



**Universidad
Zaragoza**

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Desarrollo e implementación de estrategias de
cobertura para cocinas de inducción con inductores
móviles

Autor

Víctor Machín Moreno

Director

José Manuel Palacios Gasós

Ponente

Carlos Sagües Blázquez

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2015



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. Víctor Machín Moreno,

con nº de DNI 72891202-Q en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) Grado _____, (Título del Trabajo)

Desarrollo e implementación de estrategias de cobertura para cocinas de inducción con inductores móviles

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, a 27 de agosto de 2015 _____

Fdo: Víctor Machín Moreno

Resumen del trabajo

Desarrollo e implementación de estrategias de cobertura para cocinas de inducción con inductores móviles

En los últimos años, el grupo BSH Electrodomésticos España ha mostrado un creciente interés por el concepto de flexibilidad en las cocinas domésticas para ofrecer más prestaciones a los usuarios. Se pretende conseguir que las encimeras se adapten a la amplia variedad de recipientes existentes en la actualidad, con diferentes tamaños y formas. Una de las líneas de investigación que la compañía lleva años desarrollando, es la idea de dotar a los inductores de movilidad para transferir esta flexibilidad al usuario. De hecho, actualmente dispone de un prototipo de tres inductores móviles.

Continuando con esta línea de investigación, el objetivo principal de este trabajo es el desarrollo de algoritmos que sean capaces de llevar a cabo una estrategia de cobertura con el fin de calentar hasta un máximo de seis recipientes. Dentro de esta tarea, se incluyen tanto la posición de los inductores y la potencia que deben entregar, como las trayectorias empleadas por el inductor para calentar recipientes más grandes que él mismo. Una vez realizado el algoritmo se implementará en una simulación para evaluar la viabilidad técnica del prototipo frente a las cocinas convencionales.

Para abordar el trabajo, primeramente se divide el problema en tres tipos de situaciones que pueden darse en función del número, tamaño y posición de los recipientes, con el fin de simplificar la realización de la tarea, para su posterior unificación bajo un mismo algoritmo. Estas situaciones se diferencian en la temporalidad de la asignación y en el tipo de cobertura que realizan. De esta forma el problema queda dividido en: asignación estática con cobertura estática, asignación dinámica con cobertura estática y cobertura dinámica.

El método para resolver el problema de la asignación de inductores a los recipientes es la asignación discreta de recursos minimizando el coste de asignación, calculado en función de unos parámetros estudiados, como son la distancia entre el recipiente y el inductor, la diferencia de potencia del recipiente respecto de su consigna y el tiempo que un inductor tarda en volver a calentar un recipiente.

Con el fin de que las posiciones de los inductores sean viables, se estudian y resuelven los inconvenientes derivados de problemas físicos y/o térmicos, como pueden ser las colisiones entre inductores o con el borde de la cocina, o malas coberturas y acoplamientos magnéticos entre inductor y recipiente.

Finalmente, se establecen trayectorias que son seguidas por los inductores para calentar las diversas formas y tamaños de recipientes que no pueden calentarse estáticamente. Para que el estudio sea lo más real posible, se utiliza el modelo de distribución de densidad de potencia de los inductores. La trayectoria óptima es la que realiza un calentamiento uniforme, eficiente y rápido.

Índice

1.	Introducción	3
1.1	Motivación	3
1.2	Investigaciones previas en el campo de los inductores móviles.....	5
1.3	Desglose del problema.....	6
1.4	Objetivo y alcance	8
1.5	Descripción de la memoria.....	9
2.	Asignación estática y cobertura estática.....	11
2.1	Objetivo	11
2.2	Método de asignación.....	11
2.3	Alcance de los inductores.....	12
2.4	Criterios de coste propuestos	14
2.5	Cálculo de la posición final de los inductores	17
2.6	Evaluación y selección de los criterios	24
3.	Asignación dinámica y cobertura estática.....	31
3.1	Objetivo	31
3.2	Estrategia de asignación.....	31
3.3	Forma de calentamiento	34
3.4	Selección de parámetros óptimos y evaluación del algoritmo	36
4.	Cobertura dinámica con asignación estática	43
4.1	Objetivo	43
4.2	Modelo térmico implementado	43
4.3	Estudio de trayectorias para cobertura uniforme.....	45
4.4	Forma de las trayectorias implementadas.....	51
4.5	Soluciones halladas	54
5.	Conclusiones y futuras líneas de trabajo	59
	Referencias.....	61
	Anexo A: Gráficas representativas de la evaluación de criterios en la asignación estática.....	63
	Anexo B: Resultados del filtrado de combinaciones de pesos para obtener la asignación dinámica óptima.....	67

1. Introducción

1.1 Motivación

En la actualidad, el ser humano tiende a mejorar su calidad de vida, haciéndola más cómoda, fácil y simple. Ejemplo de ello se puede observar en múltiples casos de la vida cotidiana como pueden ser los coches con nuevas tecnologías y comodidades, aspiradoras inteligentes, cocinas domesticas más seguras y, por qué no, más flexibles también.

Hacia esta última referencia, cocinas domésticas más flexibles, es donde se enfoca este trabajo. En los últimos años se han producido grandes cambios en este sector en lo que respecta a la tecnología que implementan, desde las cocinas de gas de butano, pasando por las cocinas eléctricas radiantes y llegando a las cocinas de calentamiento por inducción. Estas últimas no necesitan de un medio de transferencia de calor como ocurre en las cocinas radiantes, sino que mediante la tecnología de inducción, el recipiente es calentado directamente, con el consiguiente ahorro de energía, tiempo y aumento en la seguridad del usuario.

Como es sabido, no es posible colocar cualquier recipiente en estas cocinas, sino que hay que adaptarse al número, tamaño, forma y posición de los inductores que se encuentran fijos en la cocina. Debido a esta situación y dada la gran variedad de formas y tamaños de recipientes que existen en la actualidad (Figura 1), desde las empresas del sector, empezaron a realizar cocinas con diferentes configuraciones y tamaños de inductores para dar mayor flexibilidad a los usuarios. Un ejemplo de ello es la cocina que lanzó al mercado la compañía BSH, con inductores de múltiples aros que puede calentar recipientes de hasta 32 cm. de diámetro. Gracias a un inductor triple muy grande permite, por ejemplo, realizar paellas con grandes recipientes (Figura 2).



Figura 1. Cocina doméstica "free induction" con gran variedad de recipientes

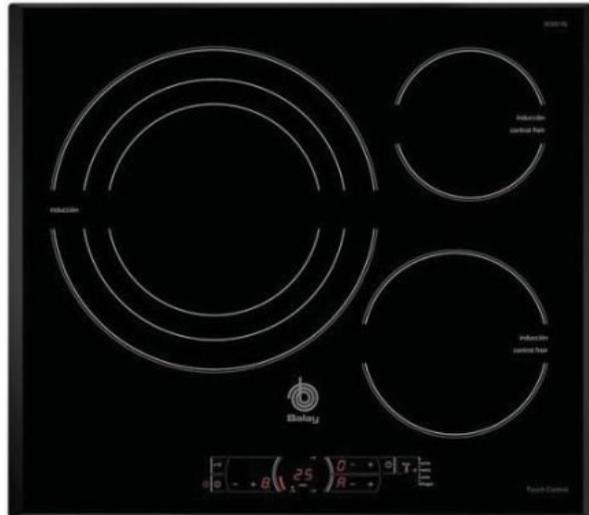


Figura 2. Cocina domestica con inductores de múltiples aros

No obstante, cualquier configuración fija que exista tiene limitaciones en cuanto al número, tamaño, forma y posición de los recipientes. Por ello, las empresas líderes en el sector, como por ejemplo el grupo B.S.H. Electrodomésticos España, se encuentran en la línea de investigación de realizar cocinas de inducción completamente flexibles, en las que pueda ser útil toda el área de la cocina. Prueba de este desarrollo es que actualmente ya está en el mercado una cocina flexible denominada “*free induction*” (Figura 1). Se compone de una matriz de 48 inductores pequeños que pueden llegar a calentar cualquier parte de la cocina.

Sin embargo, este elevado número de inductores incrementa el coste de la cocina. Además, los inductores de pequeño tamaño y con formas no circulares son menos eficientes y los acoplamientos magnéticos mutuos entre inductores adyacentes pueden causar un mal funcionamiento en los circuitos electrónicos [1]. Por estos motivos están investigando y evolucionando este sistema con nuevas configuraciones de múltiples inductores y en paralelo han abierto otras líneas de desarrollo.

Una de estas líneas de investigación para cocinas flexibles es la idea de que los inductores se puedan mover por debajo de la cocina mediante brazos robóticos y, de esta forma, colocarse en el lugar requerido y utilizar la estrategia de movimiento más apropiada para realizar un calentamiento uniforme y cubrir las necesidades del usuario.

Tras varios años de trabajo y estudios en esta línea de trabajo en los que se han investigado nuevas formas de calentamiento, de transferencia de calor y detección de recipientes, actualmente ya existe un prototipo construido que posee tres inductores dobles (tienen la posibilidad de encender el inductor completo o solo un aro interno más pequeño) movidos mediante tres brazos robóticos de dos ejes rotativos paralelos y anclado su extremo en un punto fijo (Figura 3).

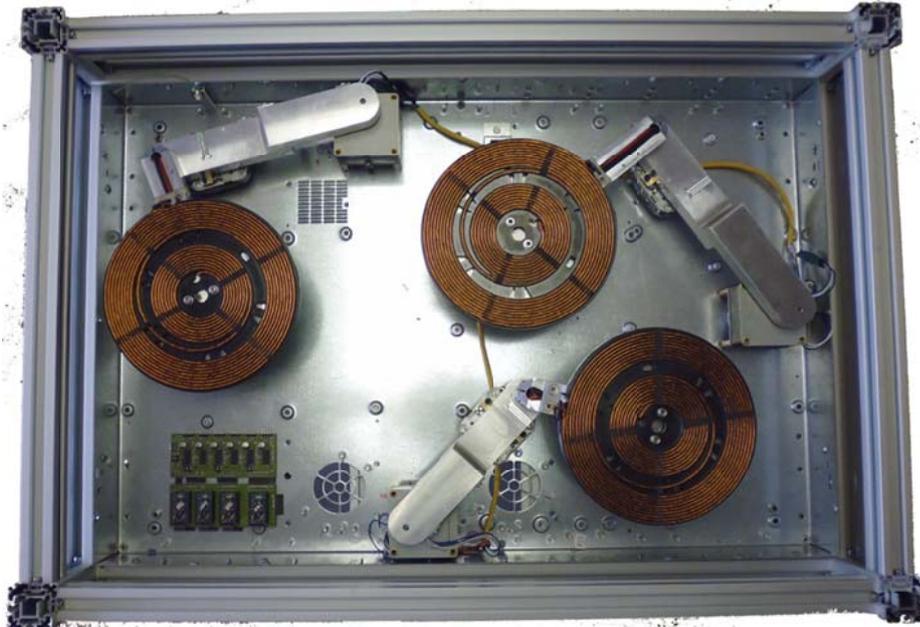


Figura 3. Prototipo de inductores móviles

Siguiendo la línea de investigación en este campo del grupo B.S.H. Electrodomésticos España y gracias a la estrecha colaboración que mantiene con la Universidad de Zaragoza, la finalidad de este trabajo es seguir desarrollando este sistema de inductores móviles, a partir del prototipo ya creado. Concretamente se va a abordar el problema de la asignación de inductores a los recipientes y la realización de trayectorias bajo los recipientes con el objetivo de realizar un calentamiento uniforme. Para ello se va a realizar una simulación mediante el programa informático *Matlab*, en el cual se contemplarán las diferentes casuísticas que se pueden encontrar, se solucionarán los problemas que puedan surgir a lo largo de estas asignaciones y se determinarán las posiciones finales de los inductores, las trayectorias a seguir bajo los recipientes y la potencia entregada en cada momento.

1.2 Investigaciones previas en el campo de los inductores móviles

Este proyecto surge como continuación de una amplia línea de investigación, de la cual se han obtenido algunos datos clave para la realización de este trabajo. El prototipo de inductores móviles se ha construido en base a un estudio de optimización del número, tamaño y forma de los inductores según las limitaciones físicas de la cocina [2].

Las dimensiones de la cocina son 726 mm de ancho y 482 mm de largo. El prototipo dispone de tres inductores dobles, formados por dos bobinados independientes, coplanarios y concéntricos, de 120 mm y 180 mm de diámetro. Estos inductores se mueven gracias a los brazos robóticos donde van sujetos en un extremo del brazo y su otro extremo está anclado en la cocina en un punto fijo. Los brazos tienen dos ejes de giro en dirección vertical con la finalidad de dotarlos con capacidad de movimiento y poder alcanzar cualquier punto de su campo de actuación. La longitud total de estos brazos es distinta para cada inductor y se detalla a continuación, junto a la posición de anclaje de los mismos (Tabla 1).

	Anclaje en X (mm)	Anclaje en Y (mm)	Longitud del brazo (mm)
Inductor 1	310	39	295
Inductor 2	683	241	405
Inductor 3	267	450	360

Tabla 1. Dimensiones del prototipo

Así mismo, dados el punto inicial y final, también se ha creado el algoritmo de generación de trayectorias en cooperación con todos los inductores y con el ambiente restringido de la cocina.

Gracias a otro de los estudios realizados en esta línea de investigación [3], se ha descubierto que inductores de 180 mm de diámetro pueden llegar a calentar satisfactoriamente recipientes circulares concéntricos de 210 mm de diámetro. De forma similar sucede con el inductor pequeño de 120 mm, que puede calentar recipientes de 140 mm de diámetro. Además, también se han realizado algoritmos de detección de recipientes mediante visión por computador, con el fin de localizar la posición y forma de los recipientes. Paralelamente a este proyecto se ha realizado otro tipo de detección de recipientes mediante la colocación de sensores capacitivos pegados al cristal de la cocina.

En cuanto al objetivo principal de este trabajo, la asignación de posiciones finales a los inductores, en BSH no se ha realizado ninguna investigación similar y tampoco se ha encontrado información en otras fuentes, ya que se trata de una idea novedosa.

Sin embargo, si se han encontrado ideas acerca cómo afrontar el problema [4]. La base del problema radica en la asignación de tareas de sistemas multi-robot, ya sea sobreasignación o asignación deficiente, lo que traducido a este problema significa que puede haber menos recipientes que inductores o que existan más, en cuyo caso la asignación deberá variar en el tiempo. La forma de realizar estas asignaciones será mediante la optimización del coste de asignación, como si de una red de flujo se tratase.

1.3 Desglose del problema

Para abordar el problema, inicialmente se han estudiado las diferentes casuísticas que se pueden dar en función del número, tamaño y posición de los recipientes. Se va a considerar la posibilidad de introducir cuatro tipos de recipientes, cuyos tamaños mínimos, máximos y factores de forma están limitados según el mercado y el estudio de optimización realizado para el prototipo (Tabla 2).

Recipiente	Tamaño mínimo	Tamaño máximo	Factor de forma (lado mayor / lado menor)
Círculo	Diámetro de 8 cm	Diámetro de 32 cm	-
Cuadrado	Lado menor de 15 cm	Lado mayor de 32 cm	-
Rectángulo	Lado menor de 15 cm	Lado mayor de 32 cm	Entre 1,2 y 2
Elipse	Eje menor de 15 cm	Eje mayor de 32 cm	Entre 1,2 y 2

Tabla 2. Tipos y tamaños de recipientes

En función del tamaño de los recipientes, estos pueden ser cubiertos manteniendo el inductor estático bajo el recipiente, de aquí en adelante se mencionará como cobertura estática, o si son más grandes, se debe desplazar el inductor bajo el recipiente con el fin de calentarlo uniformemente, llamado cobertura dinámica.

Con el fin de dividir el problema y poder abordarlo de una manera más fácil, se han planteado cuatro posibles situaciones que se podrán resolver por separado, para posteriormente intentar unificar todo bajo un único algoritmo. Las cuatro situaciones planteadas son las siguientes:

1. Asignación y cobertura estática:
 - La asignación es fija en el tiempo.
 - Esta situación se encuentra cuando todos los recipientes, con dimensiones para ser cubiertos estáticamente, pueden ser calentados a la vez. Como máximo puede haber hasta tres recipientes.
2. Asignación dinámica y cobertura estática:
 - La asignación es variable en el tiempo. Los inductores se mueven para cubrir nuevos recipientes que puedan ser calentados estáticamente.
 - Esta situación ocurre cuando hay más de tres recipientes cubiertos estáticamente y en algunas ocasiones incluso con dos o tres recipientes.
3. Cobertura dinámica:
 - La asignación puede ser estática o dinámica, aunque en la mayoría de casos será estática dadas las dimensiones de los recipientes y de la cocina.
 - Esta situación se encuentra cuando los recipientes son más grandes que los inductores y no se pueden cubrir manteniéndose en una posición fija.
 - Los inductores se mueven bajo el recipiente para calentarlo homogéneamente.
4. Cobertura dinámica múltiple:
 - Esta situación se da cuando varios inductores calientan un mismo recipiente con cobertura dinámica.
 - La causa de esta situación puede ser el elevado tamaño del recipiente o el escaso número de ellos.

Es de advertir que el cuarto caso se ha propuesto como tal, pensando en el conjunto del problema, sin embargo desde un principio se ha percibido que no va a ser posible abordarlo por cuestiones de tiempo y carga de trabajo para este proyecto.

1.4 Objetivo y alcance

El objetivo de este trabajo es la continuación en la línea de investigación que la empresa BSH tiene en el campo de las cocinas domesticas con inductores móviles. Más concretamente, el objetivo principal de este trabajo es el desarrollo de un algoritmo que sea capaz de asignar posiciones a los inductores donde puedan calentar los recipientes de la mejor manera posible, ya sean posiciones permanentes o temporales, y conocer en todo momento la potencia que deben dar los inductores a los recipientes, para evaluar la viabilidad técnica del prototipo de inductores móviles.

Determinar la posición óptima del inductor es una labor en la que influyen muchos factores. Además, debe de ser una posición viable tanto físicamente, para evitar colisiones entre inductores o los laterales de la cocina, como térmicamente con buena cobertura y acoplamiento magnético entre el inductor y el recipiente. Para establecer el criterio de asignación más apropiado, se evalúan mediante una simulación diferentes criterios, atendiendo a diversos parámetros como el número y distancia de los movimientos realizados, la cobertura entre inductor y recipiente, el tiempo transcurrido o el error de potencia del recipiente.

Realizar un calentamiento uniforme de recipientes más grandes que el inductor es un factor determinante para la correcta elaboración de los alimentos. Debido a la elevada dificultad de elaborar un algoritmo que genere la trayectoria óptima, la resolución de este problema se afronta como una evaluación paramétrica de los movimientos básicos predeterminados que un inductor puede realizar, para poder determinar la trayectoria del inductor en función de la forma y dimensiones del recipiente. Con el fin de que el estudio sea lo más real posible, se utiliza el modelo de distribución de densidad de potencia de los inductores.

En resumen, los objetivos del trabajo son los siguientes:

- Desarrollo de un algoritmo que posicione correctamente el inductor respecto del recipiente, evitando los inconvenientes físicos y térmicos.
- Determinación del criterio óptimo de asignación de inductores a recipientes, tanto en asignación estática como en dinámica.
- Estudio de la viabilidad técnica del prototipo, atendiendo a parámetros como el tiempo de calentamiento o el error de potencia que presentan los recipientes.
- Evaluación del calentamiento de zonas mediante movimientos predeterminados del inductor y selección de las trayectorias a seguir para calentar recipientes no posibles de cubrir estáticamente.

1.5 Descripción de la memoria

La memoria de este trabajo se ha desarrollado a lo largo de cinco capítulos:

En el capítulo 2, se desarrolla el algoritmo con la asignación estática y cobertura estática. Para ello se determina el método de asignación que se implementará y se exponen diversos criterios de cálculo del coste de asignación. Se solucionan los problemas derivados de la posición de asignación al centro del recipiente, modificando ligeramente esta posición del inductor. Para seleccionar el mejor criterio de coste se realiza una simulación con una base de datos.

En el capítulo 3, se varía el cálculo de coste de asignación incluyendo nuevos factores y se modifica el algoritmo de asignación para dar cabida a la asignación dinámica. Además, se presentan varios rangos de potencia que pueden entregar los inductores. Finalmente se seleccionan los factores óptimos del cálculo del coste y la potencia que deben dar los inductores y se evalúa la viabilidad del prototipo mediante una simulación.

En el capítulo 4, primero se realiza una simplificación del modelo de distribución de potencia de los inductores y se implementa en el algoritmo. Posteriormente, se simulan las trayectorias básicas que puede realizar un inductor para calentar una zona y se estudia la homogeneidad de la potencia entregada en dicha región. En base a estos datos se determinan las trayectorias a utilizar para calentar recipientes más grandes que el inductor.

En el capítulo 5, se exponen las conclusiones obtenidas en el trabajo y las líneas futuras de continuación que quedan pendientes en esta línea de investigación de cocinas flexibles con inductores móviles.

Adicionalmente, se incluyen dos anexos que complementan la memoria:

En el Anexo A, se presentan los gráficos con todos los criterios de cálculo de coste en la asignación dinámica para poder observar todas las diferencias o similitudes entre todos los criterios.

En el Anexo B, se presentan los pasos previos realizados a la selección final de los parámetros que optimizan el algoritmo y la potencia que deben entregar los inductores. Estos pasos previos son una serie de evaluaciones realizadas con todas las combinaciones posibles, donde se van seleccionando las combinaciones de parámetros que mejor hacen funcionar el algoritmo, como si de un filtro se tratase.

2. Asignación estática y cobertura estática

2.1 Objetivo

En este apartado se va a abordar el problema de la asignación y cobertura estática, el cual se da en los casos en que los recipientes puedan ser calentados manteniendo el inductor en una posición fija bajo el recipiente y todos los recipientes tienen una asignación constante en el tiempo. Esta condición de asignación estática se da en el caso de tener como máximo tres recipientes y cada recipiente poder ser cubierto como mínimo por un inductor diferente.

El objetivo principal de este capítulo es conseguir un criterio de asignación que optimice la estrategia empleada en las situaciones en que se pueda llevar a cabo la asignación estática. Para ello, se generará el algoritmo siguiendo el método de la optimización de costes de asignación, dentro de las limitaciones de la cocina. Se resolverán las incompatibilidades físicas y/o térmicas derivadas de los inductores y el calentamiento uniforme de los recipientes. En cuanto a la optimización del algoritmo, inicialmente se propondrán varios criterios de asignación y se evaluarán con una base de datos de situaciones de recipientes generada aleatoriamente. Finalmente se elegirán los mejores criterios para continuar evaluándolos con el problema de la asignación dinámica.

2.2 Método de asignación

Para realizar la asignación de los inductores a los recipientes, se ha enfocado el problema como una asignación discreta de recursos, como si fuese una optimización de redes, minimizando el coste de asignación.

Con el fin de reducir el coste computacional de selección del camino de mínimo coste, se ha estudiado la implementación de algoritmos que reduzcan este coste computacional. Uno de estos algoritmos es el *Branch and Bound* [5], el cual consiste en eliminar anticipadamente las ramas u opciones que van a llevar a un coste no mínimo. Un ejemplo de este método se muestra en la Figura 4, donde se aprecia que algunas de las posibilidades son descartadas antes de llegar a la solución final porque se observa que no pueden conseguir el mejor resultado.

Sin embargo, para problemas de pequeño tamaño como este, que sólo trata de tres inductores y sus combinaciones son reducidas, estos algoritmos requieren un mayor coste computacional del que ahorran. Por ello se descarta su utilización para resolver la asignación de este problema.

Se utilice el método que se utilice, la máxima que se debe de cumplir siempre es que se debe asignar un recipiente a un inductor que pueda cubrirlo satisfactoriamente. La configuración de alcance de los inductores se explica en el siguiente apartado 2.3. De entre todas las posibles soluciones, se elegirá la que presente un menor coste, atendiendo al método de optimización de flujo de redes.

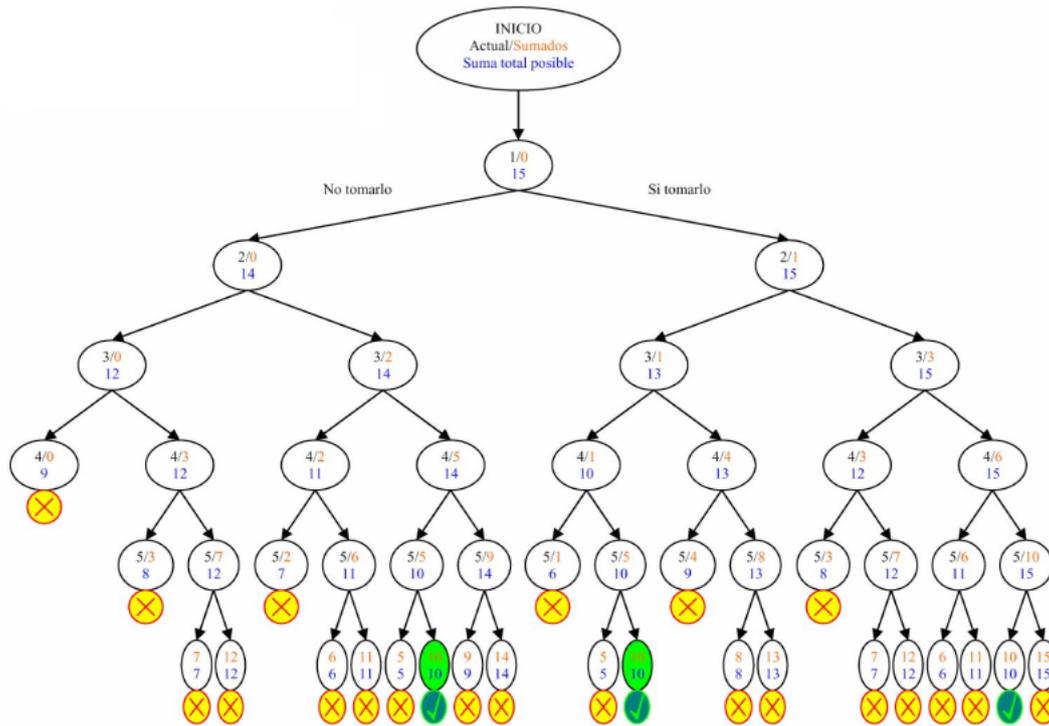


Figura 4. Ejemplo visual del método Branch and bound

2.3 Alcance de los inductores

Como se ha comentado en el apartado 1.2, los inductores están sujetos a unos brazos robóticos, los cuales les permiten moverse pero solo dentro de un límite alcanzable que no pueden sobrepasar, correspondiente al radio de actuación del brazo robótico. Esto hace que no todos los inductores puedan llegar a cubrir todos los recipientes.

Se dice que un recipiente es alcanzable por un inductor cuando éste puede calentar de forma satisfactoria el recipiente, es decir, todo el área del recipiente se encuentra dentro del radio de actuación al que puede llegar a calentar el inductor. Para comprobar esto, se crean imágenes del área que puede alcanzar el extremo de cada inductor y del área donde se encuentran los recipientes, ambas con tamaños de matrices de las dimensiones de la cocina. Para comprobar este alcance, se solapan, mediante operaciones matriciales lógicas, las imágenes de cada inductor con los recipientes. Únicamente son alcanzables los recipientes que el resultado de esta intersección devuelva la imagen completa del recipiente.

También se ha pensado en determinar este alcance teniendo en cuenta únicamente el centro de los recipientes y la posición máxima que puede alcanzar el centro de los inductores. Esta forma es mucho más simple y menos costosa computacionalmente. Sin embargo, se ha desechado la idea debido a problemas derivados con los recipientes circulares más pequeños que el inductor. Si el centro de estos recipientes sobrepasa el límite alcanzable del inductor, no se considerarían alcanzables teniendo en cuenta únicamente el centro, cuando realmente sí pueden calentarse. La Figura 5 presenta una demostración visual para ayudar a entender el concepto. En ella se observa que el centro sobrepasa el límite de alcance del inductor, pero este sí que puede cubrirlo satisfactoriamente.

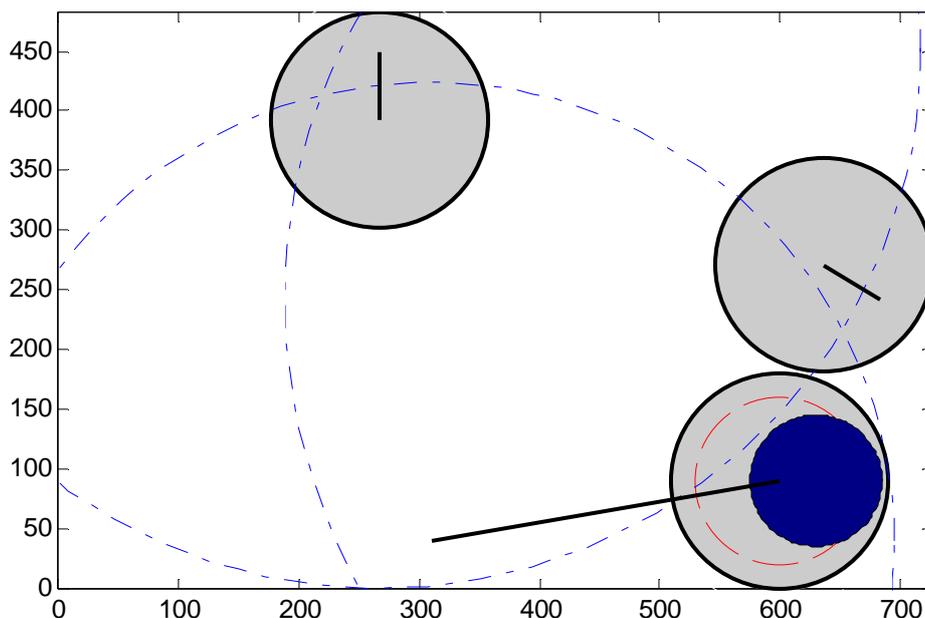


Figura 5. Demostración de la problemática de selección del alcance mediante el centro

Una vez determinados los recipientes que puede calentar cada inductor, se genera una matriz de alcance lógica, donde se puede observar rápidamente qué inductores pueden alcanzar qué recipientes. Se tomará como filas cada uno de los tres inductores y las columnas serán los recipientes.

No obstante, dependiendo de cómo sea la colocación de los recipientes y, como consecuencia, esta matriz de alcance, los inductores pueden no ser capaces de calentar los recipientes con la asignación estática, incluso aunque estos sean tres o menos. Por ejemplo si dos recipientes pueden ser calentados únicamente por un inductor. En la Figura 6 se aprecia como los dos recipientes, de color azul, solo están comprendidos por completo dentro del área de alcance del inductor superior.

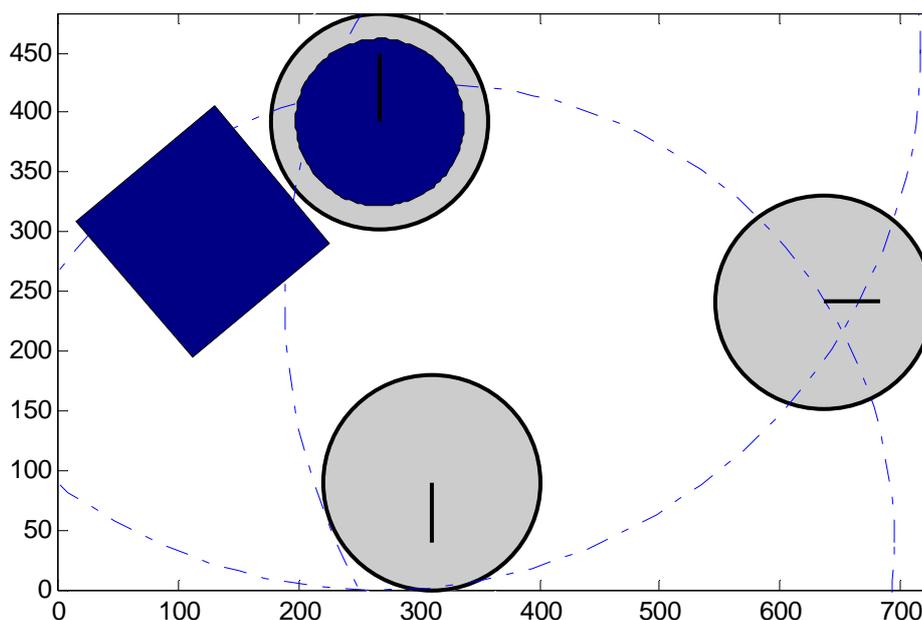


Figura 6. Alcance exclusivo de dos recipientes por un inductor

Por ello, hay que verificar que la situación actual puede ser cubierta con asignación estática, o en caso contrario pasar al caso en el que las asignaciones son variables en el tiempo.

Para que la asignación pueda ser estática, la solución final debe cumplir la siguiente condición [5]:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, m$$

con $x_{ij} \in \{1, 0\} \quad i = 1, \dots, m, \quad j = 1, \dots, n$

donde x_{ij} son los componentes de la matriz solución que indica la asignación de inductores a recipientes, m es el número de inductores y n es el número de recipientes.

La situación expuesta matemáticamente corresponde con los términos que se multiplican para hallar el determinante en una matriz 3x3:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Como consecuencia, la comprobación de situación con asignación estática es la suma no nula de todos los términos que constituyen el determinante de la matriz de alcance.

En el caso de no colocar tres recipientes, no habría una matriz de alcance 3x3. Para evitar este inconveniente, se colocan en esta matriz columnas de unos hasta completar el tamaño deseado, simulando la colocación de recipientes imaginarios que puedan ser calentados por cualquier inductor y, de esta forma, poder trabajar con la matriz de alcance de la misma forma que se ha mencionado y en las mismas condiciones que se presentan en la realidad.

2.4 Criterios de coste propuestos

Para realizar la evaluación del coste de asignación, es decir, el coste que presenta el calentamiento de un recipiente determinado con un inductor determinado, inicialmente se proponen varios criterios y posteriormente se decidirá cuál es el mejor, en base a una serie de parámetros analizados mediante una simulación.

Los tres criterios propuestos son:

1. Mínima distancia entre el recipiente y la posición del inductor.
2. Mínima distancia entre el recipiente y la posición del anclaje base del inductor.
3. Mínima área disponible que tiene el área alcanzable de un inductor.

En todos los criterios, si un recipiente no es alcanzable presenta un coste infinito, de tal forma que no pueda ser elegido como solución. También hay que tener en cuenta que se debe valorar positivamente si un recipiente puede ser calentado con el inductor pequeño porque este hecho conlleva una mejora de algunas prestaciones, como es la eficiencia de la cocina. Para que esta asignación tenga preferencia, se descarta el coste calculado para este recipiente

según el criterio correspondiente. Es decir, que un recipiente que se pueda calentar con el inductor pequeño, tendrá un coste muy reducido y su asignación será preferente con el inductor que pueda cubrirlo con el aro interior.

El cálculo final del coste será directamente proporcional tanto a la distancia como al área disponible calculada. Los dos primeros criterios son fáciles de entender, así como de implementarlos en el simulador, en ellos se premiará con un coste menor a los recipientes con distancias más cortas. Sin embargo el tercer criterio es más complejo y requiere de una breve explicación.

Para este tercer criterio, se hace un símil entre el área que un inductor tiene libre y la probabilidad de que el usuario coloque un recipiente que pueda ser cubierto por este inductor. Por lo tanto, se dará preferencia de asignación de un recipiente al inductor con menor área disponible, lo que supone una reducción de las probabilidades de colocación de otro recipiente que tenga que cubrir ese inductor y, finalmente, esto se traduce en la disminución de posibilidades de que el inductor se vuelva a mover.

Para calcular el área disponible, se crea una imagen del área de alcance del inductor (Figura 7a) y otra donde se indica qué lugares están ocupados por los recipientes (Figura 7b). Con estas dos imágenes y mediante herramientas de procesamiento de imágenes [6], erosión y dilatación, se marcan como espacios ocupados lugares en los que no cabría el mínimo recipiente posible dentro del área alcanzable de cada inductor (Figura 7c). Recordar que el mínimo recipiente es una cafetera de 8 cm de diámetro. De esta forma se obtiene el área en la cual se puede colocar algún recipiente y que este sea cubierto por un inductor determinado.

Es de destacar que para disminuir el tiempo de procesamiento de estas operaciones se ha realizado una reducción y posterior ampliación de la resolución de las imágenes, mediante otra herramienta de procesamiento de imágenes que reduce una imagen al tamaño deseado y posteriormente la amplía al tamaño original.

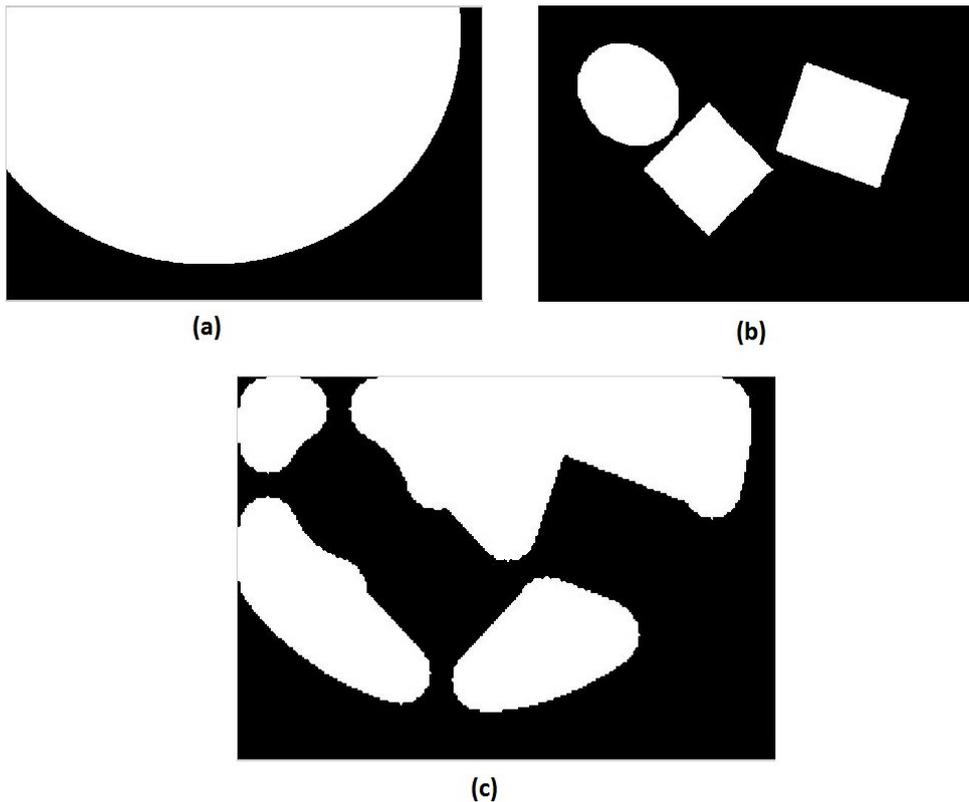


Figura 7. Ejemplo de cálculo del criterio de área: (a) Área de alcance del inductor, (b) Imagen de los recipientes colocados, (c) Espacio en el que se puede colocar el mínimo recipiente y que sea cubierto por ese inductor.

Una de las finalidades del algoritmo es reducir el número de movimientos. Por ello, cuando la configuración de recipientes cambie en un momento posterior, es decir, se incorpore o se quite un recipiente, el criterio intenta mantener la asignación de los inductores a los recipientes ya existentes si no han variado su posición y, con ello evitar el desplazamiento de los inductores, siempre que sea posible. No obstante, como comprobación, también se evalúa otro criterio de área en el que no se imponga esta restricción de mantener la asignación, como se observa en la Tabla 3.

Para determinar qué criterio resulta mejor en la evaluación del coste de asignación, se va a realizar una simulación con una base de datos de recipientes para estudiar el comportamiento de los inductores mediante unos parámetros elegidos. Este proceso de evaluación se expondrá en el apartado 2.6.

Además de estos tres criterios, también se proponen para evaluación otros criterios que serán combinaciones de los tres criterios básicos mencionados, mediante ponderaciones de estos. Todos los criterios evaluados se muestran en la Tabla 3:

Área libre	80% distancia anclaje - 20% área
Área libre, sin mantener asignación	60% distancia anclaje - 40% área
Distancia inductor - recipiente	40% distancia anclaje - 60% área
Distancia anclaje inductor - recipiente	20% distancia anclaje - 80% área
80% distancia - 20% área	80% distancia anclaje - 20% distancia
60% distancia - 40% área	60% distancia anclaje - 40% distancia
40% distancia - 60% área	40% distancia anclaje - 60% distancia
20% distancia - 80% área	20% distancia anclaje - 80% distancia

Tabla 3. Criterios de asignación estática evaluados

2.5 Cálculo de la posición final de los inductores

Supuesto un criterio cualquiera, inicialmente el inductor se coloca en el centro del recipiente, lugar donde mejor calienta al mismo. Esta colocación puede conllevar problemas físicos y/o térmicos, como por ejemplo colisiones o malas coberturas, que deben solucionarse. A continuación se exponen los problemas y la solución final llevada a cabo.

2.5.1 Coberturas de calentamiento

Evitar las colisiones de los inductores con el resto de elementos físicos es algo imprescindible. Sin embargo, puede conllevar un excesivo descentramiento del inductor respecto del recipiente y no conseguir calentarlo correctamente.

Como se ha comentado en el apartado 1.2, se sabe que un recipiente circular de 21 cm. de diámetro puede ser calentado por un inductor de 18 cm. colocándose en el centro. En base a esta situación se decide si un recipiente circular puede ser calentado correctamente mediante cobertura estática dada una posición del inductor.

Para los recipientes cuadrados, rectangulares y elípticos, el parámetro de corte que se ha utilizado es la cobertura de calentamiento, es decir, la intersección entre el recipiente y el inductor relativa al área del recipiente. El umbral implementado en este caso ha sido en base a una estimación visual, teniendo en cuenta el área extra que los inductores pueden llegar a calentar según el estudio realizado en círculos. Además, los recipientes rectangulares no tienen las aristas vivas, sino que presentan un redondeo en los vértices, situación que ayuda al calentamiento uniforme del mismo. Teniendo en cuenta estas situaciones, las coberturas mínimas de calentamiento en elipses es del 90% y en rectángulos y cuadrados es del 85%.

Por ello, en cuanto un recipiente no puede ser cubierto correctamente, se desecha la idea de calentarse en esa situación y se aborda otra alternativa que se expondrá como solución genérica al final del apartado 2.5.4.

2.5.2 Cobertura del inductor

Debido a un deficiente acoplamiento magnético y a cuestiones de seguridad, no es posible calentar un objeto que no cubra más de un cierto porcentaje del inductor. El motivo de seguridad es evitar el calentamiento de cubiertos u objetos indeseados que se coloquen en la cocina. Este porcentaje mínimo de cobertura es del 33% en el inductor grande y del 30% en el inductor de 12 cm. de diámetro.

Este hecho repercute en el mínimo recipiente que se puede calentar con el inductor grande y, como consecuencia, qué recipientes solo son posibles de calentar con el inductor pequeño. Además, puede conllevar a la imposibilidad de calentar recipientes demasiado pequeños situados cerca de los laterales de la cocina, debido a que el inductor pequeño no pueda centrarse con el recipiente porque de lo contrario colisionaría con los laterales (Figura 8).

En caso de que un inductor sea incapaz de calentar un recipiente pequeño con el aro interior debido al límite alcanzable, éste será asignado a otro inductor. En caso de que el problema venga derivado de colisiones con los laterales de la cocina, este recipiente no puede ser calentado de ninguna forma. Esta es una de las limitaciones que presenta el prototipo.

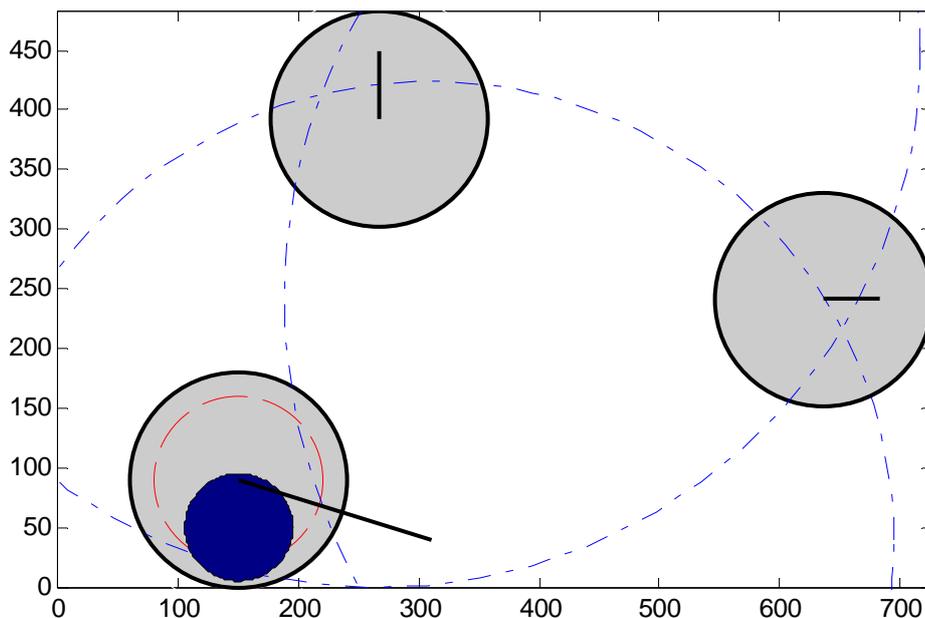


Figura 8. Demostración de recipiente imposible de calentar

2.5.3 Solapamiento de un inductor a dos recipientes

La tecnología de inducción se basa en la generación de un campo magnético por parte de un componente y su recepción por parte de otro cuerpo. Sin embargo este campo magnético debe de cerrarse en el cuerpo receptor y para ello necesita una cobertura mínima entre ambos cuerpos.

Este hecho repercute en situaciones donde un inductor calienta un recipiente y a su vez tenga un pequeño solapamiento con otro recipiente cercano (Figura 9).

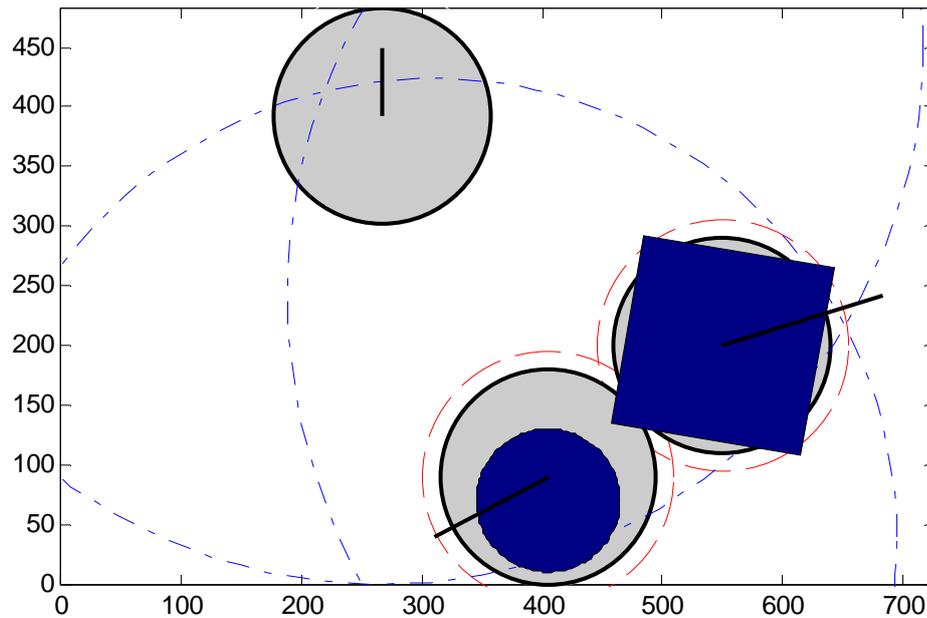


Figura 9. Recipiente solapado por dos inductores

Si se tratase de una tecnología de calentamiento mediante resistencias, la esquina inferior izquierda del recipiente cuadrado se vería sobrecalentada y habría problemas de temperatura en esa zona. Sin embargo, con la tecnología de inducción esta situación no presenta ningún inconveniente porque el campo magnético en este recipiente no llega a cerrarse y por lo tanto no recibe potencia del inductor inferior.

2.5.4 Colisiones

Para abordar el problema, este se ha dividido en tres tipos de colisiones:

2.5.4.1 *Colisión de inductores con los laterales de la cocina o límites articulares del brazo del inductor*

La colocación de recipientes cerca de los laterales de la cocina o del límite articular del brazo del inductor que será asignado, puede acarrear colisiones con los bordes de la cocina o configuraciones del brazo no posibles. Inicialmente al inductor se le asigna el centro del recipiente, posición que puede llevar a sobrepasar los límites físicos de la cocina (Figura 10a).

Para solucionar este problema, posteriormente se calcula la posición del inductor en el punto más cercano que cumpla los límites físicos comentados, minimizando de esta forma su descentramiento y consiguiente reducción de cobertura de calentamiento entre inductor y recipiente (Figura 10b). Este punto final se determina de forma analítica y por ello el tiempo de computación es ínfimo. En el caso de colisiones con los laterales el punto más cercano es aquel que se encuentre en la línea perpendicular y a una distancia igual al radio del inductor respecto del lateral. En caso del límite alcanzable por el inductor, el punto más cerca es el que esté en la línea que une el centro del inductor con su anclaje y a una distancia igual al radio de alcance del brazo.

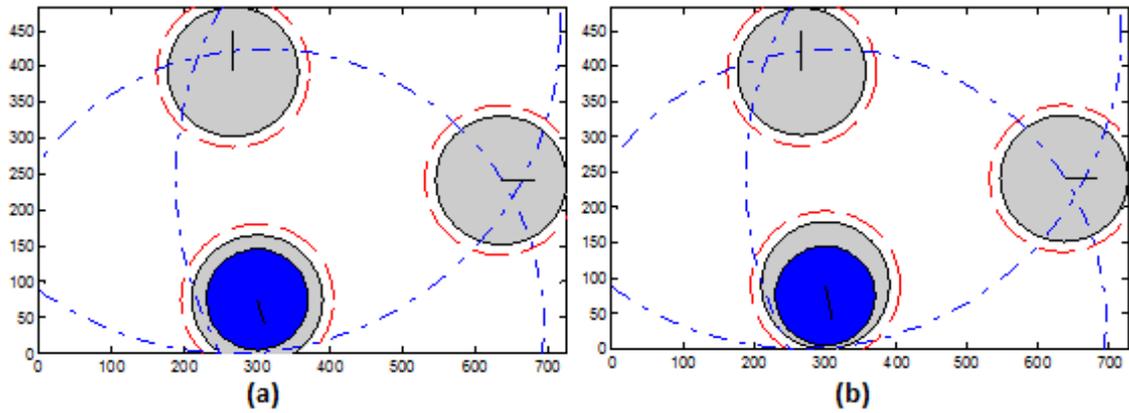


Figura 10. Representación del choque de inductores con los laterales: (a) Situación previa colocando el inductor en el centro del recipiente; (b) Situación solucionada

2.5.4.2 Colisión de dos inductores, de los cuales uno no está calentando ningún recipiente

El momento en que un inductor no tiene recipientes que cubrir, este permanece en su última posición asignada. Este hecho puede conllevar colisiones entre este inductor y otro que haya sido asignado a un recipiente cercano (Figura 11a), un suceso que, al igual que en el caso anterior, hay que tener en cuenta para calcular una posición válida físicamente.

Lógicamente, el inductor a mover será el que se encuentre inactivo. Esta solución se computa también analíticamente, encontrando el punto más cercano al inductor que evite la colisión (Figura 11b). Este punto solución es aquel que se encuentre en la recta que une ambos inductores y a una distancia igual al diámetro del inductor respecto del inductor activo.

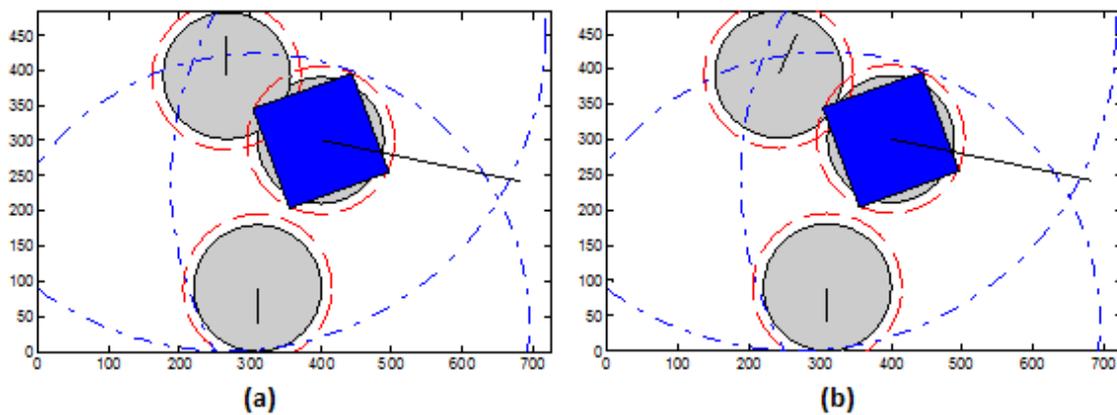


Figura 11. Choque entre inductores, con uno de ellos sin calentar ningún recipiente: (a) Situación previa manteniendo los inductores en su lugar anterior; (b) Situación solucionada

Una de las situaciones que puede darse, es el caso de que un inductor que no esté calentando un recipiente y por ello se pueda colocar en cualquier lugar de su rango de actuación, no tenga espacio disponible debido al lugar que ocupan otros inductores (Figura 12).

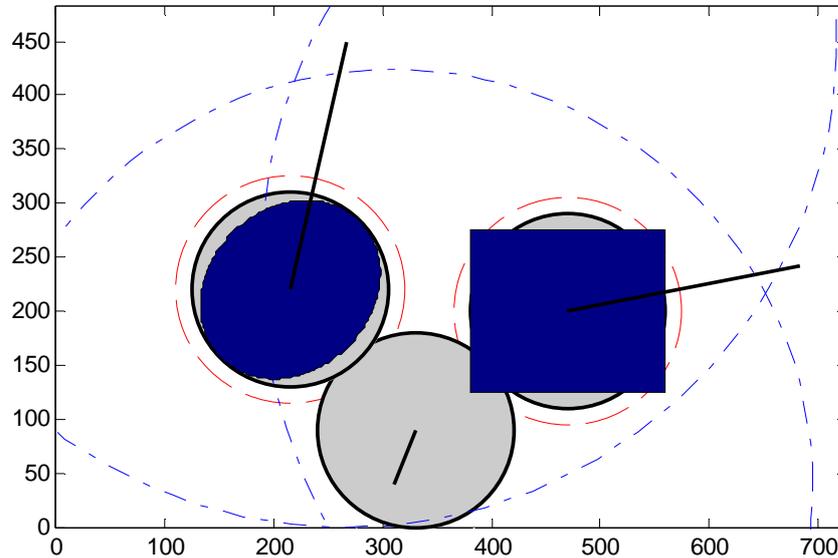


Figura 12. Inductor no asignado no tiene espacio libre

Para cerciorarse de la existencia de espacio disponible, primeramente se prueban tres posiciones prefijadas al límite de su rango articular y si no se obtiene un resultado positivo, se emplea la herramienta de procesamiento de imágenes de erosión con la que se comprueba si existe cualquier espacio posible donde colocar el inductor. El procesado de imágenes es costoso computacionalmente y por este motivo se realiza en primer lugar la comprobación analítica.

Tras estas comprobaciones y si el resultado es negativo, se prueban otras posibles soluciones alcanzables, variando la asignación entre recipientes e inductores. En el improbable caso de que no existan otras soluciones, se deben mover los inductores que están calentando otros recipientes según los criterios que se explican en el siguiente apartado. Si en la nueva posición de estos inductores la cobertura de calentamiento está por debajo del umbral establecido, la situación no se puede calentar con asignación estática.

2.5.4.3 Colisión entre dos inductores que están calentando recipientes

Cuando el usuario coloca dos recipientes cercanos, más pequeños que los inductores, puede existir una colisión entre los dos inductores que vayan a cubrirlos. Esta colisión es más difícil de solucionar que las anteriores, puesto que se trata de descentrar uno o los dos inductores lo mínimo posible, maximizando la cobertura de calentamiento dada a los dos recipientes. Para solucionar esta situación se han planteado dos alternativas.

1- Repulsiones iterativas

Se trata de un algoritmo que calcula movimientos iterativos de los inductores, según unas direcciones de repulsión, hasta solucionar la colisión. Estas direcciones de repulsión son calculadas en base a una serie de intereses, los cuales tienen una dirección y pesos determinados, que se expondrán a continuación, y la suma del producto de todas las direcciones normalizadas por su peso resulta la dirección final en la que el inductor ha de moverse.

Los intereses de movimiento de los inductores son: evitar la colisión con los laterales, evitar sobrepasar el límite alcanzable del brazo y evitar la colisión con otros inductores. El peso por el que van multiplicadas las direcciones, expresa el grado de interés que tiene el inductor en moverse hacia esa dirección y es calculado mediante una expresión cuadrática definida a trozos en función de la distancia donde se encuentra el inductor, la cual toma valor máximo 1 y mínimo 0. En la Figura 13 se observa la función y su representación gráfica, donde el eje x es la distancia en mm. que falta para salvar la colisión.

$$\text{Peso}(d) = \begin{cases} 0 & \text{si } d < 0 \\ -0,0346 \cdot d^2 + 0,3193 \cdot d + 0,3 & \text{si } 0 < d < 3,5 \\ 1 & \text{si } d > 3,5 \end{cases}$$

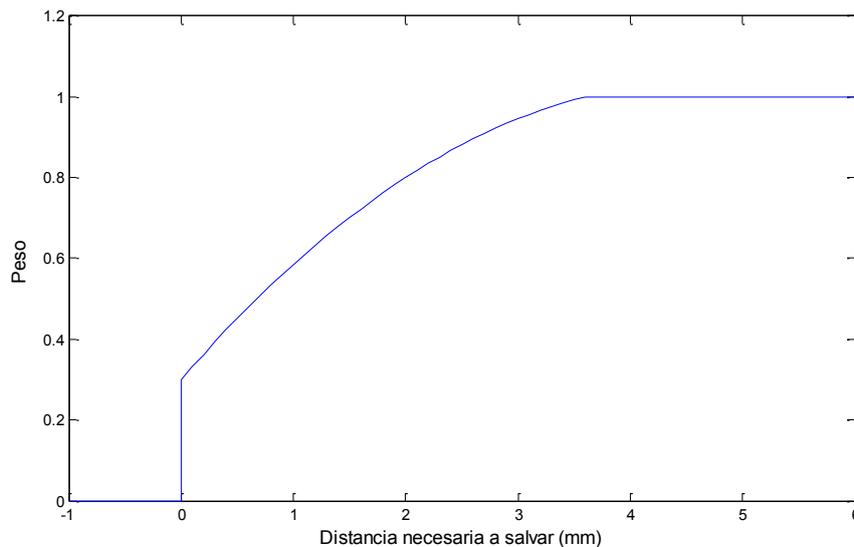


Figura 13. Representación de la función de cálculo del peso de las direcciones para evitar las colisiones

Además de estos intereses para que el inductor no quebrante los límites físicos, se ha añadido un cuarto interés que tiene peso constante de 0.5 y expresa la dirección de movimiento del inductor en la que mejor se descentra el recipiente del inductor. Esta dirección es a lo largo de su lado mayor. En caso de círculos y cuadrados no existe tal dirección, todas son iguales.

El paso de movimiento de los inductores también es variable en función de la mínima distancia a la que se encuentre el inductor de una limitación. Este paso puede variar entre 1, 2 o 3 mm por iteración, siendo éste la mitad de la distancia a la que se encuentra el inductor de la limitación.

2- Repulsión y deslizamiento

El método de repulsión y deslizamiento consiste en llevar una única dirección para salvar el problema, sin tener en cuenta las barreras o límites que existan y, al llegar a éstos, se debe desplazar por el borde del límite en la dirección que reduzca el problema (Figura 14).



Figura 14. Representación de la trayectoria virtual ambos métodos

Implementando este sistema en el problema que atañe a este trabajo, inicialmente el inductor sólo debe moverse en la dirección que evita la colisión, ponderada junto con la dirección de mejor descentrado. Al llegar a un límite lateral o articular, el inductor deberá moverse de forma horizontal, vertical o siguiendo la circunferencia del límite alcanzable, según corresponda.

Evaluando las dos soluciones planteadas, se ha elegido el método repulsión y deslizamiento, debido a la menor cantidad de problemas que ha conllevado su simulación. Con el método de repulsiones iterativas, debido a la mayor variedad de direcciones a ponderar, alguna vez los inductores realizaban movimientos repetitivos que no conducían a la solución final y por lo tanto no consiguen resolver la colisión y esa situación no es posible calentarla con asignación estática.

Otra de las razones que ha llevado a elegir este método para resolver las colisiones, es la mayor linealidad de la trayectoria virtual que sigue la simulación para llevar el inductor al punto final. Con este método, la trayectoria simulada seguida por el inductor en los límites es lineal, mientras que con el método de repulsiones la trayectoria tendría forma de dientes de sierra. Esto se traduce en una mejor solución y un menor tiempo de computación (Figura 14).

Al implementar este método, aunque en menos ocasiones que con el sistema de repulsiones iterativas, alguna vez los inductores también realizaban movimientos repetitivos que no llevaban a la solución del problema. Un ejemplo de esta situación se puede observar en la Figura 15, donde el inductor anclado en la parte superior, situado en la posición central, se encuentra en el borde articular y en contacto con dos inductores, este hecho le condiciona gravemente seleccionando en cada iteración una dirección distinta, por ello es preferible mover otros inductores. En estas situaciones, se desactiva la dirección que indica el mejor descentrado entre recipiente e inductor, dejando como única dirección a seguir la repulsión entre inductores. Cuando persiste esta situación, se dejar de mover el inductor conflictivo, prefiriendo mover otro inductor que evite esta situación.

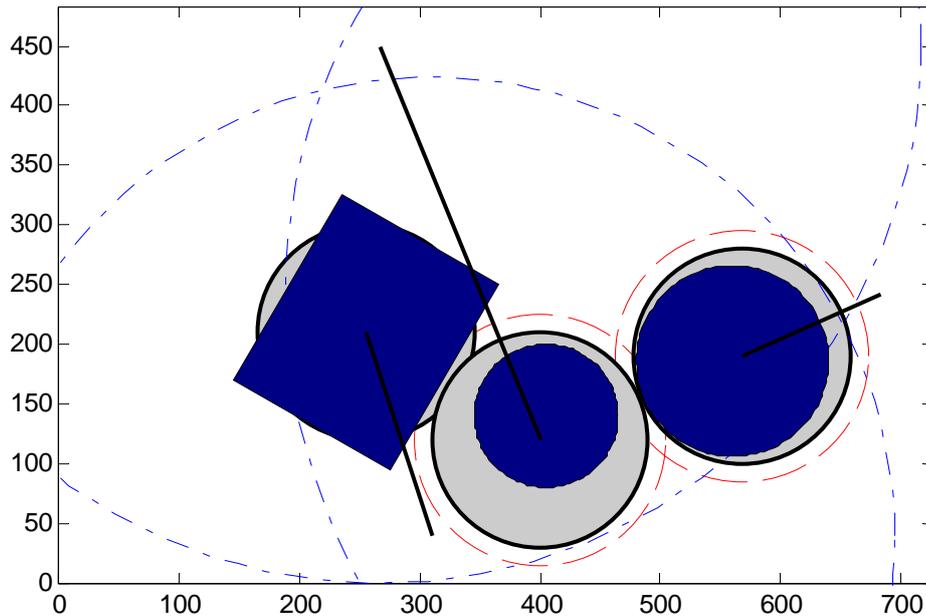


Figura 15. Situación de movimientos repetitivos que no conducen a la solución

Independientemente del método utilizado, hay que definir la preferencia de movimiento de los inductores para evitar la colisión y los parámetros a tener en cuenta. A continuación se exponen, en orden de preferencia, los factores utilizados:

1. Maximizar la suma de las coberturas de calentamiento entre los inductores y sus recipientes calentados.
2. Mantener el calentamiento de recipientes pequeños con el inductor pequeño.
3. En caso de que las coberturas de calentamiento sean del 100%, elegir el recipiente con menor área.

Todas estas condiciones se aplican siempre que la nueva posición del inductor cumpla con todas las condiciones anteriormente comentadas como son la cobertura mínima de calentamiento o la cobertura mínima de inducción.

2.6 Evaluación y selección de los criterios

Una vez expuestos todas las particularidades de la asignación, sólo falta decidir qué criterios son mejores para la asignación estática.

Para realizar esta selección, se simulan todos los criterios propuestos en las mismas condiciones y se recogen una serie de parámetros con los cuales se evaluará qué criterios son los mejores.

Para que la evaluación sea bajo las mismas condiciones, primeramente se ha creado una base de datos con 5000 casos de recipientes en la que se simularán los criterios. Estas situaciones tienen tres o menos recipientes y todos ellos tienen un tamaño adecuado para ser calentados estáticamente, con el fin de evaluar únicamente la asignación y cobertura estática. Además, cada situación es una adición o eliminación de un recipiente del caso anterior,

asemejándose a un caso real. La forma, posición y dimensiones de los recipientes son creadas aleatoriamente, cumpliendo las dimensiones de los recipientes comentadas anteriormente en el apartado 1.3.

Es de destacar, que aunque la base de datos contiene como máximo casos de tres recipientes, algunas de estas situaciones no es posible cubrirlas con una asignación estática debido a la imposibilidad de coexistir varios inductores calentado recipientes cercanos. Estos casos no serán evaluados pero sí se tendrán en cuenta para uno de los parámetros de elección que se muestran en el siguiente apartado.

2.6.1 Parámetros de simulación

Los parámetros elegidos para comparar los criterios son:

1. Número de movimientos que realizan los inductores.
El número de movimientos de los inductores equivale al número de veces que los motores deben encenderse para mover los brazos, lo que a su vez está relacionado con la vida de los componentes debido a la fatiga, además del pico de corriente que presentan los motores al comenzar el movimiento.
2. Distancia recorrida por los inductores.
La distancia recorrida por los inductores se traduce en un consumo de energía por parte de los motores. Aunque ésta puede ser despreciable frente a la potencia entregada en el calentamiento, cualquier reducción de movimiento alargará la vida de la cocina. La distancia calculada será una distancia lineal porque se desconoce el tipo de movimiento que realizarán los inductores. Sin embargo esta distancia euclídea puede ser un buen factor comparativo de la distancia real que realicen.
3. Porcentaje de suma de las coberturas de calentamiento entre inductores y recipientes respecto del máximo posible.
El interés máximo es el calentamiento de los recipientes y por ello la cobertura de calentamiento que reciben los recipientes debe ser la máxima posible.
4. Porcentaje de situaciones no posibles de cubrir con asignación estática.
Cuando una situación tiene que ser cubierta con la asignación dinámica, significa que los recipientes serán calentados, pero con una reducción de beneficios como son el tiempo de calentamiento y algún posible sobrecalentamiento por encima de la consigna. Por ello es interesante elegir un criterio que cubra el mayor número de casos posibles con asignación estática.
5. Porcentaje de recipientes calentados con el inductor pequeño.
Siempre es interesante que los recipientes que puedan ser cubiertos por el aro interior del inductor, debido a su reducido tamaño, se calienten con dicho inductor, porque esto supone una mayor eficiencia del calentamiento. Por ello es interesante elegir un criterio con el que se calienten más recipientes con el inductor pequeño.

2.6.2 Resultados de la simulación

Tras realizar la simulación en las condiciones que se han comentado, en este apartado se presentan los resultados obtenidos. Dado que no se aprecian grandes diferencias entre la mayoría de los criterios, a continuación se presentan las gráficas de los parámetros con los criterios más representativos. En el Anexo A se pueden encontrar las gráficas con todos los criterios representados.

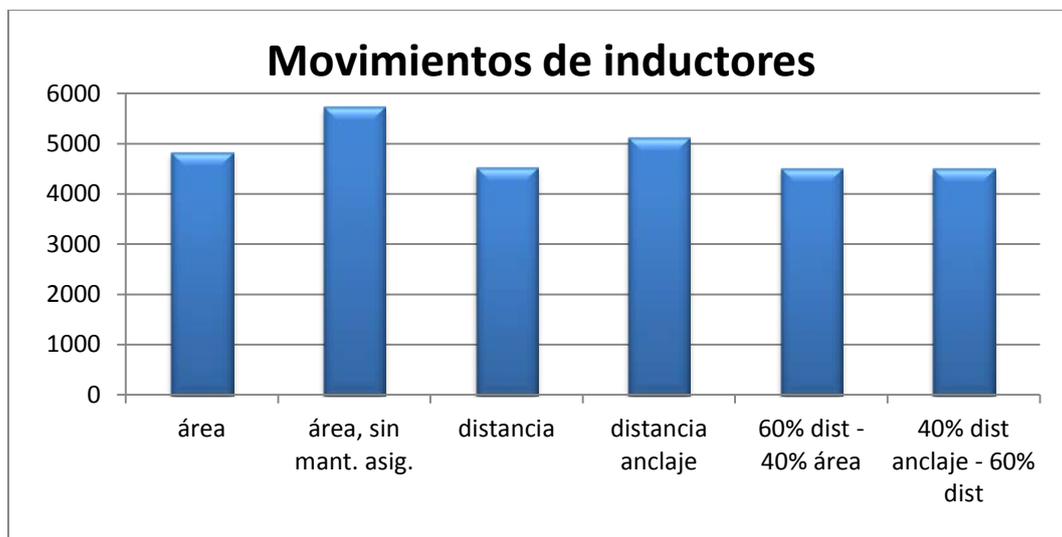


Figura 16. Evaluación de criterios según el parámetro de movimiento de inductores

Primeramente, se presenta en la Figura 16, el número de movimientos que realizan los tres inductores. Puede saltar a la vista que el número de movimientos sea inferior al número de situaciones simuladas, esto es debido a que los inductores no varían su posición cuando el recipiente que estaban calentando ya no existe.

Existen ligeras variaciones entre los criterios, la mayoría de los cuales presentan valores en torno a los 4500 movimientos. Lo más destacado es la diferencia entre el mínimo (criterio de distancia) y el máximo (criterio de área sin mantener asignación) que llega al 27%.

En cuanto a la distancia que recorren estos inductores (Figura 17) presenta un comportamiento similar al del movimiento. Lo más destacado de nuevo es la diferencia del 50% entre los mismos criterios, denotando claramente que el criterio de área sin mantener la asignación no es buena opción, y que el criterio de distancia parece destacar ligeramente sobre el resto.

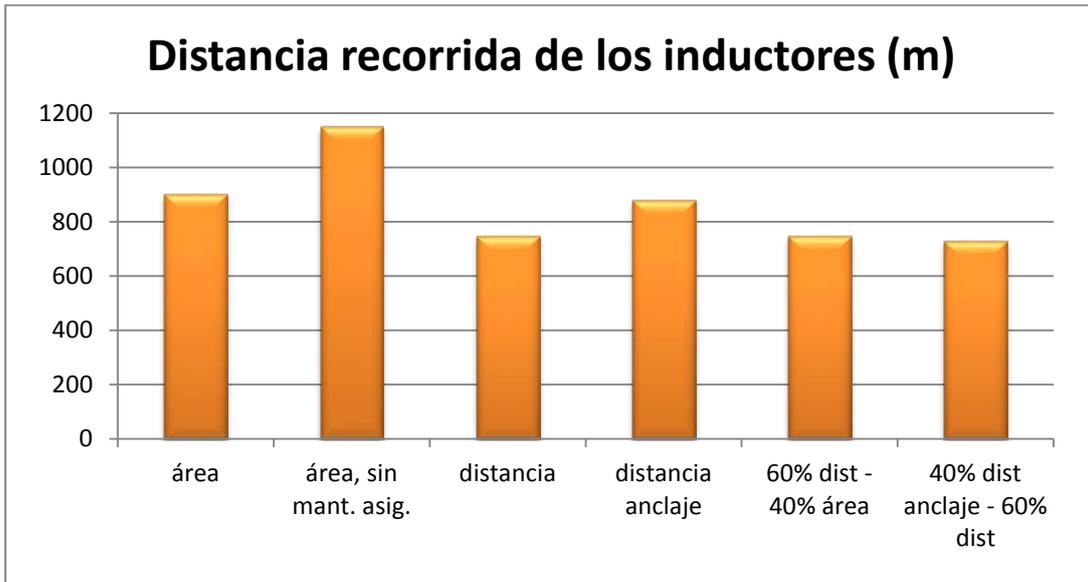


Figura 17. Evaluación de criterios según el parámetro de distancia recorrida de inductores

En cuanto al parámetro de la cobertura (Figura 18), a priori el más importante porque refleja la finalidad de la cocina, que es el calentamiento de recipientes, prácticamente no se aprecian diferencias en la evaluación de los criterios, apenas existe un 0,1% de diferencia entre el máximo y el mínimo, por lo tanto este parámetro tendrá poca consideración a la hora de valorar los criterios.

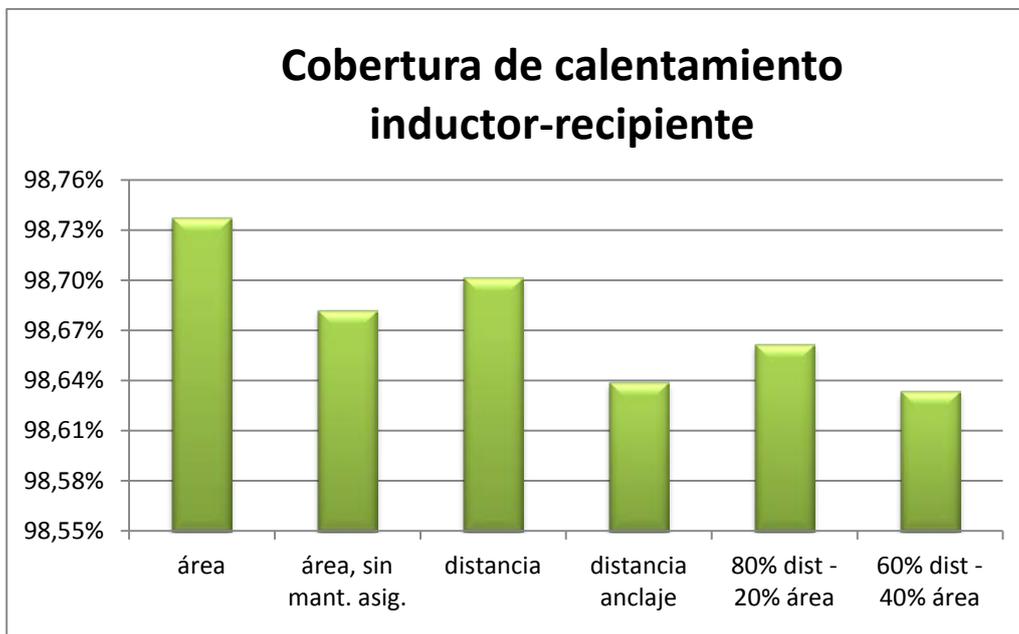


Figura 18. Evaluación de criterios según el parámetro de cobertura de calentamiento

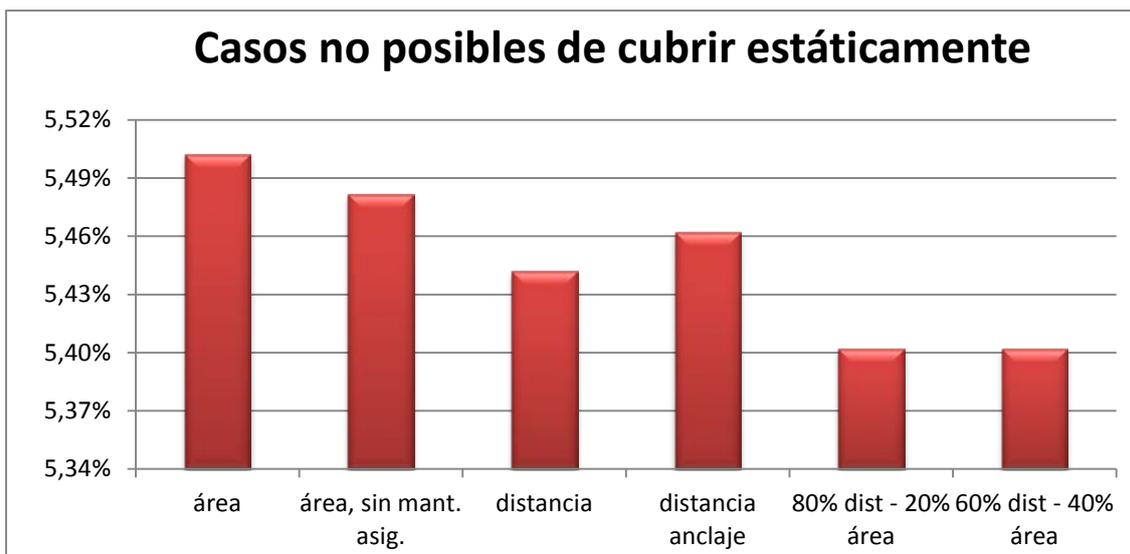


Figura 19. Evaluación de criterios según el parámetro de asignación estática

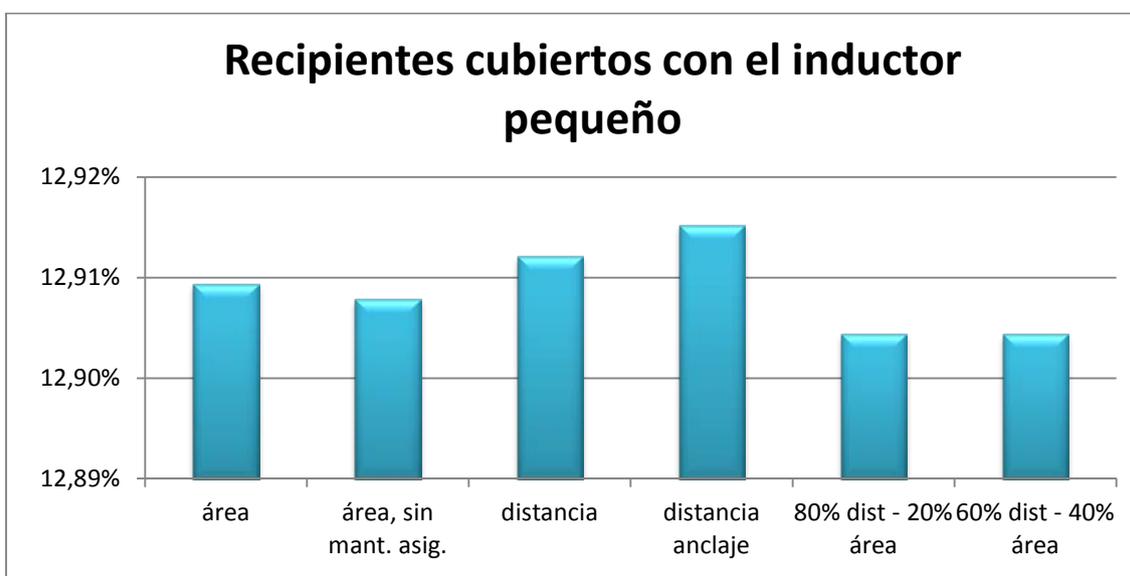


Figura 20. Evaluación de criterios según del parámetro de inductores pequeños

En cuanto a los dos criterios restantes (Figura 19 y Figura 20) también se observa que presentan unas diferencias muy reducidas entre los criterios, más acentuada aún en el caso del parámetro de los inductores pequeños, con solo un 0,02% de amplitud de valores. Por ello, ambos parámetros son prácticamente despreciables.

Teniendo en cuenta los valores de los dos primeros parámetros (movimientos y distancia), el criterio de distancia presenta el mejor comportamiento, similar al de algunos criterios ponderados. En cuanto a los otros tres parámetros restantes (cobertura, casos no posibles estáticamente e inductores pequeños), los cuales se han considerado de poca importancia por tener poca amplitud de valores, el criterio de distancia presenta buenos datos, aunque en algunos casos es superado por otros criterios ponderados. También cabe destacar que el criterio de distancia tiene un coste computacional bajo, al contrario que ocurre con el criterio de área, en el cual hay que procesar imágenes.

2. Asignación estática y cobertura estática

En líneas generales, se puede decir que la implementación de un criterio u otro no hace decisiva la respuesta de los inductores ante diversas situaciones de recipientes, como se ha observado en el comportamiento de los parámetros evaluados. Finalmente, debido a la reducción de movimientos y de coste computacional que presenta, se ha decidido elegir el criterio de distancia como el más adecuado para continuar con el problema de la asignación estática.

Hasta ahora se han abordado las situaciones donde los recipientes se pueden calentar mediante asignación y cobertura estática, es decir, manteniendo una posición fija de los inductores y permanente en el tiempo. Para ello se ha propuesto una serie de criterios de coste de asignación de inductores a los recipientes y posteriormente se ha elegido el mejor criterio en base a una simulación realizada con una base de datos de recipientes. También se han resuelto los problemas relativos al posicionamiento final de los inductores cuando existen limitaciones físicas y/o térmicas y como consecuencia de ello los inductores no pueden colocarse en el centro del recipiente.

3. Asignación dinámica y cobertura estática

3.1 Objetivo

En este capítulo se aborda el problema de la asignación dinámica, donde los inductores deberán cambiar su asignación en el tiempo para poder calentar todos los recipientes. Para ello se parte del criterio de asignación elegido en la sección anterior, criterio de distancia, y se le incorporan costes relativos a otros parámetros considerados, para que los inductores cambien su asignación en el momento adecuado. Para poder valorar adecuadamente los diferentes costes, todos ellos se normalizarán e irán multiplicados por un peso de coste, el cual será parametrizado y posteriormente simulado, con el fin de obtener un cálculo del coste de asignación que optimice el tiempo de calentamiento y el error cometido para cualquier situación con cobertura estática, tanto asignación dinámica como estática.

El objetivo final de esta sección es generar un algoritmo que sea capaz de realizar el calentamiento de situaciones generales con hasta seis recipientes con cobertura estática, es decir que los recipientes se puedan calentar manteniendo el inductor en una posición fija. Para ello se realizará una simulación con el fin de valorar los criterios de coste propuestos, poder arrojar datos acerca del funcionamiento de esta cocina con inductores móviles y valorar su viabilidad frente a las cocinas convencionales, refiriéndose únicamente a recipientes calentados mediante cobertura estática.

3.2 Estrategia de asignación

Se ha partido del algoritmo creado en la sección anterior para la asignación estática, al que se le han modificado algunas cosas. Primeramente, la función de asignación se modifica puesto que varía el número de recipientes posibles, las dimensiones de la matriz de alcance y, como consecuencia, también la forma de verificarla. Otra modificación sustancial que se ha hecho es el cálculo del coste de asignación, donde se han tenido que introducir nuevos parámetros que hacen variar el coste. A continuación se detallan estas modificaciones.

3.2.1 Verificación de las posibilidades de asignación

Primeramente se construye la matriz de alcance con el mismo método empleado para la asignación estática, obteniéndose una matriz $3 \times n$, donde n es el número de recipientes, que varía desde uno hasta seis. Esta matriz no tiene las mismas dimensiones que la utilizada en la sección anterior, por lo tanto hay que modificar su forma de verificación. Dada la gran diversidad de situaciones que pueden darse, se pueden quedar recipientes sin cubrir o inductores sin asignar, no hay un método general para obtener una solución y hay que tener en cuenta todas las posibilidades que puedan darse. Así, la matriz de alcance es comparada con todas las asignaciones posibles en función del número de recipientes, priorizando la elección de soluciones con mayor número de recipientes cubiertos. Posteriormente, de estas posibles soluciones se escoge la que menor coste posea según la matriz de coste, que se explica en el siguiente apartado 3.2.2.

Es de destacar que algunos recipientes, aunque sean alcanzables por los inductores, puede ser incompatible calentarlos a la vez debido a las colisiones entre inductores, comentadas en el apartado 2.5. Cuando ocurren estas situaciones el algoritmo elimina, de las asignaciones incompatibles, la de mayor coste y se vuelve a calcular la solución óptima con la nueva matriz de alcance modificada.

3.2.2 Cálculo del coste de asignación

Como se ha comentado en el apartado 2.6, la elección de un criterio de coste u otro no resulta determinante para la asignación y la mayoría de los criterios presentan un comportamiento similar. Por ello se va a evaluar la asignación dinámica únicamente con un criterio de coste, al cual se le van a incorporar una serie de costes que a continuación se explicarán, para llegar a obtener un resultado óptimo. Estos costes tienen magnitudes muy variadas y por ello deben ser normalizados para poder controlar la influencia que tiene cada coste en la matriz de coste final.

1. Diferencia cuadrática entre potencia real y potencia consignada. Se calcula como la diferencia entre la potencia media del recipiente y la potencia consignada, elevada al cuadrado para aumentar el contraste de costes si la diferencia de potencia es elevada. Este coste favorece la asignación de un inductor a un recipiente cuya potencia actual difiere considerablemente de su potencia consignada y viceversa, aumenta el coste a un recipiente que está calentado por encima de su consigna, reduciendo las posibilidades de que vuelva a ser calentado durante un tiempo. La normalización se ha realizado respecto de la máxima diferencia de potencia que pueda tener cada recipiente, que será la máxima potencia que se entregue a ese recipiente.

$$C_{pot}^{norm} = \frac{(\bar{p}_{recip} - p_{consig})^2}{p_{entregada}^{recip}{}^2}$$

donde:

$$p_{entregada}^{recip} = p_{consig} * mult_p ;$$

$$\bar{p}_{recip} = \sum_{i=1}^T \frac{p_i}{T}$$

$mult_p$ = múltiplo de la potencia consignada entregada a los recipientes, es un parámetro que se explicará en el apartado 3.3.2.

2. Tiempo que un inductor tarda en volver a cubrir el recipiente que tiene asignado después de ir a calentar otro recipiente. En este tiempo está incluido tanto el tiempo de desplazamiento como el tiempo de calentamiento del otro recipiente. En caso de haber varios recipientes alcanzables por el inductor, será escogido el recipiente con menor coste, de tal forma que sea el siguiente recipiente en ser cubierto. Este coste sólo influye en los recipientes e inductores asignados en el momento del cálculo. La normalización se ha realizado respecto del mayor tiempo calculado para un recipiente alcanzable por el inductor (Figura 21).

$$C_{tiemp}^{norm} = \frac{t_j^{cal} + 2t_j^{trayect}}{\max\{t_i^{cal} + 2t_i^{trayect}\}} \mid MC_j = \min\{MC_i\}$$

siendo: $i \in \{1, \dots, n\}$ el conjunto de recipientes restantes alcanzables por el inductor

MC = matriz de coste para ese inductor

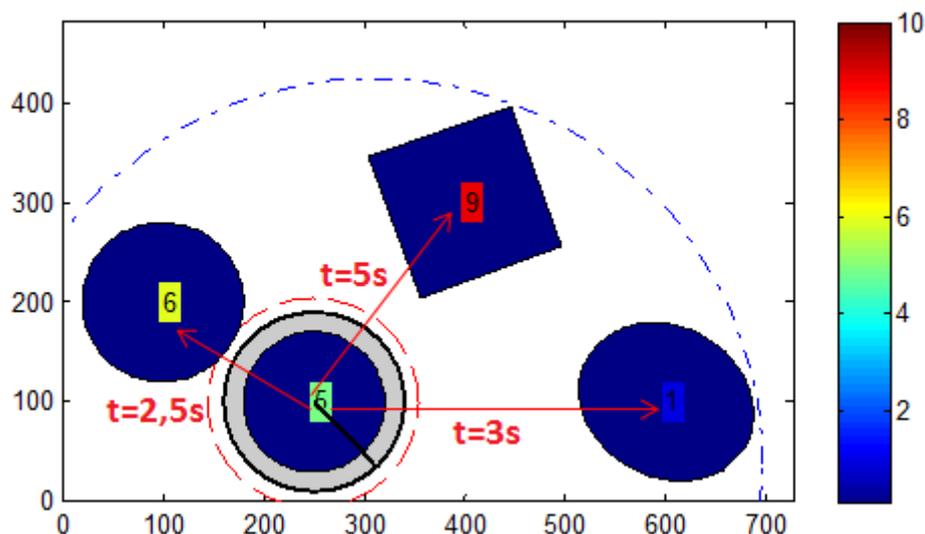


Figura 21. Ejemplo visual de la determinación del tiempo en volver a calentar un recipiente

Además de estos nuevos costes, se recuerda que en el criterio de distancia también se encuentran los siguientes costes:

3. Distancia entre el inductor y el recipiente. Distancia entre la posición actual del inductor y el centro del recipiente. Una distancia larga favorece que el inductor se mantenga asignado al recipiente donde se encuentra. La normalización se ha realizado con la máxima distancia que puede recorrer cada inductor, según permita el límite articular del brazo y los laterales de la cocina.
4. Recipiente alcanzable por el inductor pequeño. Los recipientes que es posible calentar con el inductor pequeño tienen un beneficio en su coste, para que sean cubiertos únicamente por los inductores que puedan calentarlo con el aro interior. Este coste ya está normalizado, únicamente comprende los valores 0 y 1.

Para controlar la influencia de cada coste, cada uno será multiplicado por un peso. Entre todas las posibilidades se seleccionan, mediante una simulación con una base de datos, los pesos que optimizan el algoritmo.

De la misma forma que se ha realizado en la asignación estática, la matriz de coste se emplea para elegir la mejor solución de asignación, dentro de las posibilidades existentes, en base a los parámetros impuestos. La solución de asignación final será aquella que minimice la suma de los costes de asignación de los recipientes, priorizando las soluciones que más número de recipientes calienten.

De los cuatro parámetros que influyen en la matriz de coste, tres de ellos son fijos en el tiempo dada una asignación, pero el coste de la diferencia de potencia es variable en el tiempo. Como consecuencia, la matriz de coste es dinámica y por ello el algoritmo está continuamente evaluando cual es la mejor asignación posible. Cuando existe una solución con un coste inferior al de la solución actual, se asigna esta nueva solución y los inductores se mueven a la nueva posición para calentar otros recipientes. Por ello, la solución de asignación no es fija y varía en el tiempo, dando nombre a estas situaciones: asignación dinámica.

Es de destacar que es necesaria la introducción de una histéresis en el coste, porque de lo contrario la asignación podría cambiar constantemente. Esta histéresis se consigue mediante dos de los costes propuestos. El coste de tiempo sólo influye en las asignaciones que se encuentran en la solución; por lo tanto en cada nueva solución, la asignación anterior pierde la influencia del coste y la recibe la nueva asignación, generando una histéresis. De forma similar ocurre con el criterio de distancia de forma automática; la asignación antigua gana un coste derivado del aumento de distancia con el inductor, respecto de la situación anterior, y la nueva asignación ve reducido su coste porque la distancia que anteriormente tenía con el inductor ya no existe.

3.3 Forma de calentamiento

3.3.1 Selección del objetivo de referencia en el calentamiento

El objetivo principal de una cocina es calentar los recipientes a una potencia consignada por el usuario, por lo tanto, se ha decidido tomar como parámetro objetivo de calentamiento la potencia media que reciben los recipientes a lo largo del tiempo que el usuario quiere estar calentando los recipientes. Por ello, una situación de recipientes se considerará como calentada cuando todos los recipientes tengan una potencia media igual o superior a la potencia consignada. Posteriormente y hasta que el usuario decida dejar de calentar los recipientes, los inductores únicamente tendrán que mantener esa potencia media cercana a la consignada.

También se ha considerado la posibilidad de utilizar como objetivo de calentamiento la temperatura que alcanzan los recipientes, pero finalmente se desestimó esta posibilidad por varios motivos. Primeramente la tecnología para la medición de la temperatura de los recipientes aún no está disponible y las estimaciones que obtenemos presentan algunos márgenes de error. Por otra parte, los modelos térmicos de transferencia de calor son complejos y su estudio y programación resultaría una tarea que excedería los límites de este trabajo. Además, gran parte de estos modelos térmicos utilizan como base para sus cálculos la potencia media que presenta el recipiente, por lo que el empleo de la potencia media como objetivo es una buena aproximación de la situación térmica.

3.3.2 Potencia entregada por los inductores

En este trabajo se está realizando la simulación de un prototipo básico con algunos parámetros y características aún por determinar, como la potencia máxima que pueden dar los inductores y la máxima potencia consignada por el usuario. Por ello, en base a los datos recogidos en la empresa BSH se han propuesto ambas potencias con valores de 3.600W y 2.000W, respectivamente.

A parte de estas potencias propuestas, otro de los factores que influyen en la eficacia del calentamiento y que además debe ser una de las respuestas que el algoritmo debe devolver, es la potencia que van a dar los inductores a los recipientes durante el calentamiento. Existen diversas posibilidades, desde dar únicamente la potencia consignada

por el usuario hasta dar la potencia máxima que puede ofrecer la cocina. Para resolver este conflicto, se va a realizar un barrido paramétrico de la potencia que entregan los inductores, junto con los parámetros de coste comentados en el apartado 3.2.2. Se han propuesto como soluciones cuatro estrategias, todas ellas bajo la limitación superior de la potencia máxima entregada (3.600W):

1. Dar el triple de la potencia consignada al recipiente.
2. Dar el cuádruple de la potencia consignada al recipiente.
3. Dar cinco veces la potencia consignada al recipiente.
4. Variable en función del número de recipientes: el doble para 4 o menos, triple para 5 y cuádruple para 6 recipientes.

Cabe mencionar que únicamente dar el doble de potencia para todos los casos de recipientes no es posible, puesto que si hay seis recipientes, aproximadamente cada inductor se debe encargar de calentar dos recipientes, lo que supone estar la mitad de tiempo en cada uno si se entrega únicamente el doble de potencia. Sin embargo también hay que tener en cuenta la pérdida de tiempo que se genera en los trayectos y que impide que esta situación pueda ser calentada satisfactoriamente. También se ha descartado como posible solución dar siempre la potencia máxima a cualquier recipiente, debido a que no se pueden permitir diferencias de potencia tan amplias, especialmente con los recipientes de consigna baja.

En algunos casos, en los que la solución permite calentar todos los recipientes, es decir, asignación estática, o en los casos en que un inductor sólo pueda calentar un recipiente, este inductor realizará un calentamiento óptimo de tal forma que en el menor tiempo posible haya llegado a la consigna del recipiente y posteriormente se mantiene en ella. Otro caso donde también se realiza este tipo de acciones, es cuando todos los recipientes que no están cubiertos por inductores ya están calentados por encima de su consigna, entonces el calentamiento de los recipientes asignados es el óptimo, en el menor tiempo posible, para igualar su potencia media a la consignada sin sobrepasarla.

Es de destacar que, con los datos de potencias propuestos, pueden darse ocasiones donde de ninguna forma se puedan calentar correctamente los recipientes, porque la potencia que requiere el usuario en los recipientes sea superior a la potencia que pueden dar los inductores. Estas situaciones ocurren cuando la suma de las potencias de algunos recipientes es superior a la suma de las potencias máximas entregadas por los inductores que pueden calentarlos. Incluso estas sumas de potencias no tienen por qué ser superiores, puede darse esta situación aun siendo inferiores, porque hay que recordar que el movimiento de los inductores reduce la eficacia del calentamiento total.

Hay que señalar que se realiza una simplificación en lo que respecta al movimiento de los inductores. Las trayectorias que llevan los inductores al realizar los desplazamientos son desconocidas y su implantación en esta simulación resultaría muy compleja, por ello la trayectoria de los inductores se simplifica por un movimiento lineal con velocidad constante.

3.4 Selección de parámetros óptimos y evaluación del algoritmo

Como se ha comentado en el apartado 3.2.2, los parámetros de coste junto con la potencia dada por los inductores van a ser simulados con diversos valores para poder determinar la combinación que optimice el algoritmo. Para ello, primeramente se ha realizado una pequeña simulación evaluando muchas combinaciones posibles dentro de un rango aceptable, con la finalidad de filtrar los parámetros que no llevan a una solución satisfactoria. Se ha considerado oportuno establecer un tiempo límite en que deben ser calentados los recipientes para considerarse una situación de recipientes calentada satisfactoriamente, el tiempo máximo establecido ha sido de un minuto y medio, en el cual todos los recipientes deben estar con una potencia media igual o superior a su consigna.

Una vez realizado este filtrado de posibilidades, cinco han sido las combinaciones que terminarán evaluándose con una base de datos de 1000 situaciones, que contienen entre uno y seis recipientes, Tabla 4. Es de destacar que en esta base de datos únicamente se han incluido casos de recipientes que, a priori, pueden ser calentados satisfactoriamente. Por ello se han eliminado algunas situaciones comentadas a lo largo de este trabajo que por motivos físicos y/o térmicos no pueden calentarse todos los recipientes, por ejemplo el caso de recipientes pequeños cercanos a los laterales de la cocina o recipientes con excesiva consigna de potencia.

Cabe mencionar que la diferencia entre los pesos de los costes tiene una justificación. En primer lugar el peso de la diferencia de potencia presenta valores elevados porque debe ser el coste principal a la hora de variar la asignación. El coste del alcance del inductor pequeño no presenta valores intermedios entre 0 y 1, por lo tanto su peso no puede tener un valor elevado porque descompensaría el coste total. En cuanto al reducido valor del peso de tiempo, la justificación se encuentra en la histéresis que produce. Como se ha comentado en el apartado 3.2.2, la histéresis de coste la produce tanto el tiempo como el coste de distancia, por lo tanto un elevado valor de coste del tiempo produciría una histéresis demasiado pronunciada.

Número de la combinación	Peso diferencia potencia	Peso distancia inductor- recipiente	Peso alcance por inductor pequeño	Peso tiempo en volver a calentar recipiente	Potencia entregada múltiplo de la consiga
1	15	1	0,2	0,05	Variable 2/3/4
2	15	1	0,2	0,1	4
3	20	1	0,2	0	4
4	20	1	0,2	0,05	4
5	20	1	0,2	0,1	4

Tabla 4. Combinaciones de pesos que han pasado el filtro y son evaluadas

Los resultados del filtrado de combinaciones se pueden consultar en Anexo B. El resultado de la evaluación de los parámetros mencionados en la Tabla 4 se presenta en las siguientes gráficas.

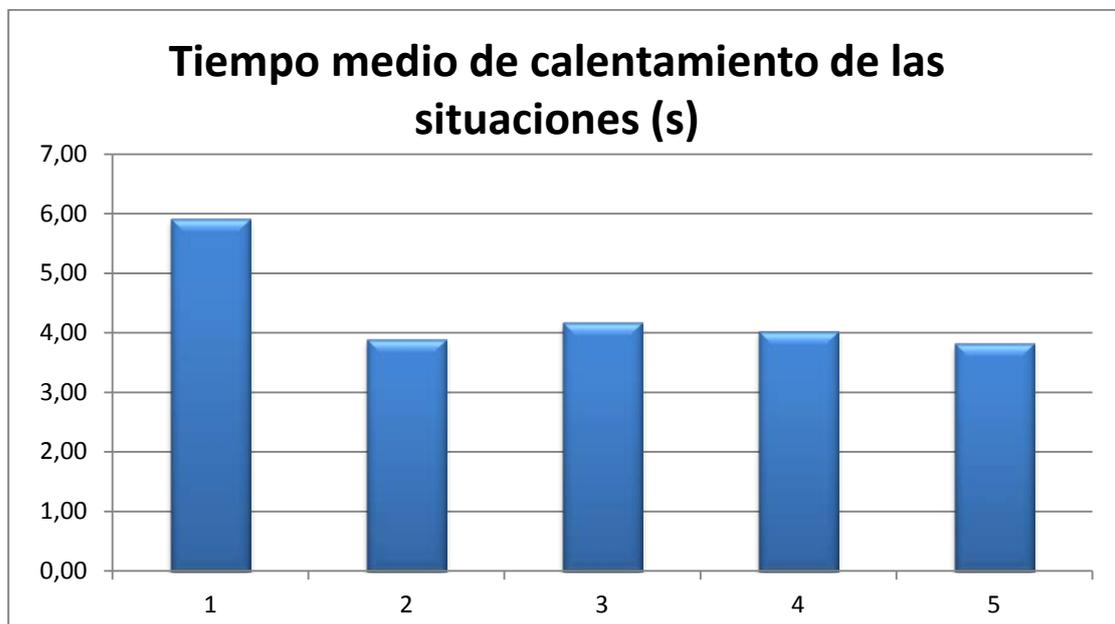


Figura 22. Tiempo medio de calentamiento de situaciones en asignación dinámica

En la Figura 22, se aprecia un tiempo de calentamiento medio similar en todos los casos, aproximadamente de 4 segundos, exceptuando la combinación 1 cuyo tiempo alcanza los 6 segundos, en los cuales se consigue una potencia media en los recipientes igual o superior a la consignada.

Sin embargo, este tiempo medio de calentamiento carece de valor real a la hora de evaluar la viabilidad de la cocina debido a la gran dispersión que tienen los valores recogidos. Con el fin de poder tener una idea de la dispersión de valores, se presenta la Figura 23 donde se representa el tiempo que tarda el algoritmo en calentar la peor situación de recipientes, siempre que esta haya sido considerada como un calentamiento aceptado encontrándose por debajo del minuto y medio. En el gráfico se observa amplia variación en los tiempos, destacando una diferencia de hasta 30 segundos entre el mayor y menor tiempo. Sin embargo, todos los tiempos indican que la diferencia respecto de la media obtenida en la Figura 22 es muy elevada, 60 segundos frente a 4.



Figura 23. Tiempo máximo de calentamiento de una situación en la asignación dinámica

Otro de los parámetros que se ha considerado para evaluar los pesos es el error de potencia medio que presentan los recipientes respecto de su consigna a lo largo del tiempo (Figura 24). Este error supera el 100% de la consigna en las cinco combinaciones, especialmente en las cuatro últimas. Estos resultados expresan que los recipientes presentan un error de potencia medio igual al de su consigna hasta que consiguen calentarse todos los recipientes. Aunque puede parecer que el 100% de error es excesivo, si se piensa en la forma de actuar que deben tener los inductores para calentar varios recipientes, el sobrecalentamiento es la única forma para llevar a cabo esta misión.

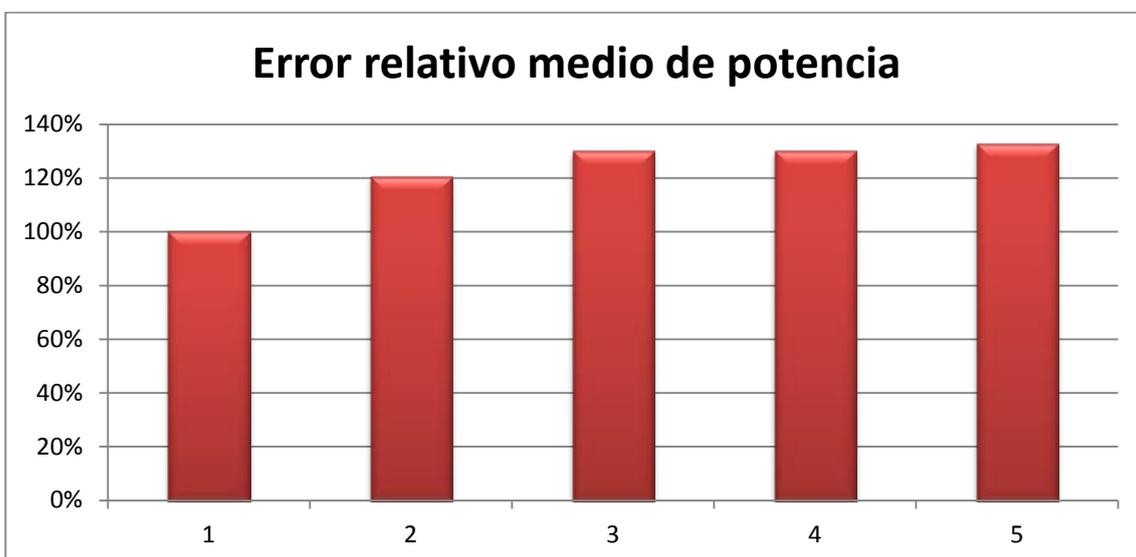


Figura 24. Error relativo medio de potencia en los recipientes en la asignación dinámica

En la Figura 25 se puede observar la evolución de las potencias medias de los recipientes y sus consignas para una situación de 5 recipientes. En ella se puede observar a simple vista el error que se comete al realizar un calentamiento de estas características, apoyando el dato obtenido en la Figura 24 acerca del error medio de potencia del 100%. Además también se aprecia el tiempo que necesita para entregar la potencia media a todos los recipientes, en este

caso son 37 segundos. Por otro lado, como se ha determinado en el estudio de la Figura 22 y Figura 23, existe una gran diferencia entre las situaciones y prueba de ello se observa en la Figura 26, que representa una situación de calentamiento más habitual con únicamente tres recipientes, donde no existe sobrecalentamiento de los recipientes, y el tiempo transcurrido es inferior a dos segundos.

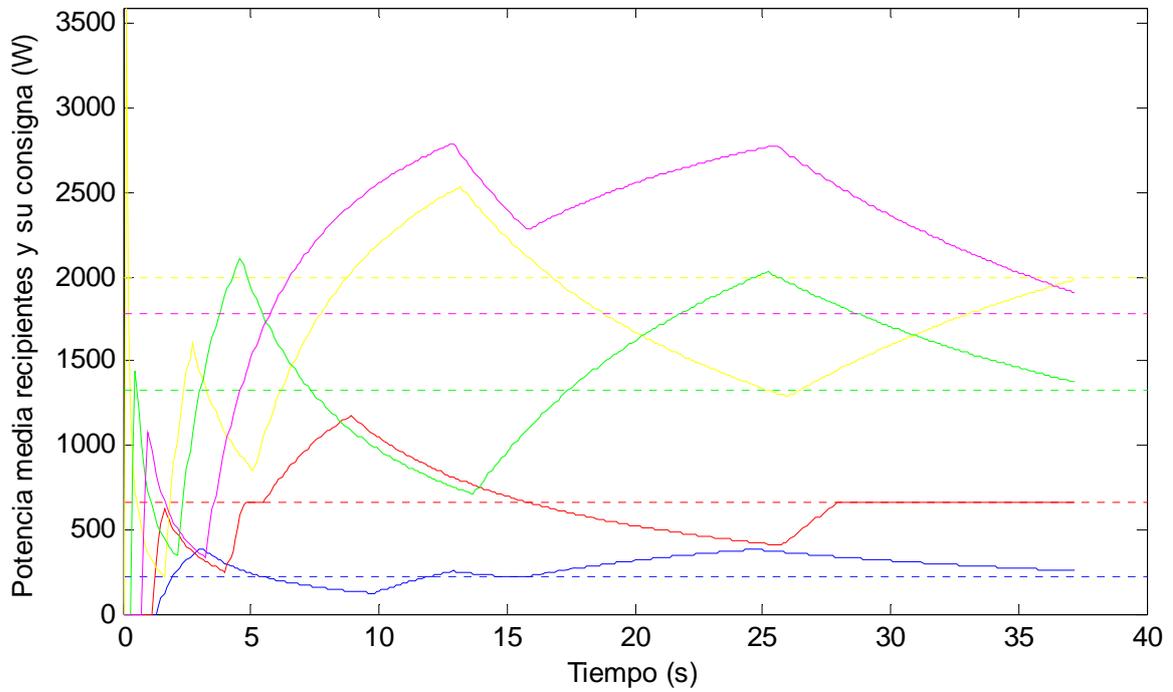


Figura 25. Evolución de las potencias medias de los recipientes y sus consignas para una situación con 5 recipientes

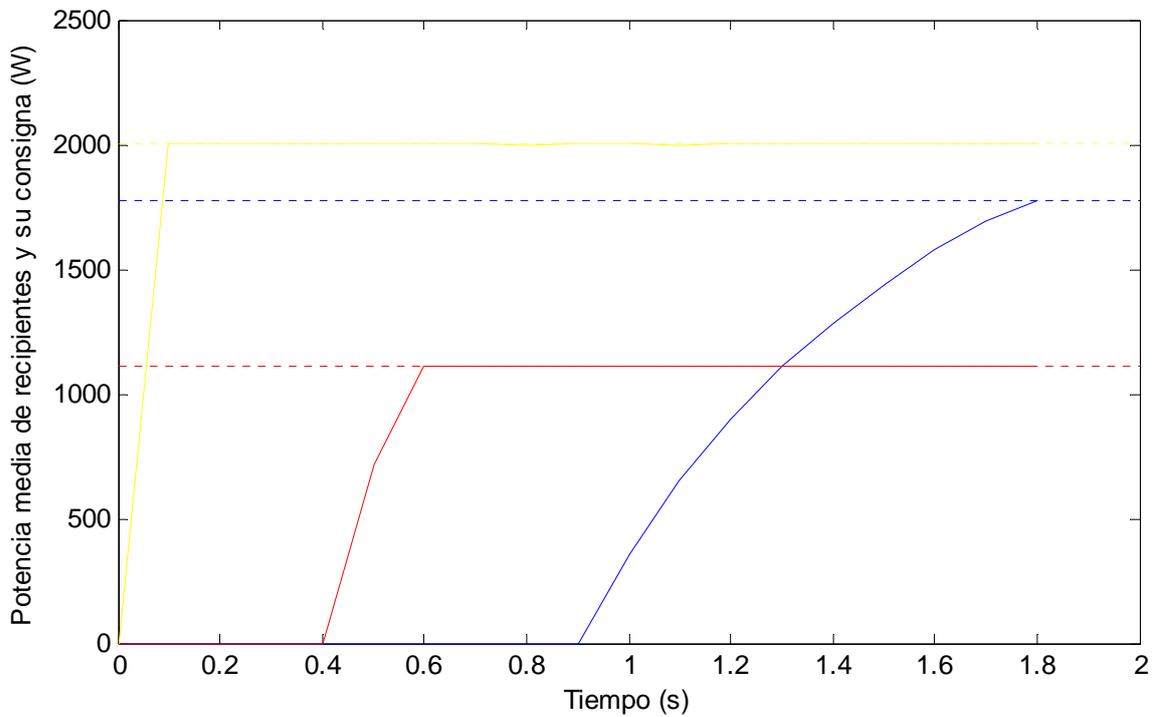


Figura 26. Evolución de las potencias medias de los recipientes y sus consignas para una situación con 3 recipientes

Por último, uno de los parámetros más importantes, es el objetivo final de poder llegar a entregar la potencia consignada a los recipientes en un tiempo prudente. Por ello, en Figura 27 se representa el número de situaciones que no se han podido calentar todos sus recipientes en un tiempo inferior a un minuto y medio, respecto del número total de situaciones evaluadas. Se observa una tendencia que ronda el 3%, con una diferencia máxima entre la combinación dos y tres de un 0,8%. De forma similar a como ha ocurrido en la evaluación de la asignación estática, este parámetro no tiene grandes variaciones y su influencia a la hora de la elección será escasa.



Figura 27. Número de situaciones en que no se ha podido calentar todos los recipientes en un tiempo inferior a 90 segundos, expresado en tanto por ciento del número de situaciones evaluadas

Con todos los datos presentados, se puede hacer un análisis final de la situación, donde se ha comprobado que las combinaciones de pesos que reducen el tiempo, aumentan el error de potencia, y viceversa. Como consecuencia, no hay ninguna combinación que claramente optimice el algoritmo y la posibilidad que se plantea es elegir los parámetros de peso en función de los requisitos del usuario, para ello se proponen dos requerimientos de usuario diferenciados. Por un lado, se puede necesitar un calentamiento estable y uniforme para realizar alimentos en contacto directo con el recipiente y por otro lado se puede solicitar alta eficiencia y tiempos bajos.

Como conclusión, se ha determinado que para realizar calentamientos uniformes se elige la primera combinación de pesos, debido a su menor error de potencia y para calentamientos rápidos se elige la combinación cuatro, dado su menor tiempo de calentamiento, Tabla 5.

Requisito del usuario	Peso diferencia potencia	Peso distancia inductor- recipiente	Peso alcance por inductor pequeño	Peso tiempo en volver a calentar recipiente	Potencia entregada múltiplo de la consiga
Uniformidad	15	1	0,2	0,05	Variable 2/3/4
Rapidez	20	1	0,2	0,05	4

Tabla 5. Solución de pesos de costes implementada en función del requisito del usuario

3. Asignación dinámica y cobertura estática

Una de las finalidades de este trabajo es el estudio de la viabilidad del prototipo y su comparativa respecto de las cocinas convencionales. Una vez obtenido el algoritmo definitivo para la asignación dinámica y cobertura estática, se puede realizar este estudio.

La primera conclusión que se puede obtener es que el aumento de flexibilidad reduce otras prestaciones de la cocina, como el tiempo de calentamiento o la potencia que adquieren los recipientes, que pueden llegar a ser determinantes o no dependiendo del grado de las mismas. A la vista de los datos arrojados en este estudio, esta disminución de prestaciones puede llegar a ser excesiva y no compensaría el aumento de flexibilidad. Las dos causas más significativas son el elevado tiempo de espera hasta que todos los recipientes adquieren potencia consignada y, como consecuencia, algunos recipientes tardarían un tiempo considerable en recibir la energía requerida, o a la excesiva diferencia de potencia que podría generar un cocinado de los alimentos no deseado.

Sin embargo, la simulación realizada ha incluido una amplia variedad de situaciones con un elevado número de recipientes y potencias consignadas que, aunque se pudieran dar en la realidad, es poco probable que ocurran. Por ello, para situaciones con un número controlado de recipientes y potencias consignadas, el algoritmo ofrece muy buenas prestaciones, dando gran flexibilidad al usuario además de un tiempo de calentamiento similar al de cocinas convencionales y errores de potencias bajos, como se ha observado en la Figura 26.

Únicamente en el 3% de las situaciones no se podrá conseguir la potencia consignada de todos los recipientes en menos de 90 segundos, aunque probablemente sí que lo consigan en un tiempo mayor. Este 3% corresponde a situaciones donde el número de recipientes y potencias es elevado y calentarlos resulta una tarea difícil. Las prestaciones que ofrece la cocina en estas condiciones no se pueden comparar con las cocinas convencionales porque no tienen tal grado de flexibilidad. Por ello, sería conveniente valorar las prestaciones de otras cocinas flexibles y compararlas con las obtenidas para el prototipo de inductores móviles según el algoritmo desarrollado.

4. Cobertura dinámica con asignación estática

4.1 Objetivo

Llegados a este punto, se han abordado los problemas de cobertura estática, ya sea con asignación dinámica o estática. Esto quiere decir que el algoritmo es capaz de calentar hasta un máximo de seis recipientes que tengan el tamaño determinado para que un inductor pueda calentarlos en una posición fija bajo el recipiente.

Sin embargo, el carácter flexible que se quiere conferir a esta cocina incluye el calentamiento de recipientes grandes y para ello el inductor deberá desplazarse bajo el recipiente para calentarlos de la forma más homogénea y eficiente posible. Dadas las dimensiones de la cocina y de los recipientes, es poco probable que se coloquen más de tres recipientes grandes dentro de los límites de la cocina, lo que significa que cada inductor puede ocuparse de un recipiente. Por este motivo y debido a los límites de este trabajo, en este apartado únicamente se evalúan las trayectorias de calentamiento de un recipiente con un inductor, es decir con asignación estática.

Para abordar este problema, primeramente se plantea cómo es la distribución de densidad de potencia que tiene un inductor. Para ello se utiliza una función simplificada que determina la potencia del inductor en función del radio.

La generación de la trayectoria que optimice el calentamiento sería la mejor forma de solucionar el problema y la solución óptima. Sin embargo, la comunidad científica aún no ha conseguido resolver este problema. Dado que dicha resolución no entraría dentro de las labores académicas de este trabajo, se resuelve el problema mediante un estudio de los movimientos básicos que puede realizar un inductor para calentar una zona, como pueden ser circunferencias o dos trayectorias lineales paralelas, y se estudia la homogeneidad de la potencia entregada en dicha región. En base al estudio de estas trayectorias predefinidas, se determinan las trayectorias a seguir para realizar el calentamiento uniforme de los recipientes.

4.2 Modelo térmico implementado

4.2.1 Generación de potencia del inductor

Hasta ahora no ha sido necesario utilizar el modelo de distribución de densidad de potencia de los inductores porque la distribución de temperatura en el recipiente depende del diseño del inductor cuando éste se coloca centrado bajo el recipiente y ambos son de tamaños similares, como ocurre en las cocinas convencionales. Sin embargo, en este problema el tamaño de ambos es diferente y el inductor debe desplazarse bajo el recipiente, una situación que hasta ahora no se había contemplado en el mundo de las cocinas domésticas, por lo tanto, la distribución de densidad de potencia influye significativamente en el calentamiento del recipiente.

4. Cobertura dinámica con asignación estática

Este modelo de distribución lo ha obtenido la empresa a través de simulaciones de los inductores mediante elementos finitos. Posteriormente se ha podido aproximar esta distribución de potencia por una función cosenoidal en función del radio del inductor y la máxima densidad de potencia del inductor. La integral de esta distribución de potencia debe ser la máxima potencia que genera el inductor. La función aproximada es la siguiente:

$$P(r) = \Phi_p^{max} * 0.5 * (1 - \cos\left(\frac{r}{R} * 2\pi\right))$$
$$\text{con } 0 \leq r \leq R \quad (R = \text{radio del inductor})$$

$$\int_0^{2\pi} \int_0^R P(r) * dr * d\theta = p^{max} = 3600W$$

donde: Φ_p^{max} es la máxima densidad de potencia del inductor para una potencia determinada
 p^{max} es la máxima potencia media que puede entregar el inductor

La distribución de potencia de esta función se puede ver en la siguiente imagen, donde se puede observar que tanto como el interior como el exterior del inductor generan escasa potencia:

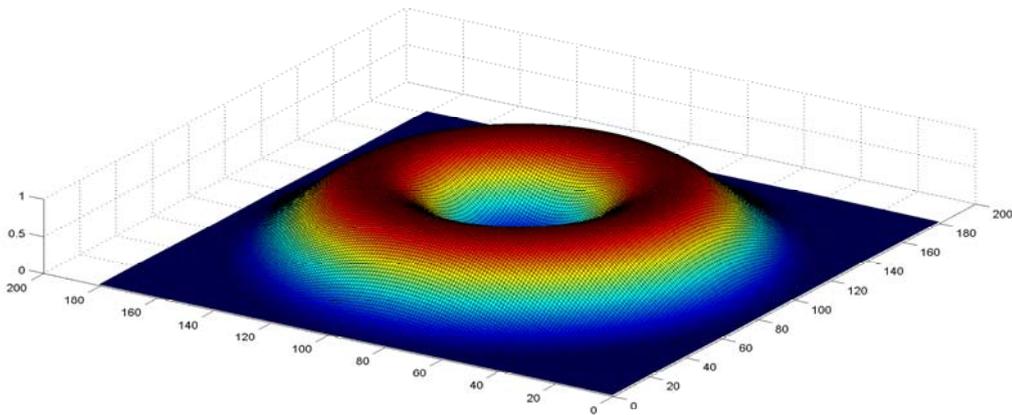


Figura 28. Distribución de densidad de potencia del inductor

4.2.2 Calentamiento del recipiente

El objetivo de calentamiento será la igualdad entre la potencia total del recipiente y la consigna del usuario. Como se va a estudiar el caso de asignación estática, es decir que el inductor solo debe encargarse de calentar un recipiente, se puede planificar el calentamiento de tal forma que al terminar la trayectoria realizada, la potencia media del recipiente a lo largo del tiempo de calentamiento sea igual a la consignada por el usuario. La planificación se realiza teniendo en cuenta el tiempo que tarda el inductor en realizar la trayectoria, la densidad de potencia que el inductor aporta al recipiente a lo largo de toda la trayectoria y la consigna del usuario.

Hay que destacar que no hay un único parámetro a tener en cuenta para decidir el mejor calentamiento, puesto que existen diferentes requerimientos o formas de cocinar. En este trabajo se va a tener en cuenta las dos situaciones más comunes:

1- Situaciones con mucho fluido en el recipiente: se trata de situaciones de cocción o freír con gran cantidad de aceite. En estas ocasiones se busca un calentamiento rápido y eficiente para gastar la menor energía posible. Al tener un fluido como medio conductor entre el alimento y el recipiente, éste se encarga de homogeneizar la temperatura.

2- Situaciones con poco fluido en el recipiente: se encuentran estas situaciones cuando se cocinan alimentos a la plancha. En estos casos lo más importante es realizar un calentamiento homogéneo para que el alimento se cocine uniformemente por toda la superficie. En esta situación el calor que desprenda el recipiente será transferido directamente al alimento y por ello es importante la generación de calor uniforme en el recipiente.

De las dos situaciones propuestas, únicamente se van a estudiar las trayectorias óptimas del segundo caso donde hay que realizar una cobertura uniforme. La trayectoria a llevar a cabo en la primera situación donde prima la eficiencia del calentamiento es sencilla, únicamente se debe realizar una trayectoria que maximice el área del recipiente cubierta por el inductor y de esta forma se optimizará la eficiencia.

4.3 Estudio de trayectorias para cobertura uniforme

Como se ha comprobado en el apartado 4.2.1, en las franjas externas del inductor se genera poca potencia. Por ello es importante estudiar y determinar los radios de actuación eficaces del inductor. Estos radios, o distancia de actuación, dependen de la trayectoria utilizada por el inductor, debido al posible solapamiento o no de las trayectorias. Por ejemplo, al realizar dos trayectorias paralelas separadas una distancia menor al diámetro del inductor, existe una región intermedia que recibe potencia durante las dos trayectorias. Si en una de ellas la zona recibe el 40% de la potencia deseada y en la otra trayectoria recibe el 60%, este área tendrá una densidad correcta.

Primeramente, hay que definir un umbral bajo el cual un área se considera calentada uniformemente atendiendo a su densidad de potencia media en el tiempo. Se propone un valor aproximado del 75% de la densidad de potencia deseada a partir del cual una zona se considera cubierta correctamente.

A continuación se estudian tres tipos de movimientos básicos que realiza un inductor, con la finalidad de determinar parámetros clave para una distribución uniforme de la potencia, como por ejemplo, distancia eficaz que cubre el inductor en una trayectoria lineal, distancia de separación entre dos trayectorias paralelas, o radio de un movimiento circular.

4.3.1 Trayectoria lineal

Se calcula el radio de actuación eficaz a partir del cual un inductor entrega menos del 75% de la densidad de potencia media. Con este dato se determina la distancia que puede abarcar un inductor entregando una densidad de potencia cercana a la consignada.

También se calcula el radio que ofrece una densidad de potencia del 50% respecto de la media del inductor, con el fin de poder tener una orientación acerca de la distancia de separación entre dos trayectorias paralelas. Aunque, concretamente este dato se abordará en el siguiente apartado.

Además de la distancia del inductor, es interesante conocer el porcentaje de esta distancia respecto del radio del inductor, para poder extrapolar este estudio a otros diámetros de inductores, concretamente en este problema, al aro interior del inductor. Los datos recogidos se muestran en la Tabla 6.

<u>Densidad de potencia requerida respecto de la media del inductor</u>	<u>50 %</u>	<u>75 %</u>
Porcentaje respecto del radio del inductor	83,3%	79%
Radio del aro doble	75 mm	71 mm
Radio del aro interno	50 mm	47,5 mm

Tabla 6. Radios de los inductores que dan densidades de potencia del 50% y 75% de la potencia media

Con estos datos recogidos, se puede determinar que no es conveniente realizar trayectorias lineales con recipientes que tengan más de 142 mm de lado. Según la casuística de recipientes que se tiene en cuenta en este trabajo, donde el mínimo recipiente rectangular o elíptico tiene 150 mm de lado menor, no es posible cubrir uniformemente un recipiente con una trayectoria lineal a lo largo de su eje mayor. Para comprobarlo se ha realizado la simulación (Figura 29).

En la representación (Figura 29) se aprecia que los polos superior e inferior del recipiente tienen una potencia reducida. No obstante, el área con escasa potencia media es reducida y gracias a los mecanismos de difusión de calor, esta región del recipiente podría llegar a tener una temperatura satisfactoria. Sin embargo, para realizar esta afirmación se necesitaría implementar una herramienta de transferencia de calor mediante elementos finitos, la cual no se posee. Por lo tanto, con lo que respecta a este trabajo y con las herramientas de las que se dispone, se observa que las trayectorias lineales no son adecuadas para realizar el calentamiento con cobertura dinámica.

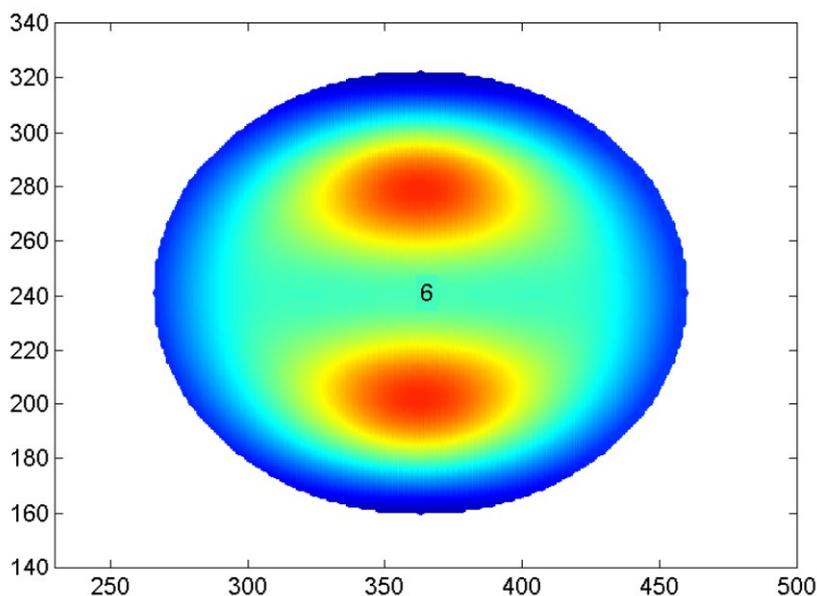


Figura 29. Calentamiento del menor recipiente elíptico mediante una trayectoria lineal

4.3.2 Estudio de dos trayectorias paralelas separadas una distancia inferior al diámetro del inductor

Con el objetivo de determinar la distancia de separación óptima entre dos trayectorias paralelas, tal que optimice la distribución uniforme de la densidad de potencia, se va a realizar una simulación de calentamiento con dos trayectorias lineales separadas una distancia parametrizada, empleando el inductor completo, únicamente el aro interno y una combinación de ambos.

El estudio realizado arroja los resultados expuestos en la Figura 30, donde se representa el área del recipiente que tiene una densidad de potencia igual a la consignada por el usuario, en relación con el área total. En ella se observa en las tres situaciones simuladas, que la distancia óptima de separación entre las trayectorias es el 177% del radio del inductor.

Además, para dar este resultado como válido, se confirma que la franja central de la intersección de las coberturas presenta una densidad de potencia plenamente aceptable, el 90% de la consigna (Figura 31). La representación de la simulación con la separación de trayectorias óptimas para el calentamiento de una región cualquiera se puede ver en la Figura 32.

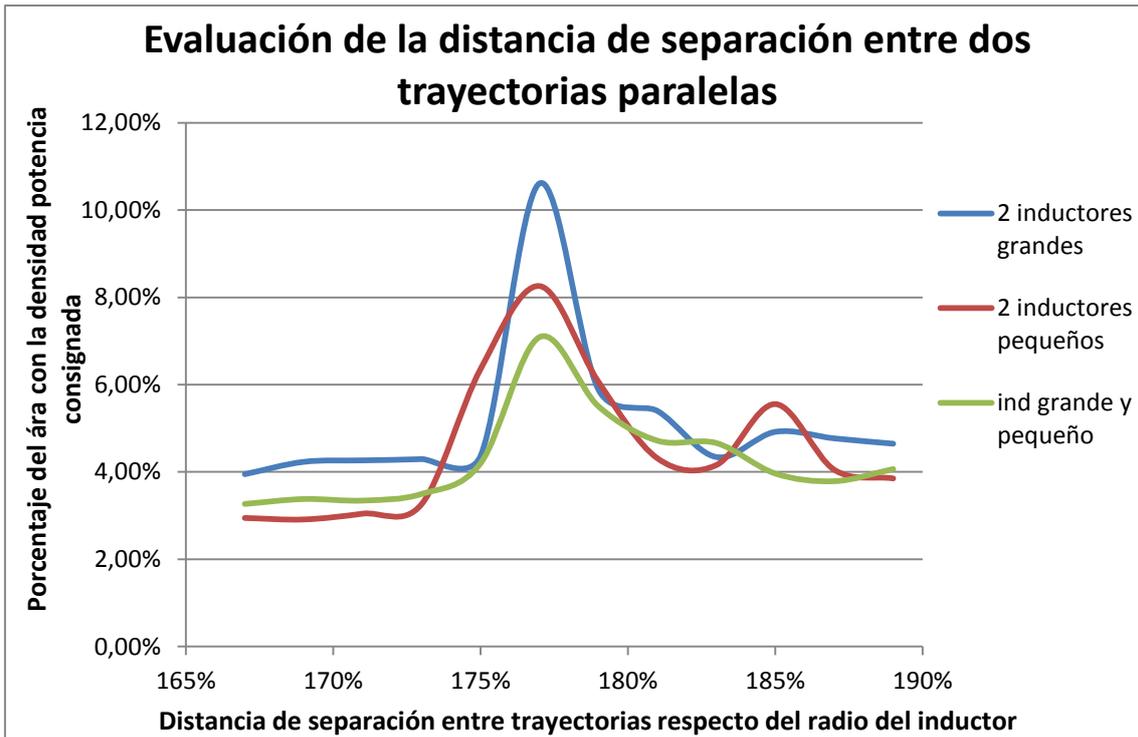


Figura 30. Evaluación de la distancia de separación óptima en el calentamiento de dos trayectorias. Porcentaje de área con la densidad de potencia consignada

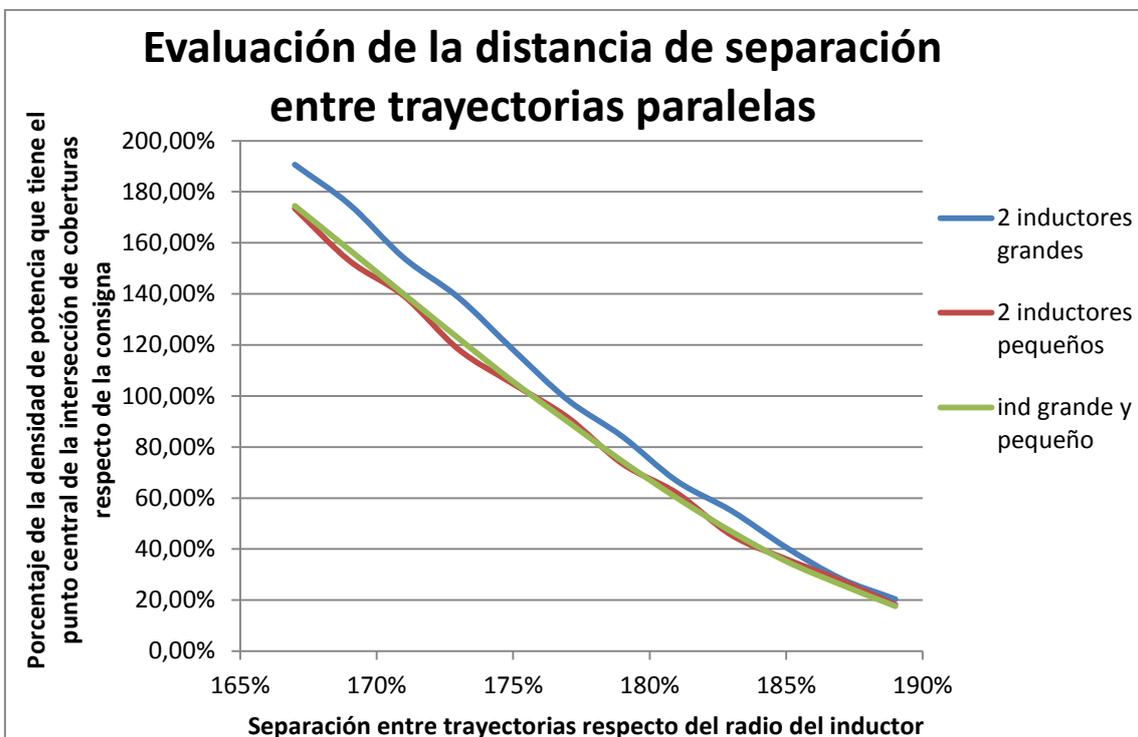


Figura 31. Evaluación de la distancia de separación óptima en el calentamiento de dos trayectorias. Porcentaje de la densidad de potencia que tiene el punto central de la intersección de coberturas respecto de la consigna

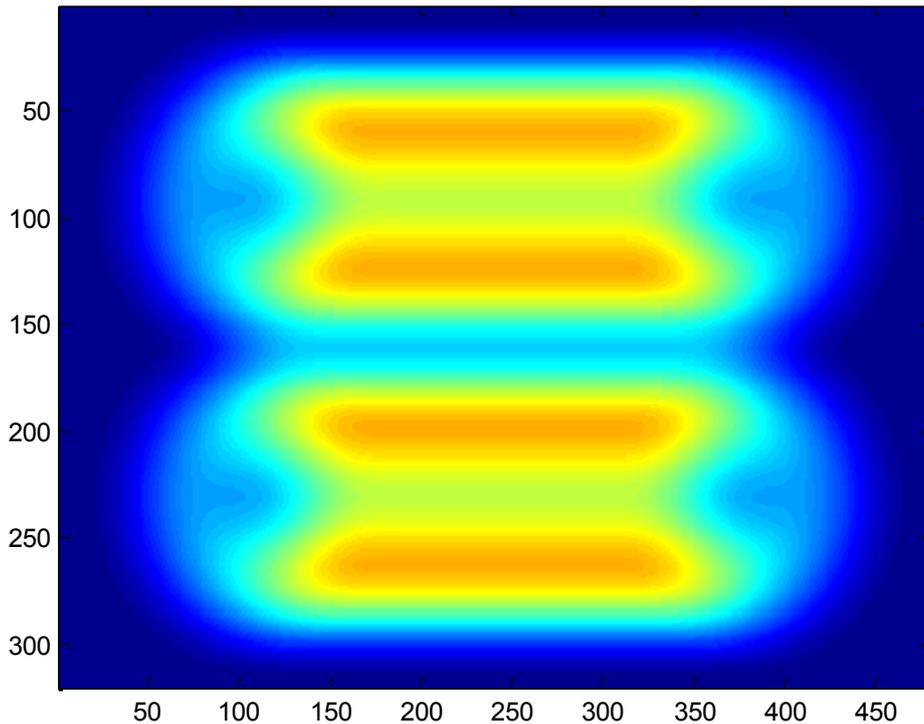


Figura 32. Representación de la densidad de potencia media de un área cualquiera calentada mediante dos trayectorias lineales separadas un 177% del radio del inductor

4.3.3 Estudio del área central en trayectorias curvas

Otro parámetro importante, en calentamientos con movimientos circulares, es la distancia entre el centro de la trayectoria y el inductor, buscando que el centro del recipiente no presente sobrecalentamientos ni defectos de potencia. Para realizar este estudio se ha realizado una simulación que determina el radio óptimo al que se deben realizar las trayectorias circulares interiores.

Los parámetros a tener en cuenta para determinar esta distancia son el porcentaje de área cubierta por el inductor que presenta la densidad de potencia consignada y el error de potencia relativo medio en el mismo área de estudio. Con el fin de no tener en cuenta en el estudio las zonas que el inductor no calienta correctamente debido al radio de eficacia exterior del inductor, este área de estudio se ha calculado como un círculo de radio igual al radio de la trayectoria más la mitad del 177% del radio del inductor (Figura 33).

4. Cobertura dinámica con asignación estática

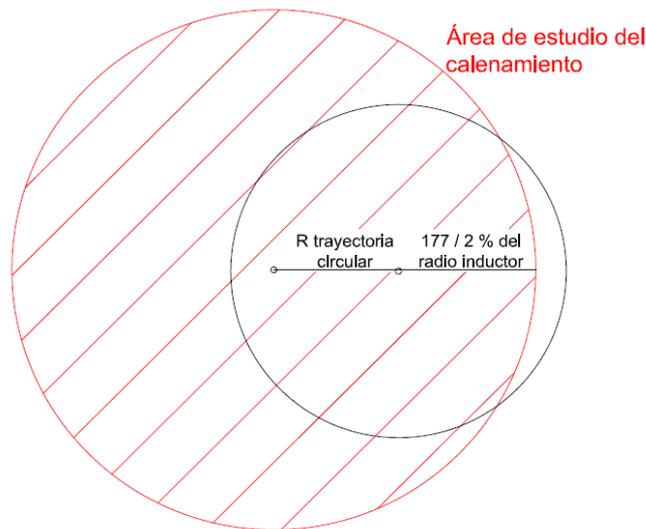


Figura 33. Representación del cálculo del área de estudio en la trayectoria circular

La representación gráfica de sendos parámetros presenta una zona de inflexión horizontal común en torno al 88% (Figura 34), por lo tanto este será el valor elegido como distancia para realizar las trayectorias circulares.

En cuanto a la densidad de potencia que alcanza el centro del área cubierta (Figura 35), en la distancia escogida presenta el 75% de la densidad de potencia consignada, consiguiendo un valor muy aceptable.

En la Figura 36 se muestra la representación del calentamiento del área cubierta en la trayectoria seleccionada.

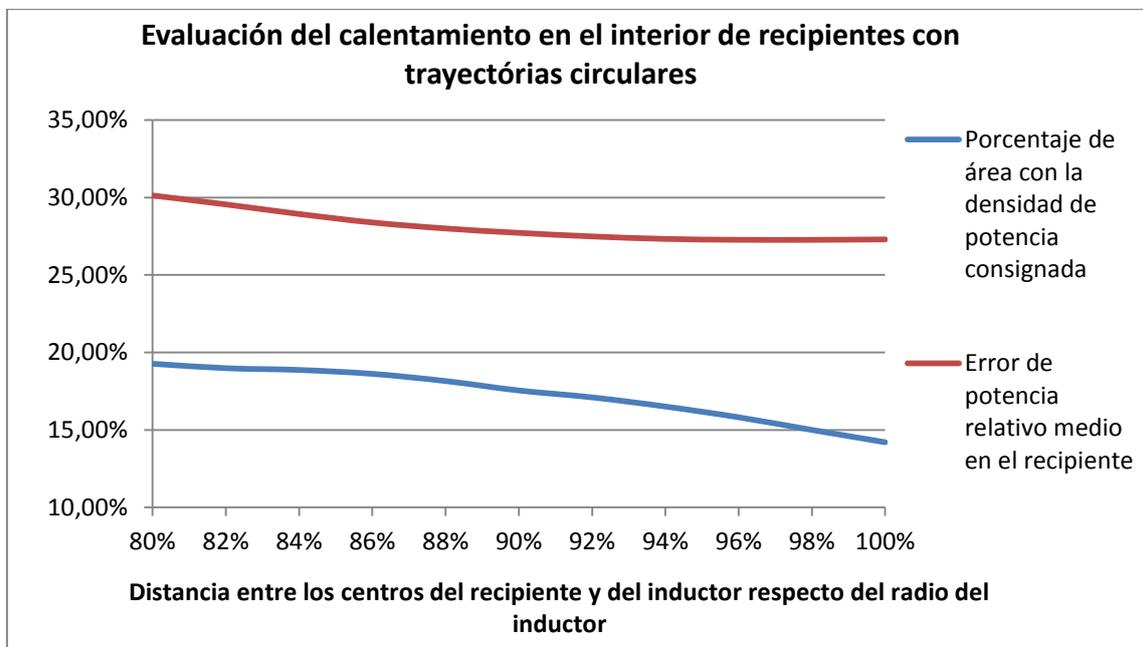


Figura 34. Evaluación del calentamiento en el interior de recipientes con trayectorias circulares

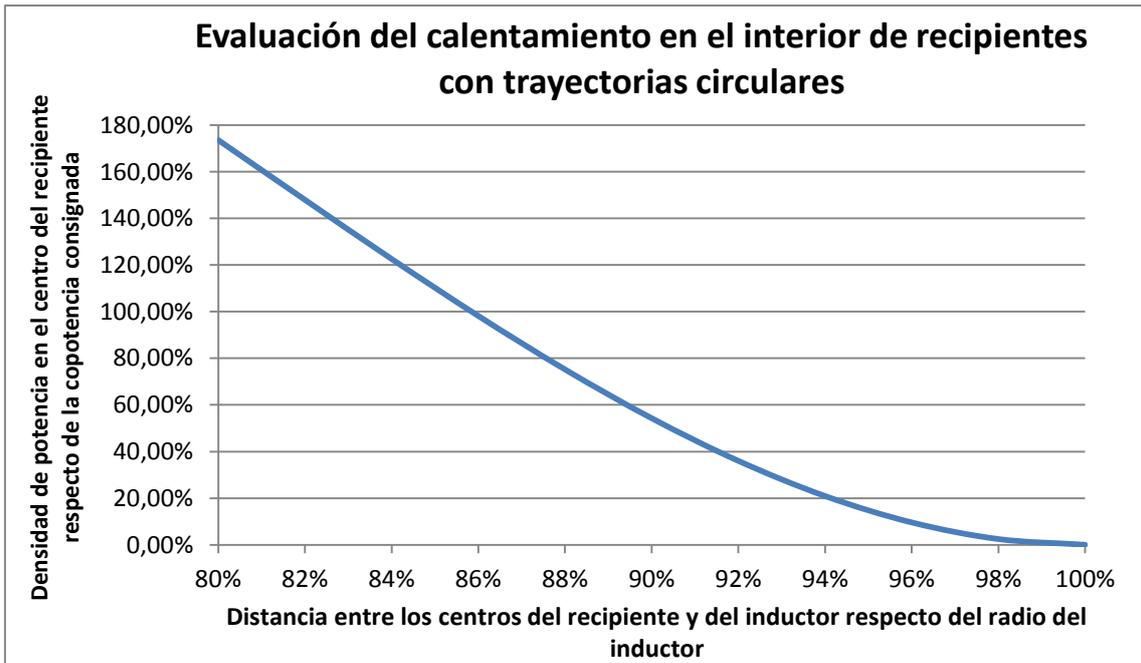


Figura 35. Evaluación del calentamiento en el interior de recipientes con trayectorias circulares

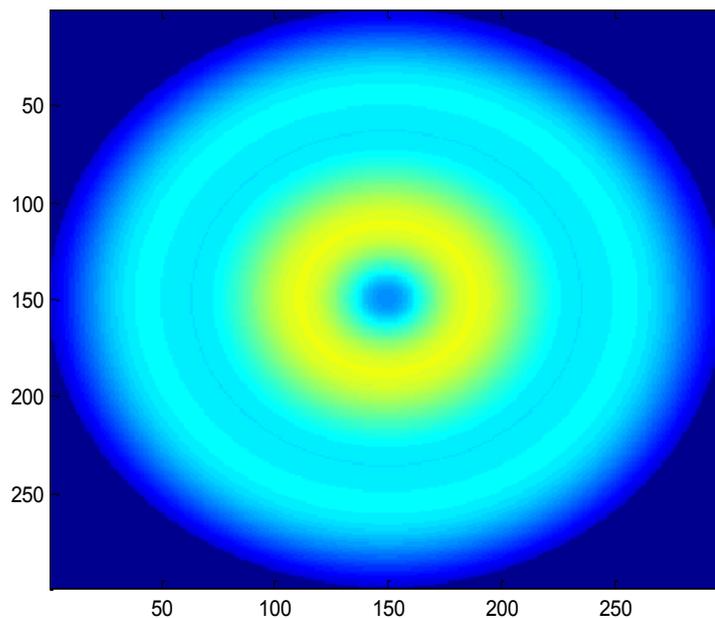


Figura 36. Representación de la potencia media del área de cubierta por la trayectoria circular óptima

4.4 Forma de las trayectorias implementadas

El último factor a determinar que influye en el calentamiento de los recipientes es la forma de la trayectoria que debe implementar el inductor. En recipientes elípticos y circulares, la forma de las trayectorias escogidas es la misma que la forma del recipiente a cubrir. Esta trayectoria presenta un comportamiento satisfactorio de la distribución de densidad de potencia (Figura 37 y Figura 38), donde la mayor parte del área del recipiente tiene una densidad de potencia igual a la consignada, aunque también se observan pequeñas zonas con una potencia más elevada. Además, con esta trayectoria también se consigue mayor cobertura y, como consecuencia, una mejor eficiencia comparándola con otras trayectorias.

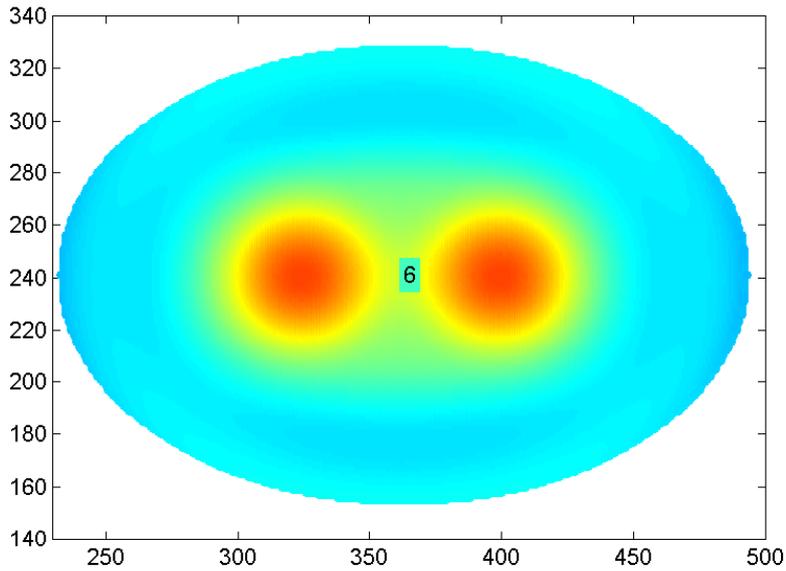


Figura 37. Simulación del calentamiento de una elipse mediante una trayectoria elíptica

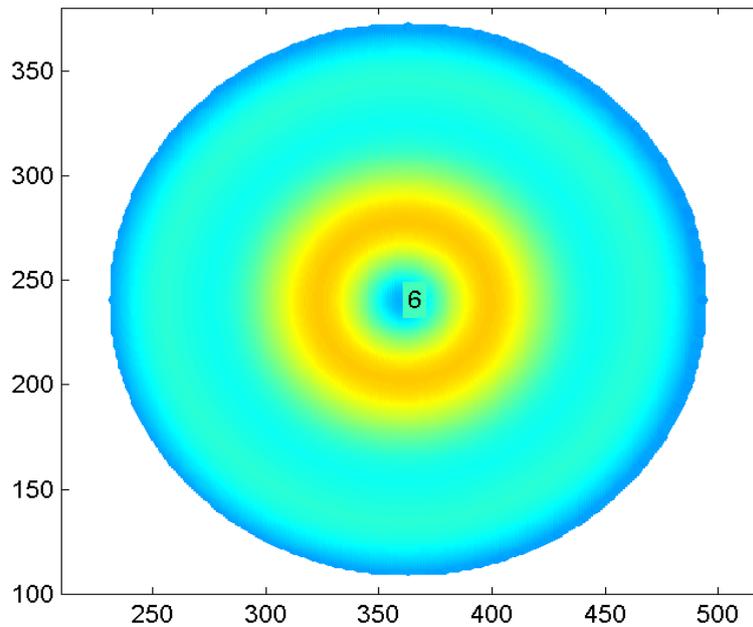


Figura 38. Simulación del calentamiento de un círculo mediante una trayectoria circular

Sin embargo, para los recipientes rectangulares, no es tan obvia la forma de la trayectoria llevada a cabo. Se proponen dos tipos: trayectoria rectangular y dos trayectorias lineales paralelas. Ambas presentan buena eficiencia porque la cobertura que realizan al recipiente es similar. La distribución de densidad de potencia se presenta en la Figura 39 y Figura 40. El calentamiento mediante trayectoria rectangular presenta una distribución más uniforme en todo el recipiente, pero tiene dos pequeñas regiones con potencia elevada. En cuanto al calentamiento con trayectorias lineales se observa que existe una mayor zona donde la potencia es superior a la consignada, aunque estas diferencias no es tan elevada como en la otra trayectoria.

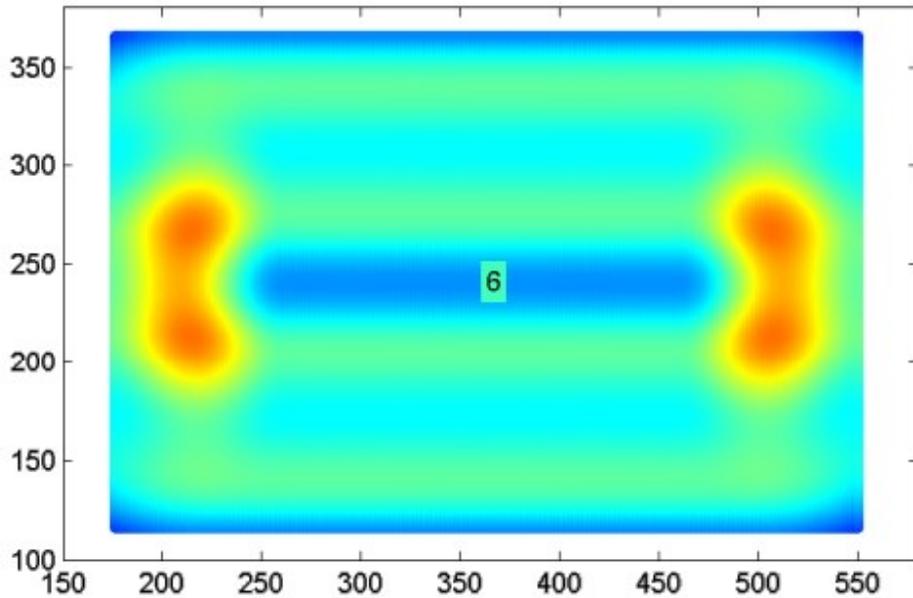


Figura 39. Simulación del calentamiento de recipiente rectangular con trayectoria rectangular

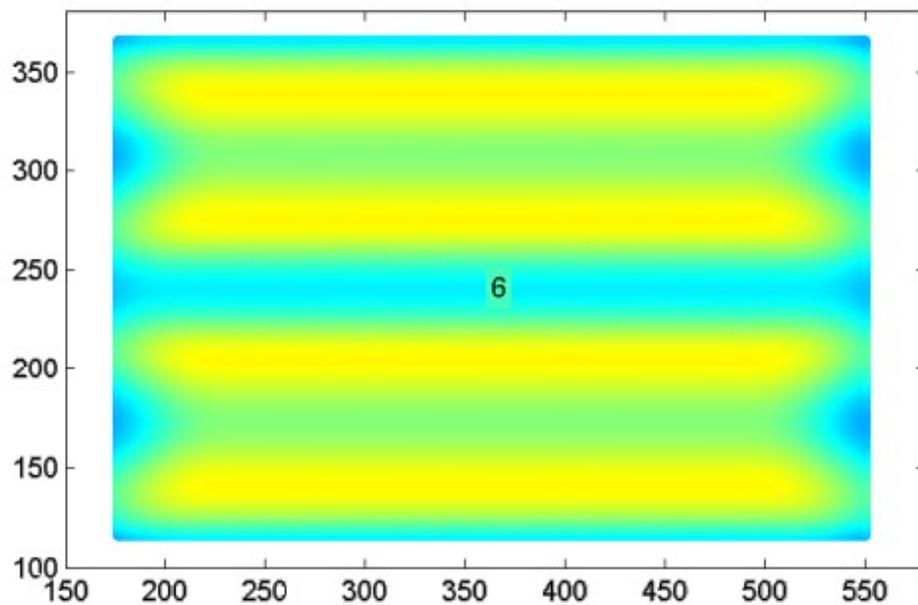


Figura 40. Simulación del calentamiento de recipiente rectangular con dos trayectorias lineales

De forma similar a como sucede en el apartado 4.3.1, con las herramientas disponibles en este trabajo es difícil determinar cuál de las dos trayectorias lleva a una distribución de energía, y por lo tanto de temperatura, más uniforme. Para poder asegurar cual es la mejor distribución se necesitaría implementar una herramienta de transferencia de calor mediante elementos finitos.

Ante esta situación, a falta de realizar un estudio térmico con mayor profundidad, se considera la elección de la trayectoria rectangular como aquella que mejor distribuye la energía debido a su mayor área con la densidad de potencia consignada. Además tiene una eficiencia ligeramente superior porque la trayectoria lineal debe dar mayor pico de potencia para corregir el tiempo de trayectoria que está sin entregar energía al recipiente.

4.5 Soluciones halladas

A partir de los estudios estratégicos realizados en los apartados anteriores, donde los datos recogidos importantes son los porcentajes de radios que optimizaban el calentamiento en función del tipo de trayectoria utilizada, es el momento de determinar la máxima dimensión de los recipientes que los inductores pueden abarcar consiguiendo una cobertura uniforme y una densidad de potencia media en toda el área con una diferencia máxima del 25% respecto a la consigna (Tabla 7). Esta distancia se obtiene multiplicando el radio del inductor utilizado para la cobertura por el porcentaje obtenido en el estudio.

Número de trayectorias	Inductores utilizados	Trayectoria	Porcentajes de radios eficaces utilizados	Distancia que consiguen abarcar
1	Grande	Lineal	79%	142 mm
		Rectangular	177% y 79%	150 mm
		Circular	88% y 79%	150 mm
1	Pequeño	Lineal	79%	95 mm
		Rectangular	177% y 79%	100 mm
		Circular	88% y 79%	100 mm
2	Grande - Grande	Lineal	79 % y 177%	300 mm
		Rectangular	177% y 79%	310 mm
		Circular	88%, 177% y 79%	310 mm
2	Grande - Pequeño	Lineal	79% y 177%	251 mm
		Rectangular	177% y 79%	258 mm
		Circular	88%, 177% y 79%	258 mm
2	Pequeño - Pequeño	Lineal	79 % y 177%	201 mm
		Rectangular	177% y 79%	206 mm
		Circular	88%, 177% y 79%	206 mm

Tabla 7. Distancia máxima de los recipientes que pueden abarcar los inductores en el calentamiento en función del número de trayectorias, el tamaño de los inductores utilizados y el tipo de trayectoria que se realice

Llegados a este punto, ya se pueden establecer todas trayectorias a llevar a cabo en función de la forma y dimensiones de los recipientes. Para ello, se ha tenido en cuenta que, la distancia desde el centro a los laterales de los recipientes, debe ser inferior a la longitud que las trayectorias de los inductores puedan abarcar, según lo expuesto en la Tabla 7, y por ello se calienta el recipiente con un tipo de inductor u otro. Las dimensiones de las trayectorias vienen fijadas por el inductor utilizado, la forma de la trayectoria y los porcentajes de radios eficaces obtenidos en los estudios.

4. Cobertura dinámica con asignación estática

Las trayectorias finales que deben recorrer los inductores se presentan a continuación en la Tabla 8¹, junto con un pequeño dibujo esquemático.

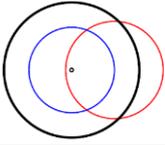
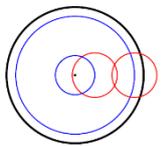
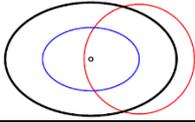
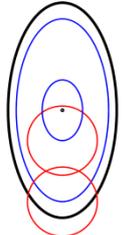
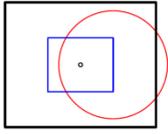
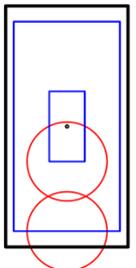
Forma del recipiente	Rango de dimensiones	Inductores	Trayectoria del inductor	Dibujo esquemático
Circular	d: 80 – 140 mm	Pequeño	Estática	-
	d: 140 – 210 mm	Grande	Estática	-
	d: 210 – 300 mm	Grande	R= 79 mm	
	d: 300 – 400 mm	2 pequeños	R ₁ = 53 mm; R ₂ = 159 mm	
Elíptica	a: 180 – 210 mm	Grande	Estática	-
	b: 210 – 300 mm	Grande	b= 158 mm; a= b·f	
	b: 300 – 400 mm	2 pequeños	b ₁ = 106 mm; a ₁ = b ₁ ·f; b ₂ = 318 mm; a ₂ = a ₁ + 106	
Rectangular / cuadrado	L1: 180 – 190 mm	Grande	Estática	-
	L2: 190 – 300 mm	Grande	L2= 158 mm; L1 = L2·f	
	L2: 300 – 400 mm	2 pequeños	L2 ₁ = 106mm; L1 ₁ = L2 ₁ ·f; L2 ₂ = 318 mm; L1 ₂ = L1 ₁ + 106	

Tabla 8. Trayectorias para cubrir uniformemente en función de la forma y dimensiones de los recipientes

¹ Con la finalidad de abreviar, se denotará al diámetro de círculos con la letra “d”; en elipses: eje mayor como “a”, eje menor como “b” y factor de forma “f”; para rectángulos el número 1 indicará que es el lado mayor y el 2 el menor.

Para los dibujos esquemáticos, se pone en color azul la trayectoria utilizada, en rojo el inductor y en negro el recipiente.

4. Cobertura dinámica con asignación estática

Para comprobar que estas trayectorias son correctas y presentan un calentamiento uniforme, se han realizado una serie de simulaciones que se presentan a continuación.

El calentamiento de recipientes con una trayectoria ya se ha presentado en el apartado anterior, donde se ha simulado un recipiente elíptico de 260 mm de eje menor y factor de forma 1,5 (Figura 37), circular de 26 cm de diámetro (Figura 38) y rectangular de 25 cm de lado menor y factor de forma de 1,2 (Figura 39). Como ya se ha comentado, las tres trayectorias son satisfactorias, aunque para recipientes rectangulares no se tiene la certeza de que esa sea la mejor forma de movimiento, según lo expuesto en el apartado 4.4.

También se simulan los recipientes donde es necesario realizar dos trayectorias. Primeramente un círculo de 32cm de diámetro, el más grande que se considera (Figura 41). La distribución de densidad de potencia es muy uniforme en gran parte del área del recipiente.

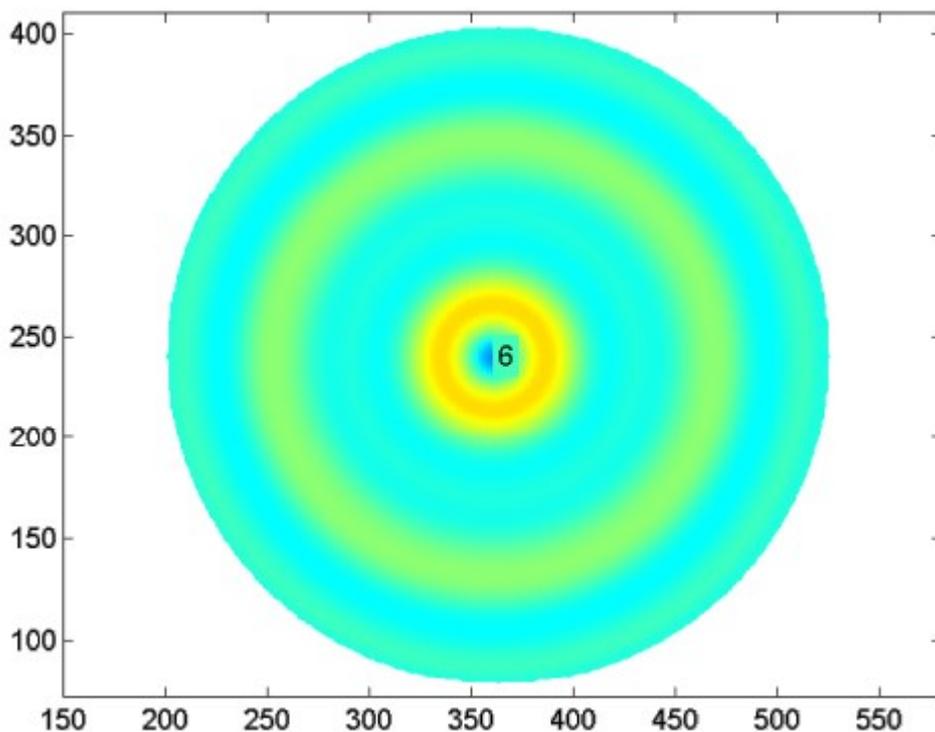


Figura 41. Simulación del calentamiento de un recipiente circular de 32cm de diámetro con dos trayectorias circulares

Para comprobar los recipientes elípticos se ha simulado uno de 36cm de eje mayor y factor de forma de 1,8 (Figura 42). Su distribución de potencia también es muy uniforme, salvando las dos zonas que deja sobrecalentadas excesivamente, al igual que ocurre con el recipiente cubierto por una trayectoria.

4. Cobertura dinámica con asignación estática

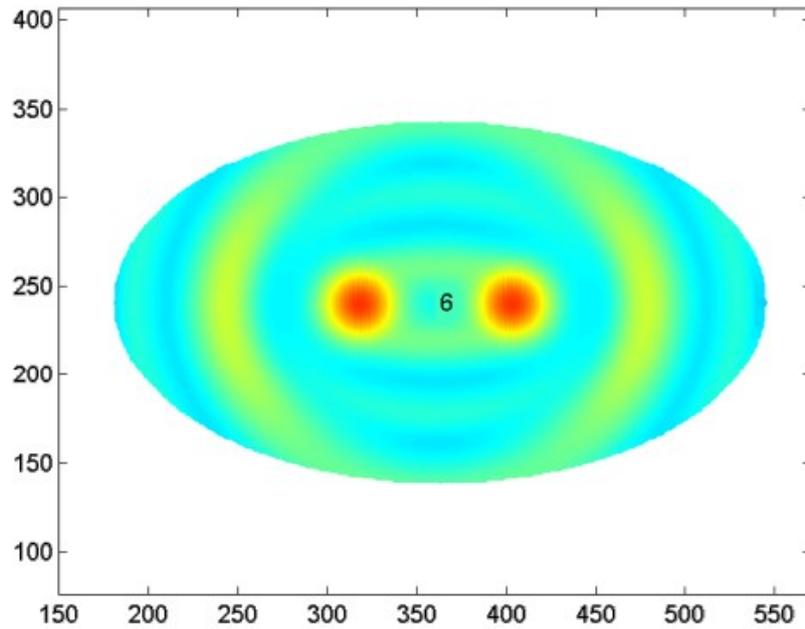


Figura 42. Simulación del calentamiento de un recipiente elíptico de 36cm de eje mayor y factor de forma de 1,8, realizado con dos trayectorias

Finalmente, se ha simulado un recipiente cuadrado de 320 cm de lado (Figura 43). El resultado obtenido es similar al realizado con una trayectoria. Aunque el resultado conseguido es aceptable como se demuestra a continuación, se encuentran focos calientes localizados en los mismos puntos y zonas frías que no han llegado a calentarse,.

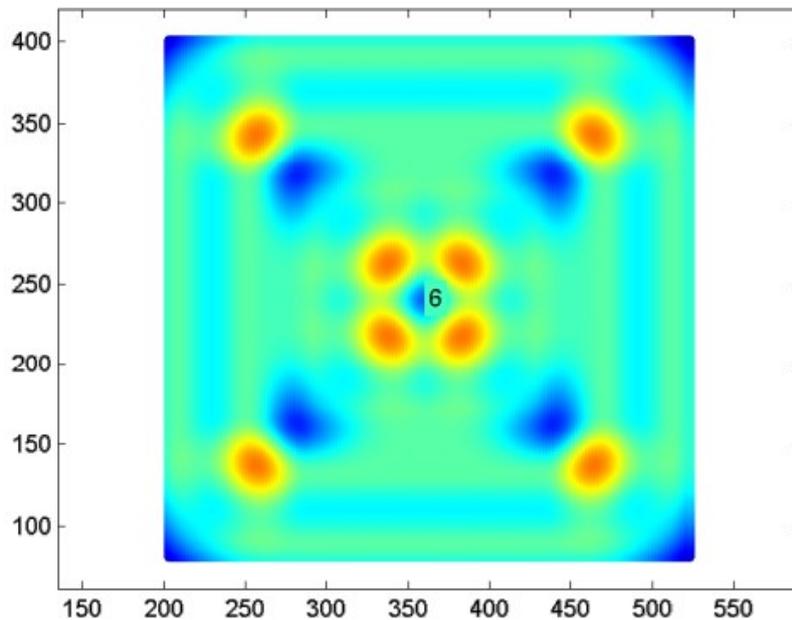


Figura 43. Simulación del calentamiento cuadrado de 32cm de lado realizado con dos trayectorias

Como conclusión, se observa que todas las trayectorias han distribuido una densidad de potencia uniforme y satisfactoria a los recipientes, presentando el 85% del área con menos del 10% de error respecto de la consigna. Sin embargo, en todas las simulaciones se aprecian zonas sobrecalentadas características de la forma de la trayectoria llevada a cabo, que se deberían solucionar en próximos trabajos mediante el algoritmo que determine trayectoria óptima.

5. Conclusiones y futuras líneas de trabajo

Teniendo en cuenta la problemática de los sistemas de cocinado flexible existentes en la actualidad, debido a sus altos costes y limitaciones en la distribución de calor en los recipientes, se ha continuado la línea de investigación basada en la idea de inductores móviles para intentar obtener mejores prestaciones.

El objetivo final es el desarrollo de un algoritmo que sea capaz de realizar las estrategias de asignación de la mejor manera posible, conocer la potencia entregada por los inductores en todo momento y las trayectorias que uniformicen la cobertura dinámica en recipientes de grandes dimensiones.

Para ello, se ha partido de un prototipo de cocina dotada de tres inductores móviles y se ha estudiado la influencia de la extensa gama de recipientes en las estrategias que se deben emplear. En base a este estudio se ha separado el problema en cuatro situaciones de recipientes en función de la temporalidad de la asignación y de la cobertura, así como de la cooperación entre los inductores. Las tres situaciones que se han abordado en el trabajo son: asignación y cobertura estática, asignación dinámica y cobertura estática y, por último, cobertura dinámica.

A lo largo del trabajo se han realizado las asignaciones de inductores a recipientes de forma satisfactoria, en base a un modelo de asignaciones de recursos discretas, optimizando el coste de asignación. El cálculo de este coste ha sido modificado y optimizado en base a la obtención de los mejores resultados en la simulación del algoritmo, cuyo objetivo es la igualdad entre la potencia media del recipiente en el tiempo y la consigna del usuario. Como parte indispensable del trabajo, se han estudiado y solucionado todos los inconvenientes derivados de incompatibilidades en la posición de los inductores, de tal forma que el algoritmo devuelve, en todo momento, posiciones asignadas a los inductores que son viables físicamente y que ofrecen una cobertura adecuada a los recipientes.

Para abordar la cobertura dinámica, primero se ha realizado una aproximación del modelo de distribución de potencia de los inductores para obtener un estudio más realista de la situación. Con el fin de obtener las trayectorias que uniformizan la potencia entregada a los recipientes, se ha realizado un estudio de los parámetros que caracterizan el calentamiento uniforme, mediante movimientos básicos de los inductores, como son dos trayectorias lineales paralelas o un movimiento circular. Con ellos se ha obtenido la distancia que pueden abarcar los inductores calentando un área uniformemente. En base a estos datos se han determinado las trayectorias a utilizar para calentar todos los recipientes planteados en el trabajo. Se han obtenido trayectorias satisfactorias para todas las formas de recipientes, aunque para recipientes rectangulares no se ha podido asegurar que la trayectoria calculada sea la óptima.

En cuanto a la viabilidad técnica del prototipo, con los estudios realizados se ha determinado que ante situaciones de recipientes y potencias estándar, las prestaciones del prototipo son similares a las de las cocinas convencionales, sin tener en cuenta el aumento cuantitativo de flexibilidad que aporta una cocina con inductores móviles. Por otro lado, ante situaciones con gran cantidad de recipientes y potencias elevadas, esta comparación se debe

realizar con cocinas que ofrezcan una flexibilidad similar y no frente a cocinas convencionales que no puedan calentar la situación propuesta. En la cobertura dinámica, se ha comprobado que el prototipo puede calentar cualquier recipiente con una distribución de densidad de potencia uniforme y una potencia total del recipiente igual a la consignada por el usuario.

Sin embargo, se han encontrado limitaciones físicas en el prototipo que imposibilitan el calentamiento de recipientes pequeños, que solo puedan ser calentados con el aro interior del inductor y que estén colocados en los laterales de la cocina de tal forma que el inductor pequeño no pueda acceder a ellos.

Con el trabajo realizado en este proyecto se han conseguido cumplir todos los objetivos propuestos inicialmente y se ha dado un paso más en la línea de investigación de las cocinas domésticas flexibles, más concretamente en la alternativa con inductores móviles, cuya demanda por el usuario sigue incrementándose.

El proyecto realizado ha constituido una gran labor de programación informática con una herramienta altamente optimizada para trabajar de forma matricial, *Matlab*, con la cual la forma de pensamiento de programación debe evolucionar, alcanzando otros niveles de abstracción. El desarrollo de este trabajo también se ha convertido en una gran aportación personal, incrementada por la posibilidad de realizar el trabajo fin de grado en una empresa y, más concretamente, la oportunidad de conocer el funcionamiento de un laboratorio de investigación, desarrollo e innovación como es el centro de competencia de inducción de BSH, compañía líder del sector.

Tras la realización de este trabajo se deja abierta la realización de tareas o mejoras para introducir en el algoritmo de simulación del prototipo de inductores móviles:

- Finalizar el estudio de las situaciones planteadas inicialmente, realizando el algoritmo de cobertura de recipientes mediante la cooperación de varios inductores.
- Realizar la planificación del calentamiento llevado a cabo en la asignación dinámica, de tal forma que se conozca el tiempo y la potencia entregada a cada recipiente, ayudaría a reducir el error de potencia en los recipientes.
- Mejorar los resultados obtenidos mediante la implementación de un modelo térmico de temperaturas que ayudaría a analizar de una forma más exacta el calentamiento uniforme de los recipientes.
- Estudiar la posibilidad de realizar cobertura dinámica en recipientes pequeños, que puedan ser calentados estáticamente, con el fin de homogeneizar la temperatura en el recipiente.
- Estudiar la posibilidad de calentamiento simultáneo de dos recipientes pequeños colindantes con un único inductor.
- Estudio comparativo entre el prototipo de inductores móviles y una cocina con prestaciones de flexibilidad similar como la cocina *free induction*.
- Implementar en el algoritmo el límite de variación de potencia instantánea según la normativa vigente de *flicker*.

Referencias

- [1] A. M. Green, "Operation of inverters supplying mutually coupled induction heating loads", *EEE Colloquium on Electromagnetics and Induction Heating*, no. 1996/264, pp. 4/1-4/3, 1996.
- [2] Manuel Carmona Martínez, "Síntesis óptima de mecanismos para inductores móviles de cocinas domésticas", Proyecto Final de Master. Director: Juan Llado. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Zaragoza, 2013.
- [3] Fernando Sanz Serrano, "Implementación de interfaz de control y evaluación de prototipo de inductor móvil en cocinas de inducción", Proyecto Final de Carrera. Director: Carlos Franco Gutiérrez y Sergio Llorente Gil. Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas. Universidad de Zaragoza, 2012.
- [4] Brian P. Gerkey y Maja J. Mataric, "A Formal Analysis and Taxonomy of Task Allocation in Multi-Robot Systems", *The International Journal of Robotics Research*, vol. 23, no. 9, pp. 939-954, Septiembre 2004.
- [5] Dimitri P. Bertsekas, "Nonlinear Programming", Ed. Athena Scientific. Second edition. 2003.
- [6] Alegre, E., Sánchez, L., Fernández, R. Á., Mostaza, J. C. *Procesamiento Digital de Imagen: fundamentos y prácticas con Matlab*. 2003
- [7] F. Sanz, C. Sagues, S. Llorente, Induction Heating Appliance with a Mobile Double-Coil Inductor, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 51 (2015) 1945–1952. doi:10.1109/TIA.2014.2367136.

Anexo A: Gráficas representativas de la evaluación de criterios en la asignación estática

A continuación se exponen los gráficos con los resultados de todos los criterios evaluados en la asignación estática. En ellos se aprecia que los criterios ponderados presentan un comportamiento muy similar y únicamente se encuentran diferencias significativas en los primeros criterios básicos, que han sido los expuestos en el trabajo.

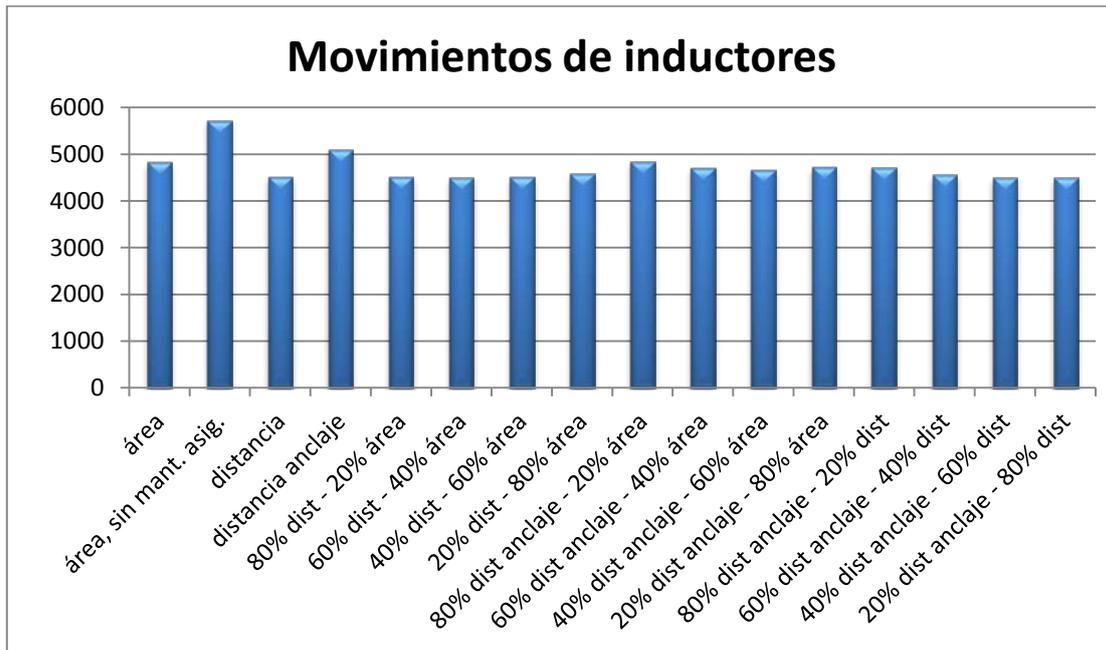


Figura A.1. Evaluación de criterios según el parámetro de movimiento de inductores



Figura A.2. Evaluación de criterios según el parámetro de distancia recorrida de inductores

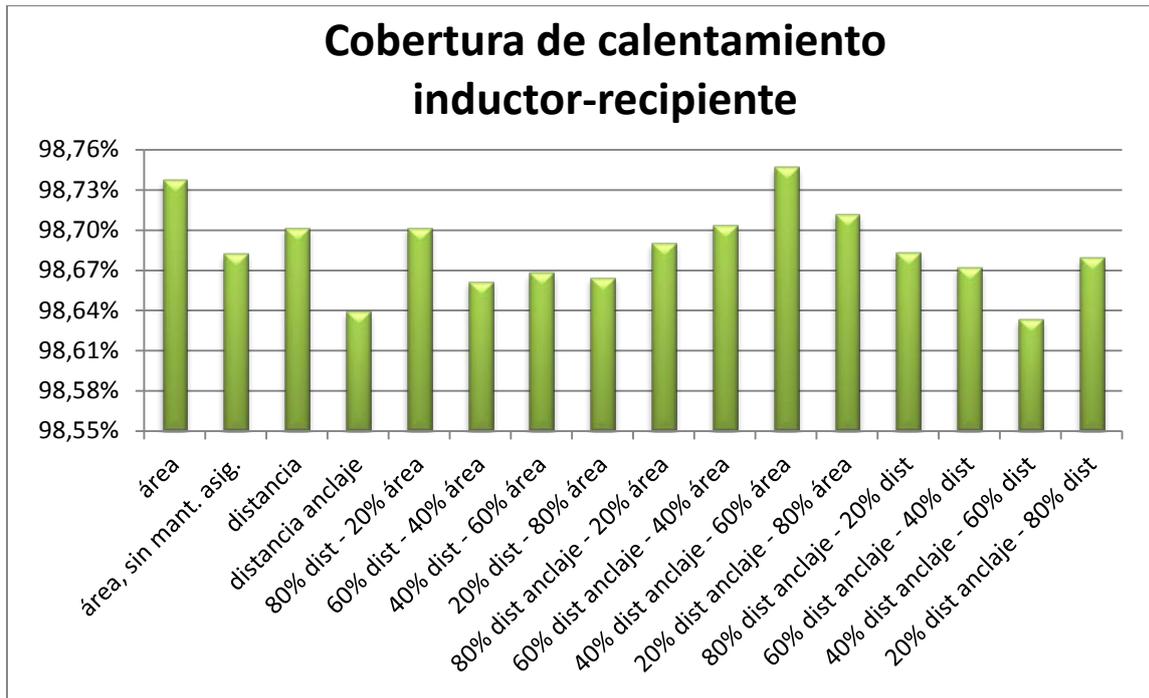


Figura A.3. Evaluación de criterios según el parámetro de cobertura de calentamiento

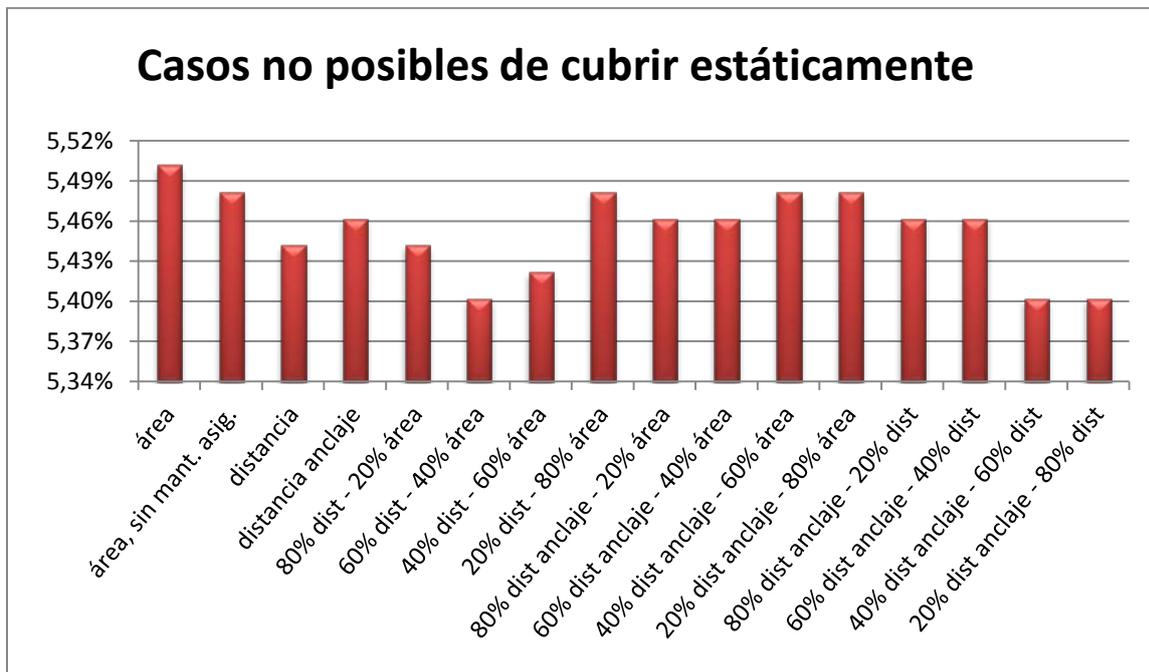


Figura A.4. Evaluación de criterios según el parámetro de asignación estática

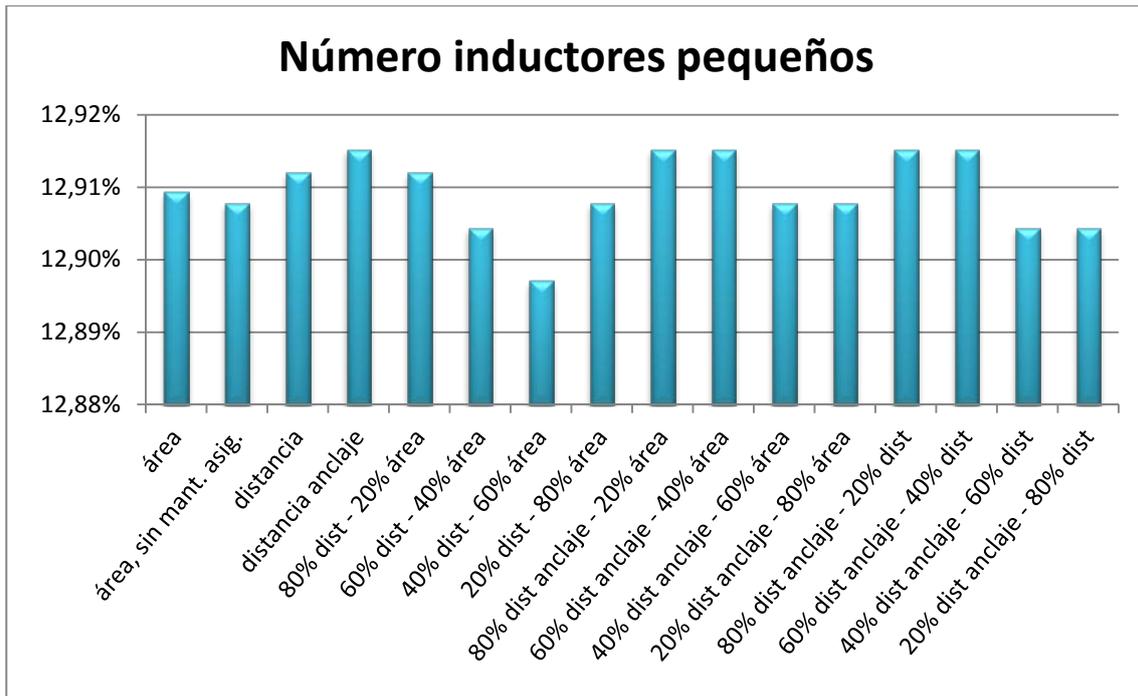


Figura A.5. Evaluación de criterios según del parámetro de inductores pequeños

Anexo B: Resultados del filtrado de combinaciones de pesos para obtener la asignación dinámica óptima

Con la finalidad de seleccionar las combinaciones de pesos favorables, se realiza un filtrado previo de todas las posibilidades simulándolos mediante una base de datos de diez situaciones, todas ellas con asignación dinámica y poseen entre cuatro y seis recipientes. Se han seleccionado los parámetros que menos situaciones no han podido calentar en un tiempo inferior al minuto y medio (Tabla B.1).

Tiempo medio	Tiempo máximo	Error potencia medio	Error potencia máximo	Nº situaciones no calentadas	Pesos (potencia, distancia, ind.peq, tiempo) y potencia dada
94	60,2	273%	353%	1	5 - 1 - 0 - 0 - 3
110,8	60,2	376%	434%	1	5 - 1 - 0 - 0 - 4
186,2	60,2	475%	637%	3	5 - 1 - 0 - 0 - 5
125,8	60,2	287%	434%	1	5 - 1 - 0 - 0 - 40
141,8	60,2	254%	313%	2	5 - 1 - 0 - 0,05 - 3
164,8	60,2	409%	459%	2	5 - 1 - 0 - 0,05 - 4
186,2	60,2	478%	616%	3	5 - 1 - 0 - 0,05 - 5
141,8	60,2	302%	443%	2	5 - 1 - 0 - 0,05 - 40
142,4	60,2	263%	337%	2	5 - 1 - 0 - 0,1 - 3
182,6	60,2	422%	459%	3	5 - 1 - 0 - 0,1 - 4
184,4	60,2	491%	627%	3	5 - 1 - 0 - 0,1 - 5
193,8	60,2	305%	458%	3	5 - 1 - 0 - 0,1 - 40
91,6	60,2	272%	363%	1	5 - 1 - 0,2 - 0 - 3
109,4	60,2	362%	435%	1	5 - 1 - 0,2 - 0 - 4
135,4	60,2	459%	625%	2	5 - 1 - 0,2 - 0 - 5
116	60,2	279%	431%	1	5 - 1 - 0,2 - 0 - 40
98,6	60,2	277%	363%	1	5 - 1 - 0,2 - 0,05 - 3
137,6	60,2	417%	459%	2	5 - 1 - 0,2 - 0,05 - 4
137,8	60,2	465%	625%	2	5 - 1 - 0,2 - 0,05 - 5
147	60,2	309%	442%	2	5 - 1 - 0,2 - 0,05 - 40
141,8	60,2	290%	421%	2	5 - 1 - 0,2 - 0,1 - 3
151,8	60,2	432%	472%	2	5 - 1 - 0,2 - 0,1 - 4
142,2	60,2	474%	625%	2	5 - 1 - 0,2 - 0,1 - 5
155,2	60,2	321%	472%	2	5 - 1 - 0,2 - 0,1 - 40
188,4	60,2	246%	306%	3	5 - 1 - 0,5 - 0 - 3
186,8	60,2	370%	455%	3	5 - 1 - 0,5 - 0 - 4
184,4	60,2	578%	810%	3	5 - 1 - 0,5 - 0 - 5
194,2	60,2	345%	648%	3	5 - 1 - 0,5 - 0 - 40
186,4	60,2	277%	338%	3	5 - 1 - 0,5 - 0,05 - 3
184	60,2	455%	678%	3	5 - 1 - 0,5 - 0,05 - 4

Anexo B: Resultados del filtrado de combinaciones de pesos para obtener la asignación
dinámica óptima

186,2	60,2	522%	799%	3	5 - 1 - 0,5 - 0,05 - 5
185,4	60,2	366%	678%	3	5 - 1 - 0,5 - 0,05 - 40
186	60,2	323%	367%	3	5 - 1 - 0,5 - 0,1 - 3
187,4	60,2	472%	675%	3	5 - 1 - 0,5 - 0,1 - 4
186,2	60,2	524%	808%	3	5 - 1 - 0,5 - 0,1 - 5
185,4	60,2	375%	675%	2	5 - 1 - 0,5 - 0,1 - 40
196	60,2	475%	550%	3	5 - 3 - 0 - 0 - 3
140,2	60,2	531%	761%	2	5 - 3 - 0 - 0 - 4
189	60,2	671%	947%	3	5 - 3 - 0 - 0 - 5
210	60,2	484%	761%	3	5 - 3 - 0 - 0 - 40
197,2	60,2	477%	548%	3	5 - 3 - 0 - 0,05 - 3
143	60,2	531%	762%	2	5 - 3 - 0 - 0,05 - 4
189	60,2	671%	947%	3	5 - 3 - 0 - 0,05 - 5
215,6	60,2	486%	762%	3	5 - 3 - 0 - 0,05 - 40
198,8	60,2	483%	547%	3	5 - 3 - 0 - 0,1 - 3
187,4	60,2	583%	762%	3	5 - 3 - 0 - 0,1 - 4
189,2	60,2	678%	947%	3	5 - 3 - 0 - 0,1 - 5
224,2	60,2	494%	762%	3	5 - 3 - 0 - 0,1 - 40
196	60,2	470%	559%	3	5 - 3 - 0,2 - 0 - 3
162,8	60,2	563%	763%	2	5 - 3 - 0,2 - 0 - 4
189	60,2	671%	948%	3	5 - 3 - 0,2 - 0 - 5
210	60,2	476%	763%	3	5 - 3 - 0,2 - 0 - 40
147,2	60,2	464%	559%	2	5 - 3 - 0,2 - 0,05 - 3
187,4	60,2	578%	763%	3	5 - 3 - 0,2 - 0,05 - 4
189	60,2	672%	948%	3	5 - 3 - 0,2 - 0,05 - 5
165,6	60,2	469%	763%	2	5 - 3 - 0,2 - 0,05 - 40
149,4	60,2	466%	557%	2	5 - 3 - 0,2 - 0,1 - 3
187,4	60,2	583%	763%	3	5 - 3 - 0,2 - 0,1 - 4
189,2	60,2	679%	948%	3	5 - 3 - 0,2 - 0,1 - 5
174,8	60,2	473%	763%	2	5 - 3 - 0,2 - 0,1 - 40
150	60,2	472%	627%	2	5 - 3 - 0,5 - 0 - 3
187	60,2	583%	768%	3	5 - 3 - 0,5 - 0 - 4
189	60,2	671%	948%	3	5 - 3 - 0,5 - 0 - 5
164	60,2	459%	768%	2	5 - 3 - 0,5 - 0 - 40
189,8	60,2	476%	627%	3	5 - 3 - 0,5 - 0,05 - 3
187,4	60,2	584%	768%	3	5 - 3 - 0,5 - 0,05 - 4
189	60,2	672%	948%	3	5 - 3 - 0,5 - 0,05 - 5
171,2	60,2	460%	768%	2	5 - 3 - 0,5 - 0,05 - 40
143,4	60,2	473%	627%	2	5 - 3 - 0,5 - 0,1 - 3
187,4	60,2	584%	769%	3	5 - 3 - 0,5 - 0,1 - 4
189,2	60,2	679%	949%	3	5 - 3 - 0,5 - 0,1 - 5
181,4	60,2	463%	769%	2	5 - 3 - 0,5 - 0,1 - 40
253,2	60,2	560%	627%	4	5 - 5 - 0 - 0 - 3
247,2	60,2	669%	813%	4	5 - 5 - 0 - 0 - 4

Anexo B: Resultados del filtrado de combinaciones de pesos para obtener la asignación
dinámica óptima

246,2	60,2	741%	1010%	4	5 - 5 - 0 - 0 - 5
247,2	60,2	539%	787%	4	5 - 5 - 0 - 0 - 40
254,2	60,2	560%	627%	4	5 - 5 - 0 - 0,05 - 3
247,6	60,2	674%	813%	4	5 - 5 - 0 - 0,05 - 4
246,4	60,2	748%	1010%	4	5 - 5 - 0 - 0,05 - 5
197,6	60,2	546%	787%	3	5 - 5 - 0 - 0,05 - 40
180,6	60,2	354%	627%	3	5 - 5 - 0 - 0,1 - 3
180,6	60,2	415%	813%	3	5 - 5 - 0 - 0,1 - 4
180,6	60,2	462%	1010%	3	5 - 5 - 0 - 0,1 - 5
198,6	60,2	548%	788%	3	5 - 5 - 0 - 0,1 - 40
180,6	60,2	353%	627%	3	5 - 5 - 0,2 - 0 - 3
180,6	60,2	409%	813%	3	5 - 5 - 0,2 - 0 - 4
180,6	60,2	459%	1010%	3	5 - 5 - 0,2 - 0 - 5
187	60,2	417%	783%	3	5 - 5 - 0,2 - 0 - 40
180,6	60,2	351%	627%	3	5 - 5 - 0,2 - 0,05 - 3
180,6	60,2	410%	813%	3	5 - 5 - 0,2 - 0,05 - 4
180,6	60,2	460%	1010%	3	5 - 5 - 0,2 - 0,05 - 5
197,6	60,2	545%	783%	3	5 - 5 - 0,2 - 0,05 - 40
180,6	60,2	350%	627%	3	5 - 5 - 0,2 - 0,1 - 3
180,6	60,2	411%	813%	3	5 - 5 - 0,2 - 0,1 - 4
180,6	60,2	460%	1010%	3	5 - 5 - 0,2 - 0,1 - 5
198,6	60,2	547%	784%	3	5 - 5 - 0,2 - 0,1 - 40
180,6	60,2	361%	627%	3	5 - 5 - 0,5 - 0 - 3
180,6	60,2	404%	813%	3	5 - 5 - 0,5 - 0 - 4
180,6	60,2	459%	1010%	3	5 - 5 - 0,5 - 0 - 5
187	60,2	417%	783%	3	5 - 5 - 0,5 - 0 - 40
180,6	60,2	365%	627%	3	5 - 5 - 0,5 - 0,05 - 3
180,6	60,2	404%	813%	3	5 - 5 - 0,5 - 0,05 - 4
180,6	60,2	459%	1010%	3	5 - 5 - 0,5 - 0,05 - 5
197,6	60,2	545%	783%	3	5 - 5 - 0,5 - 0,05 - 40
180,6	60,2	365%	627%	3	5 - 5 - 0,5 - 0,1 - 3
180,6	60,2	405%	813%	3	5 - 5 - 0,5 - 0,1 - 4
180,6	60,2	459%	1010%	3	5 - 5 - 0,5 - 0,1 - 5
198,6	60,2	547%	784%	3	5 - 5 - 0,5 - 0,1 - 40
152,2	60,2	209%	353%	2	10 - 1 - 0 - 0 - 3
134,6	60,2	295%	383%	1	10 - 1 - 0 - 0 - 4
136,8	60,2	341%	474%	2	10 - 1 - 0 - 0 - 5
119,2	60,2	231%	271%	1	10 - 1 - 0 - 0 - 40
106,2	60,2	235%	337%	1	10 - 1 - 0 - 0,05 - 3
120	60,2	327%	459%	1	10 - 1 - 0 - 0,05 - 4
134,4	60,2	418%	481%	2	10 - 1 - 0 - 0,05 - 5
139,2	60,2	236%	280%	1	10 - 1 - 0 - 0,05 - 40
144,2	60,2	196%	213%	1	10 - 1 - 0 - 0,1 - 3
147,6	60,2	328%	449%	1	10 - 1 - 0 - 0,1 - 4

Anexo B: Resultados del filtrado de combinaciones de pesos para obtener la asignación
dinámica óptima

148	60,2	467%	550%	2	10 - 1 - 0 - 0,1 - 5
133,8	60,2	245%	335%	1	10 - 1 - 0 - 0,1 - 40
149,6	60,2	227%	327%	2	10 - 1 - 0,2 - 0 - 3
149,4	60,2	279%	381%	2	10 - 1 - 0,2 - 0 - 4
119,6	60,2	352%	448%	1	10 - 1 - 0,2 - 0 - 5
151,8	60,2	203%	295%	2	10 - 1 - 0,2 - 0 - 40
151,4	60,2	203%	238%	2	10 - 1 - 0,2 - 0,05 - 3
139,6	60,2	340%	457%	2	10 - 1 - 0,2 - 0,05 - 4
135,8	60,2	422%	548%	2	10 - 1 - 0,2 - 0,05 - 5
173	60,2	236%	346%	2	10 - 1 - 0,2 - 0,05 - 40
177,4	60,2	206%	238%	2	10 - 1 - 0,2 - 0,1 - 3
144,2	60,2	310%	457%	1	10 - 1 - 0,2 - 0,1 - 4
135,4	60,2	448%	548%	2	10 - 1 - 0,2 - 0,1 - 5
137	60,2	248%	334%	1	10 - 1 - 0,2 - 0,1 - 40
156,6	60,2	191%	225%	2	10 - 1 - 0,5 - 0 - 3
182,8	60,2	329%	358%	3	10 - 1 - 0,5 - 0 - 4
183,6	60,2	405%	621%	3	10 - 1 - 0,5 - 0 - 5
139,6	60,2	210%	295%	2	10 - 1 - 0,5 - 0 - 40
171,4	60,2	248%	381%	2	10 - 1 - 0,5 - 0,05 - 3
173	60,2	341%	457%	2	10 - 1 - 0,5 - 0,05 - 4
179	60,2	424%	651%	2	10 - 1 - 0,5 - 0,05 - 5
184,6	60,2	263%	363%	3	10 - 1 - 0,5 - 0,05 - 40
157,2	60,2	217%	268%	2	10 - 1 - 0,5 - 0,1 - 3
184,2	60,2	346%	457%	3	10 - 1 - 0,5 - 0,1 - 4
135,2	60,2	382%	458%	2	10 - 1 - 0,5 - 0,1 - 5
184,6	60,2	267%	353%	3	10 - 1 - 0,5 - 0,1 - 40
147	60,2	328%	499%	2	10 - 3 - 0 - 0 - 3
184,2	60,2	449%	589%	3	10 - 3 - 0 - 0 - 4
131,4	60,2	484%	625%	2	10 - 3 - 0 - 0 - 5
142,6	60,2	346%	584%	2	10 - 3 - 0 - 0 - 40
143,8	60,2	261%	303%	2	10 - 3 - 0 - 0,05 - 3
184,2	60,2	449%	589%	3	10 - 3 - 0 - 0,05 - 4
131,8	60,2	485%	625%	2	10 - 3 - 0 - 0,05 - 5
143,2	60,2	345%	580%	2	10 - 3 - 0 - 0,05 - 40
148,8	60,2	277%	329%	2	10 - 3 - 0 - 0,1 - 3
186,8	60,2	446%	587%	3	10 - 3 - 0 - 0,1 - 4
132	60,2	504%	690%	2	10 - 3 - 0 - 0,1 - 5
173,4	60,2	340%	580%	2	10 - 3 - 0 - 0,1 - 40
183,4	60,2	326%	512%	3	10 - 3 - 0,2 - 0 - 3
170,2	60,2	430%	584%	2	10 - 3 - 0,2 - 0 - 4
145,4	60,2	486%	625%	2	10 - 3 - 0,2 - 0 - 5
142,4	60,2	389%	733%	2	10 - 3 - 0,2 - 0 - 40
185,4	60,2	264%	301%	2	10 - 3 - 0,2 - 0,05 - 3
184,2	60,2	450%	593%	3	10 - 3 - 0,2 - 0,05 - 4

Anexo B: Resultados del filtrado de combinaciones de pesos para obtener la asignación
dinámica óptima

148,2	60,2	487%	625%	2	10 - 3 - 0,2 - 0,05 - 5
145,4	60,2	393%	729%	2	10 - 3 - 0,2 - 0,05 - 40
189	60,2	273%	311%	3	10 - 3 - 0,2 - 0,1 - 3
186,8	60,2	432%	584%	3	10 - 3 - 0,2 - 0,1 - 4
149,4	60,2	487%	625%	2	10 - 3 - 0,2 - 0,1 - 5
186,2	60,2	341%	584%	3	10 - 3 - 0,2 - 0,1 - 40
171,8	60,2	260%	294%	2	10 - 3 - 0,5 - 0 - 3
130,4	60,2	442%	622%	2	10 - 3 - 0,5 - 0 - 4
185,2	60,2	472%	625%	3	10 - 3 - 0,5 - 0 - 5
168,6	60,2	393%	679%	2	10 - 3 - 0,5 - 0 - 40
145,6	60,2	272%	334%	1	10 - 3 - 0,5 - 0,05 - 3
130,8	60,2	440%	622%	2	10 - 3 - 0,5 - 0,05 - 4
183,4	60,2	496%	625%	2	10 - 3 - 0,5 - 0,05 - 5
170,4	60,2	392%	680%	2	10 - 3 - 0,5 - 0,05 - 40
148	60,2	282%	348%	1	10 - 3 - 0,5 - 0,1 - 3
131,2	60,2	438%	622%	2	10 - 3 - 0,5 - 0,1 - 4
185,2	60,2	537%	806%	3	10 - 3 - 0,5 - 0,1 - 5
186,6	60,2	356%	622%	3	10 - 3 - 0,5 - 0,1 - 40
190,6	60,2	467%	564%	3	10 - 5 - 0 - 0 - 3
190,4	60,2	549%	657%	3	10 - 5 - 0 - 0 - 4
190	60,2	647%	844%	3	10 - 5 - 0 - 0 - 5
218,6	60,2	440%	655%	3	10 - 5 - 0 - 0 - 40
191	60,2	468%	564%	3	10 - 5 - 0 - 0,05 - 3
190,4	60,2	549%	658%	3	10 - 5 - 0 - 0,05 - 4
190	60,2	647%	844%	3	10 - 5 - 0 - 0,05 - 5
220,8	60,2	442%	655%	3	10 - 5 - 0 - 0,05 - 40
191,2	60,2	470%	564%	3	10 - 5 - 0 - 0,1 - 3
190,6	60,2	552%	660%	3	10 - 5 - 0 - 0,1 - 4
186,6	60,2	637%	944%	3	10 - 5 - 0 - 0,1 - 5
222,8	60,2	443%	655%	3	10 - 5 - 0 - 0,1 - 40
190,6	60,2	453%	567%	3	10 - 5 - 0,2 - 0 - 3
190,4	60,2	550%	658%	3	10 - 5 - 0,2 - 0 - 4
186,4	60,2	631%	944%	3	10 - 5 - 0,2 - 0 - 5
192,2	60,2	437%	658%	3	10 - 5 - 0,2 - 0 - 40
191	60,2	453%	567%	3	10 - 5 - 0,2 - 0,05 - 3
190,4	60,2	550%	659%	3	10 - 5 - 0,2 - 0,05 - 4
186,4	60,2	646%	944%	3	10 - 5 - 0,2 - 0,05 - 5
219,4	60,2	429%	658%	3	10 - 5 - 0,2 - 0,05 - 40
176,6	60,2	460%	567%	2	10 - 5 - 0,2 - 0,1 - 3
190,6	60,2	552%	661%	3	10 - 5 - 0,2 - 0,1 - 4
186,6	60,2	654%	944%	3	10 - 5 - 0,2 - 0,1 - 5
221,6	60,2	429%	657%	3	10 - 5 - 0,2 - 0,1 - 40
190,6	60,2	453%	573%	3	10 - 5 - 0,5 - 0 - 3
162,4	60,2	539%	654%	2	10 - 5 - 0,5 - 0 - 4

Anexo B: Resultados del filtrado de combinaciones de pesos para obtener la asignación
dinámica óptima

186,4	60,2	645%	944%	3	10 - 5 - 0,5 - 0 - 5
192,2	60,2	436%	654%	3	10 - 5 - 0,5 - 0 - 40
191	60,2	452%	573%	3	10 - 5 - 0,5 - 0,05 - 3
167,4	60,2	536%	654%	2	10 - 5 - 0,5 - 0,05 - 4
186,4	60,2	646%	944%	3	10 - 5 - 0,5 - 0,05 - 5
191,2	60,2	438%	654%	3	10 - 5 - 0,5 - 0,05 - 40
191,2	60,2	452%	570%	3	10 - 5 - 0,5 - 0,1 - 3
174	60,2	533%	654%	2	10 - 5 - 0,5 - 0,1 - 4
186,6	60,2	654%	944%	3	10 - 5 - 0,5 - 0,1 - 5
191,8	60,2	439%	654%	3	10 - 5 - 0,5 - 0,1 - 40
137,8	60,2	196%	272%	1	15 - 1 - 0 - 0 - 3
92,2	40,2	281%	347%	0	15 - 1 - 0 - 0 - 4
148,4	60,2	313%	392%	2	15 - 1 - 0 - 0 - 5
77	27,8	180%	217%	0	15 - 1 - 0 - 0 - 40
125,6	60,2	174%	196%	1	15 - 1 - 0 - 0,05 - 3
85,6	35,6	261%	327%	0	15 - 1 - 0 - 0,05 - 4
153,6	60,2	329%	403%	2	15 - 1 - 0 - 0,05 - 5
86	35,6	201%	310%	0	15 - 1 - 0 - 0,05 - 40
108,2	60,2	227%	363%	1	15 - 1 - 0 - 0,1 - 3
124,6	60,2	271%	299%	1	15 - 1 - 0 - 0,1 - 4
117,4	60,2	325%	388%	1	15 - 1 - 0 - 0,1 - 5
114,6	60,2	194%	253%	1	15 - 1 - 0 - 0,1 - 40
105,6	60,2	174%	226%	1	15 - 1 - 0,2 - 0 - 3
70,4	26,6	233%	323%	0	15 - 1 - 0,2 - 0 - 4
113,8	60,2	351%	545%	1	15 - 1 - 0,2 - 0 - 5
61,6	26,6	186%	248%	0	15 - 1 - 0,2 - 0 - 40
142,8	60,2	193%	272%	1	15 - 1 - 0,2 - 0,05 - 3
118	60,2	256%	309%	1	15 - 1 - 0,2 - 0,05 - 4
139,6	60,2	348%	545%	2	15 - 1 - 0,2 - 0,05 - 5
112,8	60,2	181%	254%	1	15 - 1 - 0,2 - 0,05 - 40
97,8	60,2	195%	229%	1	15 - 1 - 0,2 - 0,1 - 3
93,6	60,2	254%	328%	1	15 - 1 - 0,2 - 0,1 - 4
140,6	60,2	365%	386%	2	15 - 1 - 0,2 - 0,1 - 5
111,6	60,2	181%	261%	1	15 - 1 - 0,2 - 0,1 - 40
152,2	60,2	163%	172%	2	15 - 1 - 0,5 - 0 - 3
142,4	60,2	297%	327%	2	15 - 1 - 0,5 - 0 - 4
158,8	60,2	363%	423%	2	15 - 1 - 0,5 - 0 - 5
186	60,2	219%	298%	3	15 - 1 - 0,5 - 0 - 40
175,4	60,2	196%	272%	2	15 - 1 - 0,5 - 0,05 - 3
138,2	60,2	274%	328%	2	15 - 1 - 0,5 - 0,05 - 4
134,8	60,2	381%	550%	1	15 - 1 - 0,5 - 0,05 - 5
149,6	60,2	178%	250%	2	15 - 1 - 0,5 - 0,05 - 40
145,2	60,2	185%	215%	1	15 - 1 - 0,5 - 0,1 - 3
94,8	60,2	291%	480%	1	15 - 1 - 0,5 - 0,1 - 4

Anexo B: Resultados del filtrado de combinaciones de pesos para obtener la asignación
dinámica óptima

169,4	60,2	391%	550%	1	15 - 1 - 0,5 - 0,1 - 5
147,2	60,2	187%	260%	2	15 - 1 - 0,5 - 0,1 - 40
94	60,2	273%	353%	1	15 - 3 - 0 - 0 - 3
110,8	60,2	376%	434%	1	15 - 3 - 0 - 0 - 4
186,2	60,2	475%	637%	3	15 - 3 - 0 - 0 - 5
125,8	60,2	287%	434%	1	15 - 3 - 0 - 0 - 40
95,8	60,2	273%	353%	1	15 - 3 - 0 - 0,05 - 3
124,4	60,2	374%	435%	1	15 - 3 - 0 - 0,05 - 4
186,2	60,2	474%	634%	3	15 - 3 - 0 - 0,05 - 5
134,6	60,2	283%	435%	1	15 - 3 - 0 - 0,05 - 40
144	60,2	227%	280%	2	15 - 3 - 0 - 0,1 - 3
145,6	60,2	421%	459%	2	15 - 3 - 0 - 0,1 - 4
186,2	60,2	475%	634%	3	15 - 3 - 0 - 0,1 - 5
155,8	60,2	307%	435%	2	15 - 3 - 0 - 0,1 - 40
115,4	60,2	271%	353%	1	15 - 3 - 0,2 - 0 - 3
112,4	60,2	368%	434%	1	15 - 3 - 0,2 - 0 - 4
186,2	60,2	482%	613%	3	15 - 3 - 0,2 - 0 - 5
114,8	60,2	283%	433%	1	15 - 3 - 0,2 - 0 - 40
94,6	60,2	276%	353%	1	15 - 3 - 0,2 - 0,05 - 3
137,6	60,2	412%	459%	2	15 - 3 - 0,2 - 0,05 - 4
186,2	60,2	479%	607%	3	15 - 3 - 0,2 - 0,05 - 5
154	60,2	302%	433%	2	15 - 3 - 0,2 - 0,05 - 40
141,6	60,2	286%	353%	2	15 - 3 - 0,2 - 0,1 - 3
143,4	60,2	410%	459%	2	15 - 3 - 0,2 - 0,1 - 4
186,2	60,2	477%	607%	3	15 - 3 - 0,2 - 0,1 - 5
151,6	60,2	305%	432%	2	15 - 3 - 0,2 - 0,1 - 40
91,6	60,2	272%	363%	1	15 - 3 - 0,5 - 0 - 3
136,2	60,2	365%	435%	2	15 - 3 - 0,5 - 0 - 4
134,4	60,2	453%	621%	2	15 - 3 - 0,5 - 0 - 5
143,6	60,2	286%	434%	2	15 - 3 - 0,5 - 0 - 40
92,8	60,2	275%	363%	1	15 - 3 - 0,5 - 0,05 - 3
136,8	60,2	368%	435%	2	15 - 3 - 0,5 - 0,05 - 4
135,2	60,2	457%	625%	2	15 - 3 - 0,5 - 0,05 - 5
143,2	60,2	283%	435%	2	15 - 3 - 0,5 - 0,05 - 40
94	60,2	274%	363%	1	15 - 3 - 0,5 - 0,1 - 3
139,8	60,2	369%	438%	2	15 - 3 - 0,5 - 0,1 - 4
135,4	60,2	460%	625%	2	15 - 3 - 0,5 - 0,1 - 5
144,2	60,2	286%	439%	2	15 - 3 - 0,5 - 0,1 - 40
179,4	60,2	316%	464%	2	15 - 5 - 0 - 0 - 3
187	60,2	447%	590%	3	15 - 5 - 0 - 0 - 4
132	60,2	507%	707%	2	15 - 5 - 0 - 0 - 5
172	60,2	342%	580%	2	15 - 5 - 0 - 0 - 40
183	60,2	320%	477%	2	15 - 5 - 0 - 0,05 - 3
187,4	60,2	445%	580%	3	15 - 5 - 0 - 0,05 - 4

Anexo B: Resultados del filtrado de combinaciones de pesos para obtener la asignación
dinámica óptima

132,8	60,2	506%	702%	2	15 - 5 - 0 - 0,05 - 5
175,6	60,2	344%	580%	2	15 - 5 - 0 - 0,05 - 40
144,2	60,2	303%	374%	1	15 - 5 - 0 - 0,1 - 3
187,4	60,2	446%	580%	3	15 - 5 - 0 - 0,1 - 4
133,2	60,2	505%	695%	2	15 - 5 - 0 - 0,1 - 5
178,8	60,2	344%	580%	2	15 - 5 - 0 - 0,1 - 40
193,8	60,2	309%	441%	3	15 - 5 - 0,2 - 0 - 3
187	60,2	441%	580%	3	15 - 5 - 0,2 - 0 - 4
134,6	60,2	499%	660%	2	15 - 5 - 0,2 - 0 - 5
186,4	60,2	340%	580%	3	15 - 5 - 0,2 - 0 - 40
193,8	60,2	314%	452%	3	15 - 5 - 0,2 - 0,05 - 3
187,4	60,2	435%	580%	3	15 - 5 - 0,2 - 0,05 - 4
135,8	60,2	496%	646%	2	15 - 5 - 0,2 - 0,05 - 5
186,4	60,2	343%	580%	3	15 - 5 - 0,2 - 0,05 - 40
194,2	60,2	319%	462%	3	15 - 5 - 0,2 - 0,1 - 3
187,4	60,2	435%	580%	3	15 - 5 - 0,2 - 0,1 - 4
137	60,2	494%	633%	2	15 - 5 - 0,2 - 0,1 - 5
186,4	60,2	345%	580%	3	15 - 5 - 0,2 - 0,1 - 40
193,8	60,2	307%	421%	3	15 - 5 - 0,5 - 0 - 3
134,8	60,2	430%	622%	2	15 - 5 - 0,5 - 0 - 4
158,2	60,2	485%	625%	2	15 - 5 - 0,5 - 0 - 5
186,4	60,2	351%	622%	3	15 - 5 - 0,5 - 0 - 40
193,8	60,2	311%	427%	3	15 - 5 - 0,5 - 0,05 - 3
135,6	60,2	430%	622%	2	15 - 5 - 0,5 - 0,05 - 4
158,6	60,2	488%	625%	2	15 - 5 - 0,5 - 0,05 - 5
186,4	60,2	354%	622%	3	15 - 5 - 0,5 - 0,05 - 40
156,2	60,2	326%	433%	2	15 - 5 - 0,5 - 0,1 - 3
136	60,2	428%	622%	2	15 - 5 - 0,5 - 0,1 - 4
160,2	60,2	488%	625%	2	15 - 5 - 0,5 - 0,1 - 5
148,4	60,2	366%	622%	2	15 - 5 - 0,5 - 0,1 - 40
149,6	60,2	186%	221%	2	20 - 1 - 0 - 0 - 3
54	17,8	265%	380%	0	20 - 1 - 0 - 0 - 4
87,8	37	292%	423%	0	20 - 1 - 0 - 0 - 5
56,6	17,8	165%	194%	0	20 - 1 - 0 - 0 - 40
153	60,2	179%	210%	2	20 - 1 - 0 - 0,05 - 3
66,8	27,2	272%	347%	0	20 - 1 - 0 - 0,05 - 4
92,8	40,8	331%	423%	0	20 - 1 - 0 - 0,05 - 5
61	19,4	167%	198%	0	20 - 1 - 0 - 0,05 - 40
99,6	60,2	187%	232%	1	20 - 1 - 0 - 0,1 - 3
98,8	60,2	303%	459%	1	20 - 1 - 0 - 0,1 - 4
85	60,2	359%	550%	1	20 - 1 - 0 - 0,1 - 5
103,6	60,2	197%	267%	1	20 - 1 - 0 - 0,1 - 40
99	39,2	174%	231%	0	20 - 1 - 0,2 - 0 - 3
72,6	25,2	230%	327%	0	20 - 1 - 0,2 - 0 - 4

Anexo B: Resultados del filtrado de combinaciones de pesos para obtener la asignación
dinámica óptima

98,8	60,2	292%	386%	1	20 - 1 - 0,2 - 0 - 5
60,2	24,8	174%	225%	0	20 - 1 - 0,2 - 0 - 40
152,6	60,2	172%	220%	2	20 - 1 - 0,2 - 0,05 - 3
86,2	41,8	261%	348%	0	20 - 1 - 0,2 - 0,05 - 4
104	60,2	288%	386%	1	20 - 1 - 0,2 - 0,05 - 5
81,8	41,8	189%	281%	0	20 - 1 - 0,2 - 0,05 - 40
105,2	43	197%	272%	0	20 - 1 - 0,2 - 0,1 - 3
69,6	27,4	269%	347%	0	20 - 1 - 0,2 - 0,1 - 4
138	60,2	276%	362%	1	20 - 1 - 0,2 - 0,1 - 5
63,8	21,6	184%	257%	0	20 - 1 - 0,2 - 0,1 - 40
146,6	60,2	165%	178%	2	20 - 1 - 0,5 - 0 - 3
132,4	60,2	258%	348%	1	20 - 1 - 0,5 - 0 - 4
139,4	60,2	313%	386%	2	20 - 1 - 0,5 - 0 - 5
155,8	56,8	184%	255%	0	20 - 1 - 0,5 - 0 - 40
152,2	60,2	179%	199%	1	20 - 1 - 0,5 - 0,05 - 3
183	60,2	302%	480%	3	20 - 1 - 0,5 - 0,05 - 4
129	60,2	316%	386%	1	20 - 1 - 0,5 - 0,05 - 5
144,6	60,2	186%	269%	2	20 - 1 - 0,5 - 0,05 - 40
146	60,2	187%	203%	2	20 - 1 - 0,5 - 0,1 - 3
142,6	60,2	276%	347%	2	20 - 1 - 0,5 - 0,1 - 4
152,2	60,2	327%	416%	2	20 - 1 - 0,5 - 0,1 - 5
144,2	60,2	193%	268%	2	20 - 1 - 0,5 - 0,1 - 40
105,4	60,2	224%	231%	1	20 - 3 - 0 - 0 - 3
136,6	60,2	324%	421%	2	20 - 3 - 0 - 0 - 4
156,6	60,2	458%	548%	2	20 - 3 - 0 - 0 - 5
142,2	60,2	230%	340%	2	20 - 3 - 0 - 0 - 40
109	60,2	223%	232%	1	20 - 3 - 0 - 0,05 - 3
137,2	60,2	328%	424%	2	20 - 3 - 0 - 0,05 - 4
165,4	60,2	460%	548%	2	20 - 3 - 0 - 0,05 - 5
143,8	60,2	235%	358%	2	20 - 3 - 0 - 0,05 - 40
113	60,2	223%	232%	1	20 - 3 - 0 - 0,1 - 3
137,8	60,2	322%	421%	2	20 - 3 - 0 - 0,1 - 4
171,4	60,2	465%	548%	2	20 - 3 - 0 - 0,1 - 5
165,4	60,2	250%	371%	2	20 - 3 - 0 - 0,1 - 40
99,4	60,2	234%	272%	1	20 - 3 - 0,2 - 0 - 3
151,4	60,2	301%	368%	2	20 - 3 - 0,2 - 0 - 4
151,6	60,2	451%	548%	2	20 - 3 - 0,2 - 0 - 5
156,6	60,2	226%	342%	2	20 - 3 - 0,2 - 0 - 40
153,4	60,2	218%	237%	2	20 - 3 - 0,2 - 0,05 - 3
152,8	60,2	307%	381%	2	20 - 3 - 0,2 - 0,05 - 4
157,2	60,2	450%	548%	2	20 - 3 - 0,2 - 0,05 - 5
157,2	60,2	232%	359%	2	20 - 3 - 0,2 - 0,05 - 40
104,6	60,2	226%	244%	1	20 - 3 - 0,2 - 0,1 - 3
133	60,2	333%	388%	2	20 - 3 - 0,2 - 0,1 - 4

Anexo B: Resultados del filtrado de combinaciones de pesos para obtener la asignación
dinámica óptima

133,4	60,2	485%	548%	2	20 - 3 - 0,2 - 0,1 - 5
167,4	60,2	277%	500%	2	20 - 3 - 0,2 - 0,1 - 40
97,8	60,2	218%	237%	1	20 - 3 - 0,5 - 0 - 3
183,4	60,2	331%	391%	3	20 - 3 - 0,5 - 0 - 4
150,4	60,2	458%	570%	2	20 - 3 - 0,5 - 0 - 5
144,8	60,2	246%	343%	2	20 - 3 - 0,5 - 0 - 40
116,6	58,4	219%	241%	0	20 - 3 - 0,5 - 0,05 - 3
183,4	60,2	332%	393%	3	20 - 3 - 0,5 - 0,05 - 4
143,8	60,2	480%	558%	2	20 - 3 - 0,5 - 0,05 - 5
157,2	60,2	243%	356%	2	20 - 3 - 0,5 - 0,05 - 40
116	59,6	221%	248%	0	20 - 3 - 0,5 - 0,1 - 3
132,4	60,2	341%	404%	2	20 - 3 - 0,5 - 0,1 - 4
142,8	60,2	508%	558%	2	20 - 3 - 0,5 - 0,1 - 5
141,8	60,2	246%	375%	2	20 - 3 - 0,5 - 0,1 - 40
109,8	60,2	257%	317%	1	20 - 5 - 0 - 0 - 3
155,2	60,2	446%	532%	2	20 - 5 - 0 - 0 - 4
186,6	60,2	480%	608%	3	20 - 5 - 0 - 0 - 5
155,2	60,2	340%	532%	2	20 - 5 - 0 - 0 - 40
111,8	60,2	258%	327%	1	20 - 5 - 0 - 0,05 - 3
162,2	60,2	445%	532%	2	20 - 5 - 0 - 0,05 - 4
184,4	60,2	495%	687%	3	20 - 5 - 0 - 0,05 - 5
155,6	60,2	342%	532%	2	20 - 5 - 0 - 0,05 - 40
114	60,2	261%	337%	1	20 - 5 - 0 - 0,1 - 3
169,4	60,2	449%	532%	2	20 - 5 - 0 - 0,1 - 4
184,4	60,2	495%	690%	3	20 - 5 - 0 - 0,1 - 5
163,2	60,2	336%	532%	2	20 - 5 - 0 - 0,1 - 40
110,6	60,2	255%	314%	1	20 - 5 - 0,2 - 0 - 3
159	60,2	454%	533%	2	20 - 5 - 0,2 - 0 - 4
184,4	60,2	496%	686%	3	20 - 5 - 0,2 - 0 - 5
162,6	60,2	339%	533%	2	20 - 5 - 0,2 - 0 - 40
116,6	60,2	249%	318%	1	20 - 5 - 0,2 - 0,05 - 3
166	60,2	454%	533%	2	20 - 5 - 0,2 - 0,05 - 4
184,4	60,2	498%	694%	3	20 - 5 - 0,2 - 0,05 - 5
164,2	60,2	343%	533%	2	20 - 5 - 0,2 - 0,05 - 40
118,8	60,2	253%	331%	1	20 - 5 - 0,2 - 0,1 - 3
166,2	60,2	458%	533%	2	20 - 5 - 0,2 - 0,1 - 4
130,6	60,2	495%	680%	2	20 - 5 - 0,2 - 0,1 - 5
164,8	60,2	348%	533%	2	20 - 5 - 0,2 - 0,1 - 40
183,4	60,2	291%	402%	3	20 - 5 - 0,5 - 0 - 3
152,4	60,2	468%	578%	2	20 - 5 - 0,5 - 0 - 4
135,8	60,2	464%	625%	2	20 - 5 - 0,5 - 0 - 5
145	60,2	360%	578%	2	20 - 5 - 0,5 - 0 - 40
183,4	60,2	289%	403%	3	20 - 5 - 0,5 - 0,05 - 3
177,8	60,2	404%	589%	2	20 - 5 - 0,5 - 0,05 - 4

Anexo B: Resultados del filtrado de combinaciones de pesos para obtener la asignación dinámica óptima

136,2	60,2	464%	625%	2	20 - 5 - 0,5 - 0,05 - 5
151,2	60,2	367%	671%	2	20 - 5 - 0,5 - 0,05 - 40
183,4	60,2	290%	405%	3	20 - 5 - 0,5 - 0,1 - 3
180,6	60,2	403%	584%	2	20 - 5 - 0,5 - 0,1 - 4
137	60,2	466%	625%	2	20 - 5 - 0,5 - 0,1 - 5
152	60,2	368%	676%	2	20 - 5 - 0,5 - 0,1 - 40

Tabla B.1 Resultados del primer filtrado de parámetros realizado

Posteriormente, con los parámetros válidos se vuelve a realizar otro filtro en condiciones similares al anterior, pero en este caso con 40 situaciones de recipientes, Tabla B.2.

Tiempo medio	Tiempo máximo	Error potencia medio	Error potencia máximo	Nº situaciones no calentadas	Pesos (potencia, distancia, ind.peq, tiempo) y potencia dada
290,6	60,2	200%	370%	4	5 - 1 - 0 - 0 - 3
327	60,2	275%	393%	4	5 - 1 - 0 - 0 - 40
285,8	60,2	281%	347%	2	5 - 1 - 0,2 - 0 - 3
301,6	60,2	280%	389%	3	5 - 1 - 0,2 - 0,05 - 3
228,6	60,2	273%	375%	2	10 - 1 - 0 - 0 - 4
299,4	60,2	218%	366%	3	10 - 1 - 0 - 0 - 40
303,4	60,2	196%	296%	3	10 - 1 - 0 - 0,05 - 3
318,2	60,2	266%	383%	3	10 - 1 - 0 - 0,05 - 4
322	60,2	219%	383%	3	10 - 1 - 0 - 0,05 - 40
277,6	60,2	225%	319%	3	10 - 1 - 0 - 0,1 - 3
319,8	60,2	282%	338%	2	10 - 1 - 0 - 0,1 - 4
325,6	60,2	241%	361%	4	10 - 1 - 0 - 0,1 - 40
294	60,2	282%	480%	4	10 - 1 - 0,2 - 0 - 5
255,4	60,2	270%	361%	2	10 - 1 - 0,2 - 0,1 - 4
280,8	60,2	179%	467%	4	10 - 3 - 0,5 - 0,05 - 3
284,2	60,2	180%	470%	4	10 - 3 - 0,5 - 0,1 - 3
248,8	60,2	179%	327%	2	15 - 1 - 0 - 0 - 3
228,2	60,2	226%	342%	2	15 - 1 - 0 - 0 - 4
316	60,2	186%	324%	2	15 - 1 - 0 - 0 - 40
258,4	60,2	171%	215%	2	15 - 1 - 0 - 0,05 - 3
209,4	60,2	223%	336%	2	15 - 1 - 0 - 0,05 - 4
292	60,2	203%	346%	2	15 - 1 - 0 - 0,05 - 40
278	60,2	182%	266%	2	15 - 1 - 0 - 0,1 - 3
244,6	60,2	232%	324%	2	15 - 1 - 0 - 0,1 - 4
212	60,2	199%	350%	1	15 - 1 - 0 - 0,1 - 40
257,8	60,2	173%	232%	2	15 - 1 - 0,2 - 0 - 3
156	60,2	219%	340%	1	15 - 1 - 0,2 - 0 - 4
202,2	60,2	280%	409%	1	15 - 1 - 0,2 - 0 - 5
324,4	60,2	192%	323%	1	15 - 1 - 0,2 - 0 - 40

Anexo B: Resultados del filtrado de combinaciones de pesos para obtener la asignación
dinámica óptima

273,6	60,2	174%	240%	2	15 - 1 - 0,2 - 0,05 - 3
227,2	60,2	235%	352%	2	15 - 1 - 0,2 - 0,05 - 4
243,6	60,2	185%	340%	1	15 - 1 - 0,2 - 0,05 - 40
222,8	52,8	174%	235%	0	15 - 1 - 0,2 - 0,1 - 3
170,2	60,2	229%	350%	1	15 - 1 - 0,2 - 0,1 - 4
268,2	60,2	184%	324%	1	15 - 1 - 0,2 - 0,1 - 40
264,2	60,2	319%	472%	2	15 - 1 - 0,5 - 0,05 - 5
241,2	60,2	189%	297%	1	15 - 1 - 0,5 - 0,1 - 3
281,2	60,2	255%	443%	3	15 - 1 - 0,5 - 0,1 - 4
275,6	60,2	327%	468%	3	15 - 1 - 0,5 - 0,1 - 5
290,6	60,2	200%	370%	4	15 - 3 - 0 - 0 - 3
327	60,2	275%	393%	4	15 - 3 - 0 - 0 - 40
344,2	60,2	248%	371%	4	15 - 3 - 0 - 0,05 - 3
345,2	60,2	277%	393%	4	15 - 3 - 0 - 0,05 - 40
293,4	60,2	199%	370%	4	15 - 3 - 0,2 - 0 - 3
329,8	60,2	272%	393%	4	15 - 3 - 0,2 - 0 - 40
295	60,2	200%	371%	4	15 - 3 - 0,2 - 0,05 - 3
311,8	60,2	259%	317%	3	15 - 3 - 0,5 - 0 - 3
358,2	60,2	273%	353%	3	15 - 3 - 0,5 - 0,05 - 3
217,8	60,2	262%	689%	1	20 - 1 - 0 - 0 - 4
194,6	60,2	274%	737%	1	20 - 1 - 0 - 0 - 5
284,6	60,2	182%	341%	2	20 - 1 - 0 - 0 - 40
237	60,2	225%	358%	1	20 - 1 - 0 - 0,05 - 4
258,8	60,2	247%	412%	3	20 - 1 - 0 - 0,05 - 5
266	60,2	190%	358%	2	20 - 1 - 0 - 0,05 - 40
237,4	60,2	167%	219%	2	20 - 1 - 0 - 0,1 - 3
236,8	60,2	208%	340%	2	20 - 1 - 0 - 0,1 - 4
226,6	60,2	265%	381%	2	20 - 1 - 0 - 0,1 - 5
208,4	60,2	189%	340%	1	20 - 1 - 0 - 0,1 - 40
300,6	60,2	148%	221%	3	20 - 1 - 0,2 - 0 - 3
149,8	50,6	210%	341%	0	20 - 1 - 0,2 - 0 - 4
162,2	60,2	257%	429%	1	20 - 1 - 0,2 - 0 - 5
284,8	60,2	168%	287%	2	20 - 1 - 0,2 - 0 - 40
181,2	53,2	207%	341%	0	20 - 1 - 0,2 - 0,05 - 4
171,6	60,2	256%	375%	1	20 - 1 - 0,2 - 0,05 - 5
186,6	60,2	187%	341%	1	20 - 1 - 0,2 - 0,05 - 40
220,8	60,2	167%	231%	2	20 - 1 - 0,2 - 0,1 - 3
146,4	60,2	225%	362%	1	20 - 1 - 0,2 - 0,1 - 4
223,8	60,2	260%	411%	1	20 - 1 - 0,2 - 0,1 - 5
238	60,2	188%	340%	2	20 - 1 - 0,2 - 0,1 - 40
237,8	60,2	210%	285%	2	20 - 1 - 0,5 - 0 - 4
278	60,2	186%	296%	2	20 - 1 - 0,5 - 0 - 40
319,2	60,2	151%	192%	2	20 - 1 - 0,5 - 0,05 - 3
254,2	60,2	258%	381%	1	20 - 1 - 0,5 - 0,05 - 5

Anexo B: Resultados del filtrado de combinaciones de pesos para obtener la asignación dinámica óptima

335,8	60,2	235%	339%	4	20 - 3 - 0 - 0 - 3
267,8	60,2	240%	326%	3	20 - 3 - 0 - 0,05 - 3
269,8	60,2	243%	326%	3	20 - 3 - 0 - 0,1 - 3
336,6	60,2	232%	339%	4	20 - 3 - 0,2 - 0 - 3
269,6	60,2	241%	319%	3	20 - 3 - 0,2 - 0,1 - 3
353,4	60,2	233%	339%	4	20 - 3 - 0,5 - 0 - 3
274	60,2	238%	317%	3	20 - 3 - 0,5 - 0,05 - 3
324,8	60,2	234%	317%	4	20 - 3 - 0,5 - 0,1 - 3

Tabla B.2. Resultados del segundo filtro de parámetros realizado

Por último se realiza un tercer filtrado con una base de datos de 300 situaciones de uno a seis recipientes para seleccionar de forma definitiva los parámetros que se van a evaluar, Tabla B.3.

Tiempo medio	Tiempo máximo	Error potencia medio	Error potencia máximo	Nº situaciones no calentadas	Pesos (potencia, distancia, ind.peq, tiempo) y potencia dada	Seleccionados
3,79	53,4	67%	418%	11	15 - 1 - 0 - 0,1 - 40	
2,46	75,6	101%	620%	9	15 - 1 - 0,2 - 0 - 4	
4,03	68,6	71%	418%	9	15 - 1 - 0,2 - 0,05 - 40	1
2,92	62,4	80%	418%	9	15 - 1 - 0,2 - 0,1 - 3	
2,88	79,6	101%	620%	8	15 - 1 - 0,2 - 0,1 - 4	1
3,87	57,8	68%	418%	11	15 - 1 - 0,2 - 0,1 - 40	
1,31	51,8	40%	398%	11	15 - 1 - 0,5 - 0,1 - 3	
2,43	58,6	104%	642%	11	20 - 1 - 0 - 0 - 5	
3,71	75	67%	585%	10	20 - 1 - 0 - 0,1 - 40	
2,56	55,6	97%	620%	7	20 - 1 - 0,2 - 0 - 4	1
2,42	73,4	112%	642%	9	20 - 1 - 0,2 - 0 - 5	
2,37	50,2	98%	620%	9	20 - 1 - 0,2 - 0,05 - 4	1
2,84	79,6	110%	716%	11	20 - 1 - 0,2 - 0,05 - 5	
3,81	67,8	66%	378%	10	20 - 1 - 0,2 - 0,05 - 40	
2,30	52,6	99%	620%	8	20 - 1 - 0,2 - 0,1 - 4	1

Tabla B.3. Resultados del tercer y último filtrado de parámetro