,45	-0,34	51,70	0,15
158	34,99	34,13	-2,47	34,98	-0,02
159	45,96	45,48	-1,04	45,89	-0,16
160	117,02	114,07	-2,52	111,35	-4,84
161	39,02	38,27	-1,91	39,19	0,44
162	31,53	31,54	0,03	31,62	0,31
163	22,88	22,83	-0,23	22,88	0,03
164	11,28	10,98	-2,73	11,22	-0,62
165	55,61	55,24	-0,66	54,74	-1,57
166	60,01	59,23	-1,30	58,48	-2,55
167	127,67	120,46	-5,64	117,96	-7,61
168	72,18	63,46	-12,07	62,49	-13,42
169	57,03	52,21	-8,45	51,84	-9,11
170	45,95	41,77	-9,09	41,32	-10,06

Tabla 8: Resultados del caso estacionario acoplado para los dos modelos termohidráulicos

Se puede realizar una comparativa entre la potencia axial en planta para las condiciones del *BOC 14 Record 9* y la obtenida mediante los dos modelos termohidráulicos. Para calcular la potencia en cada plano, se promedia la potencia de todos los nodos radiales pertenecientes a este plano.

En la figura 18, se puede observar que el perfil de potencia axial es muy similar. Se nota que la potencia axial está muy picada en los planos inferiores. La potencia según los dos modelos está ligeramente superior en los planos inferiores e inferior en la mitad del núcleo respecto a la del *benchmark*.

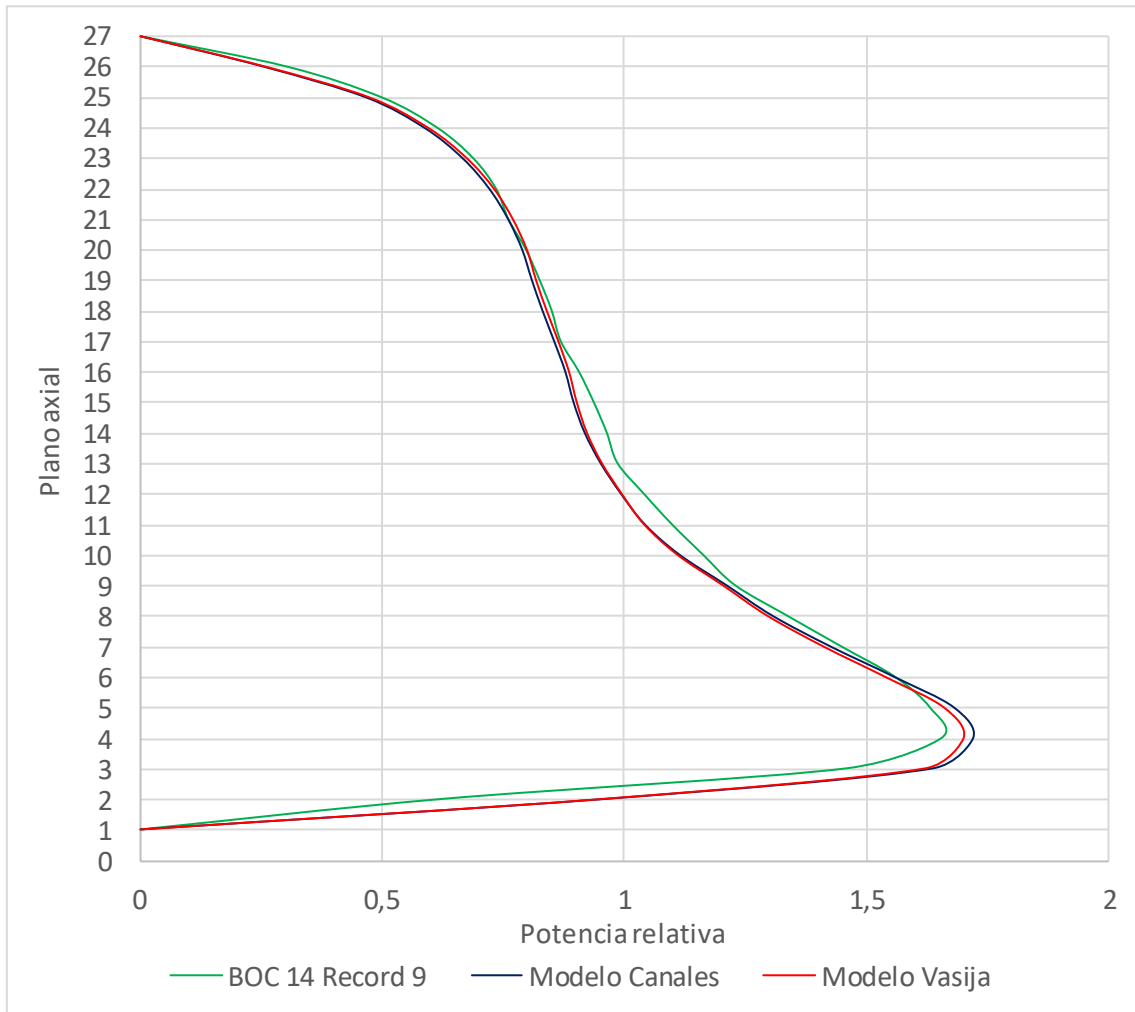


Figura 18: Perfil axial de la potencia relativa según el *benchmark* y los dos modelos termohidráulicos

También, se puede realizar una comparativa entre la potencia radial (3D y plana) en planta para las condiciones del *BOC 14 Record 9* (figura 19) y la obtenida mediante los dos modelos termohidráulicos (figuras 20 y 21). Para calcular la potencia radial, se promedia la potencia de cada columna de nodos. Se puede observar que el perfil de potencia radial es muy similar. Se nota que la potencia alcanza valores máximos superiores en los modelos respecto al *benchmark*, particularmente en el centro del núcleo. La escala de colores es la misma para las tres figuras.

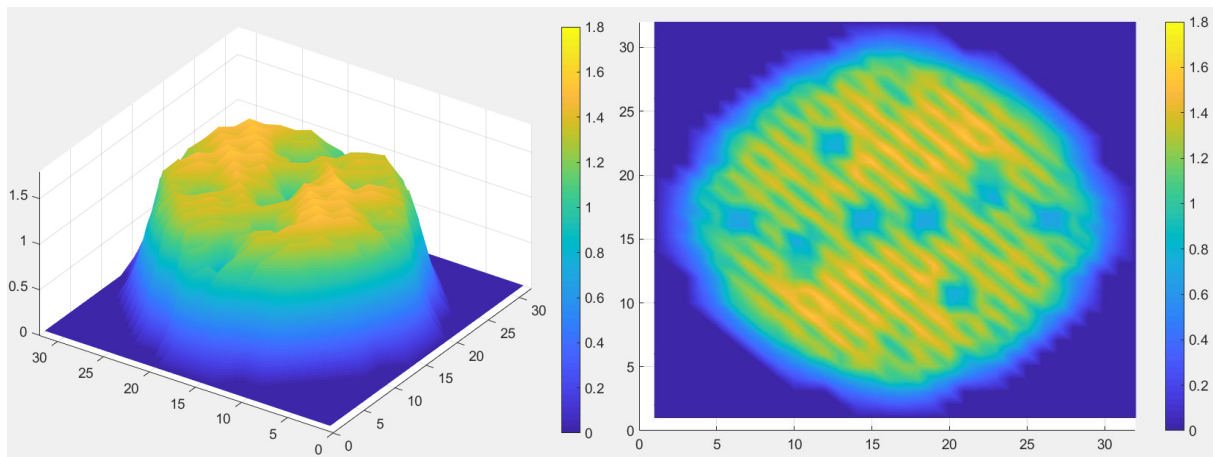


Figura 19: Representación del perfil radial de la potencia relativa según el *benchmark*

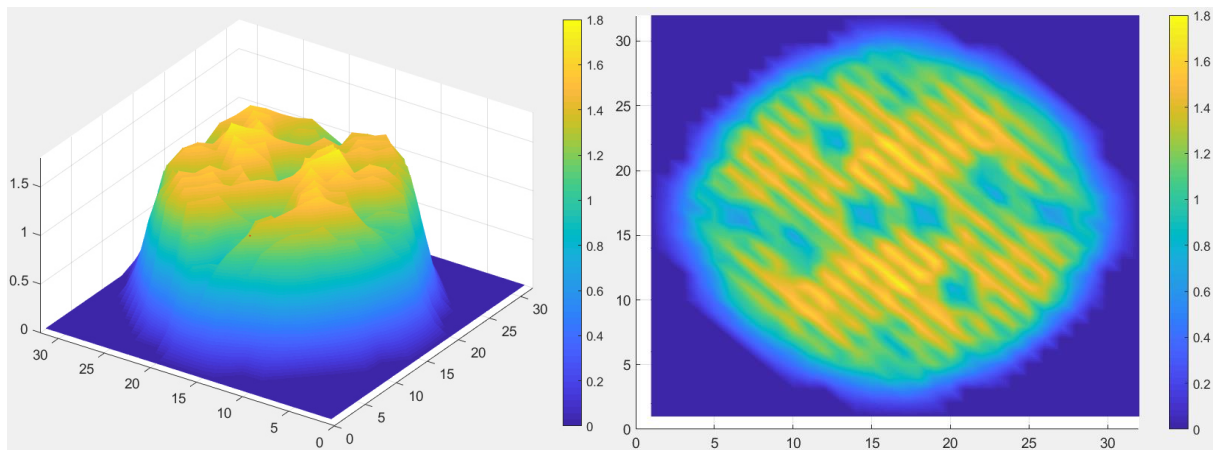


Figura 20: Representación del perfil radial de la potencia relativa según el modelo de los canales

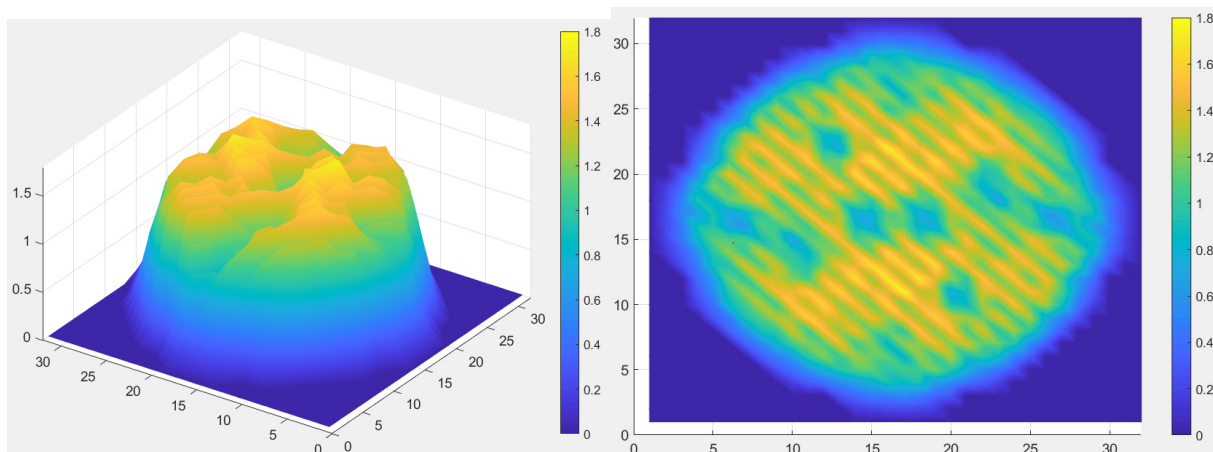


Figura 21: Representación del perfil radial de la potencia relativa según el modelo de la vasija



Las zonas de baja potencia dentro del núcleo (cuadrados azules en la representación plana) corresponden a la posición de las barras de control las más introducidas en el núcleo (ver posición inicial de las barras de control en la tabla 10).

La tabla 9 compara los valores de la presión en el domo de vapor y la temperatura en el *plenum* inferior. Los modelos se acercan mucho de la referencia.

Modelo	Presión en el domo de vapor (bar)	Temperatura en el <i>plenum</i> inferior (°C)
<i>BOC 14 Record 9</i>	70,1	260,4
Modelo Canales	70,0	260,3
Modelo Vasija	70,3	261,2

Tabla 9: Presión en el domo de vapor y temperatura en el *plenum* inferior de los puntos de referencia

Según las referencias del *benchmark*, se obtienen similitudes que permiten otorgar validez al modelo realizado por TRACE.

A partir de los resultados del caso estacionario, se lanzan varios transitorios sin y con perturbación para visualizar las inestabilidades.



## 5.6 Perturbaciones

Para generar oscilaciones, se perturba el sistema con un movimiento de barras de control. En la tabla 10, se ve la posición inicial de las barras de control. La perturbación simulada es un movimiento de barras de control de  $\pm 5\%$  alrededor de la posición inicial. Además, se quiere perturbar el núcleo por mitad. Se divide los bancos por 2, con la misma posición inicial, pero con un movimiento opuesto. La posición se expresa en porcentaje, donde 100% corresponde a una barra totalmente fuera del núcleo y 0% corresponde a una barra totalmente dentro del núcleo.

Banco	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Posición inicial	0	4	11	19	50	86	88	94	94	100	100	100	100	50

Tabla 10 : Posición inicial de las barras de control

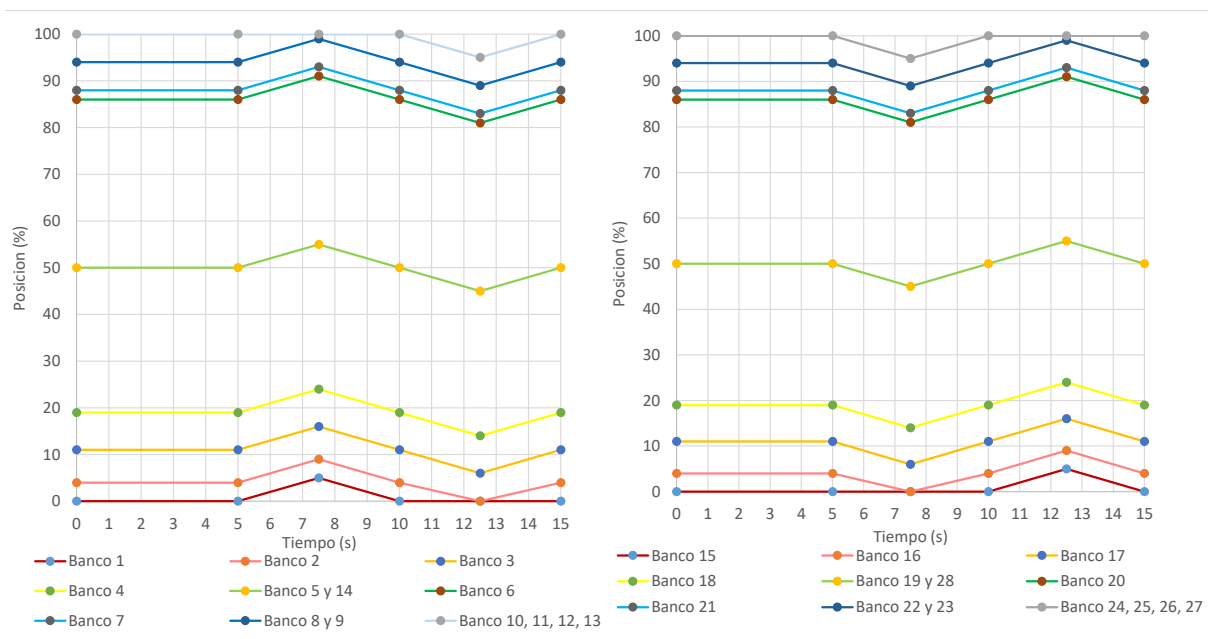


Figura 22 : Movimiento de las barras de control

El movimiento empieza 5 segundos después del inicio del transitorio y dura hasta las 15 segundos. Se compone de un descenso y una elevación de las barras de control (figura 22). A partir de las 15 segundos, el reactor actúa de manera libre.

Se consideran cuatro perturbaciones más el caso del transitorio nulo (sin perturbación). Se trata de perturbar el núcleo por mitad. Se divide el mapa de las barras de control en cuadrantes con base al mapa termohidráulico. Se conserva la simetría central y los cuatro nodos por barra de control. Cada cuadrante tiene el mismo número de barras de control.

### 5.6.1 Perturbación global

La perturbación global corresponde a un movimiento uniforme de las barras de control en todo el núcleo (figura 23).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32			
1													0	0	0	0	0	0	0	0															
2												0	0	12	12	12	12	12	12	12	0	0													
3								0	0	0	0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0	0											
4							0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0										
5						0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0									
6					0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	5	5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0								
7				0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	5	5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0						
8			0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	6	6	13	13	8	8	12	12	9	9	12	12	12	12	12	0	0					
9			0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	6	6	13	13	8	8	12	12	9	9	12	12	12	12	12	12	0	0	0			
10			0	12	12	12	12	12	9	9	12	12	7	7	12	12	10	10	12	12	3	3	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0			
11			0	12	12	12	12	12	9	9	12	12	7	7	12	12	10	10	12	12	3	3	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0			
12		0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	12	12	7	7	12	12	12	12	12	12	12	0	0		
13	0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	12	12	7	7	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0	
14	0	12	12	12	12	12	12	8	8	1	1	11	11	12	12	13	13	12	12	12	12	12	12	6	6	12	12	12	12	12	12	12	12	0	
15	0	12	12	12	12	12	12	8	8	1	1	11	11	12	12	13	13	12	12	12	12	12	12	6	6	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0
16	0	12	12	12	12	4	4	13	13	10	10	12	12	2	2	13	13	2	2	12	12	10	10	13	13	4	4	12	12	12	12	12	12	0	
17	0	12	12	12	12	4	4	13	13	10	10	12	12	2	2	13	13	2	2	12	12	10	10	13	13	4	4	12	12	12	12	12	12	0	
18	0	12	12	12	12	12	12	6	6	12	12	12	12	12	12	13	13	12	12	11	11	1	1	8	8	12	12	12	12	12	12	12	12	0	
19	0	12	12	12	12	12	12	6	6	12	12	12	12	12	12	13	13	12	12	11	11	1	1	8	8	12	12	12	12	12	12	12	12	0	
20	0	0	0	12	12	12	12	12	12	7	7	12	12	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0		
21		0	0	12	12	12	12	12	12	7	7	12	12	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0			
22			0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	3	3	12	12	10	10	12	12	7	7	12	12	9	9	12	12	12	12	12	12	0		
23			0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	3	3	12	12	10	10	12	12	7	7	12	12	9	9	12	12	12	12	12	12	0		
24			0	0	0	12	12	12	12	9	9	12	12	8	8	13	13	6	6	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0				
25			0	0	12	12	12	12	12	9	9	12	12	8	8	13	13	6	6	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0					
26				0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	14	14	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0						
27				0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	14	14	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0							
28					0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0									
29						0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0										
30							0	0	0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0	0											
31											0	0	12	12	12	12	12	12	12	0	0														
32												0	0	0	0	0	0	0	0																

Figura 23 : Distribución de los bancos para la perturbación global

### 5.6.2 Perturbación regional A

La perturbación regional A corresponde a un movimiento uniforme de las barras de control en los cuadrantes superiores y un movimiento opuesto en los cuadrantes inferiores (figura 24).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32						
1												0	0	0	0	0	0	0	0	0																		
2												0	0	12	12	12	12	12	12	12	0	0																
3									0	0	0	0	0	12	12	12	12	12	12	0	0	0	0	0														
4								0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0												
5								0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0											
6								0	0	12	12	12	12	12	12	12	5	5	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0										
7								0	0	0	12	12	12	12	12	12	5	5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0								
8								0	0	12	12	12	12	12	12	12	6	6	13	13	8	8	12	12	9	9	12	12	12	12	0	0						
9								0	0	0	12	12	12	12	12	12	6	6	13	13	8	8	12	12	9	9	12	12	12	12	0	0	0					
10								0	12	12	12	12	12	12	12	7	7	12	12	10	10	12	12	3	3	12	12	12	12	12	12	12	0					
11								0	12	12	12	12	12	12	12	7	7	12	12	10	10	12	12	3	3	12	12	12	12	12	12	12	0					
12								0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	12	12	7	7	12	12	12	12	12	26	26	0	0					
13								0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11	12	12	7	7	12	12	12	12	26	26	0	0	0					
14								0	12	12	12	12	12	12	12	12	13	13	12	12	12	12	26	26	20	20	26	26	26	26	26	26	0					
15								0	12	12	12	12	12	12	12	13	13	12	12	12	12	26	26	20	20	26	26	26	26	26	26	26	0					
16								0	12	12	12	12	4	4	13	13	10	10	12	12	2	2	13	13	16	16	26	26	24	24	27	27	18	18	26	26	26	0
17								0	12	12	12	12	4	4	13	13	10	10	12	12	2	2	27	27	16	16	26	26	24	24	27	27	18	18	26	26	26	0
18								0	12	12	12	12	12	6	6	12	12	26	26	26	26	27	27	26	26	25	25	15	15	22	22	26	26	26	26	26	0	
19								0	12	12	12	12	12	6	6	12	12	26	26	26	26	27	27	26	26	25	25	15	15	22	22	26	26	26	26	26	0	
20								0	0	0	12	12	26	26	26	26	21	21	26	26	25	25	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0	0		
21								0	0	12	12	26	26	26	26	21	21	26	26	25	25	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0			
22								0	26	26	26	26	26	26	26	26	17	17	26	26	24	24	26	26	21	21	26	26	23	23	26	26	26	26	26	0		
23								0	26	26	26	26	26	26	26	26	17	17	26	26	24	24	26	26	21	21	26	26	23	23	26	26	26	26	26	0		
24								0	0	0	26	26	26	26	23	23	26	26	22	22	27	27	20	20	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0	0			
25								0	0	26	26	26	26	23	23	26	26	22	22	27	27	20	20	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0				
26								0	0	0	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0	0						
27								0	0	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0								
28								0	0	0	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0	0								
29								0	0	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0										
30								0	0	0	0	0	0	0	0	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0	0	0	0										
31								0	0	0	0	0	0	0	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0														
32								0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																

Figura 24 : Distribución de los bancos para la perturbación regional A

### 5.6.3 Perturbación regional B

La perturbación regional B corresponde a un movimiento uniforme de las barras de control en los cuadrantes de la izquierda y un movimiento opuesto en los cuadrantes de la derecha (figura 25).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
1													0	0	0	0	0	0	0	0													
2												0	0	26	26	26	26	26	26	26	0	0											
3								0	0	0	0	0	0	26	26	26	26	26	26	0	0	0	0	0									
4							0	0	12	12	12	12	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0							
5						0	0	0	12	12	12	12	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0	0						
6					0	0	12	12	12	12	12	12	26	26	13	13	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0					
7				0	0	0	12	12	12	12	12	12	26	26	13	13	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0	0				
8			0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	20	20	27	27	22	22	26	26	23	23	26	26	26	26	26	0	0				
9			0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	20	20	27	27	22	22	26	26	23	23	26	26	26	26	26	0	0	0			
10			0	12	12	12	12	9	9	12	12	7	7	26	26	24	24	26	26	17	17	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0		
11			0	12	12	12	12	9	9	12	12	7	7	26	26	24	24	26	26	17	17	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0		
12		0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	26	26	25	25	26	26	21	21	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0		
13	0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	26	26	25	25	26	26	21	21	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0	0	
14	0	12	12	12	12	12	12	8	8	1	1	11	11	27	27	26	26	26	26	26	26	26	26	20	20	26	26	26	26	26	26	26	0
15	0	12	12	12	12	12	12	8	8	1	1	11	11	27	27	26	26	26	26	26	26	26	26	20	20	26	26	26	26	26	26	26	0
16	0	12	12	12	12	4	4	13	13	10	10	12	12	2	2	13	27	16	16	26	26	24	24	27	27	18	18	26	26	26	26	26	0
17	0	12	12	12	12	4	4	13	13	10	10	12	12	2	2	13	27	16	16	26	26	24	24	27	27	18	18	26	26	26	26	26	0
18	0	12	12	12	12	12	12	6	6	12	12	12	12	12	12	13	13	26	26	25	25	15	15	22	22	26	26	26	26	26	26	26	0
19	0	12	12	12	12	12	12	6	6	12	12	12	12	12	12	13	13	26	26	25	25	15	15	22	22	26	26	26	26	26	26	26	0
20	0	0	0	12	12	12	12	12	12	7	7	12	12	11	11	12	12	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0	0	
21		0	0	12	12	12	12	12	12	7	7	12	12	11	11	12	12	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0		
22			0	12	12	12	12	12	12	12	12	3	3	12	12	10	10	12	12	21	21	26	26	23	23	26	26	26	26	26	0		
23			0	12	12	12	12	12	12	12	12	3	3	12	12	10	10	12	12	21	21	26	26	23	23	26	26	26	26	26	0		
24			0	0	0	12	12	12	12	9	9	12	12	8	8	13	13	6	6	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0	0			
25			0	0	12	12	12	12	12	9	9	12	12	8	8	13	13	6	6	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0			
26				0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	14	14	12	12	26	26	26	26	26	26	0	0	0					
27					0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	14	14	12	12	26	26	26	26	26	26	0	0						
28						0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	26	26	0	0	0							
29							0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	26	26	0	0								
30								0	0	0	0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0	0	0								
31												0	0	12	12	12	12	12	12	0	0												
32													0	0	0	0	0	0	0	0													

Figura 25 : Distribución de los bancos para la perturbación regional B

### 5.6.4 Perturbación regional C

La perturbación regional C corresponde a un movimiento uniforme de las barras de control en los cuadrantes diametralmente opuestos (figura 26).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	
1													0	0	0	0	0	0	0	0													
2												0	0	26	26	26	26	26	26	26	0	0											
3								0	0	0	0	0	0	26	26	26	26	26	26	0	0	0	0	0									
4							0	0	12	12	12	12	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0							
5						0	0	0	12	12	12	12	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0	0						
6					0	0	12	12	12	12	12	12	26	26	13	13	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0					
7				0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	26	26	13	13	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0	0	0				
8			0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	20	20	27	27	22	22	26	26	23	23	26	26	26	26	26	0	0			
9			0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	20	20	27	27	22	22	26	26	23	23	26	26	26	26	26	0	0	0		
10			0	12	12	12	12	9	9	12	12	7	7	26	26	24	24	26	26	11	11	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0		
11			0	12	12	12	12	9	9	12	12	7	7	26	26	24	24	26	26	11	11	26	26	26	26	26	26	26	26	26	0		
12		0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	26	26	25	25	26	26	21	21	26	26	26	26	26	12	12	0	0		
13	0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	26	26	25	25	26	26	21	21	26	26	26	26	26	12	12	0	0	0	
14	0	12	12	12	12	12	12	8	8	1	1	11	11	12	12	27	27	26	26	26	26	12	12	6	6	12	12	12	12	12	12	12	0
15	0	12	12	12	12	12	12	8	8	1	1	11	11	12	12	27	27	26	26	26	26	12	12	6	6	12	12	12	12	12	12	12	0
16	0	12	12	12	12	4	4	13	13	10	10	12	12	2	2	13	27	2	2	12	12	10	10	13	13	4	4	12	12	12	12	0	
17	0	12	12	12	12	4	4	13	13	10	10	12	12	2	2	27	13	2	2	12	12	10	10	13	13	4	4	12	12	12	12	0	
18	0	12	12	12	12	12	12	6	6	12	12	26	26	26	26	27	27	12	12	11	11	1	1	8	8	12	12	12	12	12	12	0	
19	0	12	12	12	12	12	12	6	6	12	12	26	26	26	26	27	27	12	12	11	11	1	1	8	8	12	12	12	12	12	12	12	0
20	0	0	0	12	12	26	26	26	26	21	21	26	26	25	25	26	26	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0	
21		0	0	12	12	26	26	26	26	21	21	26	26	25	25	26	26	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0		
22			0	26	26	26	26	26	26	26	26	26	17	17	26	26	24	24	26	26	7	7	12	12	9	9	12	12	12	12	0		
23			0	26	26	26	26	26	26	26	26	26	17	17	26	26	24	24	26	26	7	7	12	12	9	9	12	12	12	12	0		
24			0	0	0	26	26	26	26	23	23	26	26	22	22	27	27	20	20	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0			
25			0	0	26	26	26	26	26	23	23	26	26	22	22	27	27	20	20	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0			
26				0	0	0	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0				
27					0	0	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	12	12	12	12	12	12	12	0	0					
28						0	0	0	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	12	12	0	0	0							
29							0	0	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	12	12	0	0								
30								0	0	0	0	0	0	26	26	26	26	26	26	0	0	0	0	0									
31												0	0	26	26	26	26	26	26	0	0												
32												0	0	0	0	0	0	0	0														

Figura 26 : Distribución de los bancos para la perturbación regional C



## 6 Resultados de los transitorios sin perturbación

En este capítulo, se analizan el transitorio sin perturbación de cada modelo termohidráulico con el fin de comparar los resultados con los datos del *benchmark*. El *benchmark* proporciona los valores del caudal a través del núcleo, de la presión en el reactor, de los APRMs y de los LPRMs a los niveles 2 y 4 (desde la parte superior del núcleo hacia abajo) durante 11 minutos a partir de las 20:20:29 (formato hh:mm:ss) con un intervalo de medida de 0,08s. El punto 9 corresponde a una medida instantánea que ocurrió a las 20:30:00. Entonces se toma este punto como origen de tiempo en las figuras que representan los datos del *benchmark*. Las barras no cambiaron de posición antes o durante este periodo entonces en esta sección se compara los datos del *benchmark* con los resultados del transitorio sin perturbación de los dos modelos.

Se simula un transitorio de 180s con un paso de tiempo de 0,002s y un intervalo de grafico de 0,01s. No se observan oscilaciones durante los primeros 10s. El transitorio finaliza a los 180s, como puede observarse las oscilaciones inducidas por la inestabilidad del reactor son automantenidas a partir de los 40s (ciclo limite). Entre 10s y 40s, las oscilaciones son caóticas con varios picos y las variables alcanzan valores extremos debido a la amortización numérica inherente en TRACE. Se muestran los resultados de los primeros 60 segundos y de los últimos 20 segundos de los transitorios simulados cuando la oscilación está estable.

Los cuadrantes se refieren a la división del mapa termohidráulico según los primeros armónicos de potencia (figura 11). En las tablas comparativas, se resaltan en negro los cuadrantes que se comparan y se precisa “en fase”, “en oposición de fase”, “en avance de fase” o “en retardo de fase” (por ejemplo, si se precisa “en retardo de fase” para el par A y B, significa que B está en retardo de fase respecto a A).

Se analizan los siguientes resultados del *benchmark* (entre 0s y 20s) y de cada modelo desde las 160s hasta 180s:

- El caudal a través del núcleo,
- La potencia térmica del reactor,
- La presión en el reactor,
- La señal de cuatro LPRMs a los niveles 1 y 3 (hacia arriba),
- La potencia radial en cuatro nodos,
- La potencia axial en dos planos,
- El caudal de entrada y de salida en cuatro canales simétricos, cada uno de ellos perteneciente a un cuadrante del núcleo.

### 6.1 Caudal a través del núcleo

La figura 27 representa el caudal másico a través del núcleo según el *benchmark* y los dos modelos termohidráulicos. Además, oscila a una frecuencia de 2,2 Hz (4 veces más que la frecuencia de la potencia). El caudal en el modelo de los canales se queda constante a 3694 kg/s mientras que en el

modelo de la vasija oscila alrededor de este valor con una frecuencia de 0,45 Hz. Tras el punto 9, la caudal a través del núcleo disminuye y se queda inferior al valor de referencia oscilando entre 2600 y 1600 kg/s

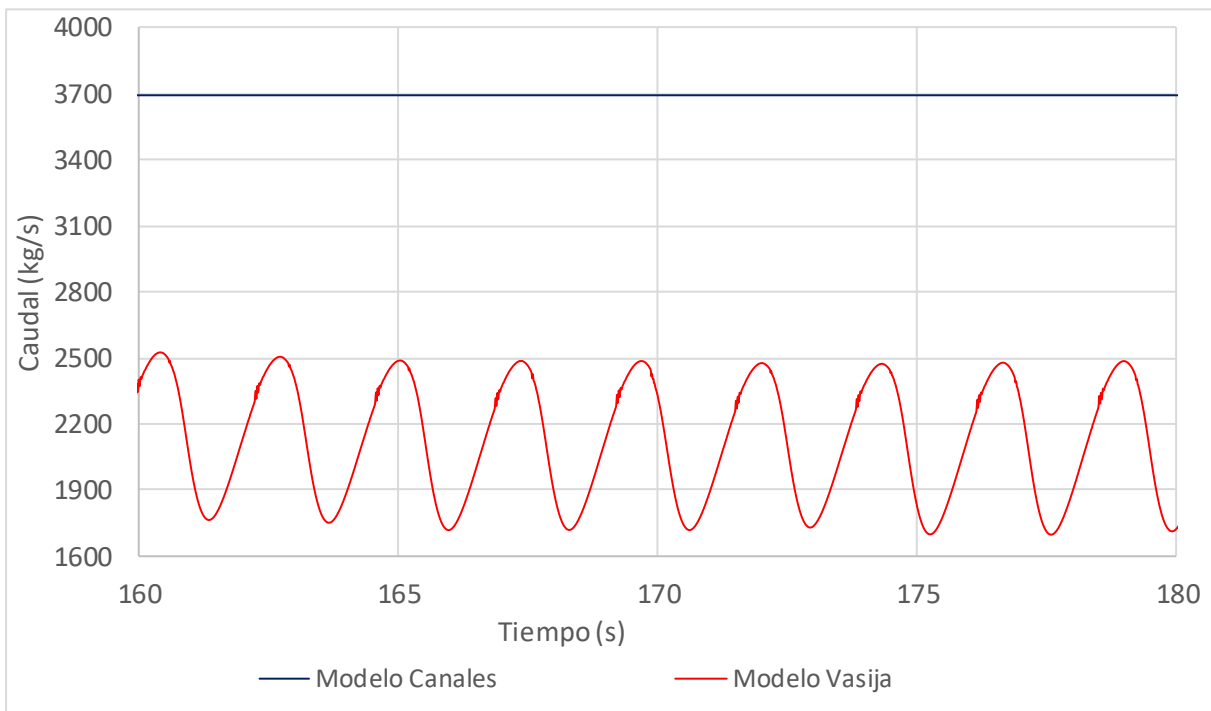
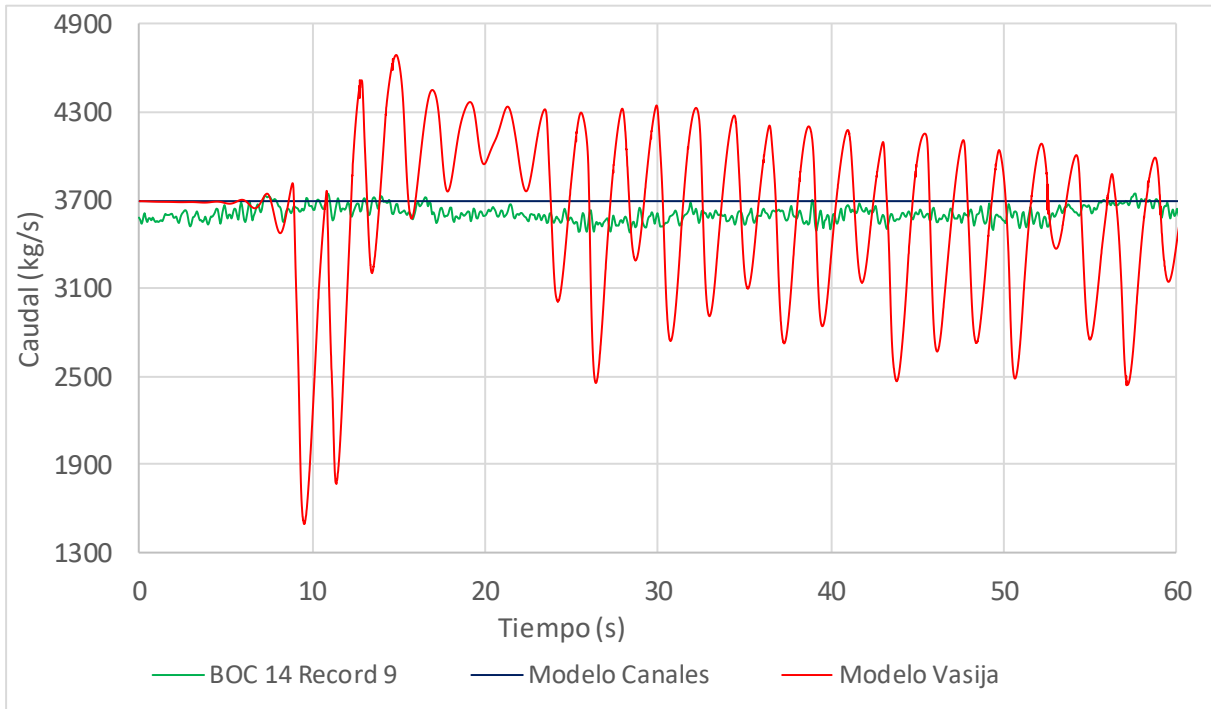


Figura 27: Caudal másico a través del núcleo según el *benchmark* y los dos modelos termohidráulicos



## 6.2 Potencia térmica del reactor

La señal del APRM medio oscila a una frecuencia de 0,56 Hz (figura 28). La potencia en el modelo de los canales oscila también a una frecuencia de 0,57 Hz. La potencia en el modelo de la vasija oscila a una frecuencia de 0,45Hz, inferior a la de referencia. En la figura 29, se representa la evolución de la potencia durante los primeros 60s y los últimos 20s del transitorio. Se ve también picos intermedios que reflejan los armónicos de potencia. Cuando las oscilaciones alcanzan el ciclo límite, la potencia oscila entre 500 MW y 5000 MW.

Potencia del reactor	<i>Benchmark</i>	Modelo	
	<i>BOC 14 Record 9</i>	Canales	Vasija
Frecuencia (Hz)	0,56	0,57	0,44

Tabla 11: Frecuencia de oscilación de la potencia del reactor sin perturbación

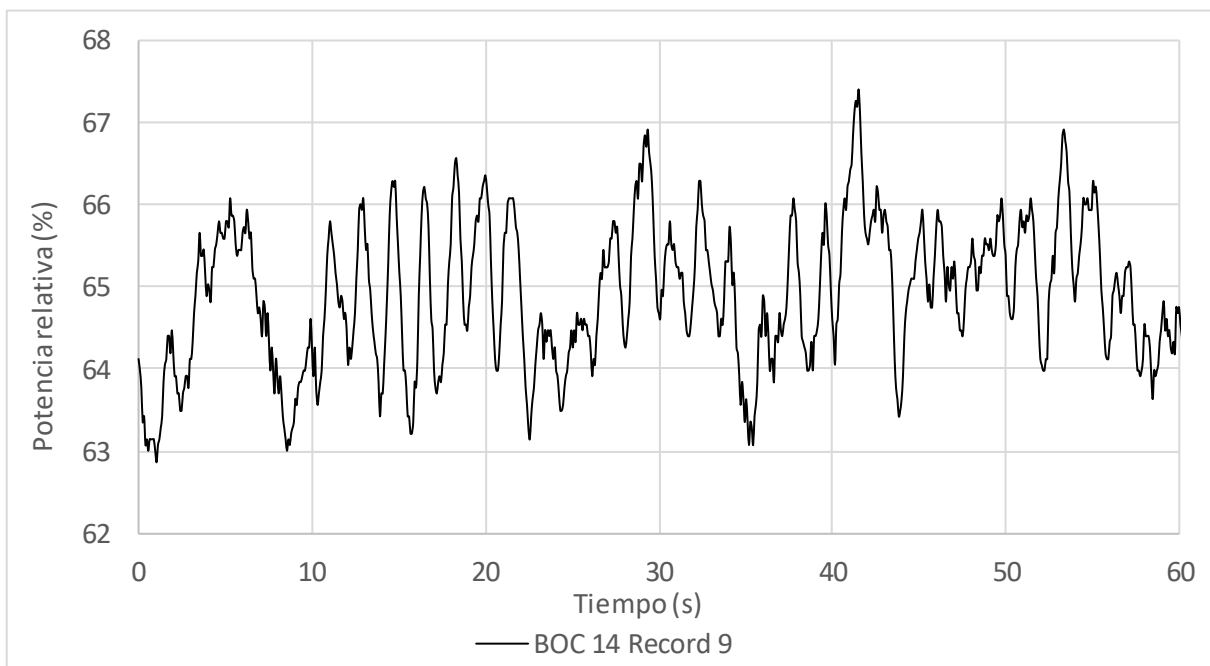
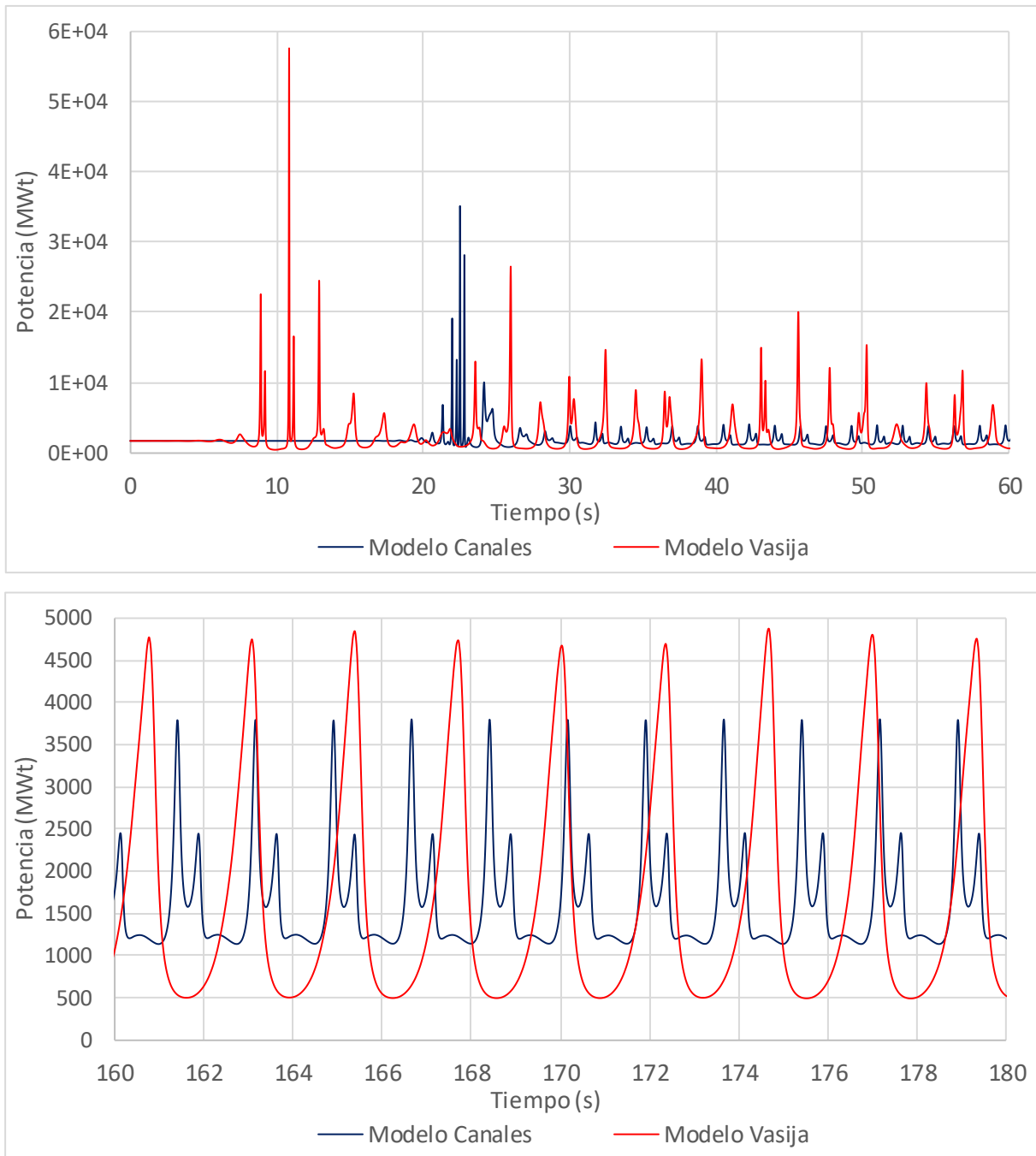


Figura 28: Señal del APRM medio según el *benchmark*



**Figura 29: Potencia térmica del reactor para los dos modelos termohidráulicos**

### 6.3 Presión en el reactor

Según el *benchmark*, la presión en el reactor es casi constante a 70,1 bares mientras que en el modelo de los canales es 70 bares. La presión en el modelo de la vasija oscila alrededor de 70,3 bares (figura 30). El *benchmark* proporciona la presión manométrica entonces se añade 1 bar para comparar con la presión absoluta de la simulación.

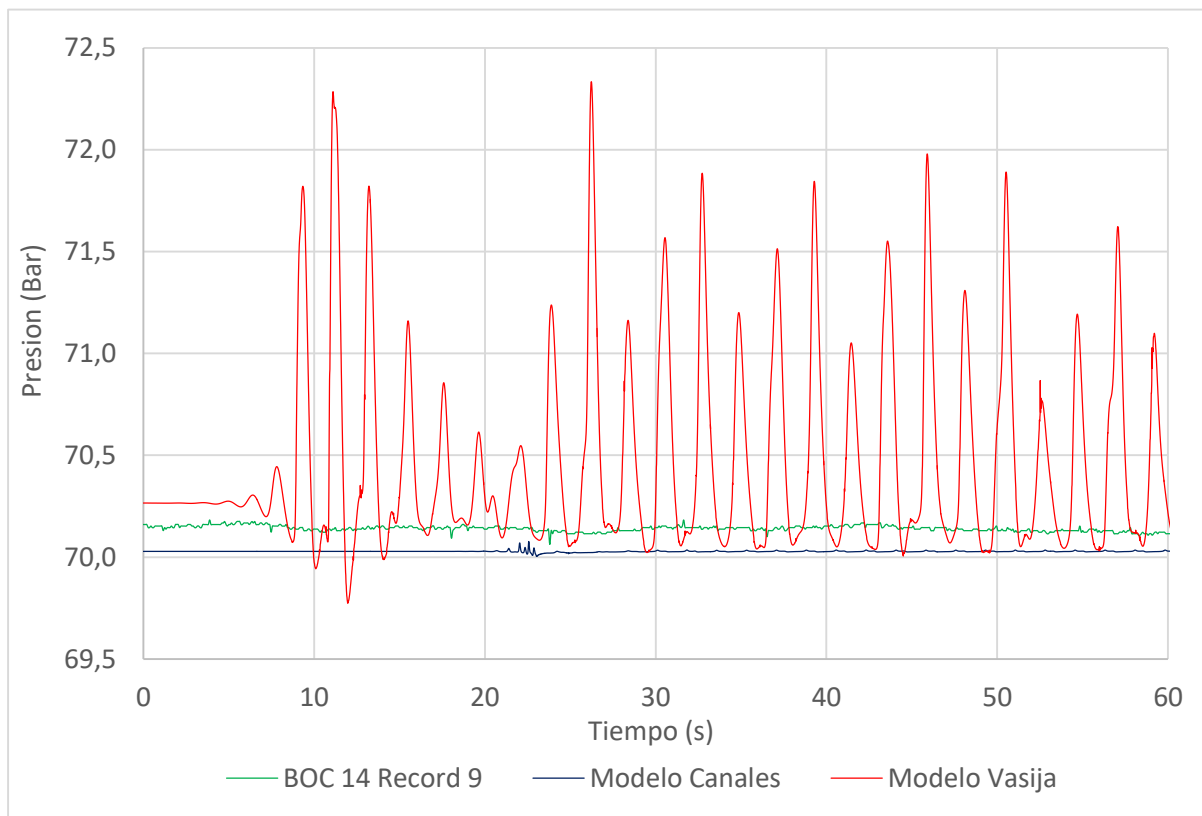


Figura 30: Presión en el reactor según el *benchmark* y los dos modelos termohidráulicos

### 6.4 LPRMs

En esta sección, se analiza la señal de dos posiciones axiales de una misma serie de LPRMs, de dos LPRMs de un mismo cuadrante y de dos LPRMs de cuadrantes simétricos. Las series de los LPRMs 5 y 12 se encuentran en el cuadrante superior izquierdo, las series de los LPRMs 9 y 14 se encuentran en el cuadrante superior derecho, las series de los LPRMs 30 y 25 se encuentran en el cuadrante inferior izquierdo y las series de los LPRMs 34 y 28 se encuentran en el cuadrante inferior derecho. La señal de los LPRMs a las posiciones axiales 1 y 3 en estas regiones se presenta en las figuras 31 hasta 42. En la tabla 12, se compara por pares la señal de los LPRMs del *benchmark* y de cada modelo termohidráulico. Como consecuencia del pico de potencia en los planos inferiores, la amplitud de la señal de los LPRMs al nivel 1 está más elevada que el nivel 3. Además la potencia en los LPRMs de un mismo cuadrante oscila en fase, tal y como se espera según la división efectuada por los armónicos de la potencia representada en el mapa radial de la figura 11. A continuación, se analiza cada caso en detalle.


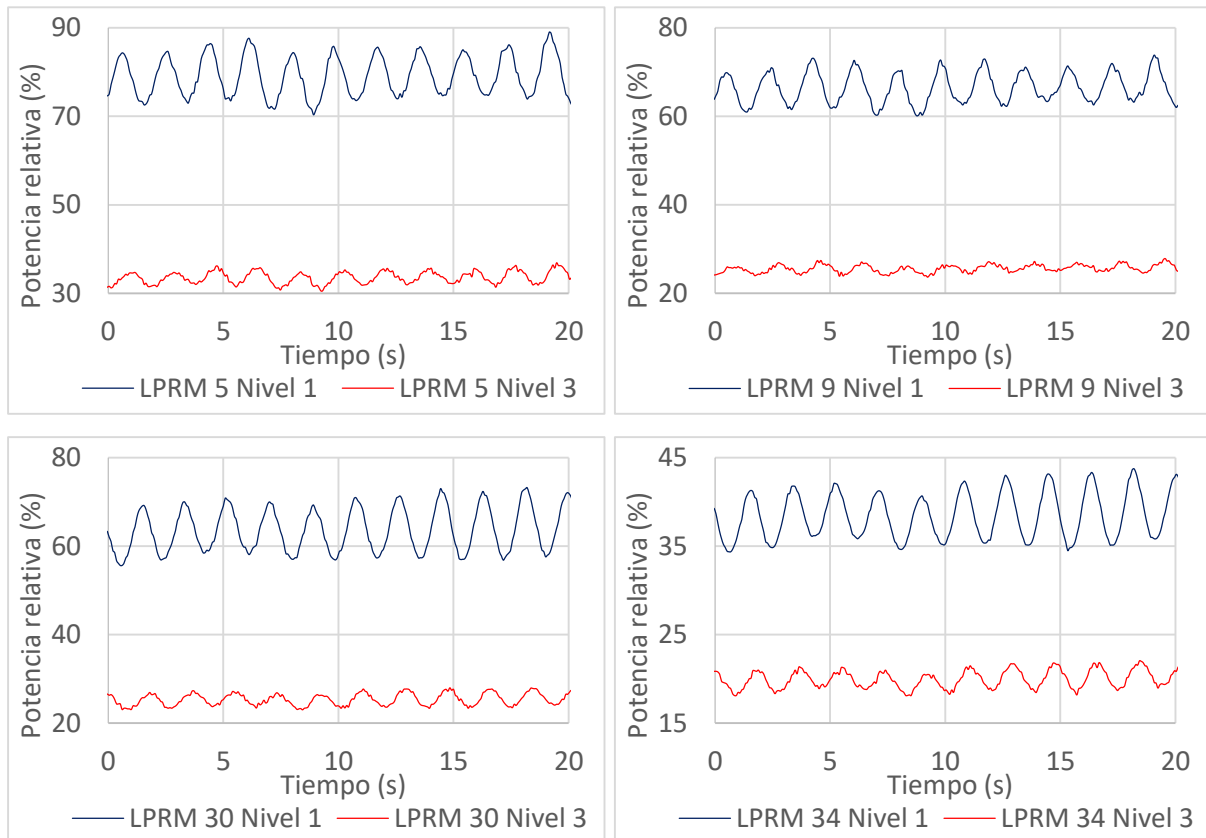
LPRM		Cuadrantes	Benchmark	Modelo	
Posición axial	Posición radial		BOC 14 Record 9	Canales	Vasija
1 y 3	5		Retardo de fase	Retardo de fase	Retardo de fase
	9		Retardo de fase	Retardo de fase	Retardo de fase
	30		Retardo de fase	En fase	Retardo de fase
	34		Retardo de fase	En fase	Retardo de fase
1	5 y 12		En fase	En fase	En fase
	9 y 14		En fase	En fase	En fase
	30 y 25		En fase	En fase	En fase
	34 y 28		En fase	En fase	En fase
3	5 y 12		En fase	En fase	En fase
	9 y 14		En fase	En fase	En fase
	30 y 25		En fase	En fase	En fase
	34 y 28		En fase	En fase	En fase
1	5 y 9		En fase	Oposición de fase	En fase
	30 y 34		En fase	En fase	Avance de fase
	5 y 30		Oposición de fase	En fase	Avance de fase
	9 y 34		Oposición de fase	Oposición de fase	Oposición de fase
	5 y 34		Oposición de fase	En fase	Oposición de fase
	9 y 30		Oposición de fase	Oposición de fase	Avance de fase
3	5 y 9		En fase	En fase	En fase
	30 y 34		En fase	En fase	Oposición de fase
	5 y 30		Oposición de fase	Oposición de fase	En fase
	9 y 34		Oposición de fase	Oposición de fase	Oposición de fase
	5 y 34		Oposición de fase	Oposición de fase	Oposición de fase
	9 y 30		Oposición de fase	Oposición de fase	En fase

Tabla 12: Tabla comparativa de la señal de los LPRMs según el *benchmark* y los dos modelos termohidráulicos

### 6.4.1 Benchmark

En esta sección, se representan las señales de los LPRMs disponibles en el *benchmark* (figuras 31 hasta 34). En este caso, la frecuencia de oscilación de las señales es 0,56 Hz. Las señales de una misma serie de LPRMs en las posiciones axiales 1 y 3 oscilan con un retardo de fase ( $45^\circ$ ) para cada cuadrante (figura 31).



**Figura 31:** Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a las posiciones axiales 1 y 3 según el *benchmark*

Las señales de dos LPRMs en un mismo cuadrante oscilan en fase (figura 32), tal y como se espera según la división efectuada por los armónicos de la potencia representada en el mapa radial de la figura 11.

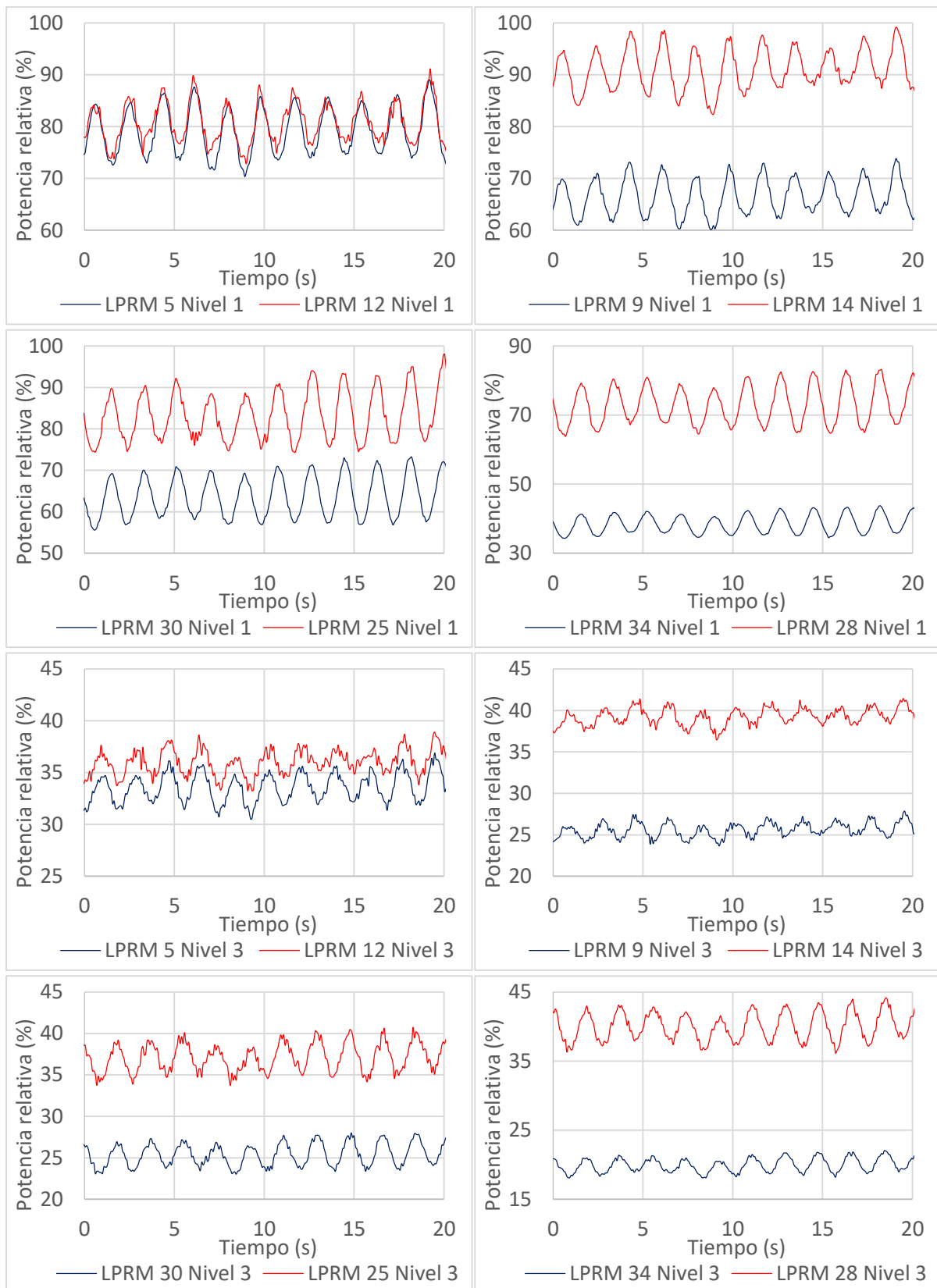


Figura 32: Señal de los LPRMs 5 y 12, 9 y 14, 30 y 25, 34 y 28 a las posiciones axiales 1 y 3 según el *benchmark*

La señal de los LPRMs 5 y 9 a la posición axial 1 oscila en fase mientras que oscila en oposición de fase respecto a los LPRMs 30 y 34 (figura 33). Es decir que la potencia oscila por mitad, la mitad superior siendo en oposición de fase con la mitad inferior tal y como se espera según las amplitudes de los tres primeros modos.

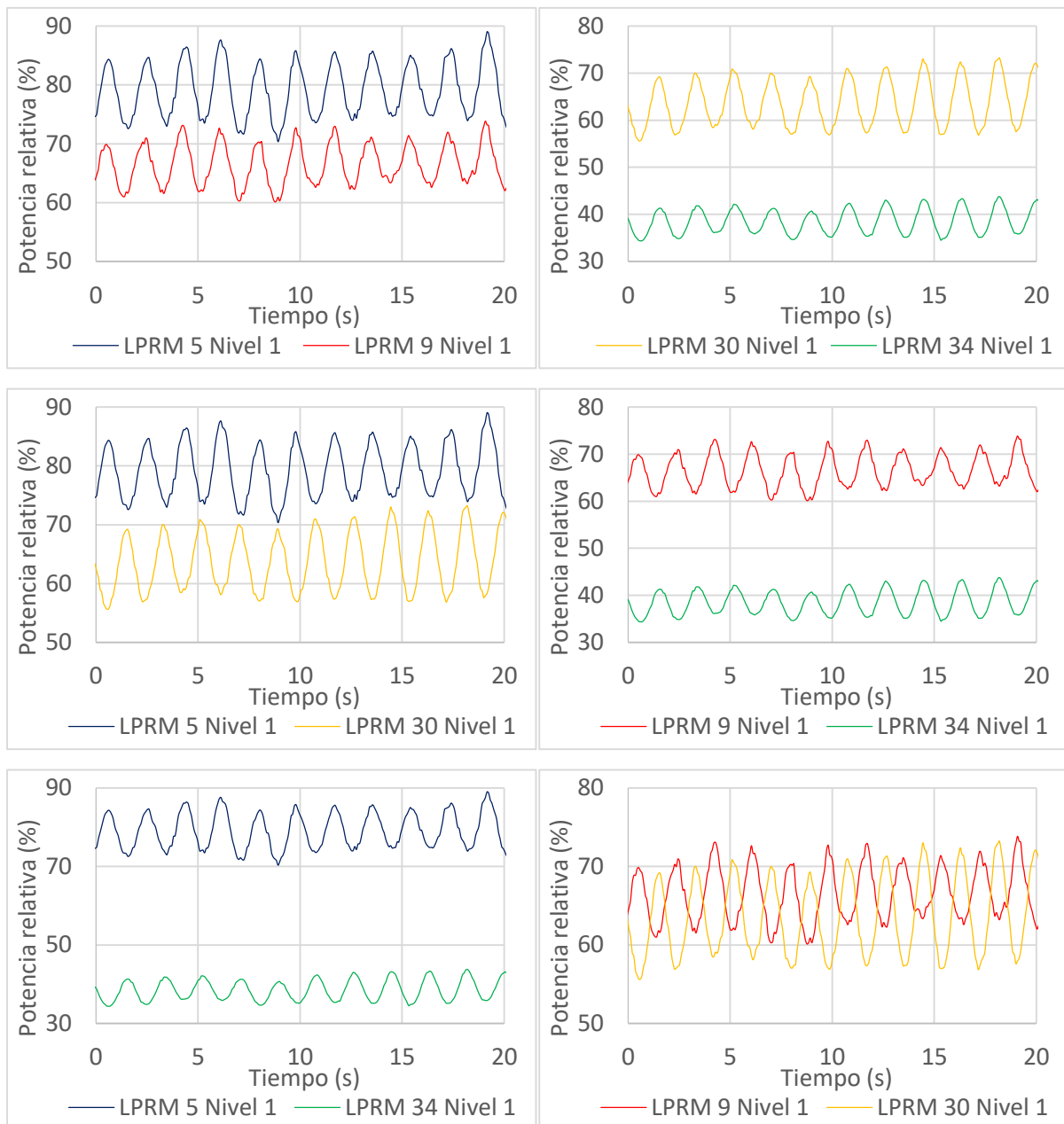


Figura 33: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 1 según el *benchmark*

La señal de los LPRMs 5 y 9 a la posición axial 3 oscila en fase mientras que oscila en oposición de fase respecto a los LPRMs 30 y 34 (figura 34). Es decir que la potencia oscila por mitad, la mitad superior siendo en oposición de fase con la mitad inferior tal y como se espera según las amplitudes de los tres primeros modos.

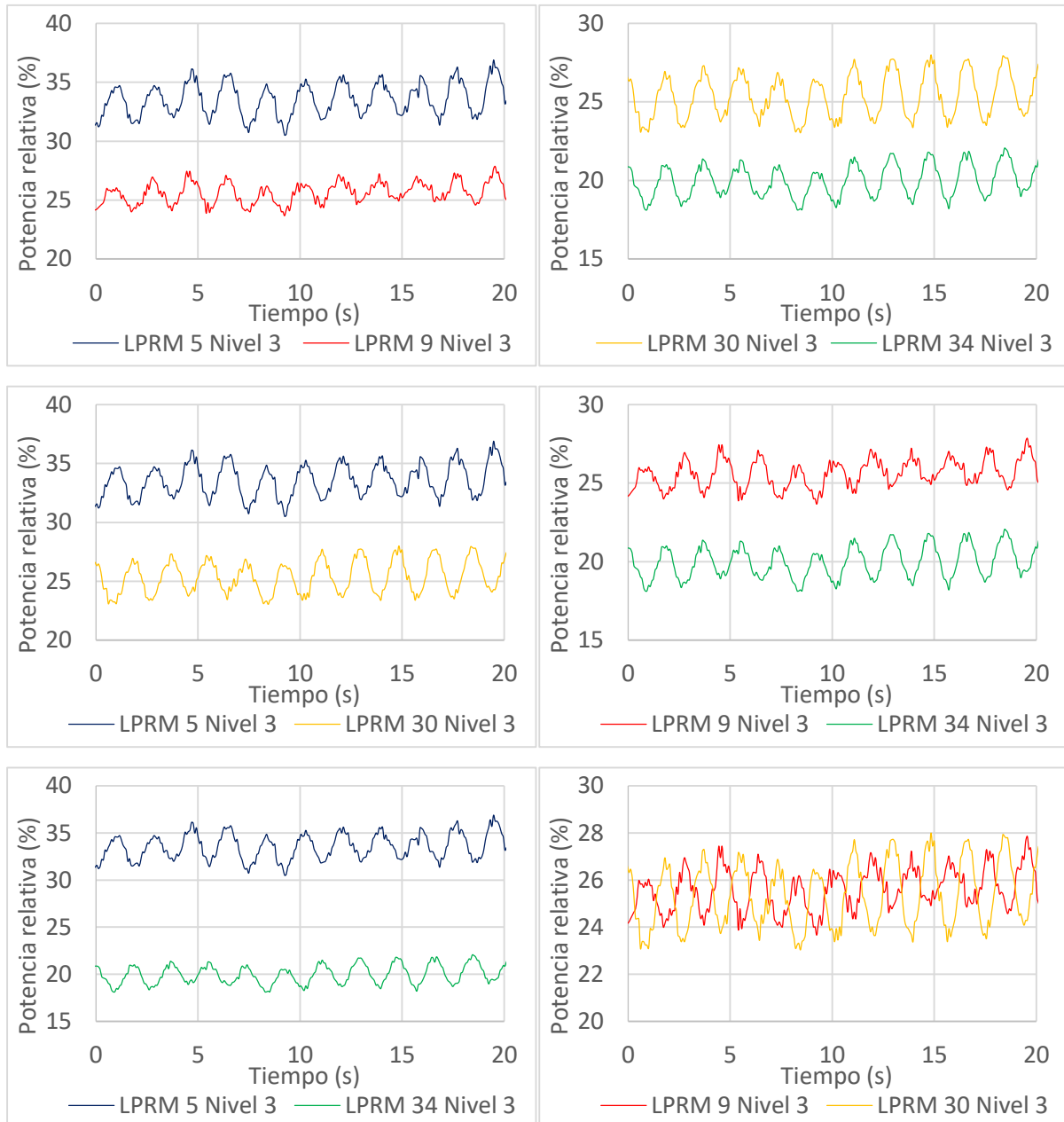


Figura 34: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 3 según el *benchmark*



### 6.4.2 Modelo de los canales

En esta sección, se representan las señales de los LPRMs obtenidas con el modelo de los canales (figuras 35 hasta 38). En este caso, la frecuencia de oscilación de las señales es 0,57 Hz. Las señales de las series de LPRMs 5 y 9 en las posiciones axiales 1 y 3 oscilan con un retardo de fase ( $45^\circ$ ) mientras que las series de LPRMs 30 y 34 oscilan en fase (figura 35).

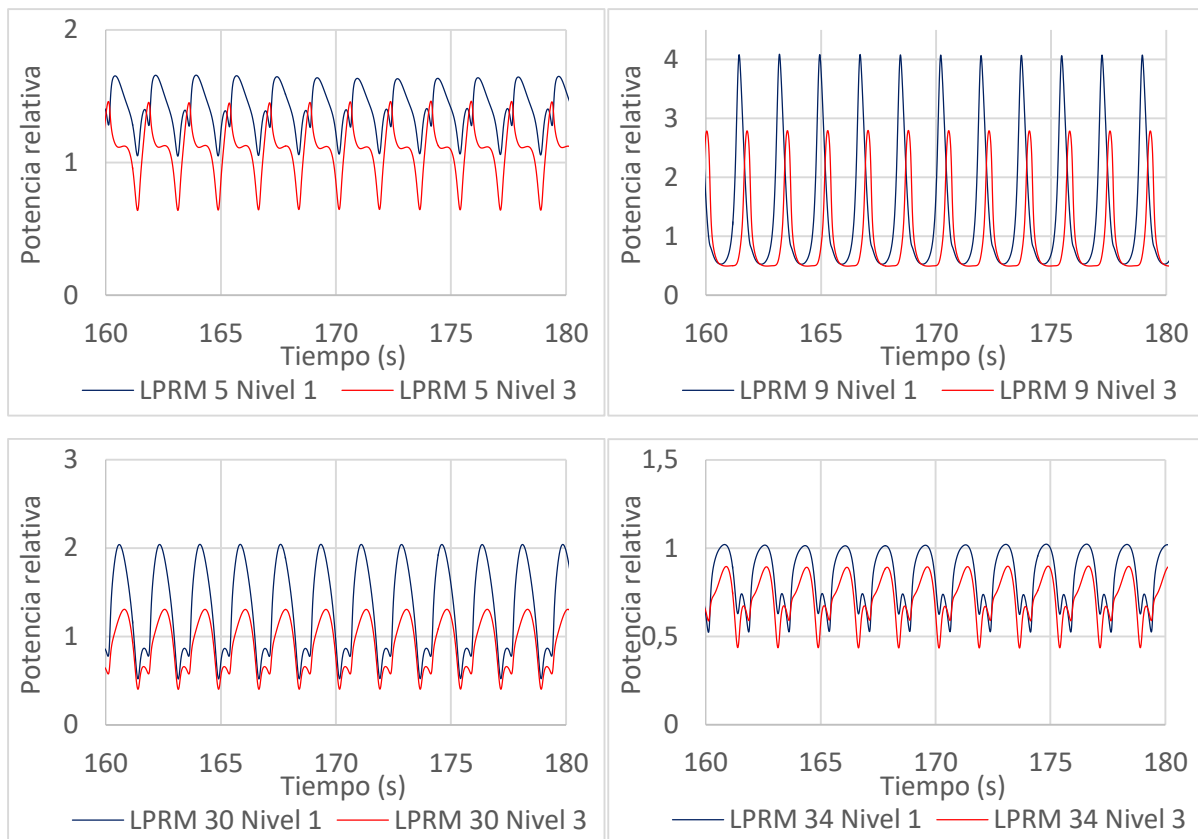


Figura 35: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a las posiciones axiales 1 y 3 para el modelo de los canales

Las señales de dos LPRMs en un mismo cuadrante oscilan en fase (figura 36), tal y como se espera según la división efectuada por los armónicos de la potencia representada en el mapa radial de la figura 11.

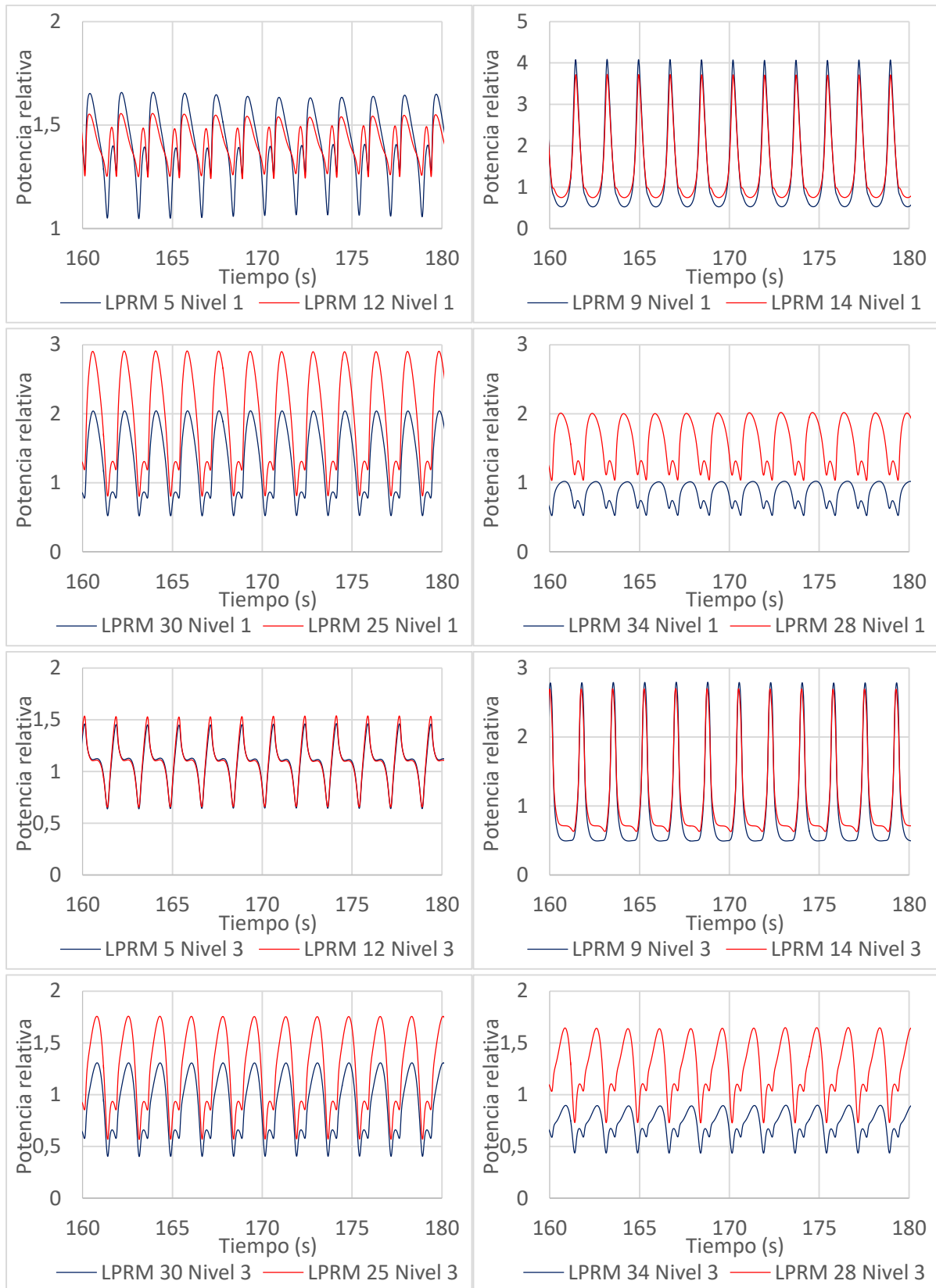


Figura 36: Señal de los LPRMs 5/12, 9/14, 30/25, 34/28 a las posiciones axiales 1 y 3 para el modelo de los canales

La señal de los LPRMs 5, 30 y 34 a la posición axial 1 (figura 37) oscila en fase mientras que oscila en oposición de fase respecto al LPRM 9. Es decir que la potencia en tres cuadrantes oscila en fase.

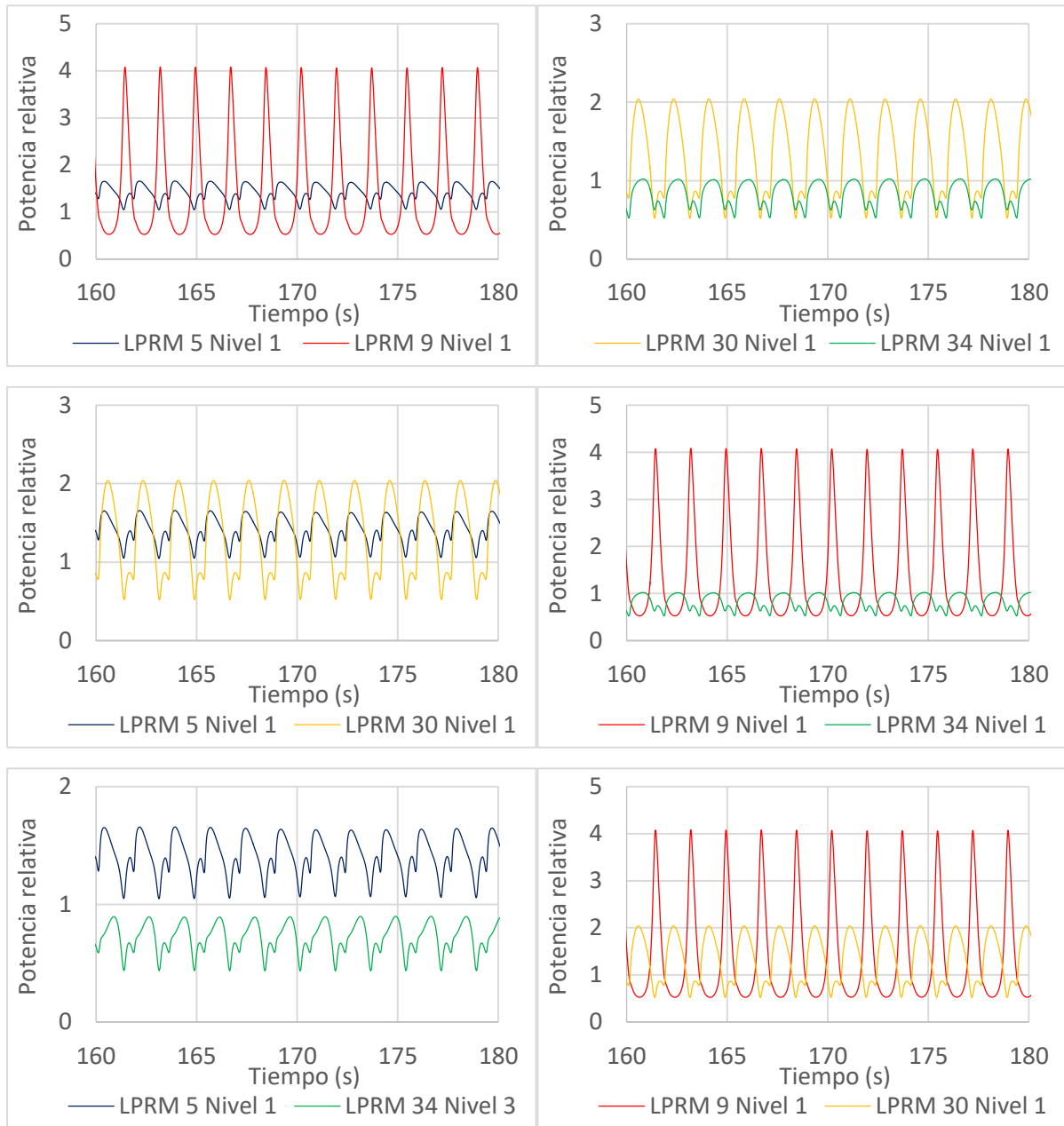


Figura 37: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 1 para el modelo de los canales

La señal de los LPRMs 5 y 9 a la posición axial 3 oscila en fase mientras que oscila en oposición de fase respecto a los LPRMs 30 y 34 (figura 38). Es decir que la potencia oscila por mitad, la mitad superior siendo en oposición de fase con la mitad inferior tal y como se espera según las amplitudes de los tres primeros modos.

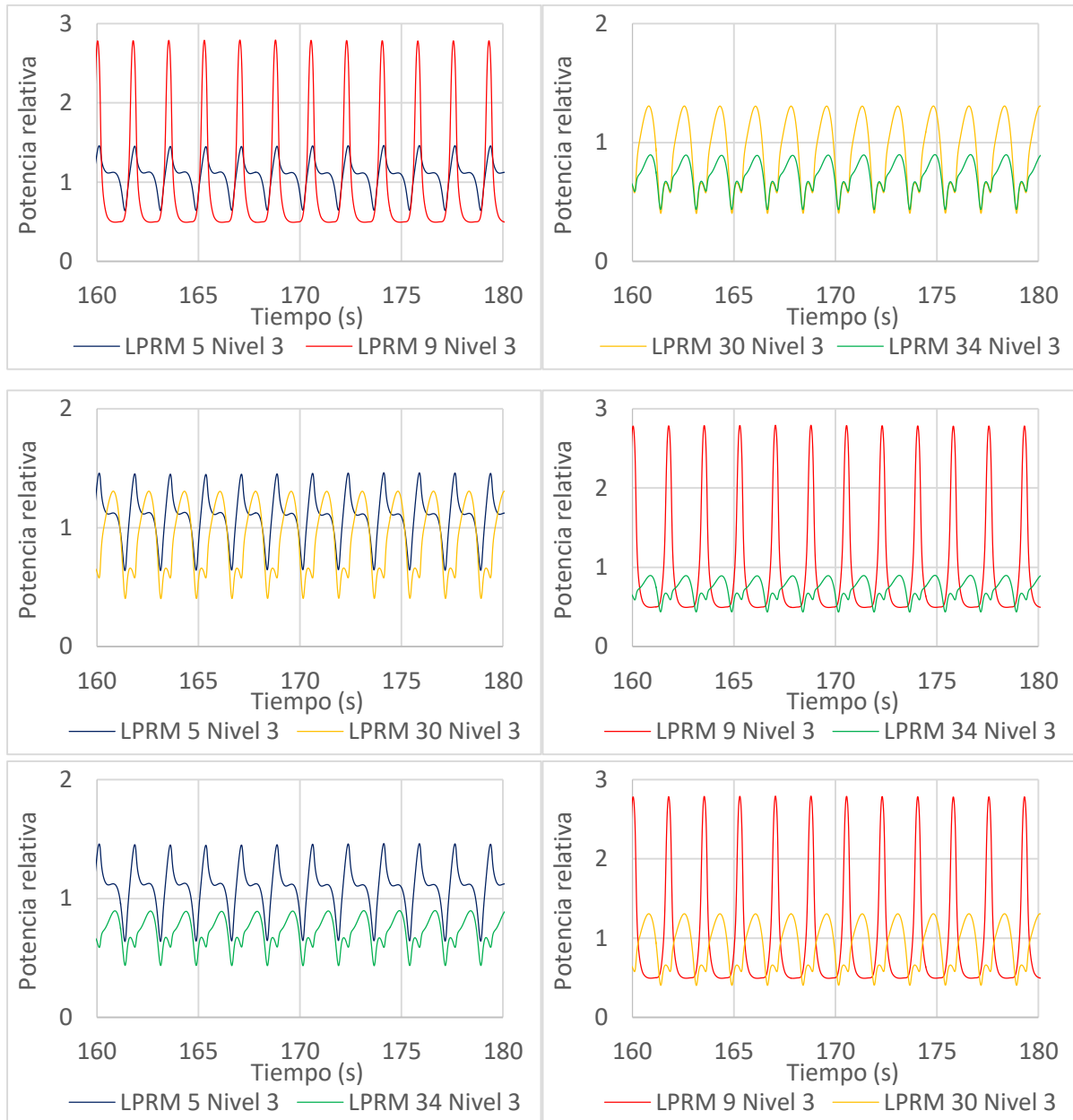


Figura 38: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 3 para el modelo de los canales

### 6.4.3 Modelo de la vasija

En esta sección, se representan las señales de los LPRMs obtenidas con el modelo de la vasija (figuras 39 hasta 42). En este caso, la frecuencia de oscilación de las señales es 0,44Hz. Las señales de una misma serie de LPRMs en las posiciones axiales 1 y 3 oscilan con un retardo de fase ( $45^\circ$ ) para cada cuadrante (figura 39).

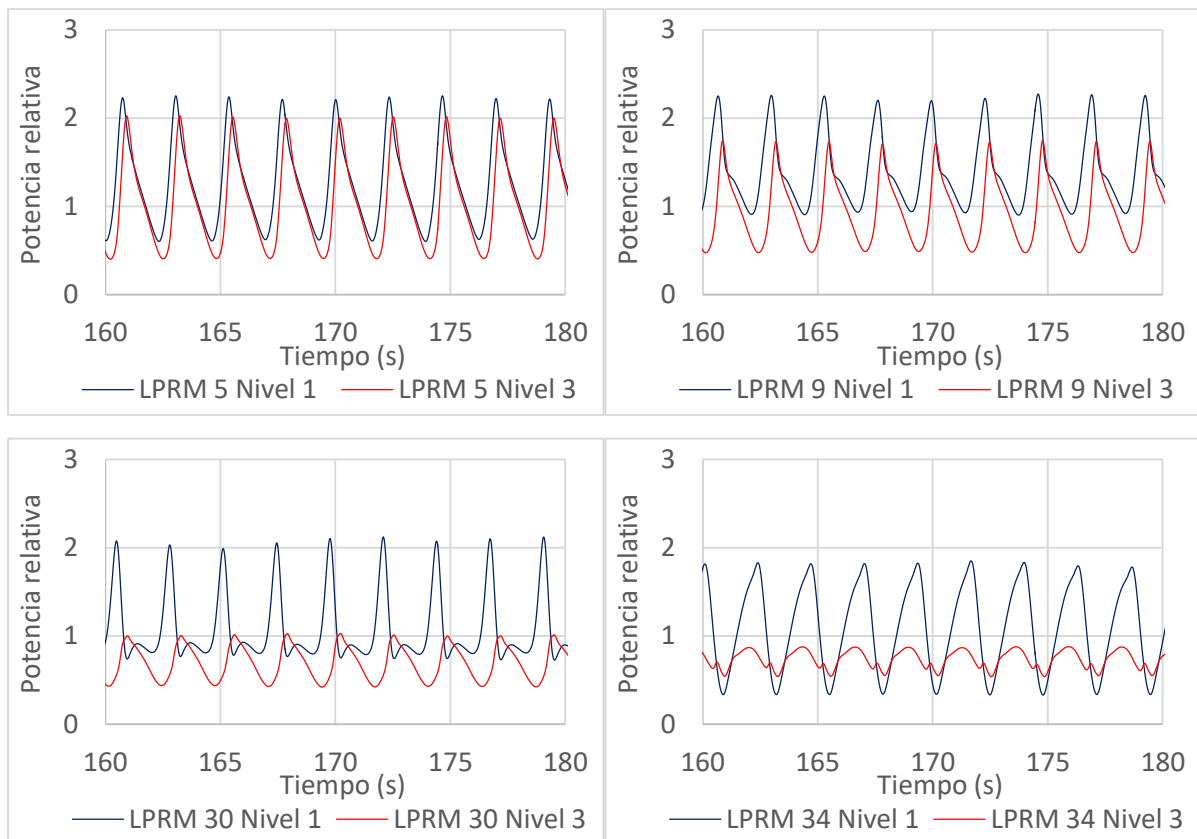


Figura 39: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a las posiciones axiales 1 y 3 para el modelo de la vasija

Las señales de dos LPRMs en un mismo cuadrante oscilan en fase (figura 40), tal y como se espera según la división efectuada por los armónicos de la potencia representada en el mapa radial de la figura 11.

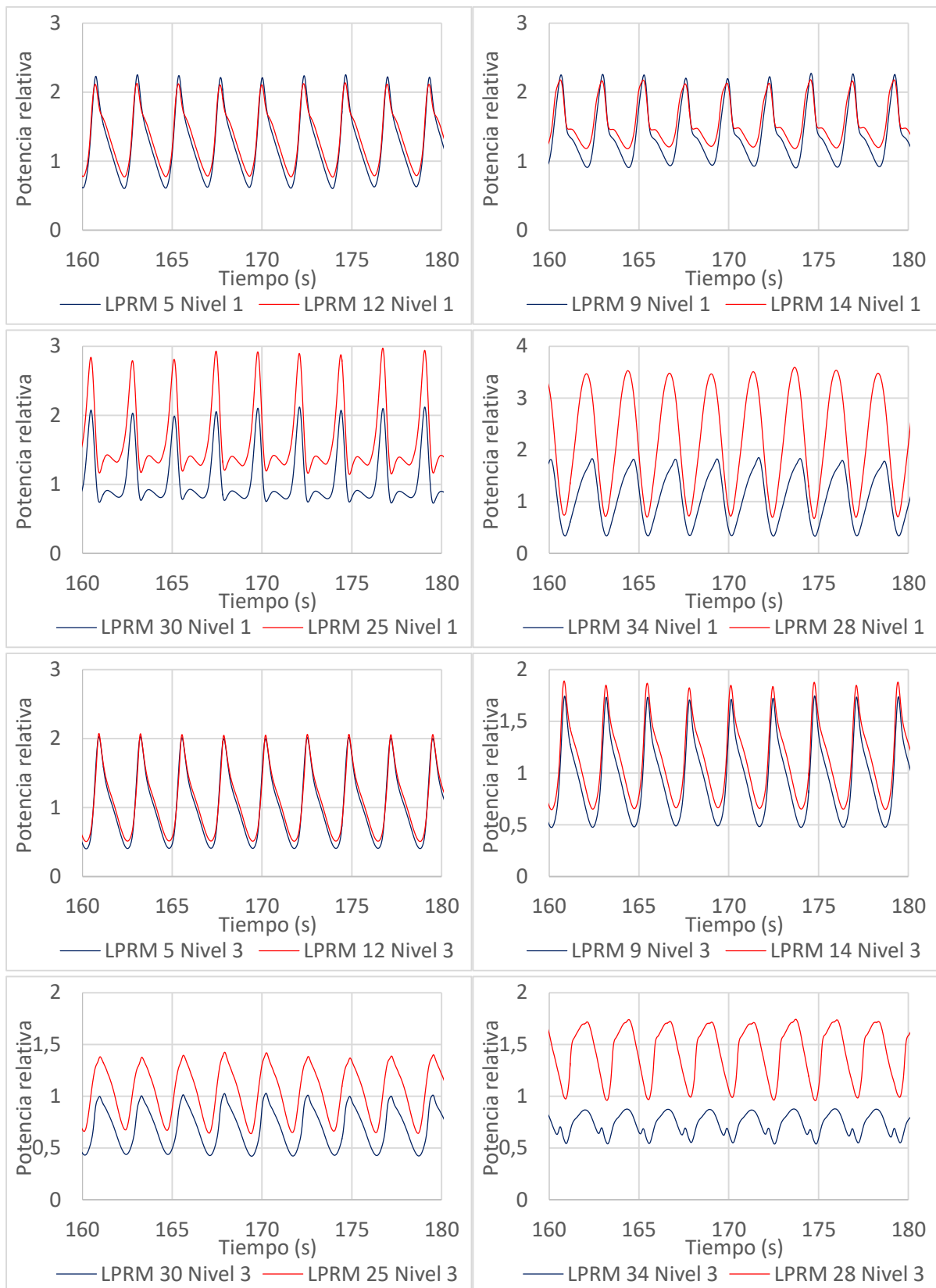


Figura 40: Señal de los LPRMs 5/12, 9/14, 30/25, 34/28 a las posiciones axiales 1 y 3 para el modelo de la vasija

La señal de los LPRMs 5 y 9 a la posición axial 1 (figura 41) oscila en fase mientras que oscila fuera de fase respecto a los LPRMs restantes. Es decir que la mitad superior oscila en oposición de fase con la mitad inferior.

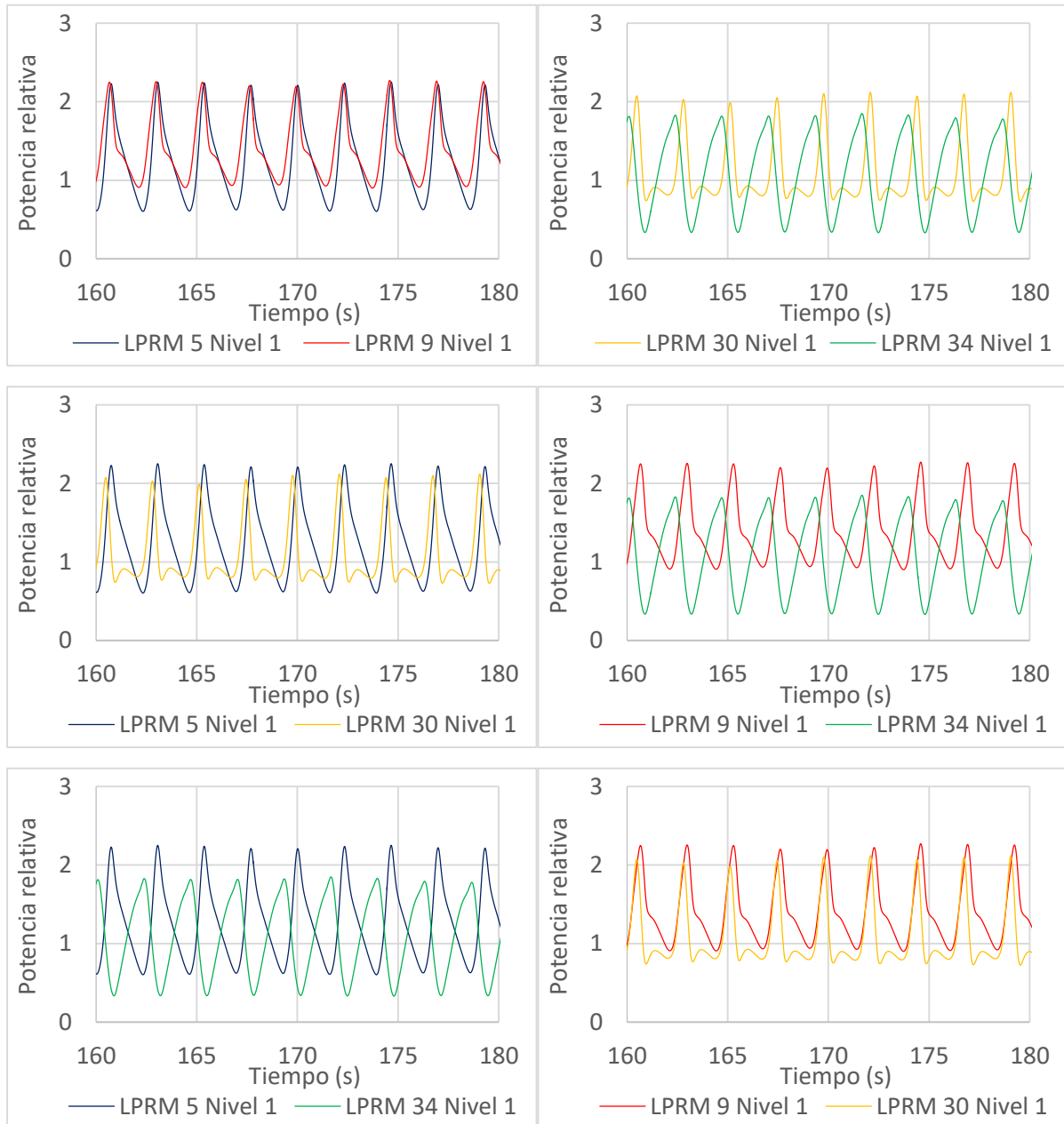
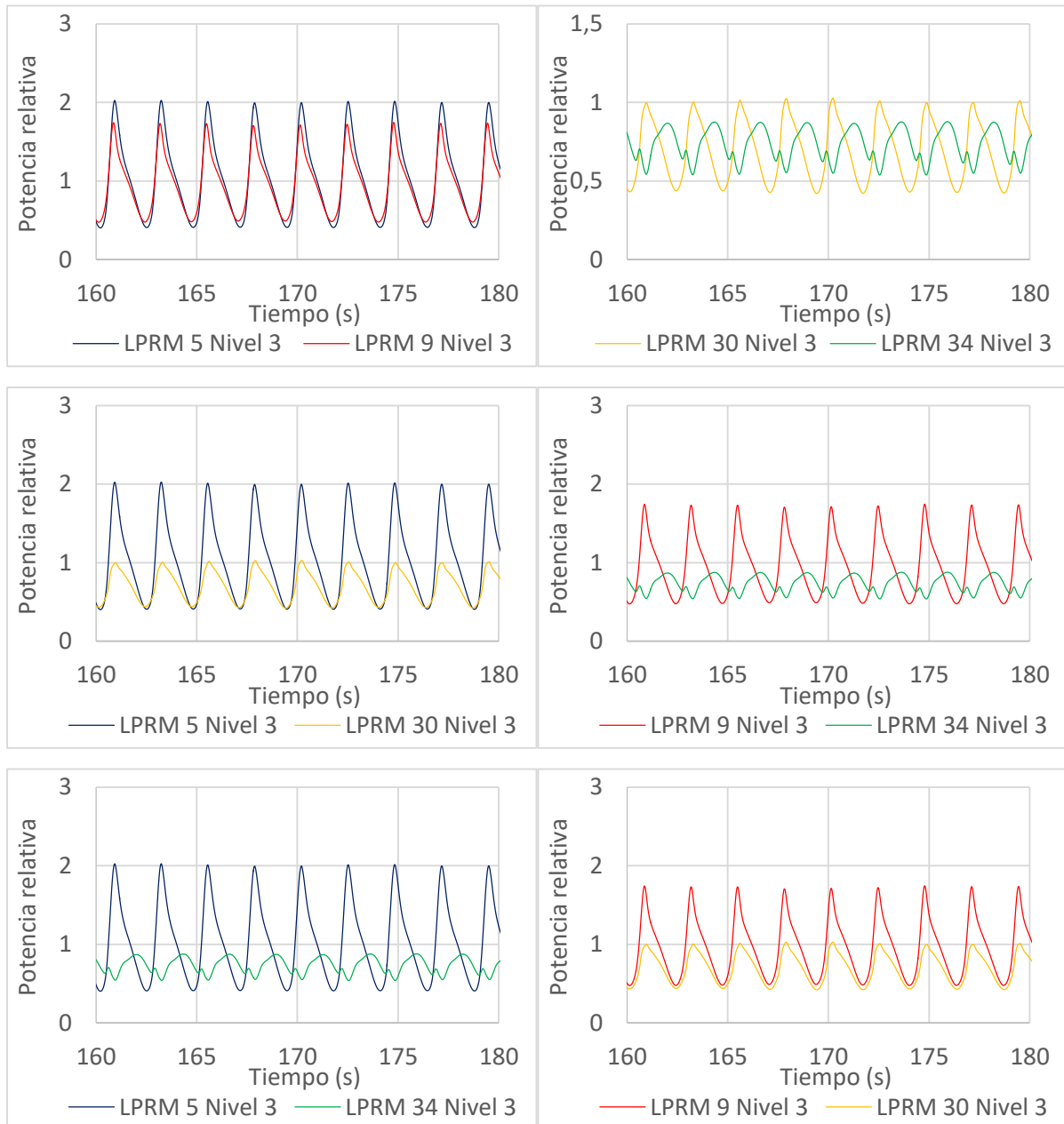


Figura 41: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 1 para el modelo de la vasija

La señal de los LPRMs 5, 9 y 30 a la posición axial 3 (figura 42) oscila en fase mientras que oscila en oposición de fase respecto al LPRM 34. Es decir que la potencia en tres cuadrantes oscila en fase.



**Figura 42: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 3 para el modelo de la vasija**



## 6.5 Perfil radial de la potencia

Se analiza la potencia radial en 8 nodos de cada modelo termohidráulico. Los nodos 151 y 239 se encuentran en el cuadrante superior izquierdo. Los nodos 166 y 248 se encuentran en el cuadrante superior derecho. Los nodos 607 y 525 se encuentran en el cuadrante inferior izquierdo. Los nodos 622 y 534 se encuentran en el cuadrante inferior derecho. La potencia en nodos en estas regiones simétricas se presenta en las figuras 43 hasta 46. En la tabla 13, se compara por pares la potencia relativa en los nodos de un mismo cuadrante y de cuadrantes simétricos. La potencia en dos nodos de un mismo cuadrante oscila en fase, tal y como se espera según la división efectuada. En cuanto a los cuadrantes simétricos, se destacan oscilaciones en fase y fuera de fase y hay que analizar cada caso en detalle.











Potencia relativa Nodos	Cuadrantes	Modelo	
		Canales	Vasija
151 y 239		En fase	En fase
166 y 248		En fase	En fase
607 y 525		En fase	En fase
622 y 534		En fase	En fase
151 y 166		Oposición de fase	En fase
607 y 622		En fase	Retardo de fase
151 y 607		Retardo de fase	Avance de fase
166 y 622		Oposición de fase	Oposición de fase
151 y 622		Retardo de fase	Oposición de fase
166 y 607		Oposición de fase	Oposición de fase

Tabla 13: Tabla comparativa de la potencia relativa en los nodos para los dos modelos termohidráulicos

### 6.5.1 Modelo de los canales

En esta sección, se representan las figuras de potencia radial obtenidas con el modelo de los canales. Con este modelo, la potencia oscila con una frecuencia de 0,57Hz. Las oscilaciones de potencia en dos nodos de un mismo cuadrante están en fase y casi superpuestas (figura 43).

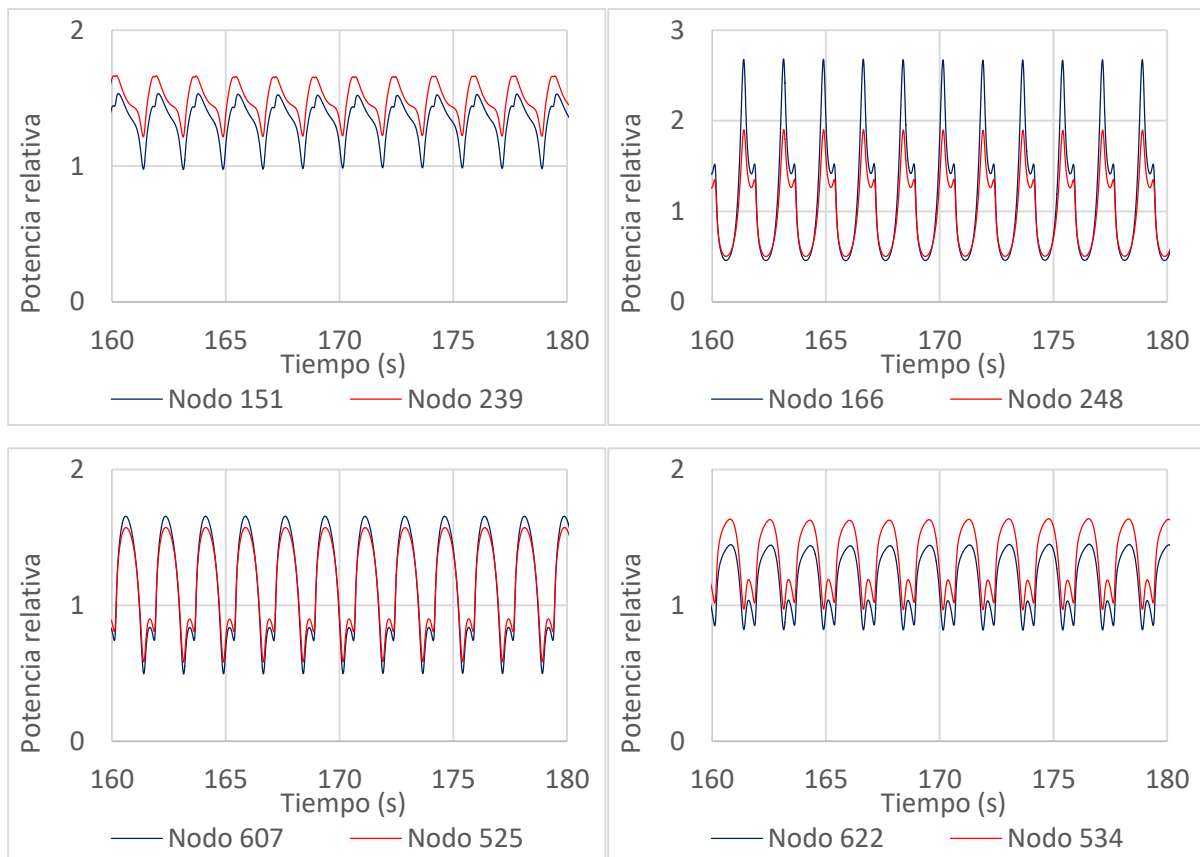


Figura 43: Potencia relativa en los nodos 151/239, 166/248, 607/525, 622/534 para el modelo de los canales

En la figura 44, se compara por pares la potencia en nodos simétricos. La potencia en los nodos 607 y 622 oscila en fase mientras que la potencia en los nodos 151 y 166 oscila fuera de fase respecto a los otros nodos. Es decir que la potencia oscila en fase en la mitad inferior.

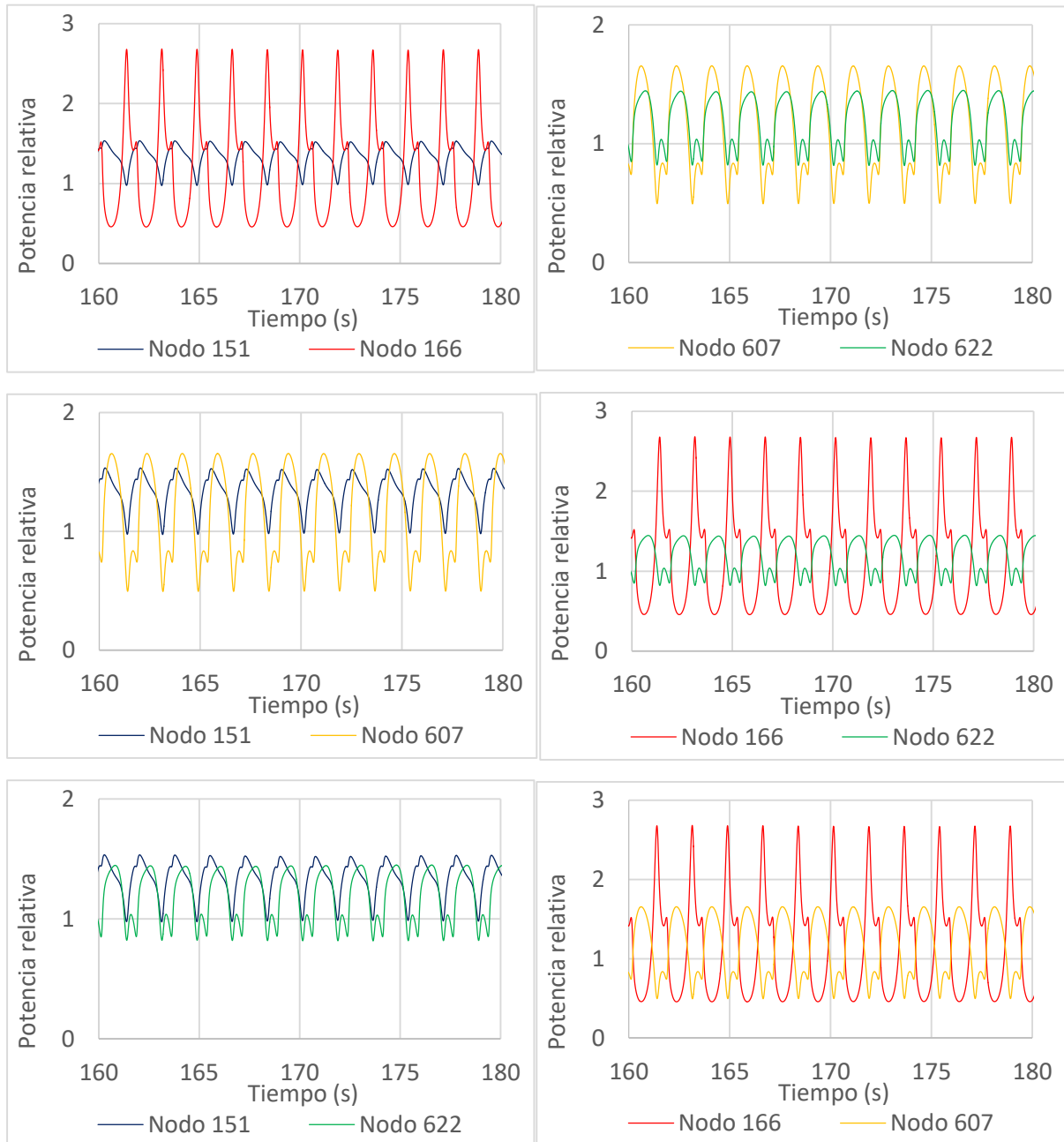
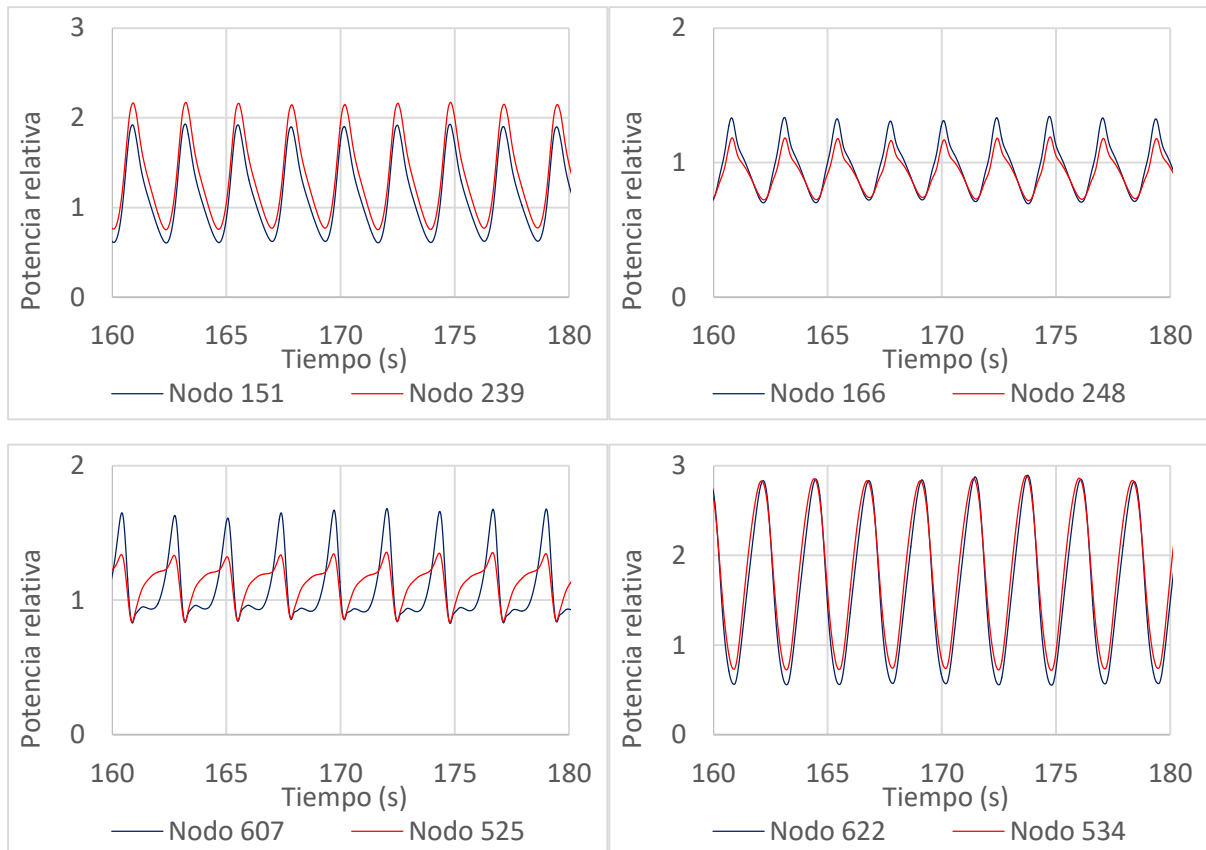


Figura 44: Potencia relativa en los nodos 151, 166, 607, 622 para el modelo de los canales

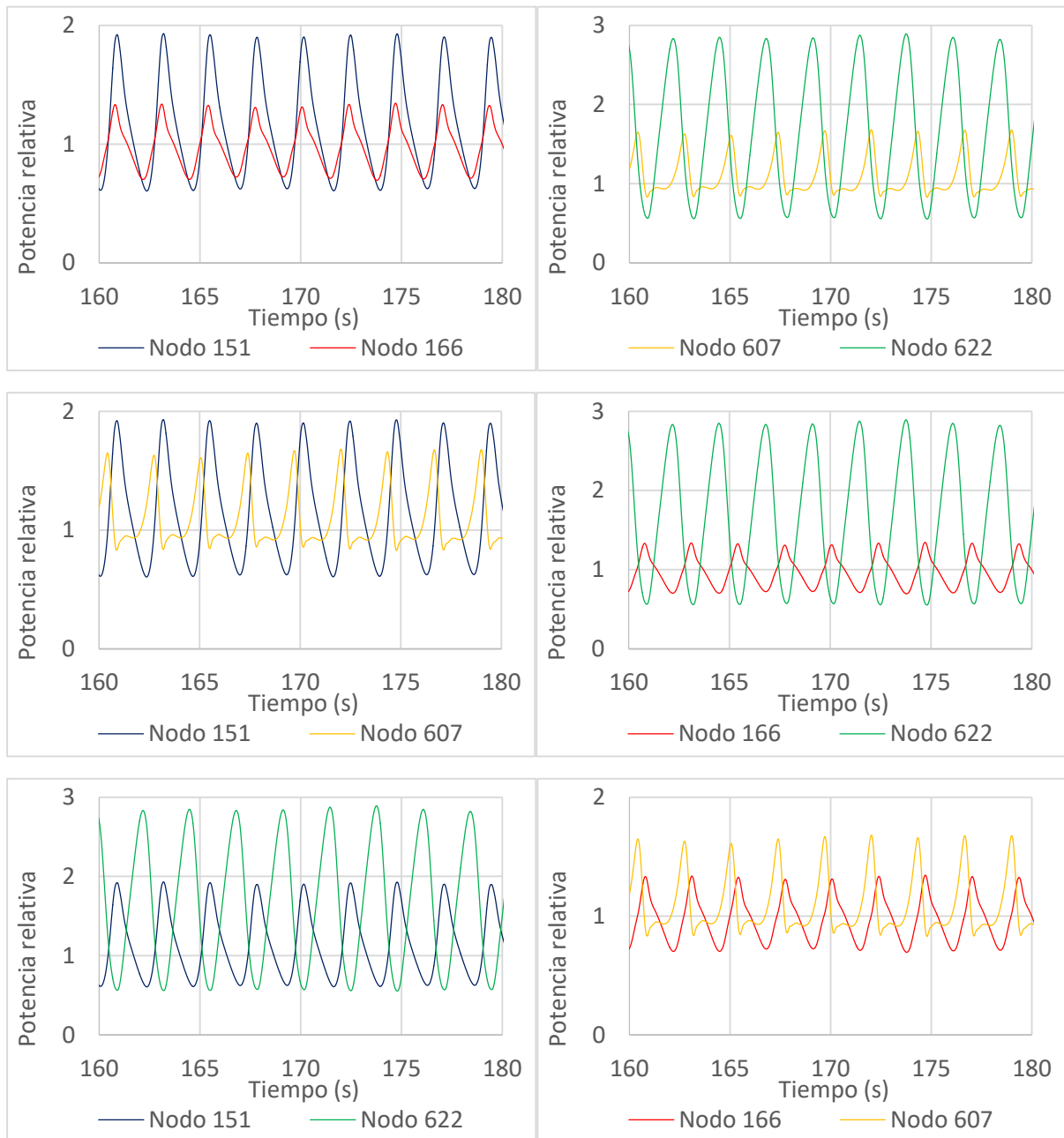
### 6.5.2 Modelo de la vasija

En esta sección, se representan las figuras de potencia radial obtenidas con el modelo de los canales. Con este modelo, la potencia oscila con una frecuencia de 0,44Hz. Las oscilaciones de potencia en dos nodos de un mismo cuadrante están en fase y casi superpuestas (figura 45).



**Figura 45:** Potencia relativa en los nodos 151/239, 166/248, 607/525, 622/534 para el modelo de la vasija

En la figura 46, se compara por pares la potencia en nodos simétricos. La potencia en los nodos 151 y 166 oscila en fase mientras que la potencia en los nodos 607 y 622 oscila fuera de fase respecto a los otros nodos. Es decir que la potencia oscila en fase en la mitad superior.



**Figura 46: Potencia relativa en los nodos 151, 166, 607, 622 para el modelo de la vasija**

## 6.6 Perfil axial de la potencia

Se analiza la potencia axial en 2 planos de cada modelo termohidráulico. La potencia relativa en los planos 11 y 17 está en oposición de fase para cada modelo (0,57Hz y 0,44Hz respectivamente).

Potencia relativa	Modelo	
Planos	Canales	Vasija
11 y 17	Oposición de fase	Oposición de fase

Tabla 14: Tabla comparativa de la potencia axial para los dos modelos termohidráulicos

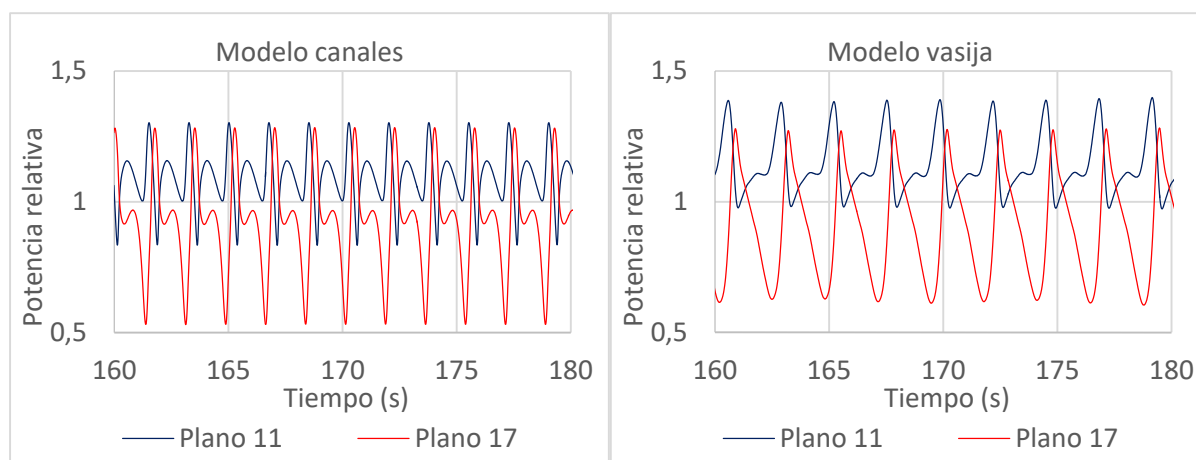


Figura 47: Potencia relativa en los planos 11 y 17 para los dos modelos termohidráulicos

## 6.7 Caudal en los canales

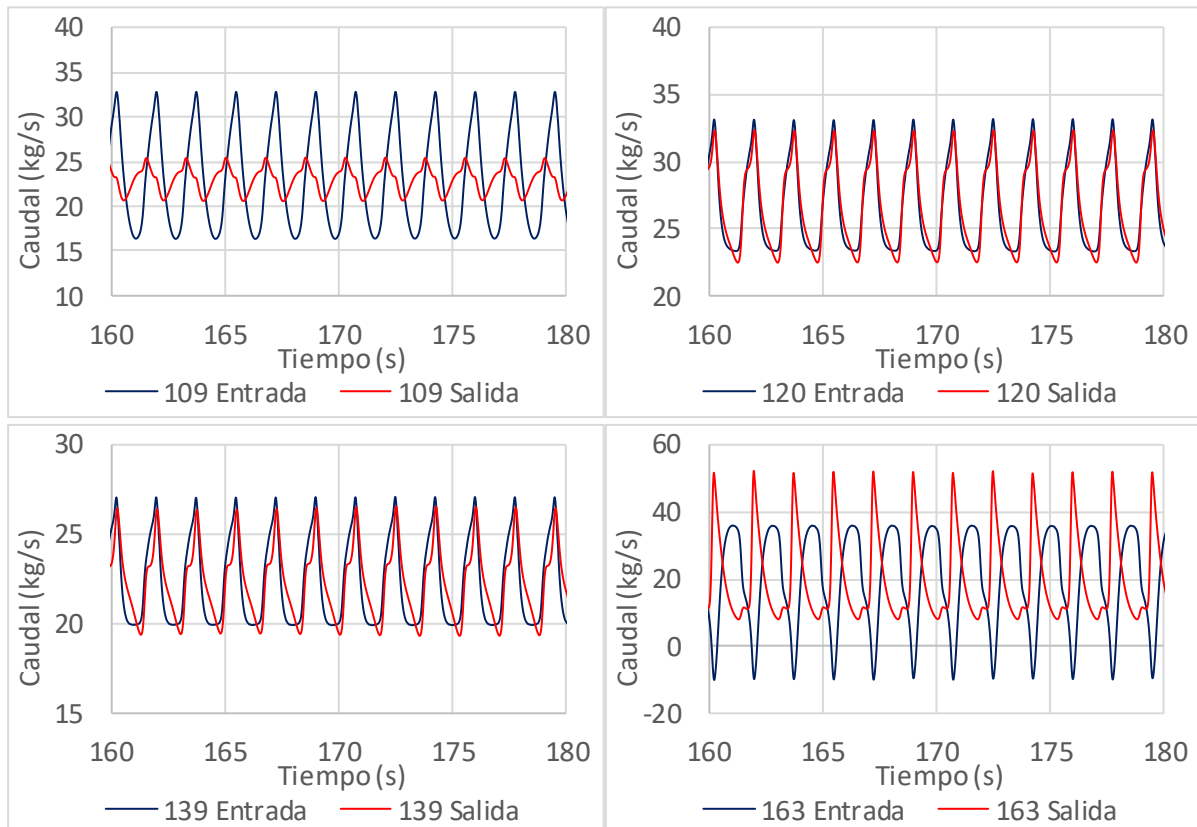
En esta sección, se analizan el caudal de entrada y de salida en un mismo canal, en dos canales de un mismo cuadrante y en dos canales perteneciente a cuadrantes simétricos, según la división efectuada por los armónicos de la potencia representada el mapa radial de la figura 11. Se recuerda que los canales 163 y 160 se encuentran en el cuadrante superior derecho, los canales 139 y 141 se encuentran en el cuadrante superior izquierdo, los canales 120 y 122 se encuentran en el cuadrante inferior derecho y los canales 109 y 105 se encuentran en el cuadrante inferior izquierdo. En la tabla 15, se compara por pares los caudales de entrada y de salida de estos canales para cada modelo. El caudal másico de la entrada y salida del núcleo en estas regiones simétricas se presenta en las figuras 48 hasta 55. Los caudales de entrada y de salida en dos canales de un mismo cuadrante oscilan en fase. En cuanto a los cuadrantes simétricos, se destacan oscilaciones en fase y fuera de fase y hay que analizar cada caso en detalle.

Caudal		Cuadrantes	Modelo	
Nivel	Canales		Canales	Vasija
Entrada y Salida	109		Avance de fase	Oposición de fase
	120		En fase	En fase
	139		En fase	Retardo de fase
	163		Oposición de fase	Oposición de fase
Entrada	109 y 105		En fase	En fase
	120 y 122		En fase	Avance de fase
	139 y 141		En fase	Avance de fase
	163 y 160		En fase	Avance de fase
Salida	109 y 105		En fase	En fase
	120 y 122		En fase	En fase
	139 y 141		En fase	En fase
	163 y 160		En fase	En fase
Entrada	109 y 120		En fase	Retardo de fase
	139 y 163		Oposición de fase	Avance de fase
	109 y 139		En fase	Retardo de fase
	120 y 163		Oposición de fase	Avance de fase
	109 y 163		Oposición de fase	En fase
	120 y 139		En fase	En fase
Salida	109 y 120		Retardo de fase	Avance de fase
	139 y 163		En fase	En fase
	109 y 139		Retardo de fase	En fase
	120 y 163		En fase	Retardo de fase
	109 y 163		Retardo de fase	En fase
	120 y 139		En fase	Retardo de fase

Tabla 15: Tabla comparativa de los caudales máxicos con los dos modelos termohidráulicos

### 6.7.1 Modelo de los canales

En esta sección, se representan las figuras de caudales obtenidas con el modelo de los canales. Con este modelo, los caudales oscilan con una frecuencia de 0,57Hz. La figura 48 compara el caudal de entrada y de salida en un mismo canal. En los canales 120 y 139, los caudales están en fase. En el canal 109, los caudales están fuera de fase y están en oposición de fase en el canal 163. Entonces la oscilación de caudal se propaga en un canal de una forma diferente según el cuadrante.



**Figura 48: Caudal de entrada y de salida en los canales 109, 120, 139 y 163 para el modelo de los canales**

La figura 49 compara el caudal de entrada y de salida en dos canales de un mismo cuadrante. En todos los cuadrantes, los caudales de entrada están en fase, así como los caudales de salida.



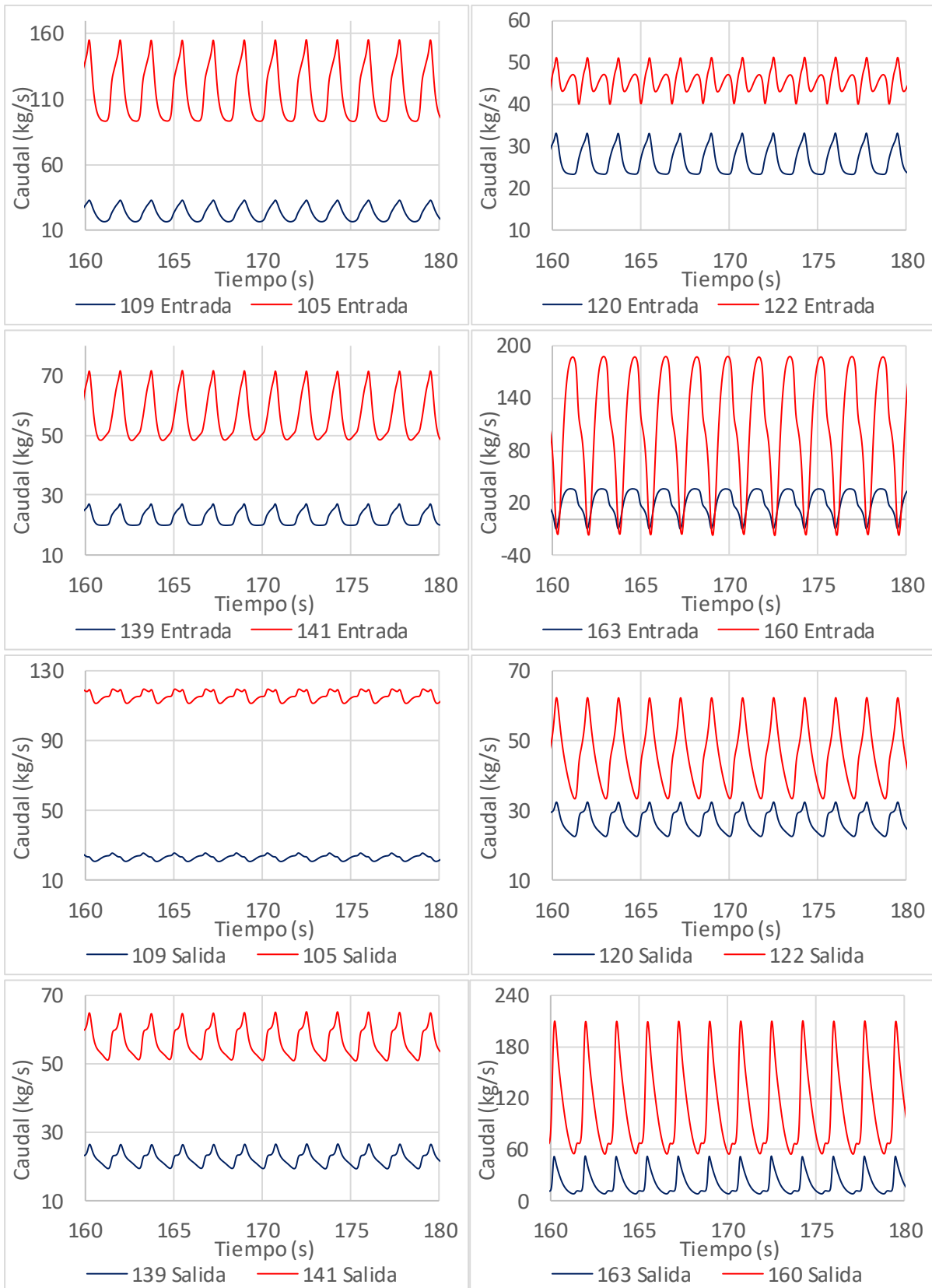


Figura 49: Caudal de entrada y de salida en los canales 109/105, 120/122, 139/141, 163/160 para el modelo de los canales

La figura 50 compara el caudal de entrada en dos canales de cuadrantes simétricos. El caudal de entrada en los canales 109, 120 y 139 oscila en fase mientras que el del canal 163 oscila en oposición de fase con los canales restantes. Es decir que el caudal de entrada oscila en fase en tres cuadrantes.

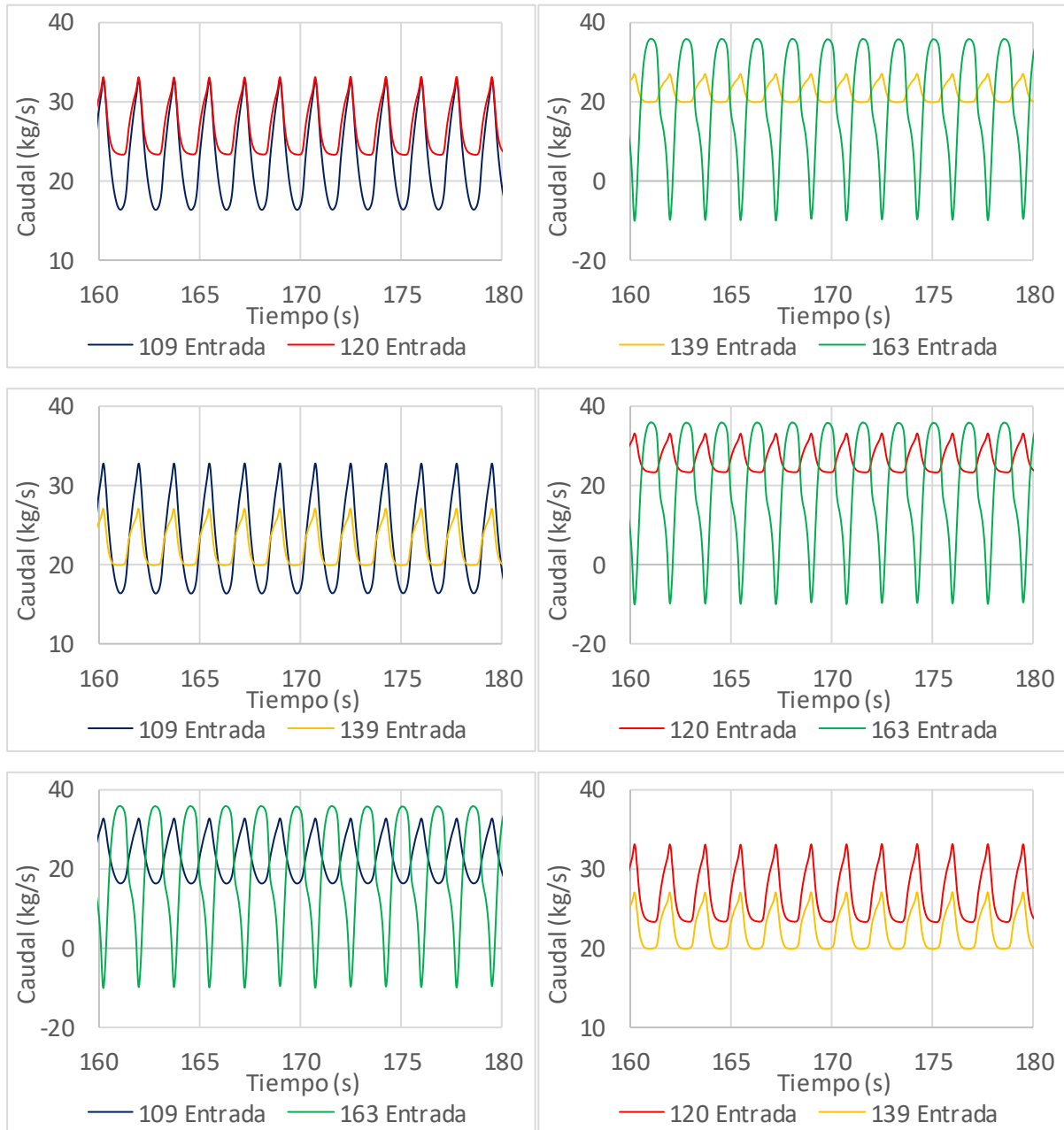


Figura 50: Caudal de entrada en los canales 109, 120, 139 y 163 para el modelo de los canales

La figura 51 compara el caudal de salida en dos canales de cuadrantes simétricos. El caudal de salida en los canales 120, 139 y 163 oscila en fase mientras que el del canal 109 oscila fuera de fase con los canales restantes. Es decir que el caudal de salida oscila en fase en tres cuadrantes

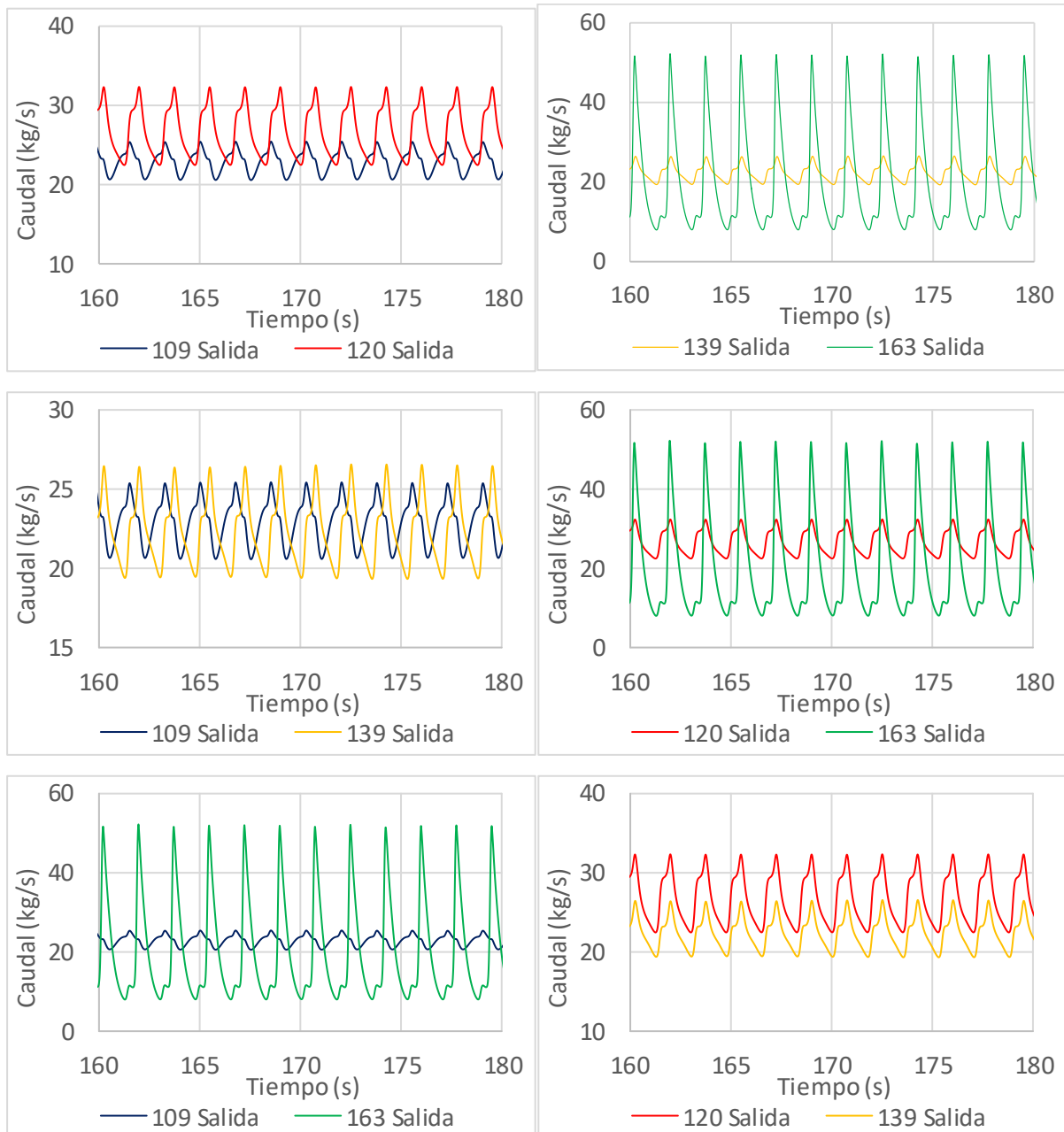
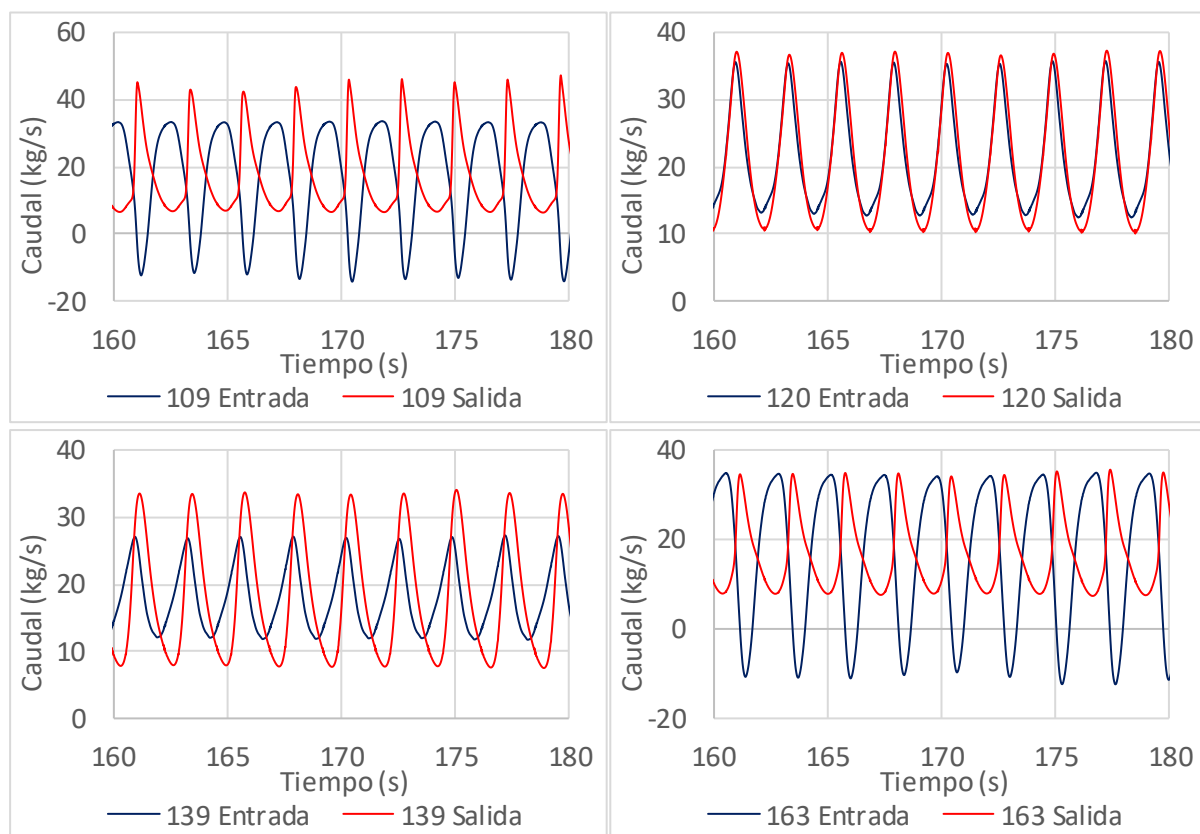


Figura 51: Caudal de salida en los canales 109, 120, 139 y 163 para el modelo de los canales

### 6.7.2 Modelo de la vasija

En esta sección, se representan las figuras de caudales obtenidas con el modelo de la vasija. Con este modelo, los caudales oscilan a una frecuencia de 0,44Hz. La figura 52 compara el caudal de entrada y de salida en un mismo canal. En los canales 120 y 139, los caudales están en fase o en avance de fase y están en oposición de fase los canales 109 y 163. Entonces la oscilación de caudal se propaga en un canal de una forma diferente según el cuadrante.



**Figura 52: Caudal de entrada y de salida en los canales 109, 120, 139 y 163 para el modelo de la vasija**

La figura 53 compara el caudal de entrada y de salida en dos canales de un mismo cuadrante. En todos los cuadrantes, los caudales de entrada están en fase o en avance de fase, así como los caudales de salida.

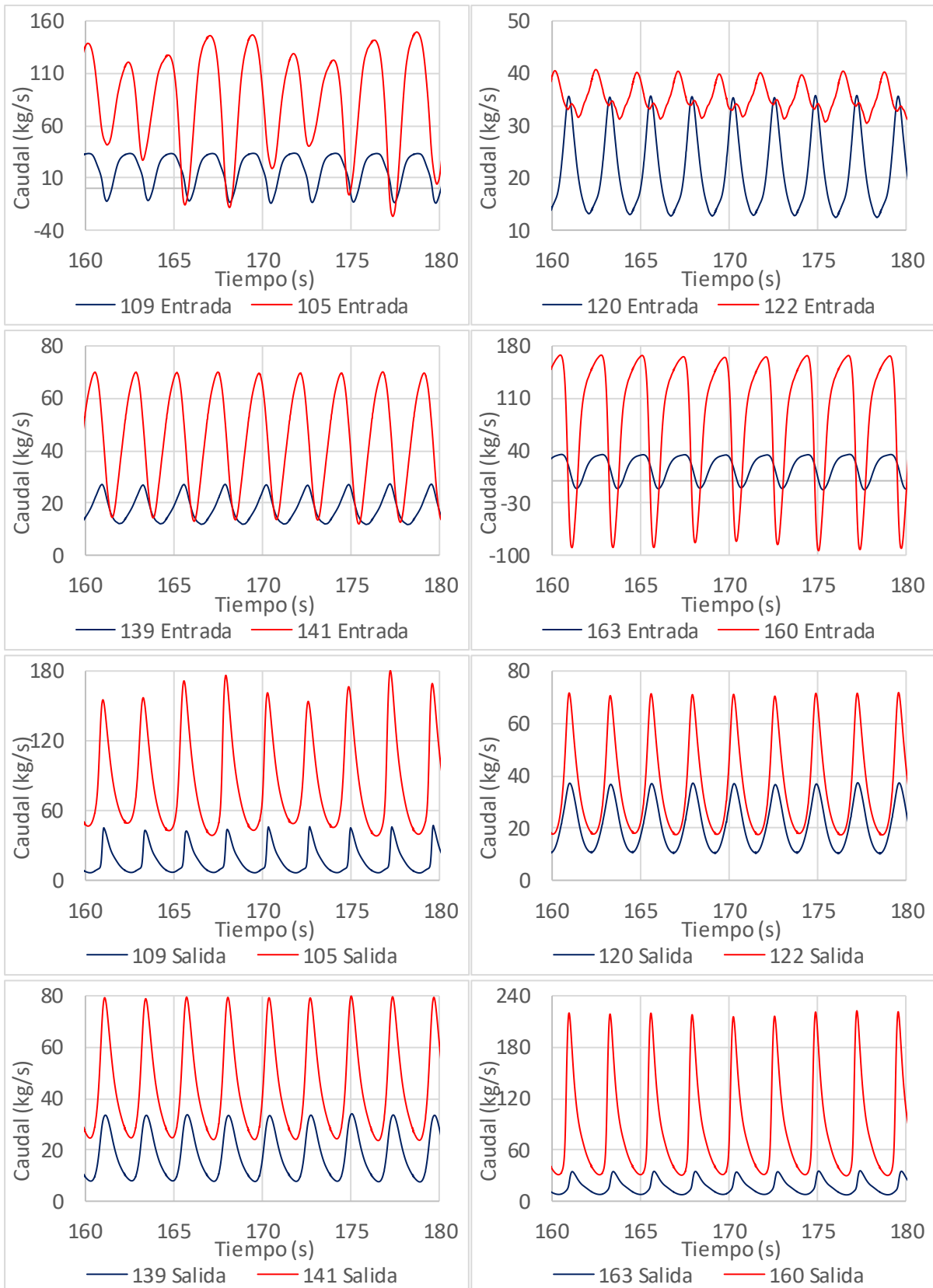


Figura 53: Caudal de entrada y de salida en los canales 109/105, 120/122, 139/141, 163/160 para el modelo de la vasija

La figura 54 compara el caudal de entrada en dos canales de cuadrantes simétricos. El caudal de entrada en los canales 109 y 163 oscila en fase, así como en los canales 120 y 139. El caudal de entrada en los canales 109 y 163 oscila en oposición de fase, así como en los canales 120 y 139. Es decir que el caudal de entrada oscila en fase en cuadrantes diametralmente opuestos.

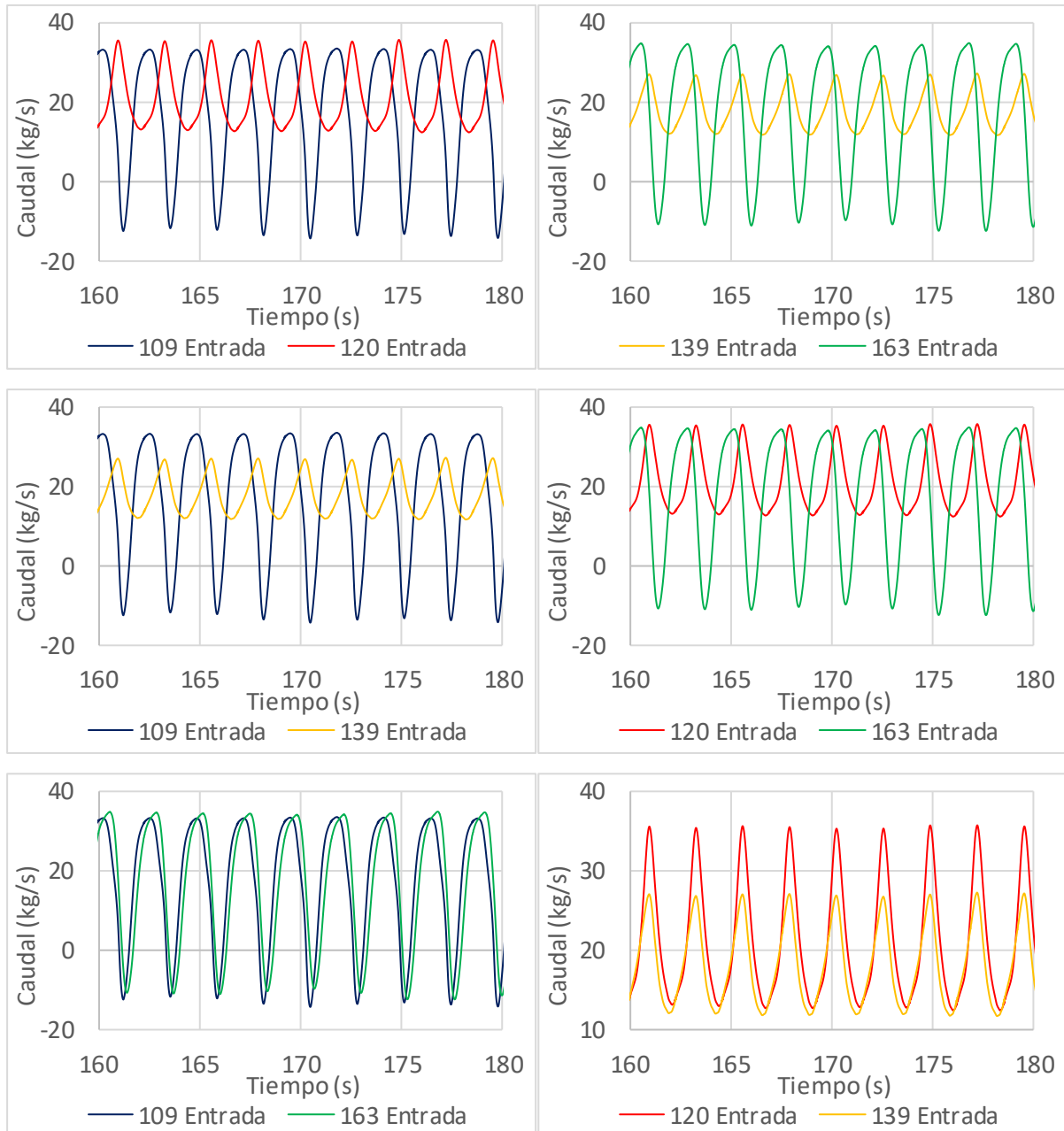
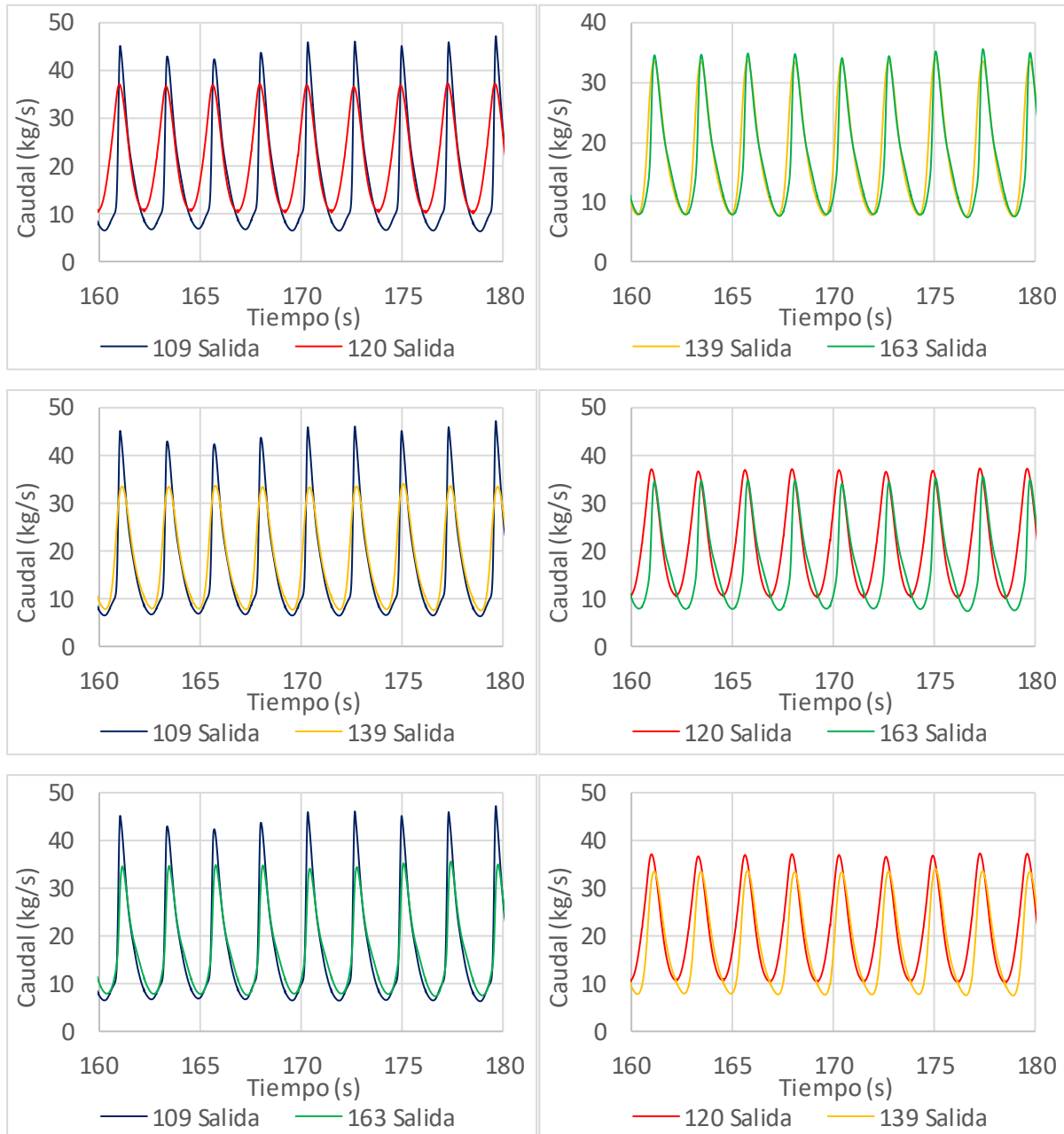


Figura 54: Caudal de entrada en los canales 109, 120, 139 y 163 para el modelo de la vasija

La figura 55 compara el caudal de salida en dos canales de cuadrantes simétricos. El caudal de salida en los canales 109, 139 y 163 oscila en fase mientras que oscila fuera de fase respecto al canal 120. Es decir que el caudal de salida oscila en fase en tres cuadrantes.



**Figura 55:** Caudal de salida en los canales 109, 120, 139 y 163 para el modelo de la vasija





## 7 Resultados de los transitorios con perturbación

En esta sección, se analizan los transitorios con perturbaciones para el modelo de la vasija con el fin de destacar oscilaciones en fase y fuera de fase. No se observan oscilaciones durante el transitorio nulo, es decir durante los primeros 5s. Las perturbaciones por movimiento de barras se aplican desde 5 a 15s. El transitorio finaliza a los 180s, como puede observarse las oscilaciones inducidas por las perturbaciones aplicadas son automantenidas a partir de los 40s (ciclo limite). Entre 10 y 40s, las oscilaciones son caóticas con varios picos y las variables alcanzan valores extremos debido a la amortización numérica inherente en TRACE. Por lo tanto, se analizan para cada perturbación de los 160s hasta los 180s:

- La potencia del reactor,
- El caudal de entrada y de salida en los canales 109, 120, 139 y 163,
- La potencia en los nodos 151, 166, 607 y 622,
- La señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 36 a las posiciones axiales 1 y 3.

Los cuadrantes se refieren a la división del mapa termohidráulico según los primeros armónicos de potencia (figura 11). En las tablas comparativas, se resaltan en negro los cuadrantes que se comparan y se precisa “en fase”, “en oposición de fase”, “en avance de fase” o “en retardo de fase” (por ejemplo, si se precisa “en retardo de fase” para el par A y B, significa que B está en retardo de fase respecto a A). Para cada perturbación, se resaltan de una misma color los cuadrantes que tienen el mismo movimiento de barras de control. La perturbación global corresponde a un movimiento uniforme de las barras de control en todo el núcleo (figura 23). La perturbación regional A corresponde a un movimiento uniforme de las barras de control en los cuadrantes superiores y un movimiento opuesto en los cuadrantes inferiores (figura 24). La perturbación regional B corresponde a un movimiento uniforme de las barras de control en los cuadrantes de la izquierda y un movimiento opuesto en los cuadrantes de la derecha (figura 25). La perturbación regional C corresponde a un movimiento uniforme de las barras de control en los cuadrantes diametralmente opuestos (figura 26).

### 7.1 Potencia del reactor

La figura 56 muestra la evolución de la potencia térmica en el reactor entre el inicio del transitorio y los 60s y entre 160s y 180s. Las oscilaciones no son sinusoidales sino una serie de picos que se repiten periódicamente con una frecuencia muy cercana de 0,45Hz (ver tabla 16) inferior a la frecuencia de referencia del *benchmark*. Se ve también picos intermedios que reflejan los armónicos de potencia. Cuando las oscilaciones alcanzan el ciclo límite, la potencia oscila entre 500 MW y 6000 MW.





Potencia del reactor	<i>Benchmark</i>	Perturbación			
	BOC 14 Record 9	Global	Regional A	Regional B	Regional C
					
Frecuencia (Hz)	0,56	0,40	0,40	0,50	0,45

Tabla 16 : Frecuencia de oscilación de la potencia del reactor con perturbaciones

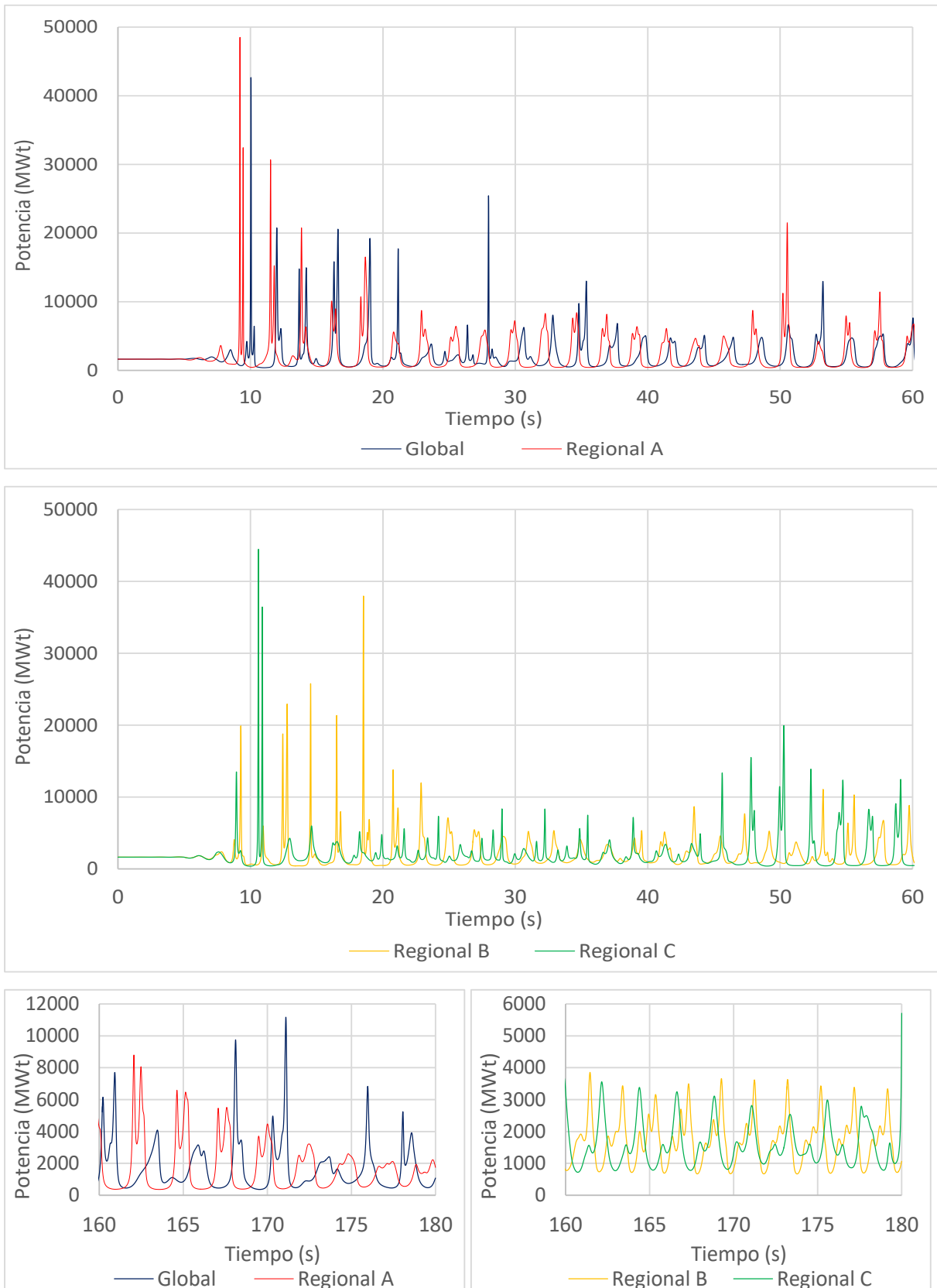


Figura 56 : Evolución de la potencia del reactor con las perturbaciones

## 7.2 LPRMs

En esta sección, se analizan la señal de ocho detectores correspondientes a 2 posiciones axiales y 4 posiciones radiales de los LPRMs, cada una de ellas perteneciente a un cuadrante del núcleo, según la división efectuada por los armónicos de la potencia representada en el mapa radial de la figura 11. Se recuerda que la serie de los LPRMs 5 se encuentra en el cuadrante superior izquierdo, la serie de los LPRMs 9 se encuentra en el cuadrante superior derecho, la serie de los LPRMs 30 se encuentra en el cuadrante inferior izquierdo y la serie de los LPRMs 34 se encuentra en el cuadrante inferior derecho. La señal de los LPRMs a las posiciones axiales 1 y 3 en estas regiones simétricas se presenta en las figuras 57 hasta 64. En la tabla 17, se compara por pares la señal de los LPRMs a raíz de cada perturbación y con el *benchmark*. Se observe que la potencia oscila por mitad y que el caso de la perturbación global así como de la perturbación regional A se acerca más de los resultados del *benchmark*. A continuación, se analiza cada caso en detalle.

LPRM		Cuadrantes	BOC 14 Record 9	Perturbación			
Posición axial	Posición radial			Global	Regional A	Regional B	Regional C
1	5 y 9		En fase	En fase	En fase	Avance de fase	Oposición de fase
	30 y 34		En fase	En fase	En fase	Retardo de fase	Oposición de fase
	5 y 30		Oposición de fase	Oposición de fase	Oposición de fase	Retardo de fase	Oposición de fase
	9 y 34		Oposición de fase	Oposición de fase	Oposición de fase	Avance de fase	Oposición de fase
	5 y 34		Oposición de fase	Oposición de fase	Oposición de fase	Oposición de fase	En fase
	9 y 30		Oposición de fase	Oposición de fase	Oposición de fase	Oposición de fase	En fase
3	5 y 9		En fase	En fase	En fase	Avance de fase	Oposición de fase
	30 y 34		En fase	En fase	En fase	Retardo de fase	Oposición de fase
	5 y 30		Oposición de fase	Oposición de fase	Oposición de fase	Retardo de fase	Oposición de fase
	9 y 34		Oposición de fase	Oposición de fase	Oposición de fase	Avance de fase	Oposición de fase
	5 y 34		Oposición de fase	Oposición de fase	Oposición de fase	Oposición de fase	En fase
	9 y 30		Oposición de fase	Oposición de fase	Oposición de fase	Oposición de fase	En fase

Tabla 17 : Tabla comparativa de la señal de los LPRMs con las perturbaciones

A raíz de la perturbación global (figura 57), la señal de los LPRMs 5 y 9 a la posición axial 1 oscila en fase mientras que oscila en oposición de fase respecto a los LPRMs 30 y 34. Es decir que la potencia oscila por mitad, la mitad superior siendo en oposición de fase con la mitad inferior tal y como se espera según las amplitudes de los tres primeros modos. En este caso, la señal de los LPRMs oscila a una frecuencia de 0,45Hz (0,5Hz para el LPRM 5).

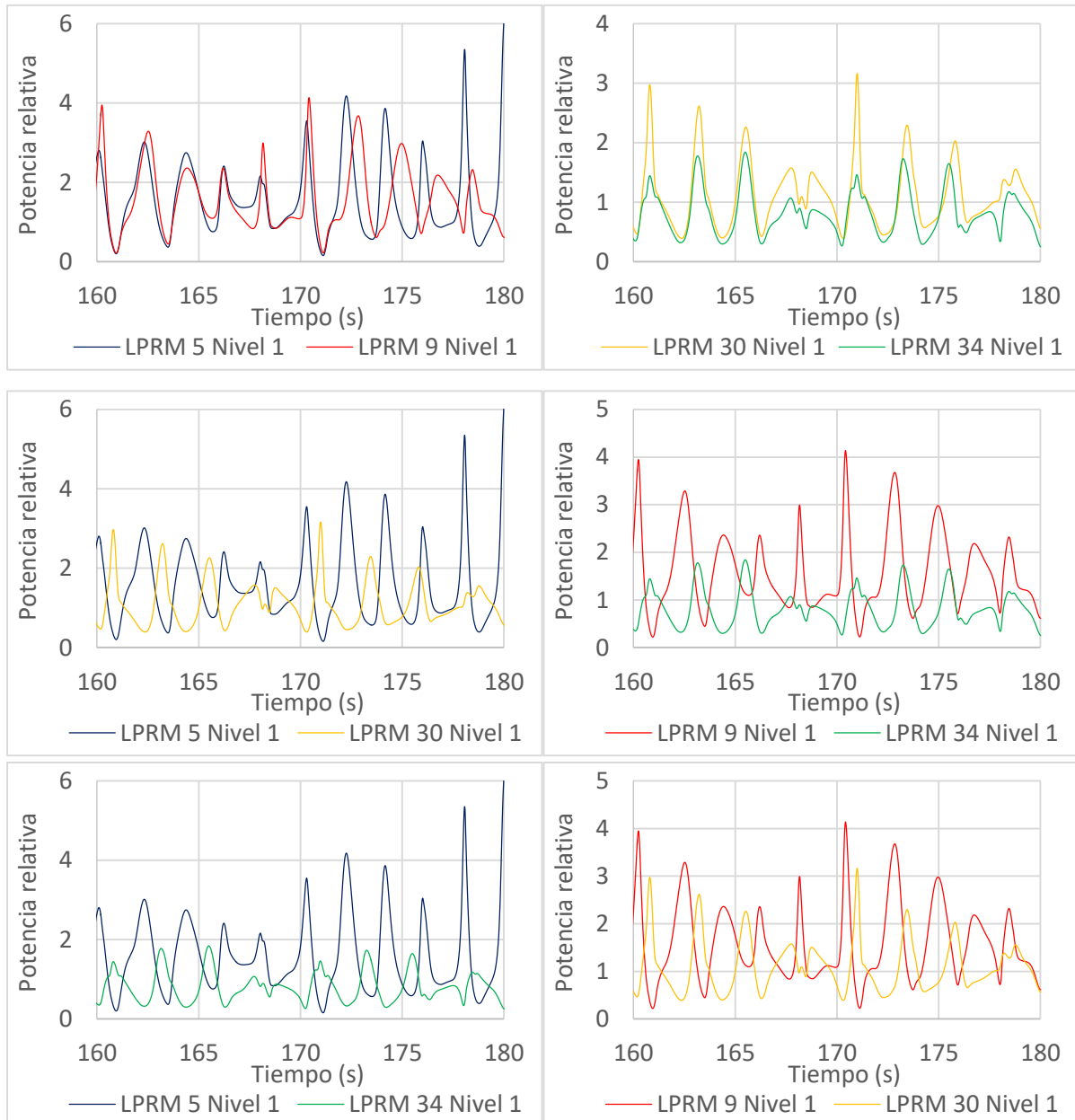


Figura 57: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 1 a raíz de la perturbación global

A raíz de la perturbación regional A (figura 58), La señal de los LPRMs 5 y 9 a la posición axial 1 oscila en fase mientras que oscila en oposición de fase respecto a los LPRMs 30 y 34. Es decir que la potencia oscila por mitad, la mitad superior siendo en oposición de fase con la mitad inferior tal y como se espera según las amplitudes de los tres primeros modos. En este caso, la señal de los LPRMs oscila a una frecuencia de 0,4Hz.

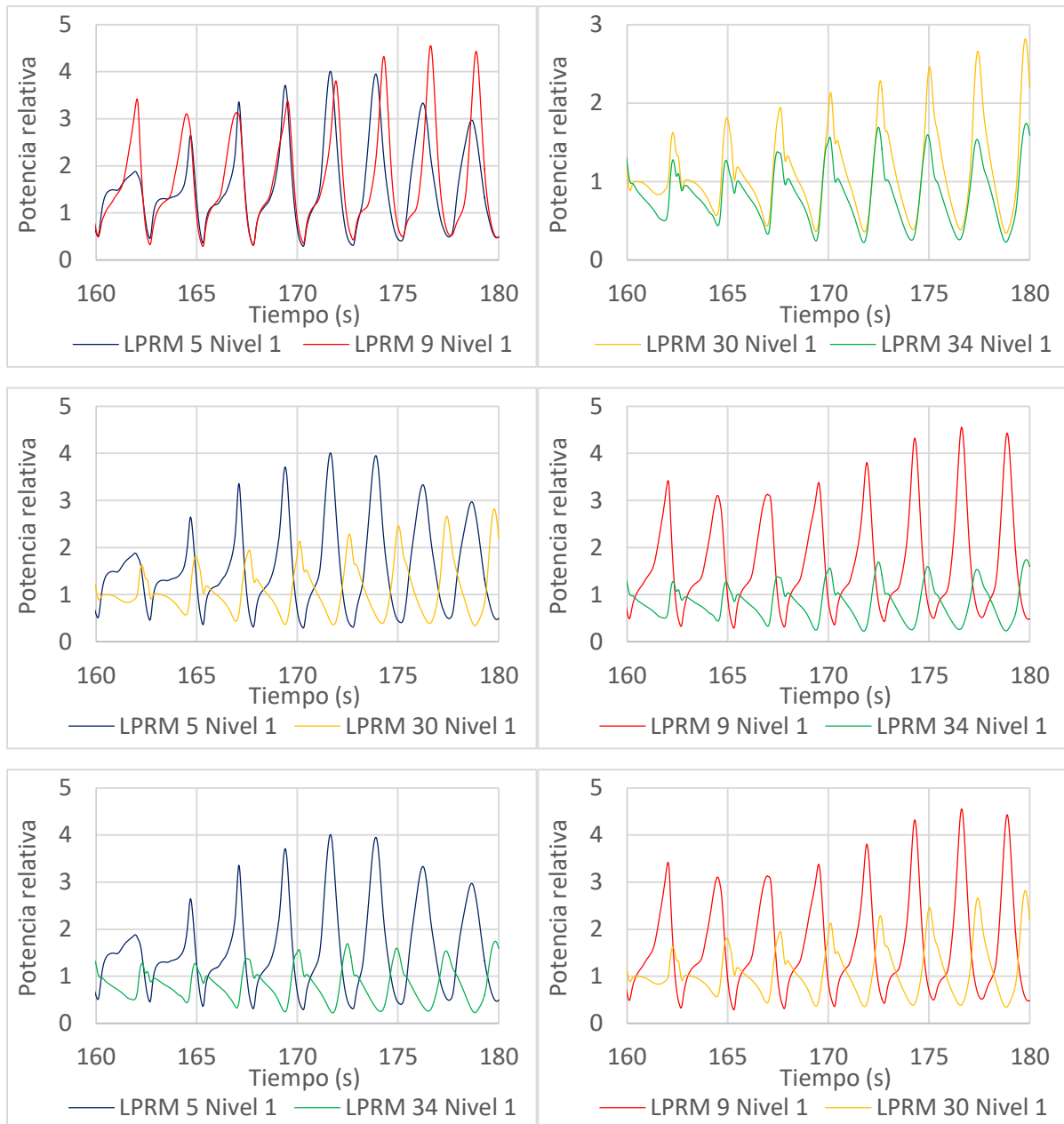


Figura 58: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 1 a raíz de la perturbación regional A

A raíz de la perturbación regional B (figura 59), la señal de los LPRMs 5/34 y 9/30 oscila en oposición de fase mientras que oscila fuera de fase respecto a los otros LPRMs. En este caso, la señal de los LPRMs oscila a una frecuencia de 0,5Hz.

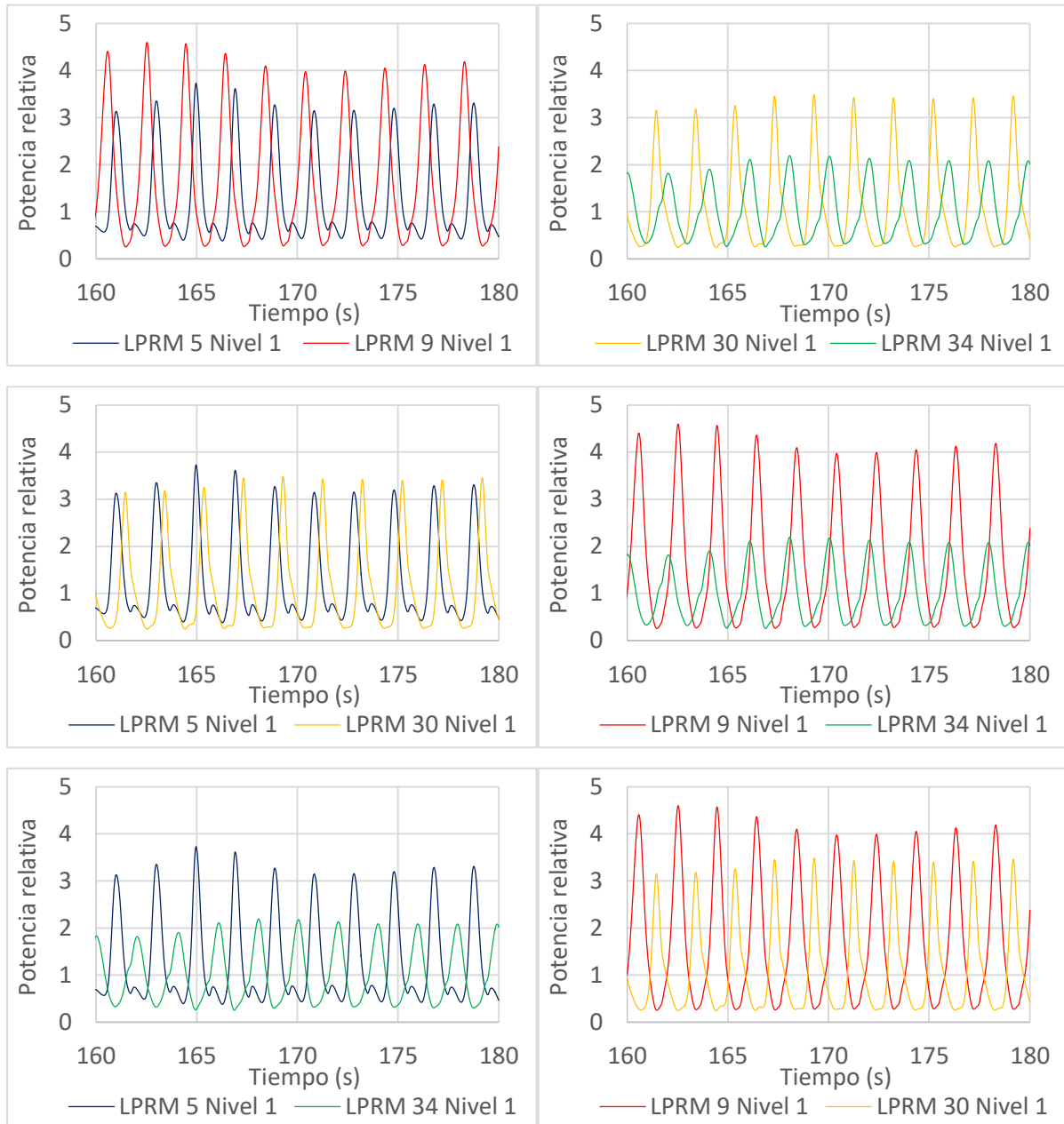


Figura 59: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 1 a raíz de la perturbación regional B

A raíz de la perturbación regional C (figura 60), la señal de los LPRMs 5 y 34 a la posición axial 1 oscila en fase mientras que oscila en oposición de fase respecto a los LPRMs 9 y 30. Es decir que la potencia oscila por mitad, los cuadrantes diametralmente opuestos oscilan en fase. En este caso, la señal de los LPRMs oscila a una frecuencia de 0,45Hz.

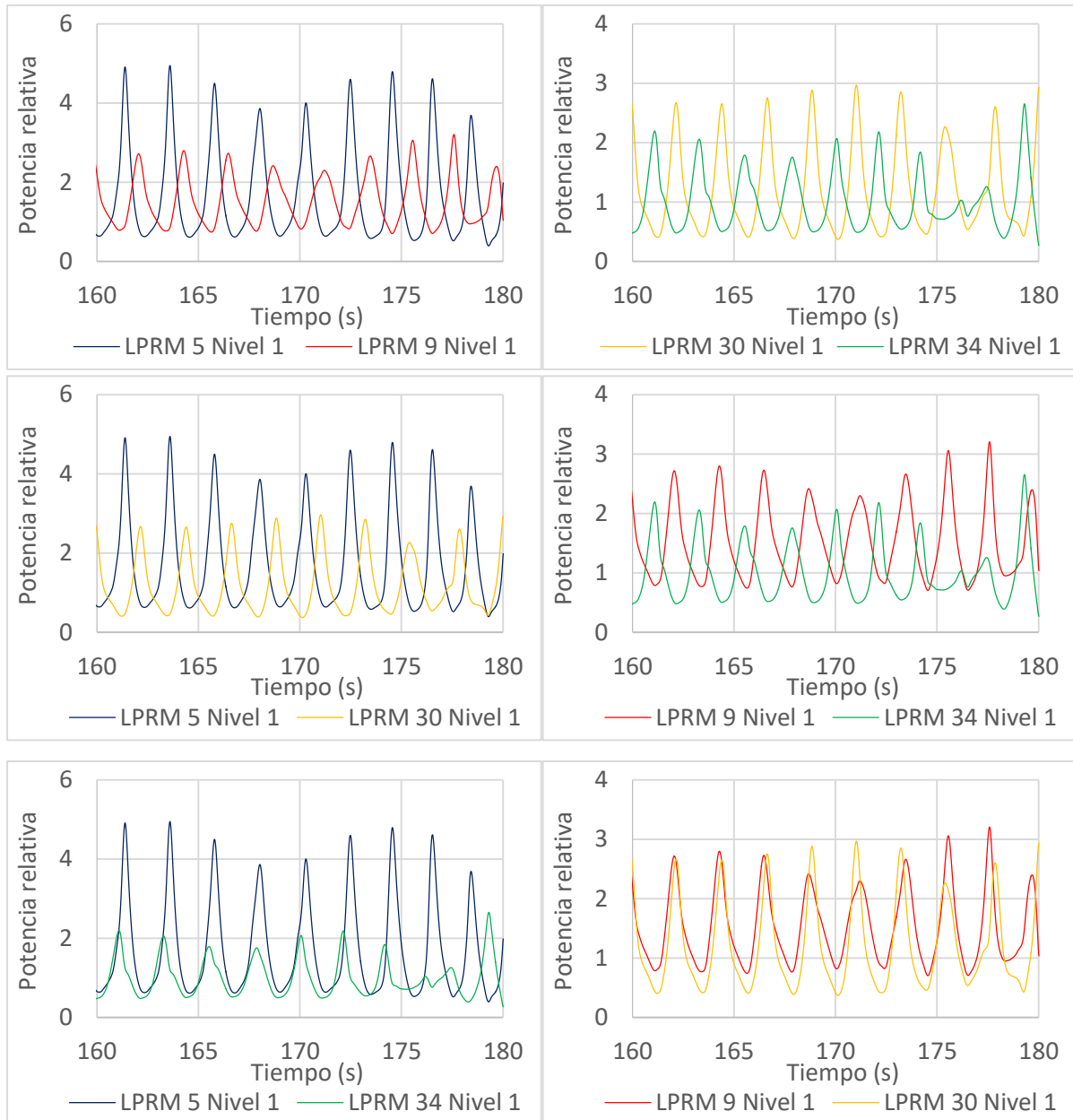
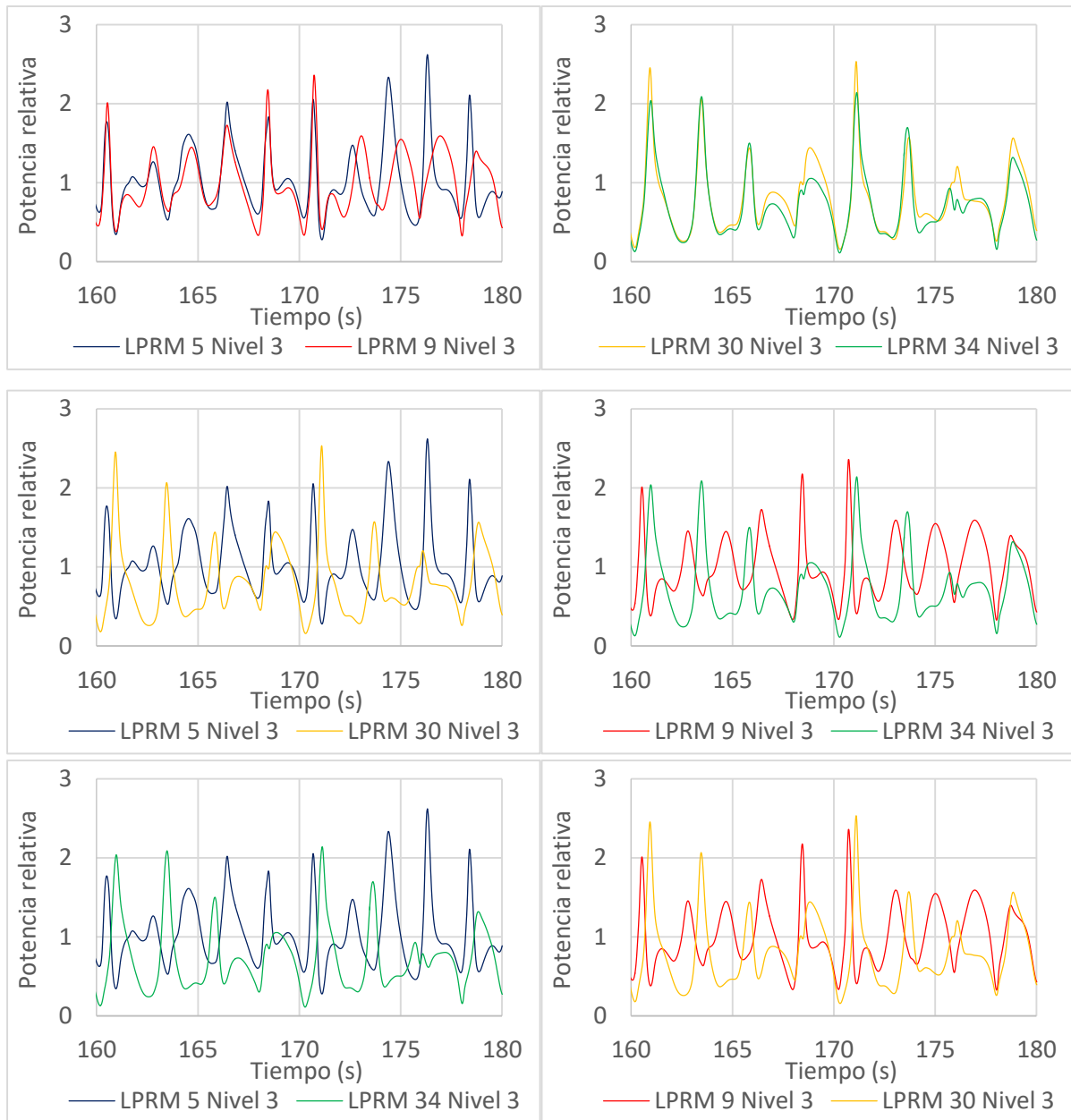


Figura 60: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 1 a raíz de la perturbación regional C

A raíz de la perturbación global (figura 61), la señal de los LPRMs 5 y 9 a la posición axial 3 oscila en fase mientras que oscila en oposición de fase respecto a los LPRMs 30 y 34. Es decir que la potencia oscila por mitad, la mitad superior siendo en oposición de fase con la mitad inferior tal y como se espera según las amplitudes de los tres primeros modos. En este caso, la señal de los LPRMs oscila a una frecuencia de 0,45Hz.



**Figura 61: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 3 a raíz de la perturbación global**



A raíz de la perturbación regional A (figura 62), la señal de los LPRMs 5 y 9 a la posición axial 3 oscila en fase mientras que oscila en oposición de fase respecto a los LPRMs 30 y 34. Es decir que la potencia oscila por mitad, la mitad superior siendo en oposición de fase con la mitad inferior tal y como se espera según las amplitudes de los tres primeros modos. En este caso, la señal de los LPRMs oscila a una frecuencia de 0,4Hz.

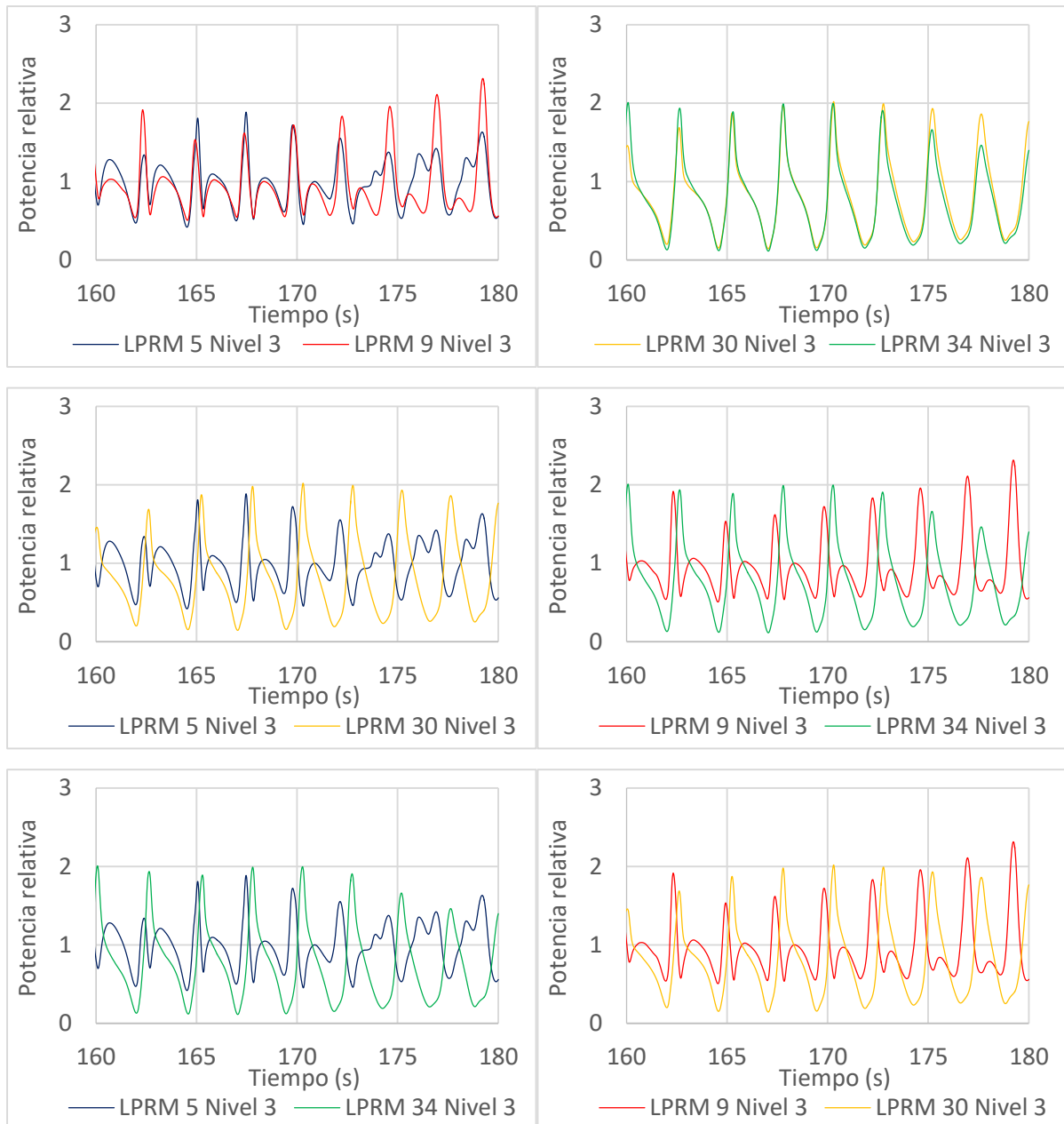


Figura 62: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 3 a raíz de la perturbación regional A

A raíz de la perturbación regional B (figura 63), la señal de los LPRMs 5/34 y 9/30 oscila en oposición de fase mientras que oscila fuera de fase respecto a los otros LPRMs. En este caso, la señal de los LPRMs oscila a una frecuencia de 0,5Hz.

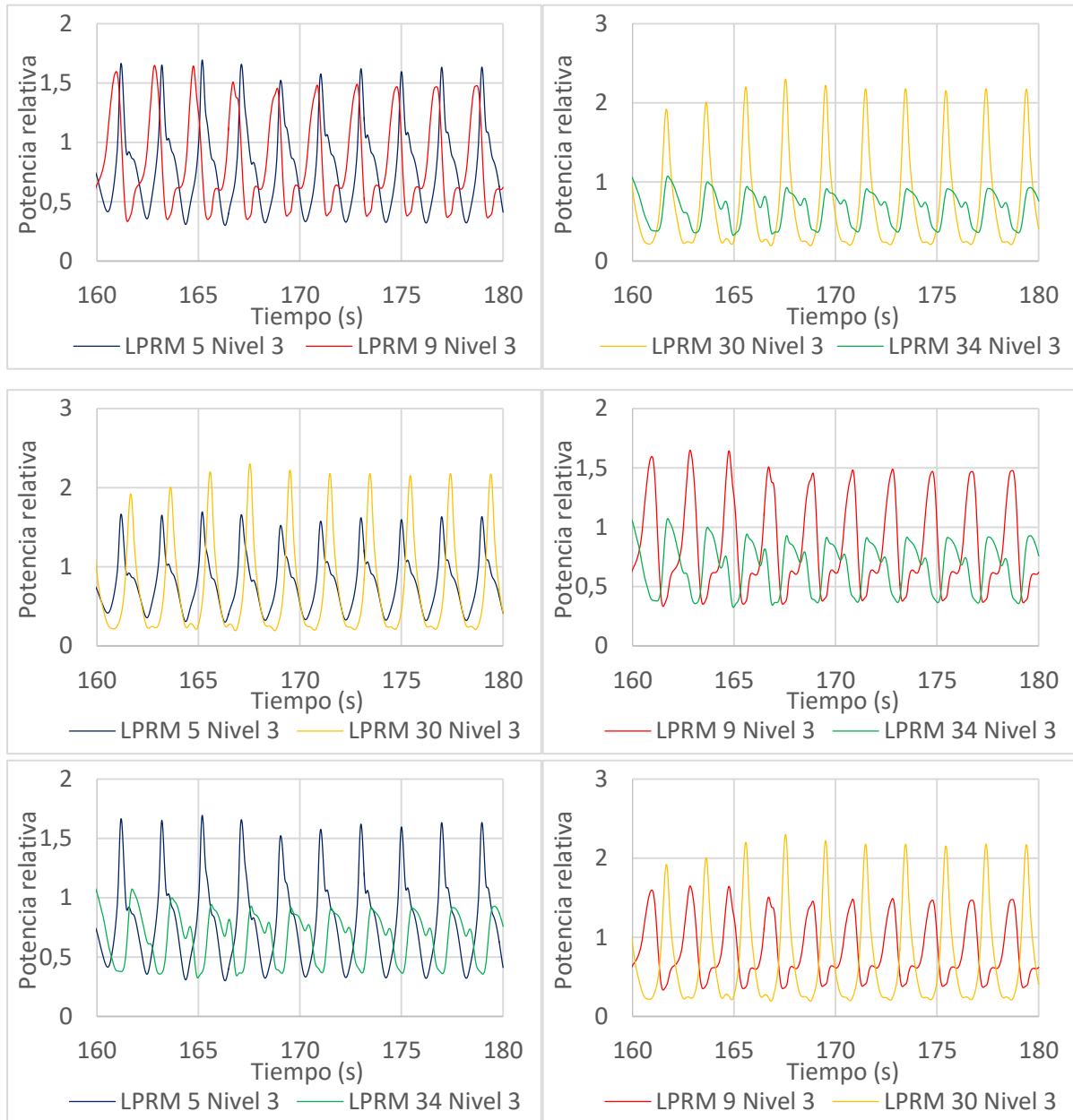


Figura 63: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 3 a raíz de la perturbación regional B

A raíz de la perturbación regional C (figura 64), la señal de los LPRMs 5 y 34 a la posición axial 3 oscila en fase mientras que oscila en oposición de fase respecto a los LPRMs 9 y 30. Es decir que la potencia oscila por mitad, los cuadrantes diametralmente opuestos oscilan en fase. En este caso, la señal de los LPRMs oscila a una frecuencia de 0,45Hz.

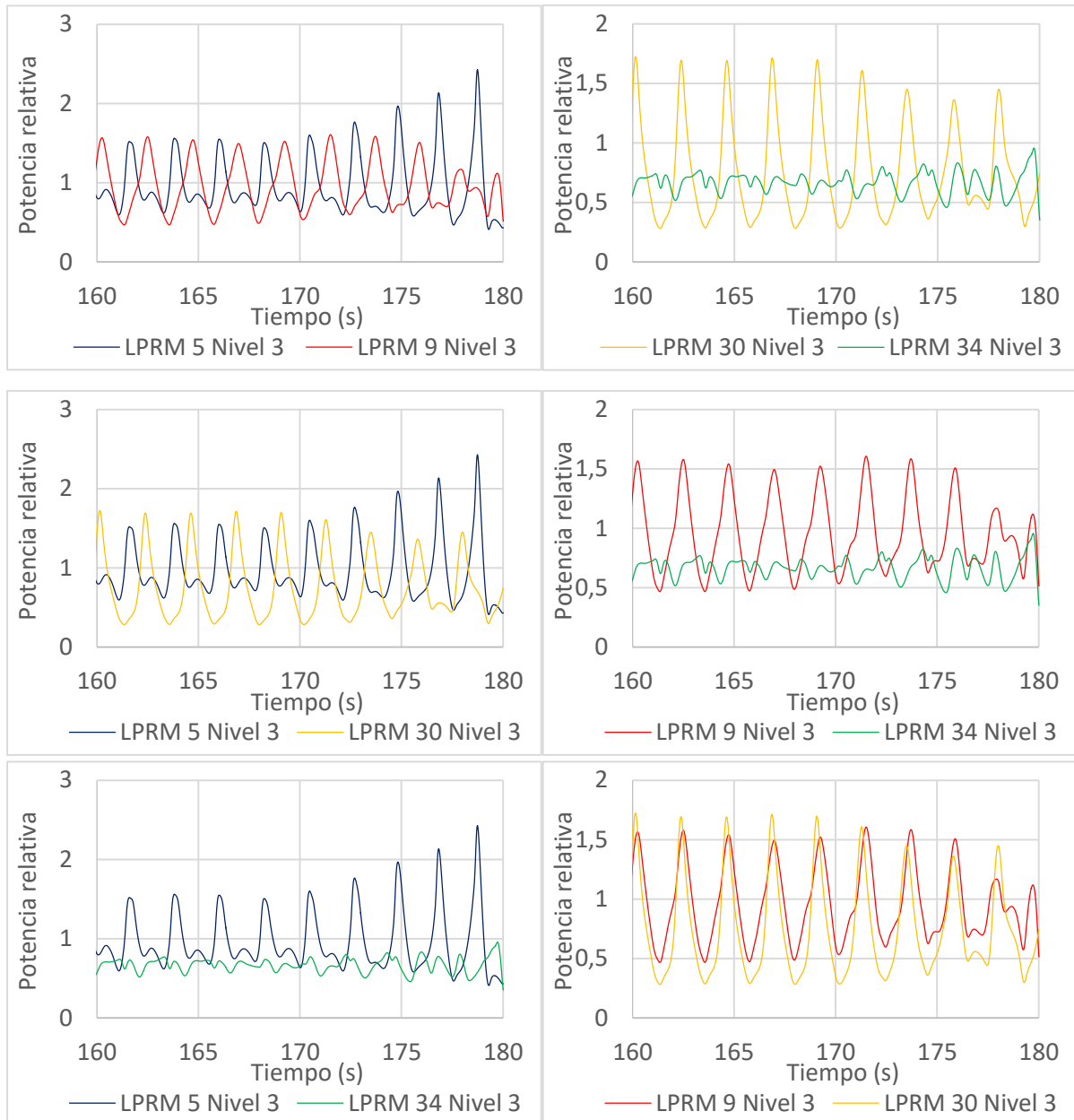


Figura 64: Señal de los LPRMs 5, 9, 30 y 34 a la posición axial 3 a raíz de la perturbación regional C

### 7.3 Perfil radial de la potencia

En esta sección, se analiza la potencia radial en 4 nodos a raíz de cada perturbación, cada uno de ellos perteneciente a un cuadrante del núcleo, según la división efectuada por los armónicos de la potencia representada en el mapa radial de la figura 11. El nodo 151 se encuentra en el cuadrante superior izquierdo. El nodo 166 se encuentra en el cuadrante superior derecho. El nodo 607 se encuentra en el cuadrante inferior izquierdo. El nodo 622 se encuentra en el cuadrante inferior derecho. En la tabla 18, se compara por pares la potencia relativa en los nodos de cuadrantes simétricos que se presenta en las figuras 65 hasta 68. Se observe que la potencia oscila por mitad. A continuación, se analiza cada caso en detalle.











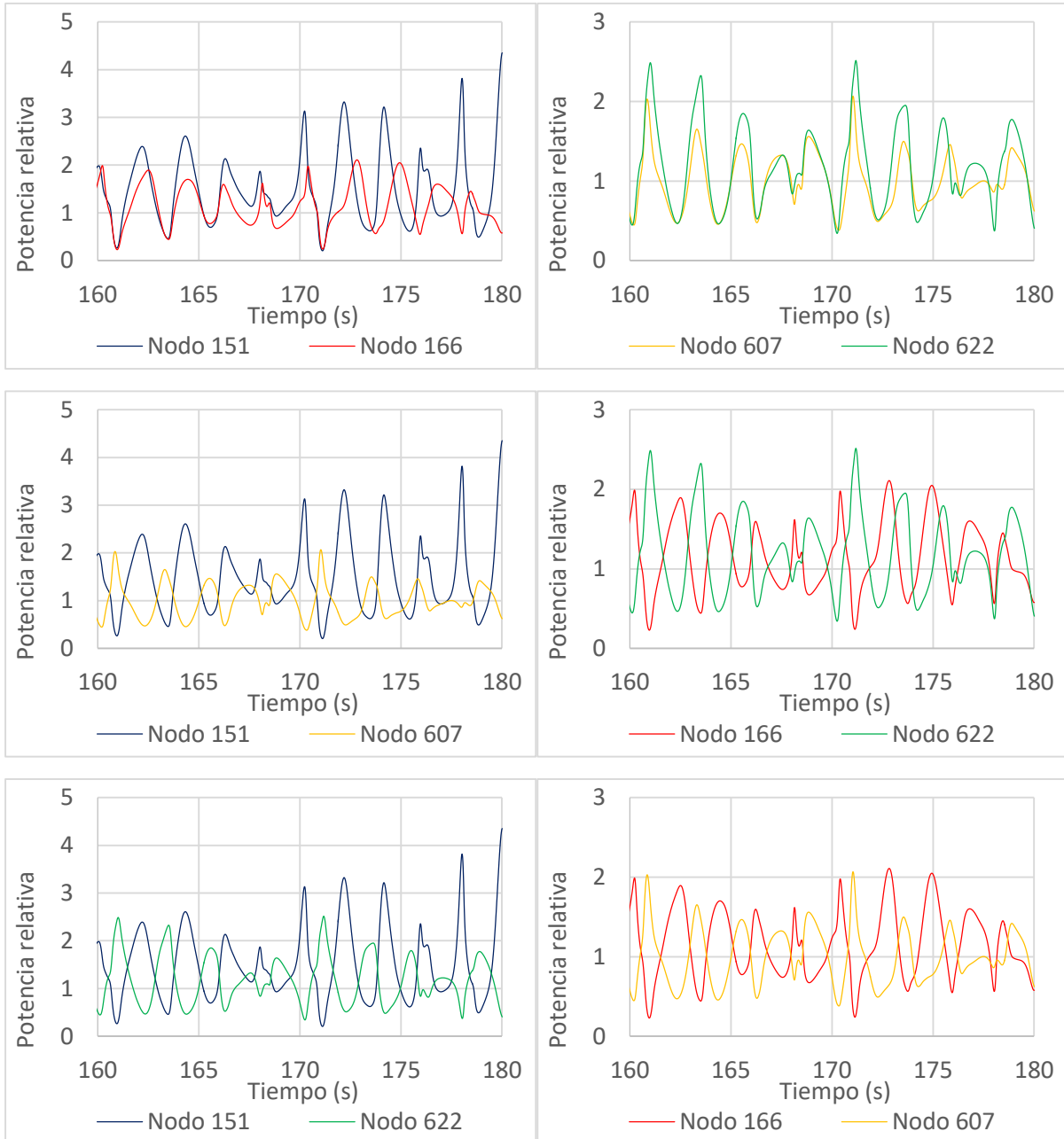
Potencia relativa	Cuadrantes	Perturbación			
		Global	Regional A	Regional B	Regional C
Nodos					
151 y 166		En fase	En fase	Avance de fase	Oposición de fase
607 y 622		En fase	En fase	Retardo de fase	Oposición de fase
151 y 607		Oposición de fase	Oposición de fase	Retardo de fase	Oposición de fase
166 y 622		Oposición de fase	Oposición de fase	Avance de fase	Oposición de fase
151 y 622		Oposición de fase	Oposición de fase	Oposición de fase	En fase
166 y 607		Oposición de fase	Oposición de fase	Oposición de fase	En fase

Tabla 18: Tabla comparativa de la potencia en los nodos con las perturbaciones

A raíz de la perturbación global (figura 65), la potencia en los nodos 151/166 y 607/622 oscila en fase mientras que oscila en oposición de fase respecto a los otros nodos. Es decir que la mitad superior oscila en oposición de fase con la mitad inferior. En este caso, la potencia en los nodos oscila a una frecuencia de 0,5Hz.



**Figura 65: Potencia relativa en los nodos 151, 166, 607, 622 a raíz de la perturbación global**

A raíz de la perturbación regional A (figura 66), la potencia en los nodos 151/166 y 607/622 oscila en fase mientras que oscila en oposición de fase respecto a los otros nodos. Es decir que la mitad superior oscila en oposición de fase con la mitad inferior. En este caso, la potencia en los nodos oscila a una frecuencia de 0,4Hz.

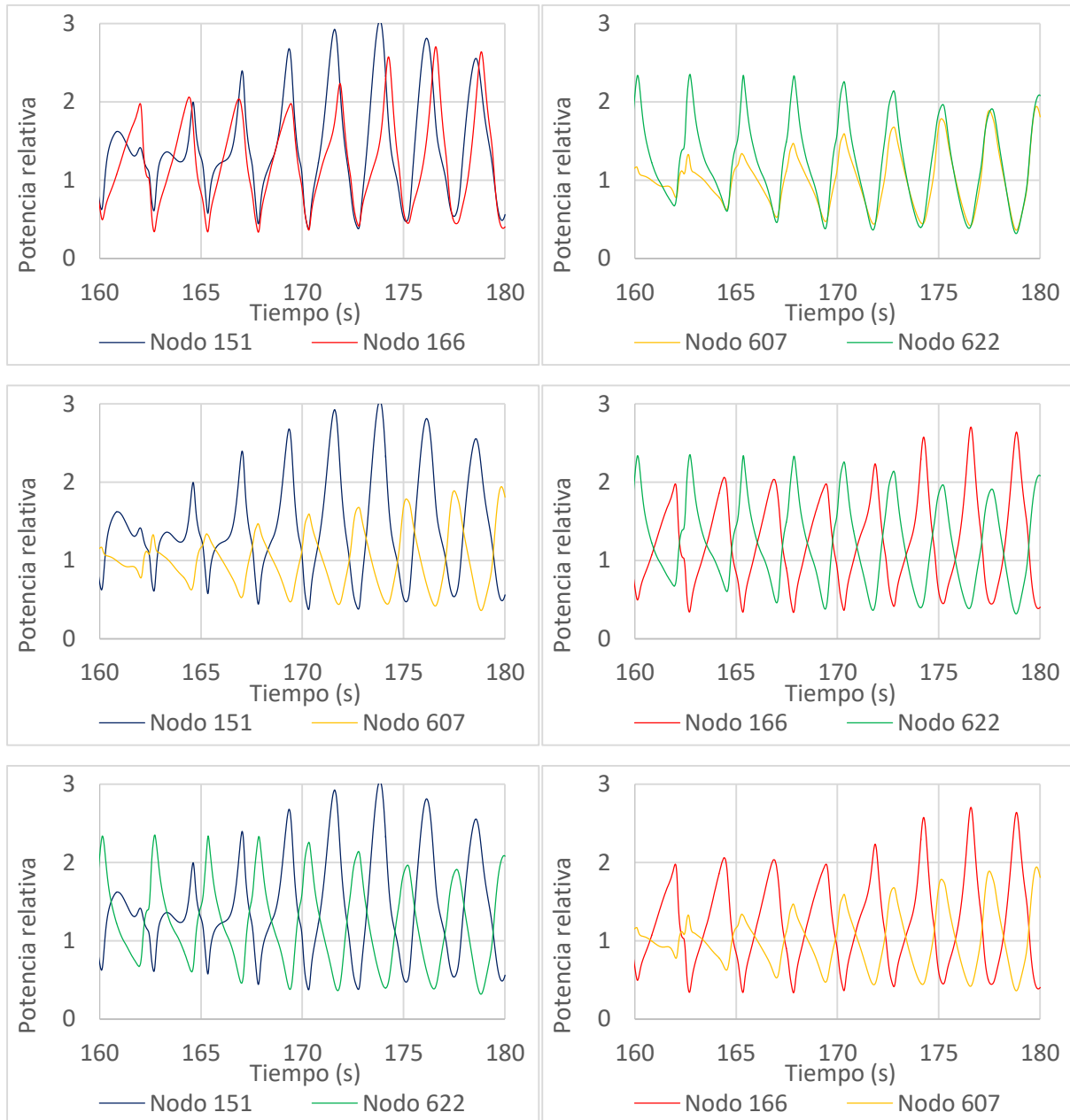
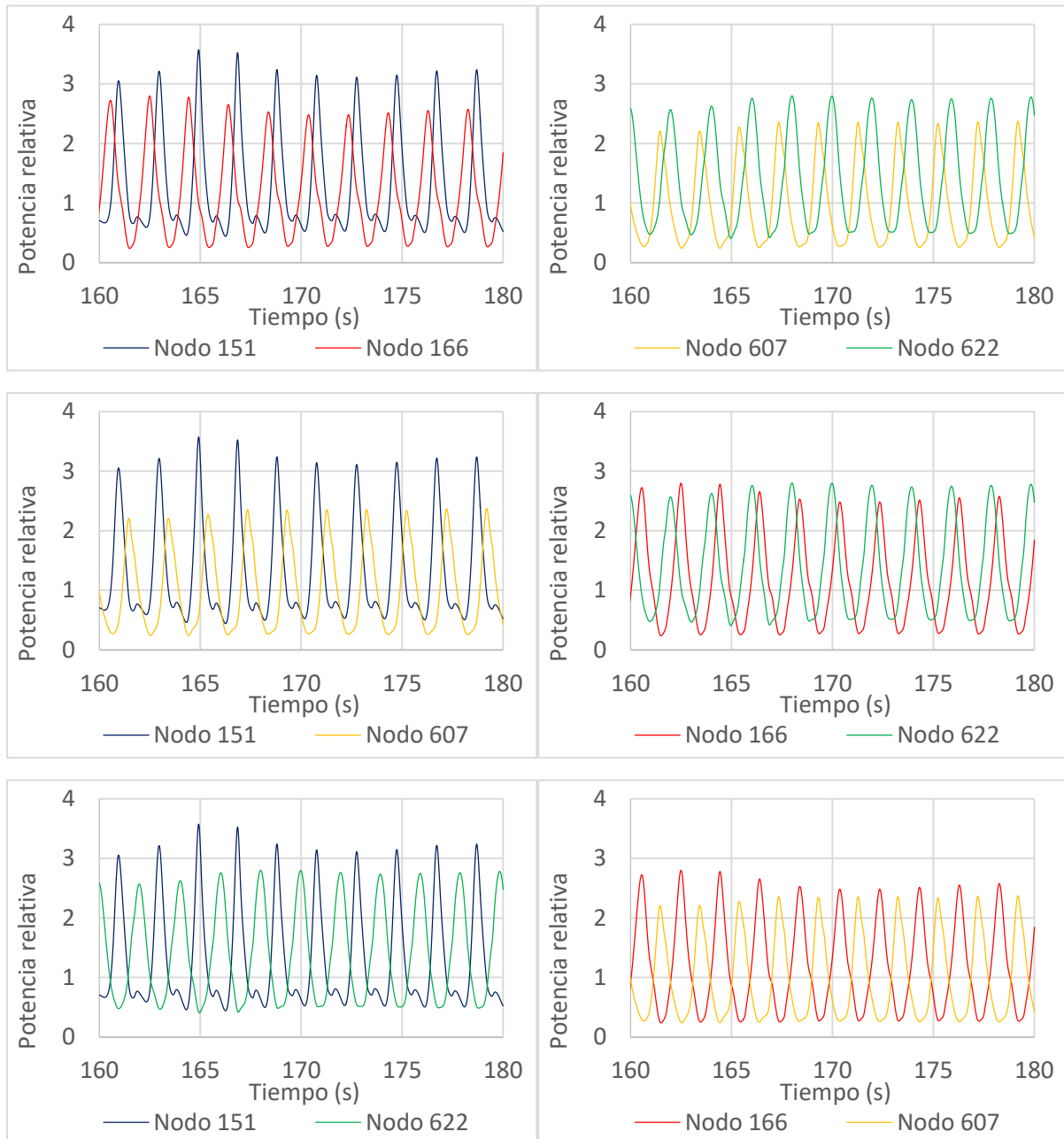


Figura 66: Potencia relativa en los nodos 151, 166, 607, 622 a raíz de la perturbación regional A

A raíz de la perturbación regional B (figura 67), la potencia en todos los nodos oscila fuera de fase, incluso en oposición de fase. En este caso, la potencia en los nodos oscila a una frecuencia de 0,5Hz.



**Figura 67: Potencia relativa en los nodos 151, 166, 607, 622 a raíz de la perturbación regional B**

A raíz de la perturbación regional C (figura 68), la potencia en los nodos 151/622 y 166/622 oscila en fase mientras que oscila en oposición de fase respecto a los otros nodos. Es decir que la potencia oscila en fase en cuadrantes diametralmente opuestos. En este caso, la potencia en los nodos oscila a una frecuencia de 0,5Hz.

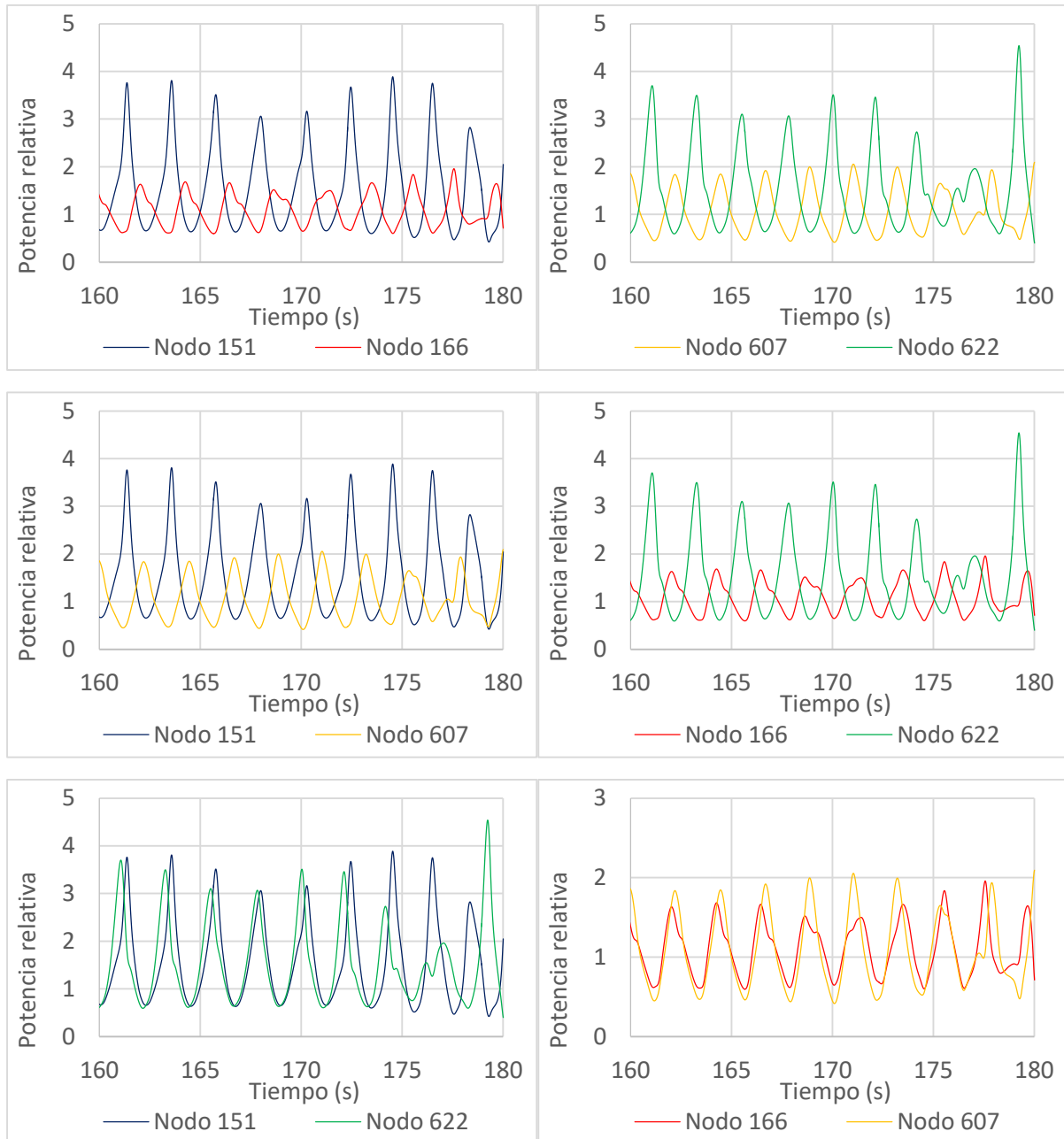


Figura 68: Potencia relativa en los nodos 151, 166, 607, 622 a raíz de la perturbación regional C



## 7.4 Perfil axial de la potencia

Se analiza la potencia axial en 2 planos de a raíz de cada perturbación. La potencia relativa en los planos 11 y 17 está en oposición de fase para cada caso (tabla 19 y figura 69). Las frecuencias son iguales las de la potencia térmica en el reactor.

Potencia relativa	Perturbación			
	Global	Regional A	Regional B	Regional C
Planos				
11 y 17	Oposición de fase	Oposición de fase	Oposición de fase	Oposición de fase

Tabla 19: Tabla comparativa de la potencia axial con las perturbaciones

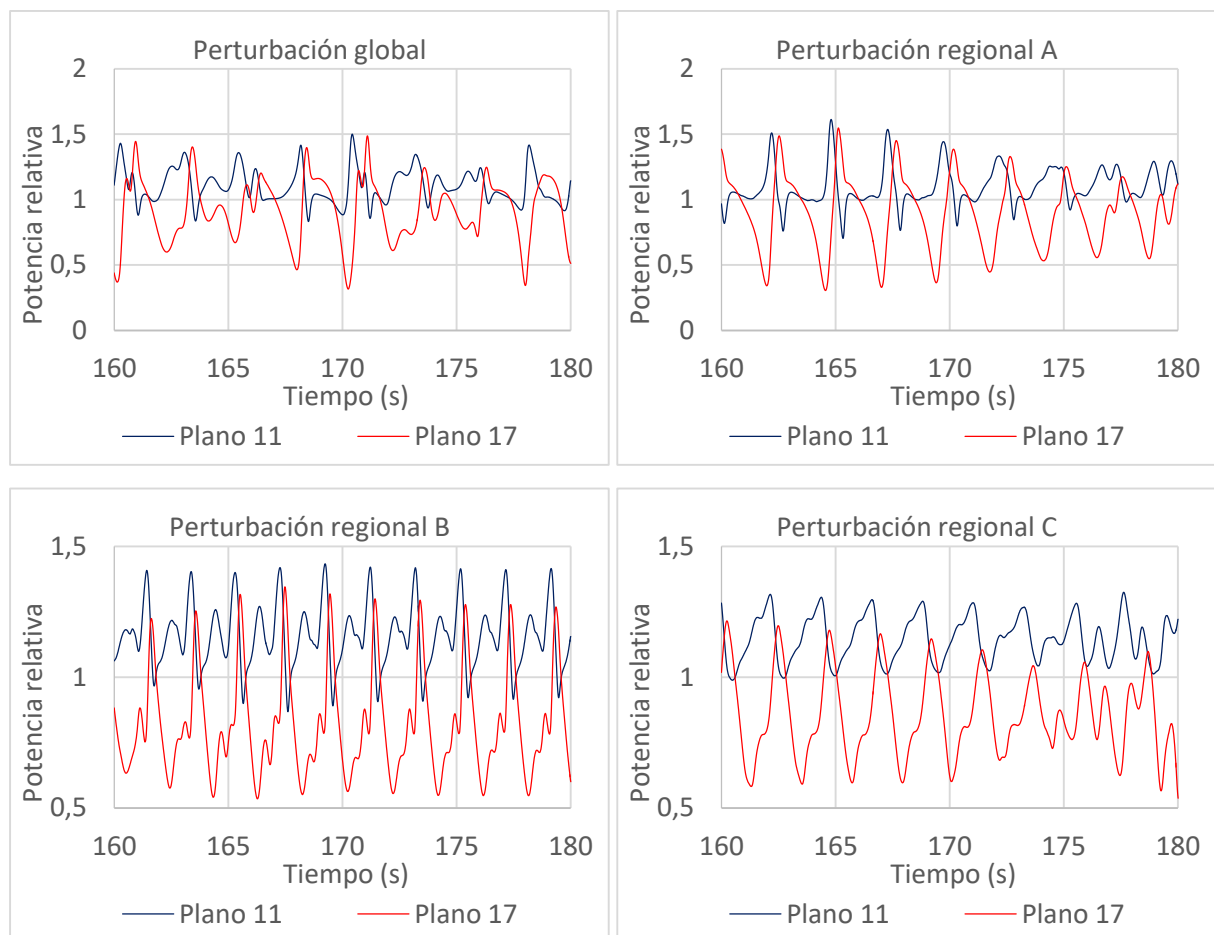


Figura 69: Potencia relativa en los planos 11 y 17 a raíz de cada perturbación

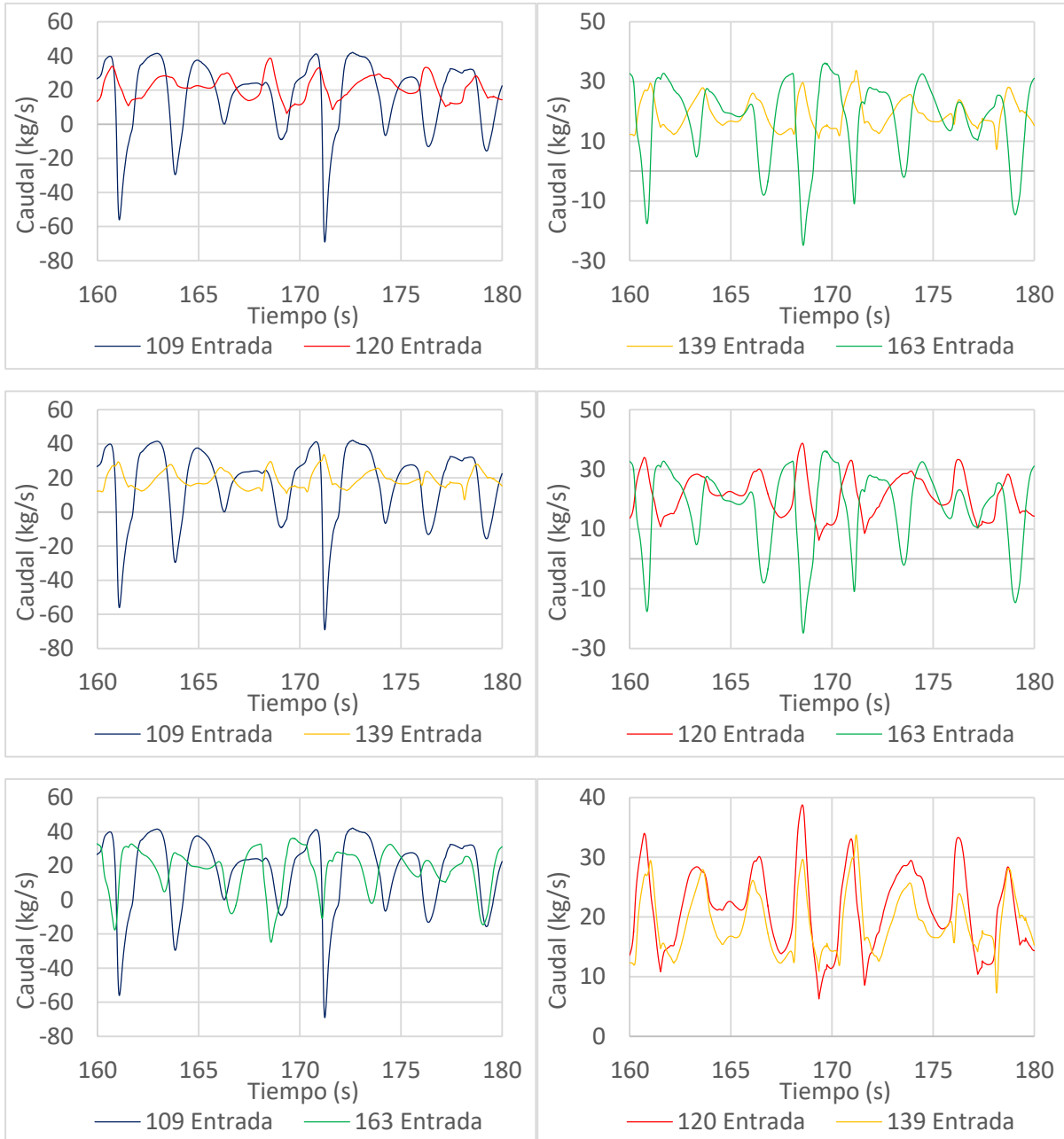
## 7.5 Caudal en los canales

En esta sección, se analizan cuatro canales simétricos, cada uno de ellos perteneciente a un cuadrante del núcleo, según la división efectuada por los armónicos de la potencia representada el mapa radial de la figura 11. Se recuerda que el canal 163 se encuentra en el cuadrante superior derecho, el canal 139 se encuentra en el cuadrante superior izquierdo, el canal 120 se encuentra en el cuadrante inferior derecho y el canal 109 se encuentra en el cuadrante inferior izquierdo. El caudal másico de la entrada y salida del núcleo en estas regiones simétricas se presenta en las figuras 70 hasta 77. En la tabla 20, se compara por pares los caudales de entrada y de salida de estos canales a raíz de cada perturbación. Estas figuras muestran que el caudal de entrada en los canales 120 y 139 oscila en fase a raíz de cada perturbación, mientras que el caudal de entrada en los otros canales oscila fuera de fase, incluso en oposición de fase, a raíz de cada perturbación. En cuanto a los caudales de salida, no se puede sacar una tendencia general, hay que analizar cada caso en detalle.

Caudal		Cuadrante	Perturbación			
			Global	Regional A	Regional B	Regional C
Nivel	Canales					
Entrada	109 y 120		Retardo de fase	Retardo de fase	Retardo de fase	Avance de fase
	139 y 163		Oposición de fase	Oposición de fase	Retardo de fase	Retardo de fase
	109 y 139		Retardo de fase	Retardo de fase	Retardo de fase	Avance de fase
	120 y 163		Oposición de fase	Oposición de fase	Retardo de fase	Retardo de fase
	109 y 163		Avance de fase	Oposición de fase	Oposición de fase	En fase
	120 y 139		En fase	En fase	En fase	En fase
Salida	109 y 120		En fase	En fase	Oposición de fase	Avance de fase
	139 y 163		En fase	En fase	En fase	Retardo de fase
	109 y 139		Avance de fase	Desfase	Oposición de fase	Avance de fase
	120 y 163		Avance de fase	Desfase	En fase	Retardo de fase
	109 y 163		Avance de fase	Desfase	Oposición de fase	En fase
	120 y 139		Avance de fase	Desfase	En fase	En fase

Tabla 20 : Tabla comparativa de los caudales másicos con las perturbaciones

A raíz de la perturbación global (figura 70), el caudal de entrada en los canales 120/139 oscila en fase mientras que oscila fuera de fase respecto a los otros nodos. Es decir que el caudal de entrada oscila en fase en dos cuadrantes diametralmente opuestos y fuera de fase en los dos otros cuadrantes. En este caso, el caudal de entrada en los canales oscila a una frecuencia de 0,4Hz.



**Figura 70: Caudal de entrada en los canales 109, 120, 139 y 163 a raíz de la perturbación global**

A raíz de la perturbación regional A (figura 71), el caudal de entrada en los canales 120 y 139 oscila en fase mientras que oscila fuera de fase en los otros canales. Es decir que el caudal de entrada oscila en fase en dos cuadrantes diametralmente opuestos y en oposición de fase en los dos otros cuadrantes. En este caso, el caudal de entrada en los canales oscila a una frecuencia de 0,4Hz.

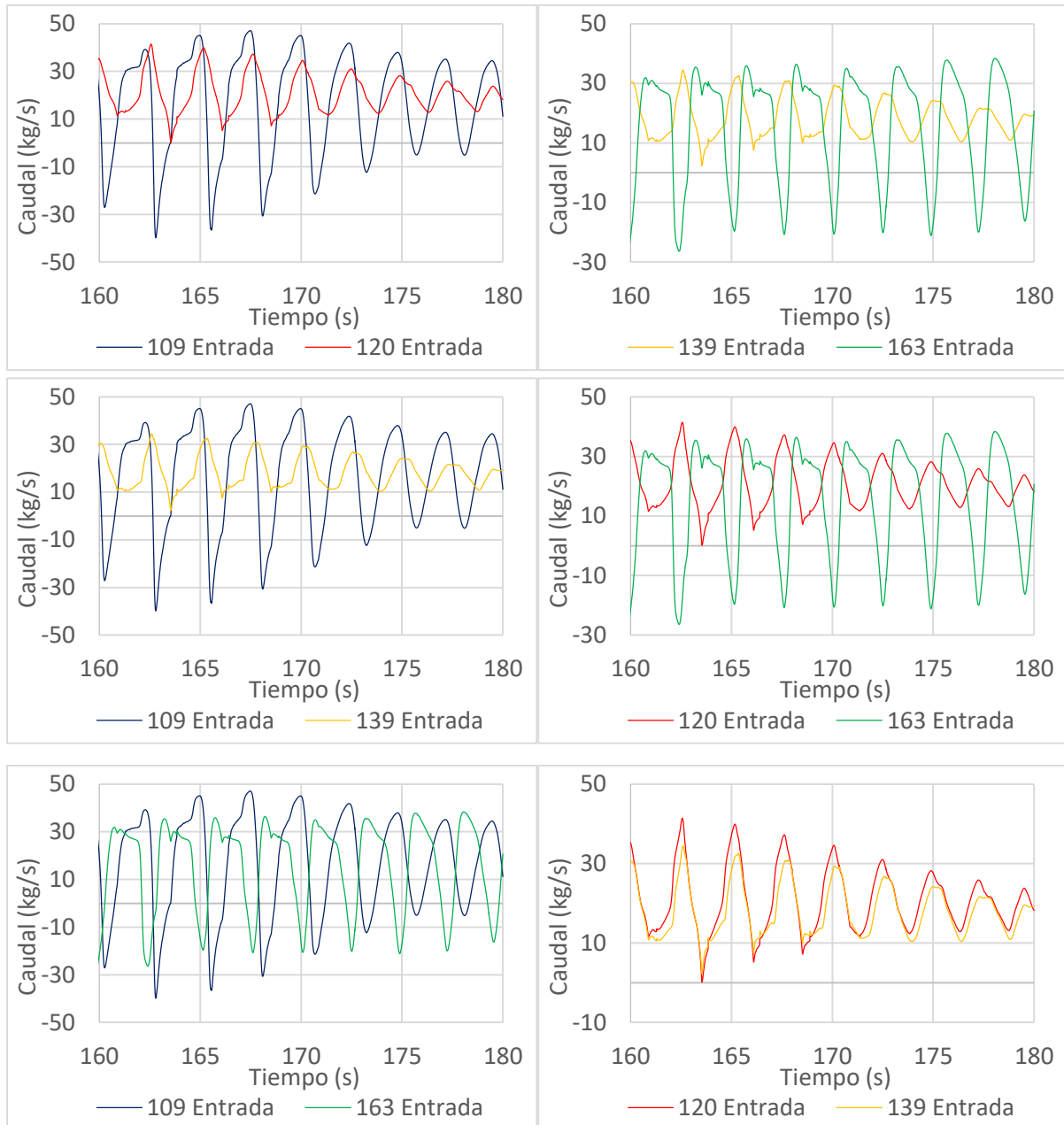
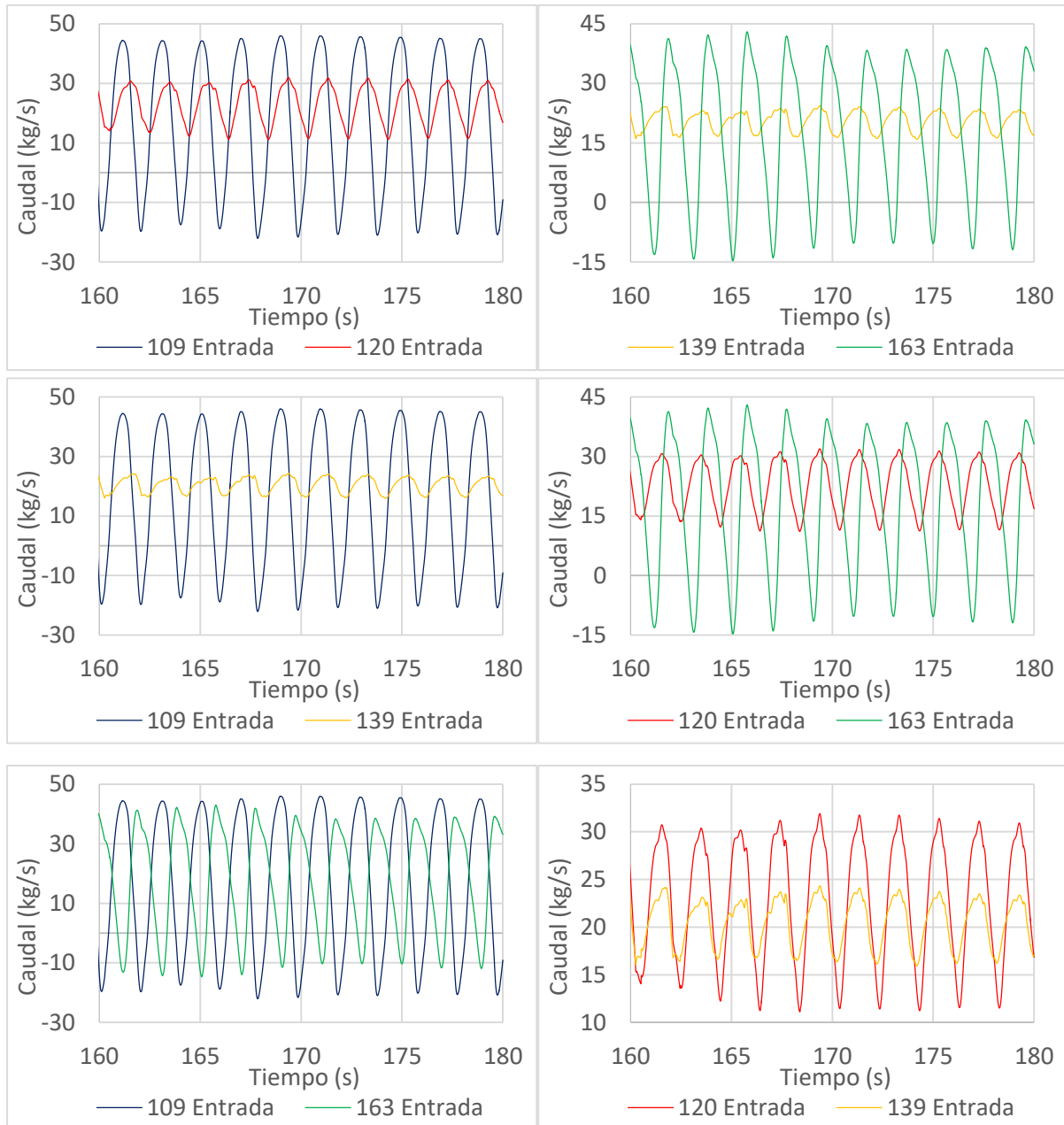


Figura 71: Caudal de entrada en los canales 109, 120, 139 y 163 a raíz de la perturbación regional A

A raíz de la perturbación regional B (figura 72), el caudal de entrada en los canales 120 y 139 oscila en fase mientras que oscila fuera de fase en los otros nodos. Es decir que el caudal de entrada oscila en fase en dos cuadrantes diametralmente opuestos y en oposición de fase en los dos otros cuadrantes. En este caso, el caudal de entrada en los canales oscila a una frecuencia de 0,52Hz.



**Figura 72: Caudal de entrada en los canales 109, 120, 139 y 163 a raíz de la perturbación regional B**

A raíz de la perturbación regional C (figura 73), el caudal de entrada en los canales 109/163 y 120/139 oscila en fase mientras que oscila en oposición de fase respecto a los otros nodos. Es decir que el caudal de entrada oscila en fase en cuadrantes diametralmente opuestos. En este caso, el caudal de entrada en los canales oscila a una frecuencia de 0,45Hz.

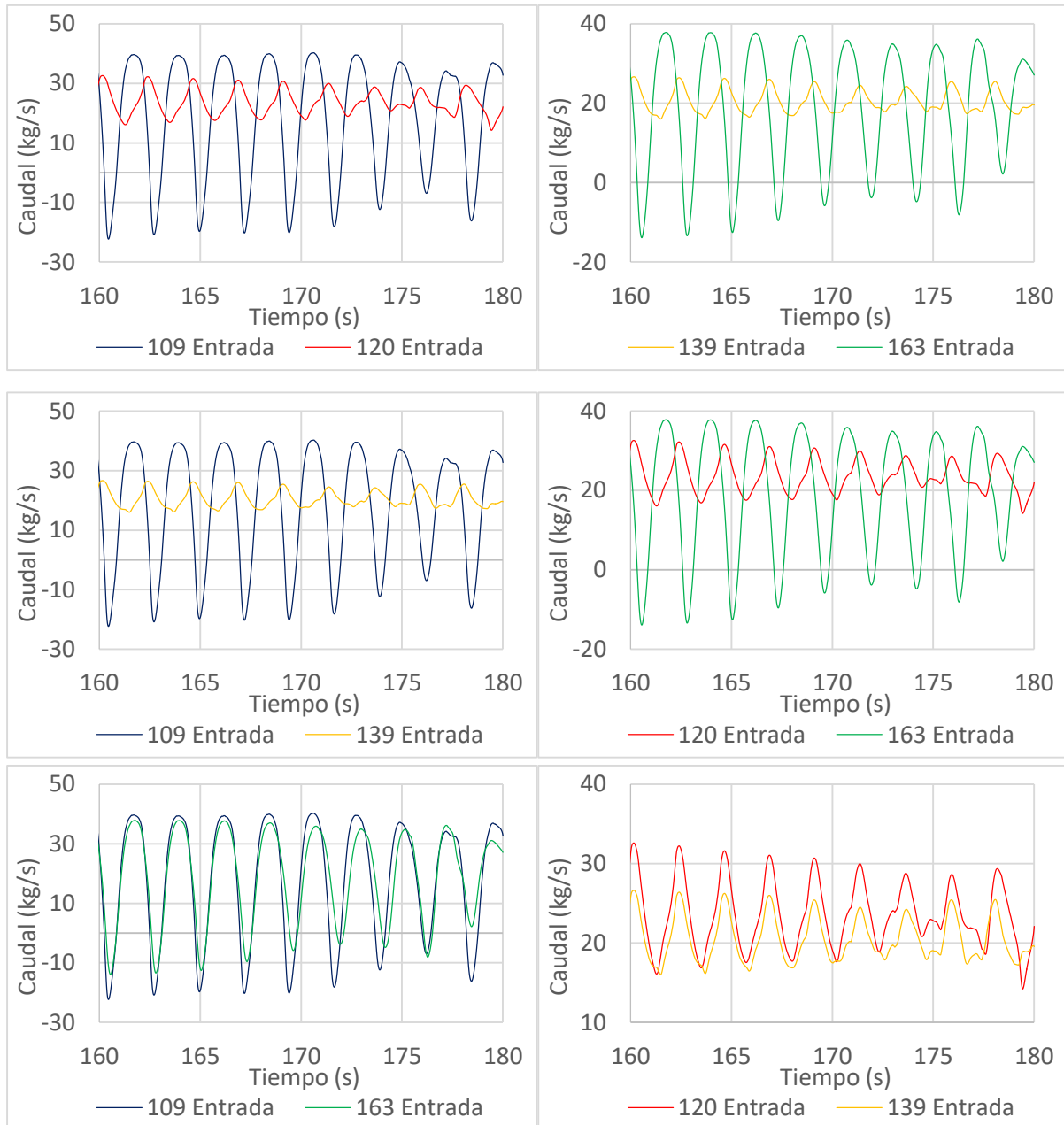
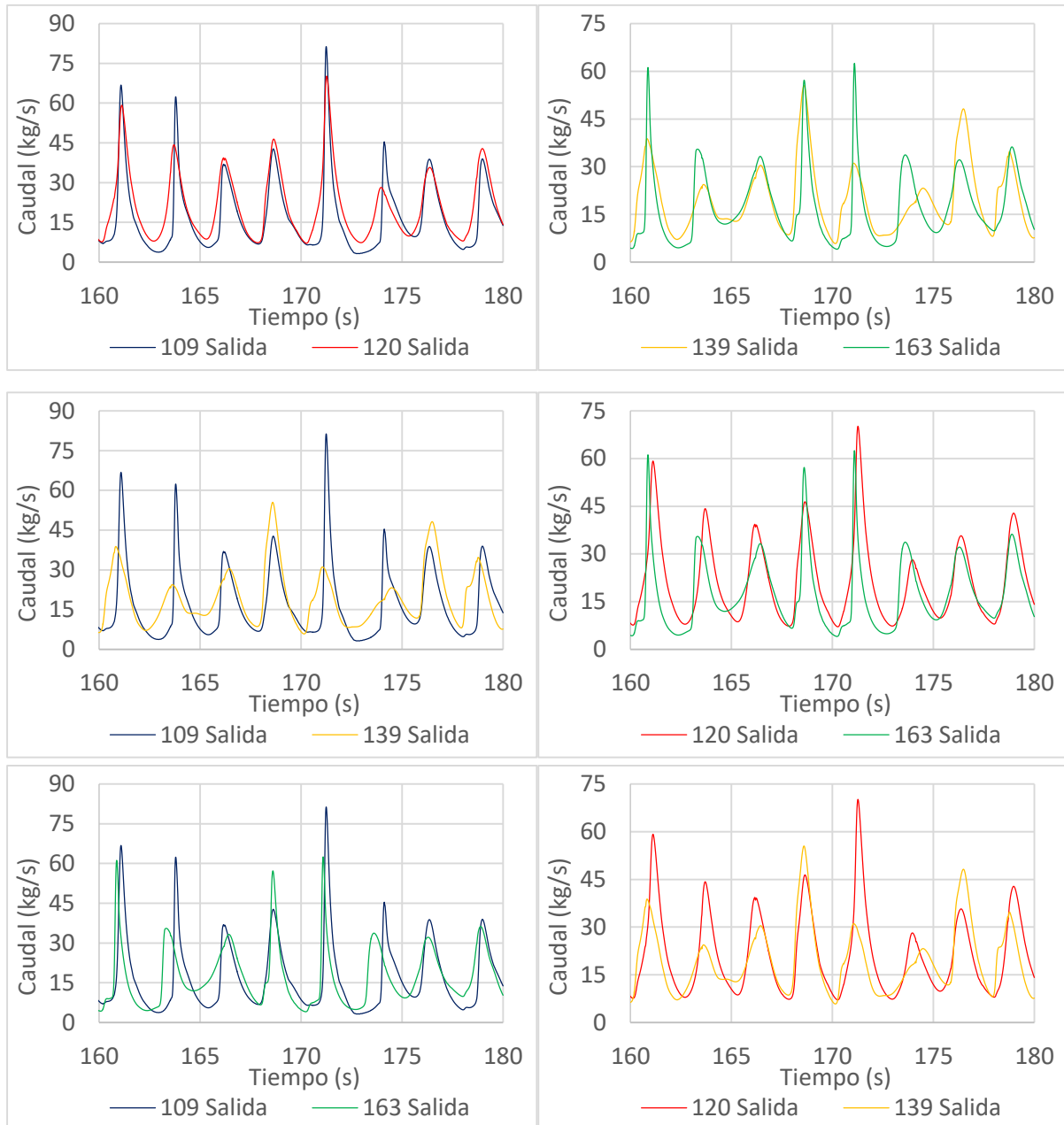


Figura 73: Caudal de entrada en los canales 109, 120, 139 y 163 a raíz de la perturbación regional C

A raíz de la perturbación global (figura 74), el caudal de salida en los canales 109/120 y 139/163 oscila en fase mientras que oscila fuera de fase respecto a los otros canales. Es decir que la mitad superior oscila fuera de fase con la mitad inferior. En este caso, el caudal de salida en los canales oscila a una frecuencia de 0,40Hz.



**Figura 74: Caudal de salida en los canales 109, 120, 139 y 163 a raíz de la perturbación global**

A raíz de la perturbación regional A (figura 75), el caudal de salida en los canales 109/120 y 139/163 oscila en fase mientras que oscila fuera de fase respecto a los otros canales. Es decir que la mitad superior oscila fuera de fase con la mitad inferior. En este caso, el caudal de salida oscila a una frecuencia de 0,4Hz.

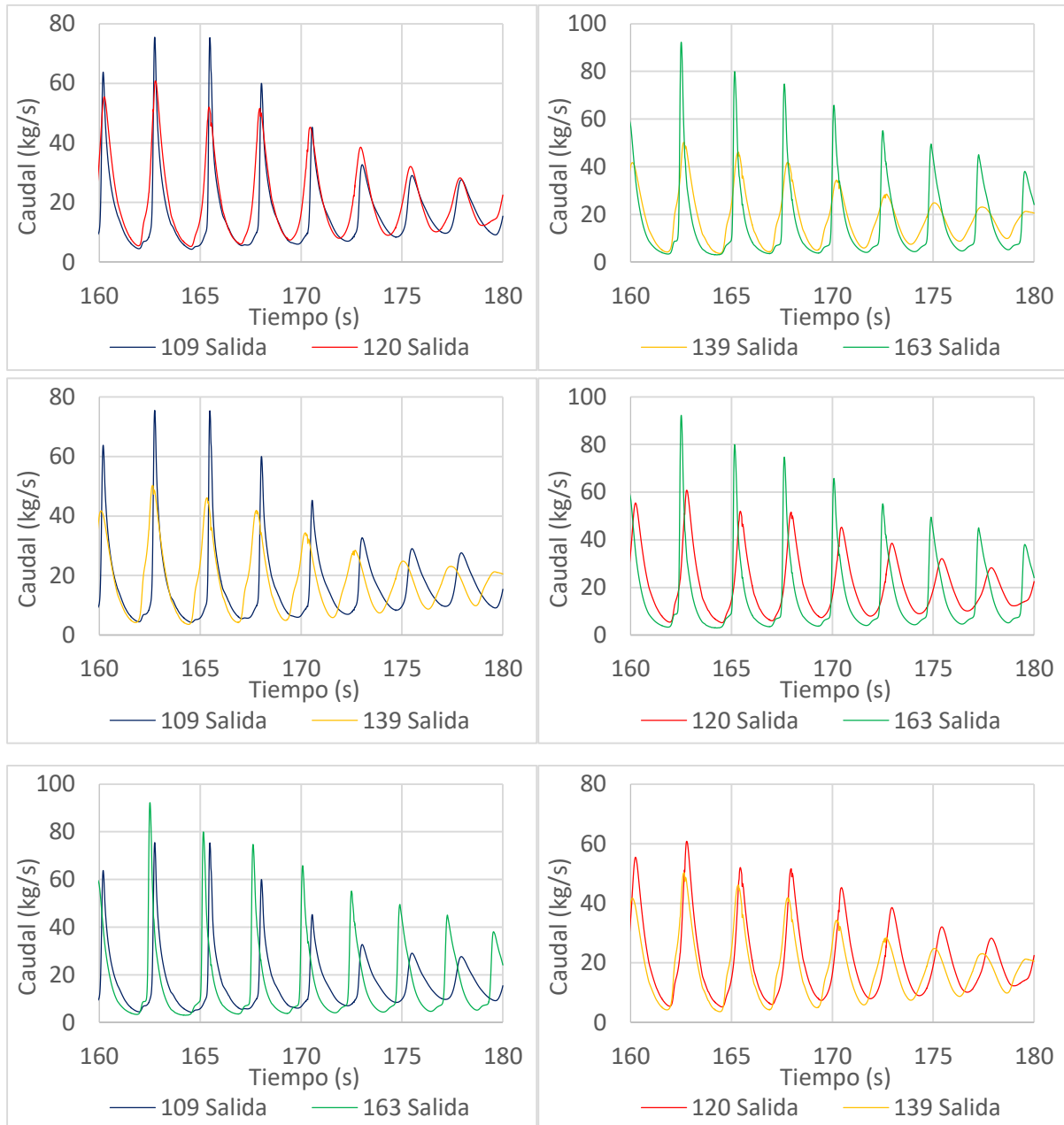
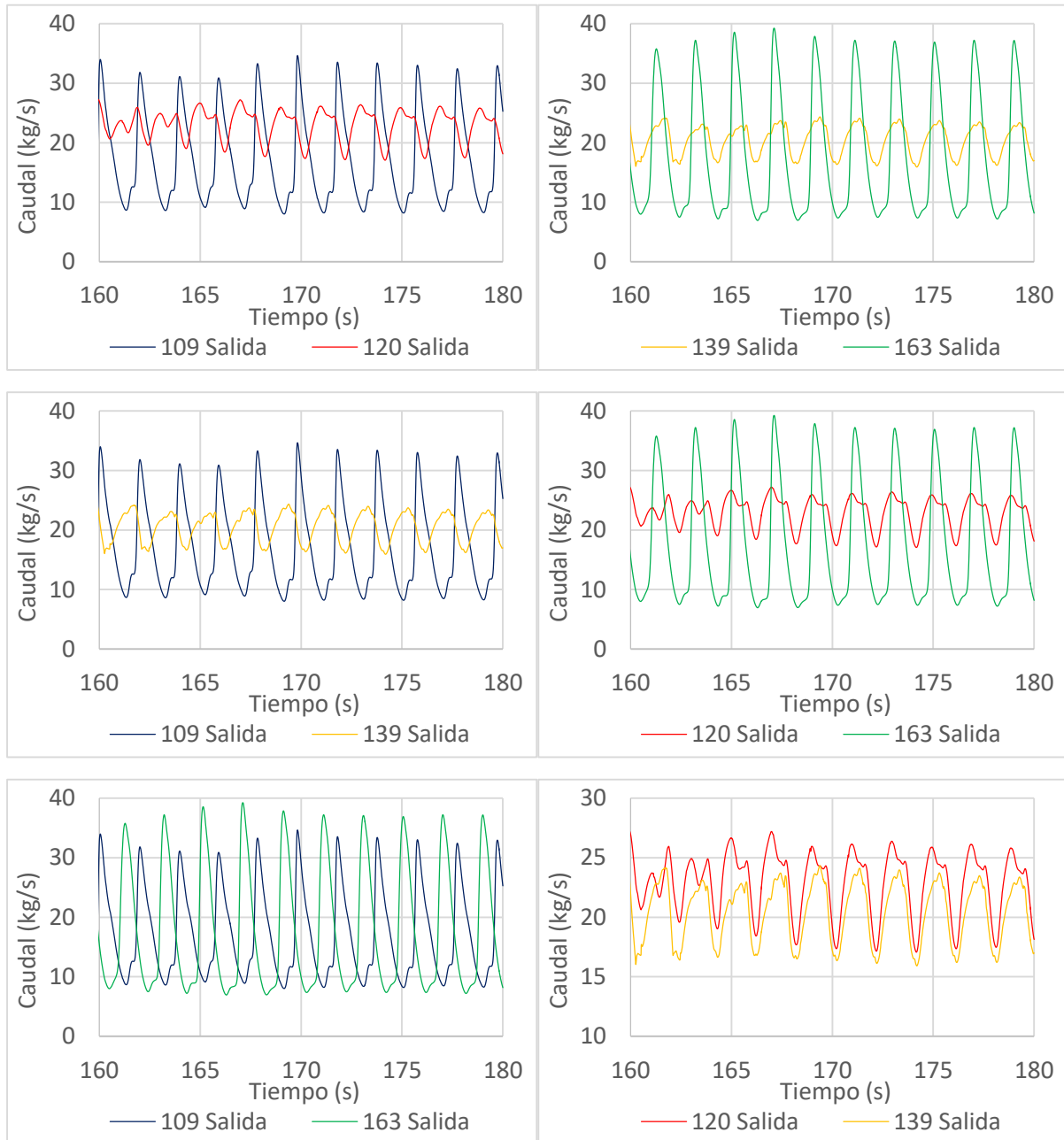


Figura 75: Caudal de salida en los canales 109, 120, 139 y 163 a raíz de la perturbación regional A

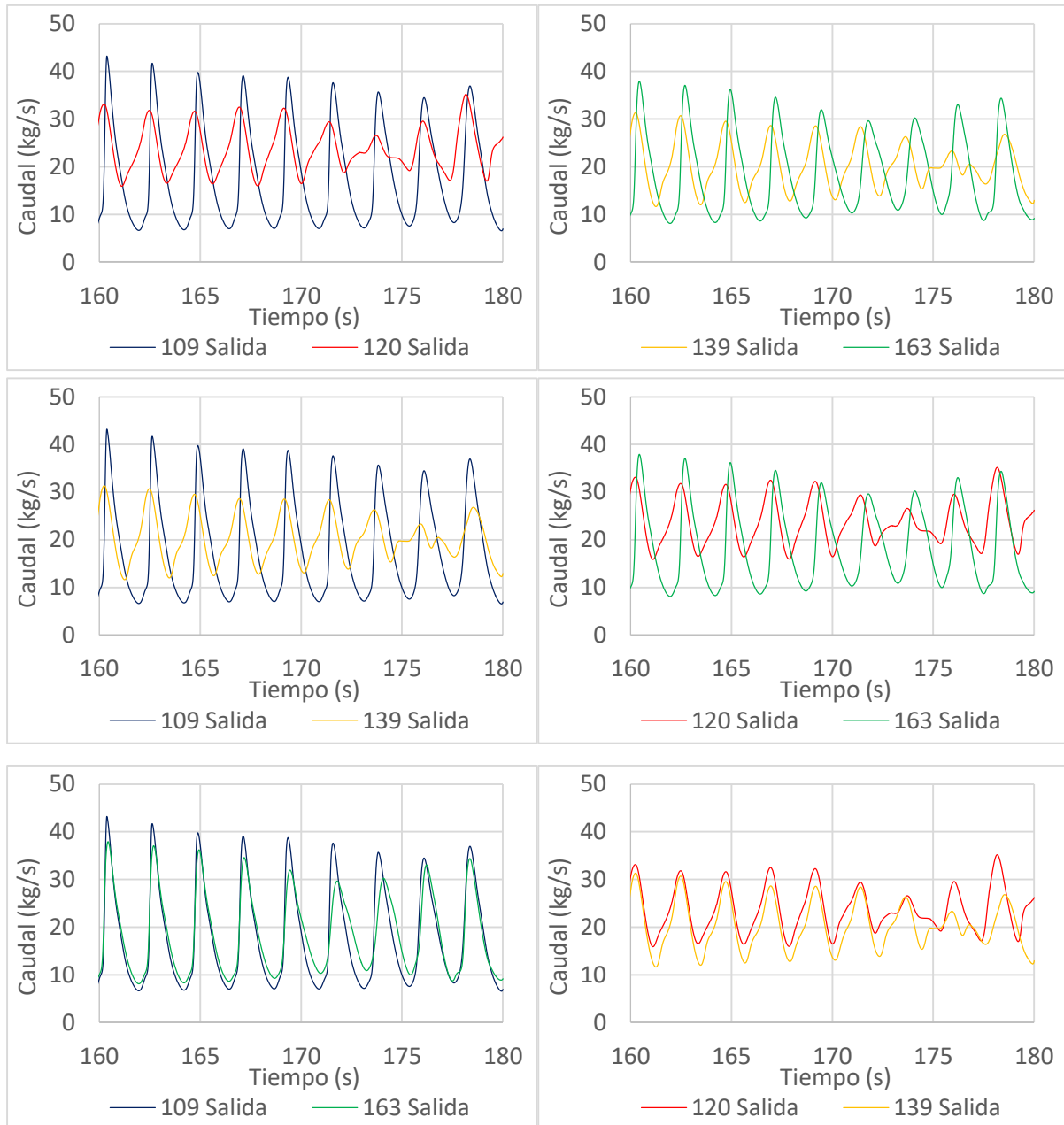


A raíz de la perturbación regional B (figura 76), el caudal de salida en los canales 120, 139 y 163 oscila en fase mientras que oscila fuera de fase respecto al canal 109. Es decir que el caudal de salida oscila en fase en tres cuadrantes. En este caso, el caudal de salida oscila a una frecuencia de 0,52Hz.



**Figura 76: Caudal de salida en los canales 109, 120, 139 y 163 a raíz de la perturbación regional B**

A raíz de la perturbación regional C (figura 77), el caudal de salida en los canales 109/163 y 120/139 oscila en fase mientras que oscila fuera de fase respecto a los otros canales. Es decir que el caudal de salida oscila en fase en cuadrantes diametralmente opuestos. En este caso, el caudal de salida oscila a una frecuencia de 0,45Hz.



**Figura 77: Caudal de salida en los canales 109, 120, 139 y 163 a raíz de la perturbación regional C**







## 8 Conclusiones

En el marco de la validación de la metodología TRACE/PARCS, se ha simulado una inestabilidad fuera de fase en un BWR. Para su realización, se representa el núcleo con 648 nodos activos y 72 canales termohidráulicos. El mapa de equivalencia entre la nodalización termohidráulica y la neutrónica se basa en las formas espaciales del fundamental y primer y segundo armónico de la potencia del reactor, calculados mediante el código VALKIN. Así se divide el núcleo en cuadrantes según la forma del primer y del segundo armónico, que son síntomas de una oscilación fuera de fase, es decir en un mismo tiempo, una mitad del núcleo opera a alta potencia mientras que la otra tiene un nivel muy bajo.

Se modeliza el reactor mediante dos modelos. El primer modelo representa únicamente los canales del núcleo y consiste en una primera aproximación del problema. El segundo modelo representa la vasija con sus componentes y consiste en un enfoque más detallado del problema. Con estos dos modelos termohidráulico, se trata de reproducir las condiciones de operación del punto *BOC 14 Record 9* en el reactor Ringhals 1.

Los resultados del estacionario acoplado permiten validar la configuración de los códigos y de los modelos porque los caudales y los perfiles de potencia obtenidos son similares a los del *benchmark*. Además, se nota un pico de potencia a la zona inferior del núcleo. La presencia de este pico como su pronunciamiento son síntomas de un núcleo inestable.

Los resultados de los transitorios sin perturbación, tanto los del *benchmark* como los de la simulación, permiten validar la división en cuadrantes efectuada por los armónicos de la potencia porque la potencia oscila en fase en un mismo cuadrante y en oposición de fase en dos cuadrantes adyacentes o diametralmente opuestos. Además, muestran que se produce una mezcla de oscilaciones en fase y fuera de fase dentro del reactor.

Los resultados de los transitorios obtenidos a raíz de la aplicación de cuatro perturbaciones diferentes muestran que el patrón de oscilación depende del modo que se perturba, es decir, el comportamiento inestable de un reactor no solamente depende de las condiciones termohidráulicas previas a la oscilación, sino que también del tipo y amplitud de la perturbación que desencadena la oscilación. Además, se produce una mezcla de oscilaciones en fase y fuera de fase dentro del reactor que depende de la perturbación.

Para concluir sobre la contribución de los modos a las oscilaciones, se analiza la frecuencia y la fase de las oscilaciones. Las frecuencias de oscilación obtenidas están dentro del rango 0,4 Hz y 0,6 Hz, típico de una inestabilidad en BWR, pero dependen del modelo termohidráulico y de la perturbación aplicada. Los datos del benchmark durante el transitorio muestran oscilaciones periódicas casi sinusoidales y un poco de ruido. Se destaca que la potencia en la mitad superior oscila en oposición de fase respecto a la potencia en la mitad inferior.

Según (D.Ginestar et al., 2011 [19]), solo el modo fundamental contribuye a la oscilación con una frecuencia determinada. Los transitorios simulados sin perturbación muestran oscilaciones periódicas con una frecuencia y una amplitud constante, sin describir sinusoidales. En este caso el reactor se



comporta casi como un oscilador armónico, es decir con una contribución preponderante del fundamental. Los dos modelos termohidráulicos reproducen bien la oscilación en fase en un mismo cuadrante pero fallan a simular las oscilaciones en fase y en oposición de fase en cuadrantes simétricos. Sin embargo la frecuencia de oscilación con el modelo de los canales esta superior a la frecuencia de referencia mientras que la frecuencia de oscilación con el modelo de la vasija esta inferior a la referencia. Como la frecuencia de oscilación está relacionada con la velocidad de propagación de las burbujas de vapor en un canal, un ajuste de la velocidad en los canales es necesario para conseguir la frecuencia correcta.

Los transitorios con las perturbaciones global o regional A muestran oscilaciones irregulares que parecen a ruidos o interferencias en cuyo caso no se puede sacar la frecuencia con exactitud porque no queda constante. Estas interferencias destacan la contribución y la excitación del primer y del segundo armónico de potencia y se puede demostrar con una descomposición modal.

Los transitorios con las perturbaciones regionales B o C muestran oscilaciones periódicas en cuyo caso solo la amplitud varia. No reproducen la situación en planta sino las oscilaciones siguen el movimiento de la perturbación, es decir que la potencia oscila en fase en cuadrantes diametralmente opuestos a raíz de la perturbación C y la potencia casi oscila en fase en mitades laterales a raíz de la perturbación B, pero permanece un pequeño desfase.

Aunque no se ocurran movimientos de barras durante el transitorio del benchmark, una simulación sin perturbación no es suficiente para reproducir las condiciones transitorias de la planta sino es necesario perturbar el sistema con el fin de excitar los modos. De hecho el caso que reproduce el transitorio del benchmark con más similitud es el transitorio con la perturbación regional A en el que la potencia en la mitad superior oscila en oposición de fase con la potencia en la mitad inferior. Esta perturbación corresponde a un movimiento uniforme de las barras de control en los cuadrantes superiores y un movimiento opuesto en los cuadrantes inferiores, lo que provoque una variación de la potencia opuesta en las dos mitades y una oscilación en oposición de fase. Como esperaba se excita el primer modo, el modo que tiene la mayor amplitud de oscilación.

En cuanto a los caudales, no siguen el mismo patrón de oscilación porque se puede que una oscilación de onda de densidad tiene lugar en un canal y no en los otros, se llama la inestabilidad u oscilación en un canal. Este tipo de oscilación no está acoplada con una oscilación de potencia, es porque a veces el caudal en un cuadrante no oscila en fase con los tres otros cuadrantes. Cuando la oscilación de caudal se acopla con la oscilación de potencia, se cree una inestabilidad regional donde las variables oscilan en fase por mitades o global donde las variables oscilan en fase en todo el núcleo.

Los resultados de la simulación en la central nuclear de Ringhals I con los códigos acoplados TRACE/PARCS muestran que el punto de test conocido como *record 9* es un punto de operación inestable. Las perturbaciones consisten en un movimiento de las barras de control, que provoca una excitación mayor de los modos subcríticos. La excitación de los armónicos de potencia, particularmente el primer armónico, produce este patrón de oscilación fuera de fase. Los resultados confirman que este procedimiento de simulación es adecuado para el análisis de estabilidad ya que se han reproducido las especificaciones del *record 9* del *benchmark* de Ringhals 1.



## 9 Trabajos futuros

A continuación del presente Trabajo Final de Master, quedan abiertas diversas líneas de investigación y mejora.

Una primera línea de investigación es la representación de un modelo de reactor canal a canal, es decir, representando todos los canales termohidráulicos sin necesidad de agrupar. Gracias al avance computacional que ha tenido lugar en los últimos años, TRACE puede realizar la simulación de un núcleo detallado en un tiempo computacional aceptable.

La siguiente línea natural de mejora es la modelización más detallada del reactor de Ringhals 1, es decir añadiendo todos los componentes que faltan en el modelo de la vasija: 6 lazos de recirculación con sus correspondientes bombas de chorro y de recirculación, 2 líneas de vapor y 2 líneas de agua de entrada con sus correspondientes turbinas. Además se puede añadir sectores acimutales, radiales o axiales en la vasija. También se puede aplicar perturbaciones al modelo de canales y comparar con el modelo detallado del reactor.

La tercera línea de investigación es la aplicación de otros modos de perturbación como, por ejemplo, perturbaciones en la densidad del moderador basadas en la forma y amplitud de los modos de la potencia.

La cuarta línea de investigación es el análisis de otros parámetros como la presión, la temperatura, la fracción de huecos, el flujo de calor o el flujo de neutrones junto con el cálculo del *Decay Ratio* y el cálculo de las amplitudes modales a partir de las señales de los LPRMs. Se pueden obtener mediante los métodos SVD (*Singular Value Decomposition*) y el PMD (*Power Modal Decomposition*).

Finalmente, un análisis de sensibilidad sobre los distintos parámetros resultaría interesante para una mayor profundidad en el conocimiento sobre dichos fenómenos, ya que permite determinar la influencia de cada parámetro individual sobre las características de la oscilación.

Los trabajos futuros también trataran de reducir la difusión y la amortización numéricas inherente en TRACE.







## 10 Bibliografía y referencias

1. Lefvert, T. “*Ringhals I Stability Benchmark*”. NEA/NSC/DOC(96) 22, (1996).
2. Theory Manual for the PARCS Kinetics Core Simulator Module
3. TRACE V5.0 Patch 5 Theory Manual
4. PARCS Input Manual Specification
5. TRACE V5.0 Patch 5 User’s Manual Volume 1: Input Specification
6. TRACE V5.0 Patch 5 User’s Manual Volume 2: Modeling Guidelines
7. Abarca Giménez, A.; Barrachina Celda, TM.; Miró Herrero, R.; Ginestar Peiró, D.; Verdú Martín, GJ. “*Estudio paramétrico de diferentes perturbaciones aplicadas al reactor de la central nuclear de Ringhals 1 con los códigos acoplados Relaps/Parcs*”. Senda Editorial, S.A, (2011).
8. G. Verdú, D. Ginestar, V. Vidal & R. Miró (1998). “*Modal Decomposition Method for-BWR Stability Analysis*”, Journal of Nuclear Science and Technology, 35:8, 538-546, DOI:10.1080/18811248.1998.9733907.  
<https://doi.org/10.1080/18811248.1998.9733907>
9. Gómez-Zarzuela, C. “*Análisis de estabilidad de Peach Bottom NPP mediante TRACE/PARCS*”. Trabajo Final de Master, Universitat Politècnica de València, (2014).
10. H. Ikeda, T. Fukahori, Y. Kubo, H. Soneda & S. Mizokami. “*BWR Stability Issues in Japan*”, Hindawi Publishing Corporation, Science and Technology of Nuclear Installations, Volume 2008, Article ID 358616, 11 pages.  
<https://doi.org/10.1155/2008/358616>
11. F. D’Auria. “*State of the Art Report on Boiling Water Reactor Stability*” OCDE/GD(97)13, AEN/NEA, 1997.  
<https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/1996/csni-r1996-21.pdf>
12. “*Appendix A to Part 50 - General Design Criteria for Nuclear Power Plants*”. USNRC  
<https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/cfr/part050/part050-appa.html>
13. Miguel Ceceñas Falcón. “*Determinación de estabilidad termohidráulica en reactores tipo BWR*”. Boletín iie, julio-agosto del 2000. <https://www.ineel.mx/bolIEA00/art2.pdf>



14. Juan Alva Neria. “*Análisis de incertidumbre para resultados de códigos termohidráulicos de mejor estimación*”. Instituto Politécnico Nacional, México, D. F., agosto de 2010.  
<https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/42/061/42061158.pdf>
15. “*Standard Review Plan*”. U.S. Nuclear Regulatory Commission, March 2007.  
<https://www.nrc.gov/docs/ML0705/ML070550017.pdf>
16. A. Abarca, T. Barrachina, R. Miró, D. Ginestar, G. Verdú. “*Análisis de estabilidad en el reactor BWR Ringhals I con los códigos acoplados RELAP5/PARCSv2.7*” Universitat Politècnica de València.
17. M. Garcia-Fenoll, A. Abarca, T. Barrachina, R. Miró, D. Ginestar, G. Verdú. “*Study of different perturbations applied on operating conditions of the cycle 14 on Ringhals Stability Benchmark with RELAP5/PARCS coupled*”. 2011 International Nuclear Atlantic Conference.
18. C. Gómez-Zarzuela, T. Barrachina, R. Miró, G. Verdú. “*Ringhals-I BWR modal stability analysis with coupled codes TRACEV5.0/PARCSv3.0*”. University of Palookaville, East Virginia, USA.
19. D. Ginestar, R. Miró, G. Verdú, T. Barrachina. “*Modal processing of the Local Power Range Monitors signals in BWR NPP*”. Annals of Nuclear Energy 38 (2011) 2441–2455.  
[https://ac.els-cdn.com/S0306454911002702/1-s2.0-S0306454911002702-main.pdf?\\_tid=6d16ea84-46e0-4dfe-a9f3-600e665723c9&acdnat=1552066072\\_5001e225fff39ffea927cad612c49a76](https://ac.els-cdn.com/S0306454911002702/1-s2.0-S0306454911002702-main.pdf?_tid=6d16ea84-46e0-4dfe-a9f3-600e665723c9&acdnat=1552066072_5001e225fff39ffea927cad612c49a76)
20. K.R. Prasad, S.P. Chaganty, V. Balagi, E. Unnikrishnan, K. Venkateswara Rao. “*Development and applications of LPRM detectors*”. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Volume 418, Issues 2–3, 1 December 1998, Pages 420–428.  
[https://ac.els-cdn.com/S0168900298006706/1-s2.0-S0168900298006706-main.pdf?\\_tid=bd2500d9-7c85-450d-9654-9d65bdfa8c2a&acdnat=1551978124\\_d056492f9d07ddd86a7eb00138cde942](https://ac.els-cdn.com/S0168900298006706/1-s2.0-S0168900298006706-main.pdf?_tid=bd2500d9-7c85-450d-9654-9d65bdfa8c2a&acdnat=1551978124_d056492f9d07ddd86a7eb00138cde942)
21. R. Miro, D. Ginestar, D. Hennig, G. Verdú. “*On the Regional Oscillation Phenomenon in BWR's*”. Progress in Nuclear Energy, Vol. 36, No. 2, pp. 189-229, 2000.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197000000056>





## DOCUMENTO 2: PRESUPUESTO





## 11 Presupuesto

En este capítulo, se van a detallar los gastos producidos en cuanto a horas de trabajo involucradas en la elaboración del TFM y en cuanto a la amortización de los equipos utilizados.

Se considera un número total de 420 horas para llevar a cabo el trabajo distribuido de la siguiente forma:

- 60 horas empleadas en la documentación para entender los códigos utilizados y la metodología de cálculo, la lectura del *benchmark* y de los trabajos previos, el aprendizaje de los códigos y la búsqueda de información adicional.
- 60 horas empleadas en el diseño y la configuración de los modelos y los códigos.
- 120 horas dedicadas a la computación de los casos simulados. También se tiene en cuenta en este total de horas los cálculos que fallan por error fatal o por ausencia de memoria virtual, el ajuste de los códigos para eliminar fallos y los cálculos divididos en parte con la herramienta *restart*. Por información, la simulación de un estacionario sin acoplar necesita un tiempo de computación de 15 a 30 minutos, entre 1 y 2 horas para un estacionario acoplado y entre 4 y 6 horas para un transitorio acoplado de 180 segundos.
- 60 horas utilizadas en la explotación de los resultados con AptPlot, Excel y Matlab y la edición de gráficos, figuras y tablas.
- 120 horas utilizadas en la redacción de la memoria, montaje del documento final, entrega y tramitación de la defensa.

Los gastos de reprografía se añaden al coste de elaboración del TFM.

Adicionalmente, se considera la amortización de los equipos utilizados a lo largo del TFM:

- Un ordenador portátil utilizado para la búsqueda de información, computación de los casos simulados, explotación de los resultados y redacción de la memoria.
- Un disco duro para guardar todos los archivos pesados necesarios al TFM.
- Los gastos indirectos hacen referencia a los costes que no se ven reflejados en los costes directos y que no pueden determinarse claramente, pero que son necesarios para la consecución del TFM, como por ejemplo los gastos de electricidad. Se estiman a un 2% del coste de elaboración del TFM.

Por lo tanto, los gastos del TFM pueden verse detallados en la tabla 21.



Concepto		Unidad	Cantidad	Precio unitario (€)	Subtotal (€)
Elaboración del TFM	Documentación, lectura de los trabajos previos, aprendizaje de los códigos	h	60	20	1200
	Diseño de los modelos y configuración de los códigos	h	60	20	1200
	Cálculos estacionarios y transitorios	h	120	20	2400
	Explotación de los resultados	h	60	20	1200
	Redacción de la memoria	h	120	20	2400
	Reprografía	-	1	50	50
Amortización de los equipos	Ordenador portátil	-	1	1000	1000
	Disco duro	-	1	80	80
	Gastos indirectos	%	2	8400	168
<b>Total sin impuestos (€)</b>					<b>9698</b>
<b>IVA (%)</b>					<b>21</b>
<b>Presupuesto total (€)</b>					<b>11734,58</b>

Tabla 21: Presupuesto total

El presupuesto total de este TFM asciende a: ONCE MIL SIETE CIENTOS TREINTA Y CUATRO EUROS CON CINCUENTA Y OCHO CENTIMOS.