

Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Master en Organización Industrial y Gestión de Empresas
Trabajo Fin de Master

Planificación de cargas de trabajo en un parque de atracciones
para la reducción de penalizaciones por excesos de potencia

Alumno: Daniel Gómez León

Tutor: Jesús Muñuzuri Sanz

Índice de contenidos

Índice de tablas	3
1. Introducción	4
2. Objetivo y alcance	6
3. Descripción del problema y del entorno de trabajo	7
1. Las tarifas eléctricas	7
2. La composición de la factura eléctrica.....	11
3. Descripción del problema y aproximación a la solución.....	14
4. Revisión del estado del arte	15
1. Metodología seguida para la realización del estado del arte	15
2. Estado del arte. Modelos y estrategias en el campo de la eficiencia energética en el sector industrial	18
3. Comentarios.....	29
4. La planificación energéticamente eficiente. Los beneficios en números.....	31
5. Conclusiones del estudio del estado del arte y detección del campo de innovación	32
5. Descripción del caso de estudio	33
6. Presentación de la solución.....	37
7. Resultados potenciales de explotación.....	50
8. Conclusiones.....	56
9. Referencias.....	57
10. Definiciones.....	60

Índice de tablas

Tabla 1.- Definición de los periodos en la Tarifa 3.1A.....	8
Tabla 2.- Horarios de aplicación de cada una de los periodos en la Tarifa 3.1A.....	8
Tabla 3.- Horarios de aplicación de cada una de los periodos en la Tarifa 6	10
Tabla 4.- Tabla resumen de la distribución de periodos horarios para la Tarifa de 6 periodos .	10
Tabla 5.- Determinación de las palabras clave para la primera fase de la búsqueda	16
Tabla 6.-Clasificación de la bibliografía con respecto a los criterios establecidos 1/9	20
Tabla 7.- Clasificación de la bibliografía con respecto a los criterios establecidos 2/9	21
Tabla 8.- Clasificación de la bibliografía con respecto a los criterios establecidos 3/9	22
Tabla 9.- Clasificación de la bibliografía con respecto a los criterios establecidos 4/9	23
Tabla 10 Clasificación de la bibliografía con respecto a los criterios establecidos 5/9	24
Tabla 11.- Clasificación de la bibliografía con respecto a los criterios establecidos 6/9	25
Tabla 12.- Clasificación de la bibliografía con respecto a los criterios establecidos 7/9	26
Tabla 13.- Clasificación de la bibliografía con respecto a los criterios establecidos 8/9	27
Tabla 14.- Clasificación de la bibliografía con respecto a los criterios establecidos 9/9	28
Tabla 15.- Resumen de los modos de funcionamiento	40
Tabla 16.- Distribución de los tiempos usados en las simulaciones	41
Tabla 17.- Casos de estudio con funcionamiento fijo durante el año.....	50
Tabla 18.- Casos de estudio con funcionamiento combinado	51
Tabla 19.- Tabla resumen de los ahorros para cada uno de los casos de estudio	55

1. Introducción

Muchas de las técnicas empleadas en el campo de la eficiencia energética se basan en la sustitución de los consumidores por tecnologías más modernas y con consumos inferiores (luminarias leds, electrodomésticos de nueva generación, etc), generando consecuentemente una reducción del monto económico de la factura eléctrica mediante la reducción del consumo energético. Dichas aplicaciones son de gran utilidad en entornos domésticos o de pequeña industria (por ejemplo industria familiar), donde existe margen de reducción en los consumos y además, dicha disminución no está ligada a criterios productivos, o tiene un impacto despreciable en ellos.

Estas técnicas anteriores para afrontar el ahorro en factura eléctrica sin embargo, no consiguen abarcar el problema cuando se plantea un escenario de grandes consumos (y potencias), donde las reglas de tarificación son distintas y las acciones planteadas para la reducción de factura eléctrica mediante la reducción de consumos tienen, o pueden tener, un impacto directo en la producción del usuario objetivo.

Además, la sustitución de consumidores y maquinarias a niveles industriales hace necesario un estudio particular de la inversión a realizar que puede postergar varios años el retorno de dicha inversión y que, en ocasiones puede frenar al inversor debido al riesgo.

Por otro lado, más allá de las técnicas “sustitutivas” o de renovación tecnológica anteriormente descritas, existen modelos y/o estrategias de optimización enfocados al campo industrial basados en la planificación de la carga de trabajo con un enfoque energético, teniendo en cuenta las oportunas consideraciones de tarificación eléctrica y horaria.

Estos modelos buscan, conocidas las cargas de trabajo y las tarificaciones horarias, una planificación con minimización de los costes energéticos y/o productivos, aunque atendiendo únicamente al precio de la energía para cada periodo. En el entorno industrial, y en su sistema particular en cuanto a términos de tarificación y contratación eléctrica, aparece otro factor clave y objeto de ser optimizado, la potencia contratada y las penalizaciones por exceso.

Por ello, se pretende por tanto con este proyecto el desarrollo de una heurística para la reducción de la factura eléctrica de grandes consumidores mediante una estrategia de compromiso entre la potencia contratada, las penalizaciones por exceso y la planificación, sincronizando los tiempos de funcionamiento de las principales cargas (normalmente de carácter inductivo), disminuyendo por tanto los registros cuartohorarios del máxímetro (instrumento de medición para la determinación de los excesos) y considerando el posible impacto productivo que las acciones de planificación provoquen.

Como caso de estudio se propone su aplicación a un parque de atracciones, donde las distintas grandes cargas, principalmente motores de inducción que accionan los carros de las atracciones

y bombas de los compresores para los frenos hidráulicos, arrancan sin estar sincronizadas, provocando que los picos coincidan y que se provoquen grandes penalizaciones por excesos de potencia.

Dado que no se puede evitar por completo el efecto anterior (superar la potencia contratada en ciertos instantes de tiempo), el modelo debe optimizar la solución minimizando dichas penalizaciones en compromiso con el impacto que puede provocar la sincronización de arranques.

2. Objetivo y alcance

Se describen a continuación el objetivo y alcance del presente trabajo.

Objetivo: realizar una revisión del estado del arte de las soluciones basadas en modelos de planificación de cargas para la eficiencia energética y presentar una solución heurística basada en la variable de la potencia como criterio de optimización para el caso particular de estudio, así como los resultados potenciales de su aplicación.

Alcance: presentar la singularidad del mercado eléctrico a nivel industrial, establecer un estado del arte en técnicas de planificación de cargas (*scheduling*) con un enfoque de eficiencia energética y determinar una oportunidad o hueco de investigación en dicho campo, presentar el caso de estudio con sus particularidades y describir el proceso heurístico aplicado a la solución, presentando los potenciales ahorros del caso de estudio.

3. Descripción del problema y del entorno de trabajo

Tal y como se ha mencionado en el apartado de Introducción, el presente proyecto se sitúa dentro de un entorno industrial, y trata de optimizar la factura eléctrica mediante la implementación de una solución heurística para la optimización económica de la planificación particular. Por tanto, antes de introducir dicha solución y las variables de optimización que pretende usar para su funcionamiento, se hace necesario una descripción adecuada del escenario eléctrico en el que va a operar el modelo.

1. Las tarifas eléctricas

En el Real Decreto 1164/2001, de 26 de octubre (BOE-A-2001-20850, con última modificación consolidada del 10 de octubre de 2015) se establecen las tarifas de acceso a las redes de transporte y distribución de energía eléctrica.

En el artículo 7 se definen las tarifas de acceso de régimen general, que quedan clasificadas como sigue:

- Tarifas de baja tensión (< 1 kV)

Tarifa 2.0A: tarifa simple para baja tensión. Aplicable a cualquier suministro en baja tensión, con potencia contratada no superior a 15 kW.

Tarifa 3.0A: tarifa general para baja tensión. Aplicable a cualquier suministro de baja tensión con potencia contratada superior a 15 kW.

- Tarifas de alta tensión (≥ 1 kV)

Tarifa 3.1A: tarifa específica de tres períodos para tensiones de 1 a 36 kV. De aplicación a los suministros en tensiones comprendidas entre 1 y 36 kV con potencia contratada en todos los períodos tarifarios igual o inferior a 450 kW.

Tarifa 6: tarifas generales para alta tensión. Estas son de aplicación a cualquier suministro en tensiones comprendidas entre 1 y 36 kV con potencia contratada en alguno de los períodos tarifarios superior a 450 kW y a cualquier suministro en tensiones superiores a 36 kV

Como característica general en las tarifas de alta tensión, el BOE anteriormente citado establece lo siguiente:

“Las potencias contratadas en los diferentes períodos serán tales que la potencia contratada en un período tarifario (Pn+1) sea siempre mayor o igual que la potencia contratada en el período tarifario anterior (Pn).”

Esto quiere decir a efectos prácticos que en las tarifas de tres periodos ha de cumplirse que:

$$P3 \geq P2 \geq P1$$

y en las tarifas de seis periodos:

$$P6 \geq P5 \geq P4 \geq P3 \geq P2 \geq P1$$

Estas tarifas de alta tensión son las más habituales en el contexto industrial, y por tanto, serán en ellas en las que centremos el resto de la contextualización que estamos llevando a cabo en este apartado.

Tenemos por tanto en esta **Tarifa 3.1A** la opción de definir tres niveles de potencia a contratar (análogamente seis en la **Tarifa 6**), cuyos periodos de aplicación viene definida por el BOE y con un precio de la energía asociado a cada nivel. A continuación se muestran las tablas del BOE con respecto a la definición de las tarifas y los horarios de aplicación.

Tabla 1.- Definición de los periodos en la Tarifa 3.1A

Periodo horario	Duración (horas/día)
Punta (P1)	4
Llano (P2)	12
Valle (P3)	8

Tabla 2.- Horarios de aplicación de cada una de los periodos en la Tarifa 3.1A

Zona	Invierno			Verano		
	Punta	Llano	Valle	Punta	Llano	Valle
1	18-22	8-18 22-24	0-8	9-13	8-9 13-24	0-8
2	18-22	8-18 22-24	0-8	19-23	0-1 / 9-19 23-24	1-9
3	18-22	8-18 22-24	0-8	19-23	0-1 / 9-19 23-24	1-9

4	19-23	8-19 23-24	0-8	20-24	0-1 9-20	1-9
----------	-------	---------------	-----	-------	-------------	-----

Zona 1: Galicia, Asturias, Cantabria, País Vasco, Castilla y León, La Rioja, Navarra, Aragón, Cataluña, Madrid, Castilla-La Mancha, Extremadura, Valencia, Murcia y Andalucía.

Zona 2: Baleares.

Zona 3: Canarias.

Zona 4: Ceuta y Melilla.

Para la aplicación de estas tarifas en la **Tarifa 6**, se divide el año eléctrico en los tipos de días siguientes:

Tipo A: de lunes a viernes no festivos de temporada alta.

Tipo B: de lunes a viernes no festivos de temporada media.

Tipo C: de lunes a viernes no festivos de temporada baja, excepto agosto en el Sistema Peninsular y el mes correspondiente de mínima demanda en cada uno de los sistemas aislados extrapeninsulares e insulares.

Tipo D: sábados, domingos y festivos y agosto en el Sistema Peninsular y el mes de menor demanda para los sistemas aislados insulares y extrapeninsulares.

Por brevedad se omite la definición de las temporadas baja, media y alta en las distintas regiones geográficas del país, aunque estas pueden ser consultadas en el mismo Real Decreto.

La composición de los seis períodos tarifarios es la siguiente:

Período 1: comprende seis horas diarias de los días tipo A.

Período 2: comprende diez horas diarias de los días tipo A.

Período 3: comprende seis horas diarias de los días tipo B.

Período 4: comprende diez horas diarias de los días tipo B.

Período 5: comprende dieciséis horas diarias de los días tipo C.

Período 6: resto de horas no incluidas en los anteriores y que comprende las siguientes:

1.ª Ocho horas de los días tipo A.

2.ª Ocho horas de los días tipo B.

3.ª Ocho horas de los días tipo C.

4.ª Veinticuatro horas de los días tipo D. (Las horas de este período, a efectos de acometida, serán las correspondientes a horas valle)

Los horarios a aplicar en cada uno de los periodos tarifarios son los siguientes:

Tabla 3.- Horarios de aplicación de cada una de los periodos en la Tarifa 6

Período tarifario	Tipo de día			
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D
1	16-22			
2	8-16 22-24			
3		9-15		
4		8-9 15-24		
5			8-24	
6	0-8	0-8	0-8	0-24

En el caso de la **Tarifa 6**, como ha podido observarse, la definición de los periodos es algo más compleja. Por esto, para facilidad del lector se adjunta una última tabla resumen que resulta de más sencilla asimilación.

Tabla 4.- Tabla resumen de la distribución de periodos horarios para la Tarifa de 6 periodos

Periodos Tarifarios en la Península													
horas	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO 1ª QUINCENA	JUNIO 2ª QUINCENA	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DECIEMBRE
1	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
2	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
3	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
4	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
5	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
7	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
8	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
9	P2	P2	P4	P5	P5	P4	P2	P2	P6	P4	P5	P4	P2
10	P2	P2	P4	P5	P5	P3	P2	P2	P6	P3	P5	P4	P2
11	P1	P1	P4	P5	P5	P3	P2	P2	P6	P3	P5	P4	P1
12	P1	P1	P4	P5	P5	P3	P1	P1	P6	P3	P5	P4	P1
13	P1	P1	P4	P5	P5	P3	P1	P1	P6	P3	P5	P4	P1
14	P2	P2	P4	P5	P5	P3	P1	P1	P6	P3	P5	P4	P2
15	P2	P2	P4	P5	P5	P3	P1	P1	P6	P3	P5	P4	P2
16	P2	P2	P4	P5	P5	P3	P1	P1	P6	P3	P5	P4	P2
17	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P1	P1	P6	P4	P5	P3	P2
18	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P1	P1	P6	P4	P5	P3	P2
19	P1	P1	P3	P5	P5	P4	P1	P1	P6	P4	P5	P3	P1
20	P1	P1	P3	P5	P5	P4	P2	P2	P6	P4	P5	P3	P1
21	P1	P1	P3	P5	P5	P4	P2	P2	P6	P4	P5	P3	P1
22	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P2	P6	P4	P5	P3	P2
23	P2	P2	P4	P5	P5	P4	P2	P2	P6	P4	P5	P4	P2
24	P2	P2	P4	P5	P5	P4	P2	P2	P6	P4	P5	P4	P2
	744	672	743	720	744	720	744	744	744	720	745	720	744

Leyenda: P1 P2 P3 P4 P5 P6
 Todos los fines de semana y festivos el periodo horario a aplicar es P6
 Horas del día: La hora 1 comprende desde las 00:00h hasta las 00:59h y así sucesivamente
 Mes de Marzo: cambio de invierno-verano
 Mes de Octubre: cambio de verano-invierno

2. La composición de la factura eléctrica

Una vez introducido el contexto de tarificación y contratación eléctrica en el entorno industrial, procedemos a analizar la estructura habitual de la factura eléctrica, variable principal de optimización objeto del presente proyecto.

Evitando la definición oficial por tediosa, aunque esta pueda ser consultada en el BOE-A-2001-20850, podemos establecer que la facturación eléctrica en el ámbito industrial se compone de cuatro conceptos principales, dos relacionados con la energía y dos relacionados con la potencia.

Términos de energía

- Energía consumida

Con este concepto se factura el montante total de la energía activa consumida en todos los periodos aplicando el precio de la energía de cada periodo, esto es:

$$FE = \sum_{i=1}^n E_i \times te_i$$

Donde E_i corresponde a la energía consumida en el período tarifario i , expresada en kWh y te_i al precio del término de energía del período tarifario i .

- Término de interrumpibilidad

Para explicar este en qué consiste este término, utilizaremos la descripción que expone la comercializadora del mercado eléctrico ENARA Renewabe Energy Supply:

El Coste por Interrumpibilidad es un concepto que el Estado paga a ciertos grandes consumidores para que se comprometan a dejar de consumir en aquellos momentos en los que el Sistema Eléctrico Nacional necesite más energía de la disponible. Así, cuando se producen picos de demanda, la reducción del consumo por parte de estos consumidores garantiza la estabilidad del Sistema.

Según la Orden IET/346/2014 de 7 de marzo, el Coste por Interrumpibilidad del sistema pasará a ser asumido por la totalidad de la demanda nacional. Es por ello que este concepto será repercutido al consumidor final en la facturación del consumo realizado a partir del 1 de enero de 2015, incrementándose al Término de Energía.

Este término, por tanto, se calcula mediante la siguiente expresión:

$$TI = E \times ti$$

Donde **E** corresponde a la energía consumida total en todos los periodos, expresada en kWh y **ti** al precio de interrumpibilidad publicado por Red Eléctrica de España (REE).

Nota: Existe otro término de facturación de energía reactiva para los casos en que el consumo de esta es superior a un 30% de la energía activa y con un factor de potencia inferior al 0,95, pero esto son casos puntuales, de una naturaleza técnica distinta y que no puede ser abordado con estos modelos, por tanto se obvia este concepto de aquí en adelante.

Términos de potencia

La facturación de estos términos es ligeramente diferentes en las tarifas de tres y seis periodos, y por tanto se presentan por separado.

- Facturación por potencia contratada en tarifa de tres periodos

Para cada uno de los periodos de potencia contratada se procederá a aplicar la siguiente fórmula:

$$FP = \sum_{i=1}^n P_i \times tp_i$$

Donde **Pi** corresponde a la potencia a facturar en el período tarifario i, expresada en kW, y **tpi** al precio anual del término de potencia del período tarifario i. Por tanto se factura mensualmente la dozava parte del resultado obtenido.

No obstante la potencia a facturar en el período tarifario, **Pi**, no tiene por qué ser exactamente la potencia contratada, sino que se calcula de la forma que se establece en el BOE, como se expone a continuación:

a) Si la potencia máxima demandada, registrada en el período de facturación, estuviere dentro del 85 al 105 por 100 respecto a la contratada, dicha potencia registrada será la potencia a facturar (Pfi).

b) Si la potencia máxima demandada, registrada en el período de facturación, fuere superior al 105 por 100 de la potencia contratada, la potencia a facturar en el período considerado (Pfi) será igual al valor registrado más el doble de la diferencia entre el valor registrado y el valor correspondiente al 105 por 100 de la potencia contratada.

c) Si la potencia máxima demandada en el período a facturar fuere inferior al 85 por 100 de la potencia contratada, la potencia a facturar (Pfi) será igual al 85 por 100 de la citada potencia contratada.

- Facturación por exceso de potencia en tarifa de tres periodos

Este concepto se corresponde con el caso b mencionado anteriormente. Es decir, además de la facturación de la máxima potencia registrada, existirá una penalización adicional (*..más el doble de la diferencia entre el valor registrado y el valor correspondiente al 105 por 100 de la potencia contratada*)

- Facturación por potencia contratada en tarifa de seis periodos

En la tarifa de seis periodos, la facturación del término fijo de potencia contratada se calcula mediante el uso de la misma expresión matemática que en la tarifa de tres periodos, con la salvedad que en este caso, la potencia de cada periodo de facturación coincide siempre con la potencia contratada. Recordamos de nuevo la fórmula:

$$FP = \sum_{i=1}^n P_i \times tpi_i$$

Donde **Pi** corresponde a la potencia a facturar en el período tarifario i, expresada en kW, y **tpi** al precio anual del término de potencia del período tarifario i. Por tanto se factura mensualmente la dozava parte del resultado obtenido.

- Facturación por exceso de potencia en tarifa de seis periodos

Con la tarifa de seis periodos, el BOE establece lo siguiente; *en el caso de que la potencia demandada sobrepase en cualquier período horario la potencia contratada en el mismo, se procederá, además, a la facturación de todos y cada uno de los excesos registrados en cada período, de acuerdo con la siguiente fórmula:*

$$FEP = \sum_{i=1}^6 k_i \times 1,4064 \times A_{ei}$$

Donde:

Ki = coeficiente que tomará los siguientes valores dependiendo del período tarifario i:

Periodo	1	2	3	4	5	6
Ki	1	0,5	0,37	0,37	0,37	0,17

Aei = se calculará de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{n=j} (P_{dj} - P_{ci})^2}$$

Donde:

Pdj = potencia máxima demandada en cada uno de los cuartos de hora del período i en que se haya sobrepasado Pci.

Pci = potencia contratada en el período i en el período considerado.

Estas potencias se expresarán en kW. Los excesos de potencia se facturarán mensualmente.

3. Descripción del problema y aproximación a la solución

Según se ha analizado hasta ahora, podemos resumir que la factura eléctrica a nivel industrial se compone de cuatro conceptos, dos de ellos relacionados con la cantidad de energía consumida y otros dos relacionados con la potencia, uno con la contratada y otro con la realmente empleada.

Como vamos a ver en el siguiente apartado, en la revisión del estado del arte, existen múltiples estrategia de modelos de optimización que buscan una reducción en el montante de la factura eléctrica mediante un aumento de la carga de trabajo en aquellos periodos en los que el coste de la energía es más bajo (teí) e intentando minimizar la carga productiva en aquellos periodos en los que es más cara, sujeta dicha programación a distintas restricciones según el modelo (capacidades de maquinaria, capacidades de recursos humanos, objetivos productivos, penalizaciones por incumplimiento, etc)

La solución planteada en este trabajo persigue el mismo objetivo que los anteriores, esto es, la disminución de la factura eléctrica, pero focalizando la optimización en los términos de potencia de la factura, esto es, optimizando la potencia contratada y planteando una planificación tratando de disminuir las penalizaciones por exceso de potencia.

4. Revisión del estado del arte

1. Metodología seguida para la realización del estado del arte

Para la revisión del estado del arte en el campo que nos ocupa se ha seguido la metodología propuesta en *C. Gahm et al. (2015)*, en concreto los primeros pasos de clasificación y selección de la bibliografía a ser considerada relevante de cara a establecerla como estado del arte en el campo que nos ocupa.

En *C. Gahm et al. (2015)* se presenta, mediante la metodología que a continuación se describe una revisión de los métodos de planificación energéticamente eficiente (EES, de sus siglas en inglés Energy-Efficient Scheduling) aunque con un alcance más ambicioso, ya que considera las técnicas posibles a aplicar dentro de la cadena completa de la energía, es decir, no solo considera los procesos y los sistemas productivos, sino que tiene en cuenta también los procesos y sistema de distribución de la energía.

Con respecto a la metodología seguida para establecer el estado del arte, se plantean una serie de pasos que son los que aparecen en la Figura 1, que no hacen más que establecer un orden lógico de la secuencia de tareas habituales a la hora de realizar una investigación científica y el establecimiento de un estado del arte:

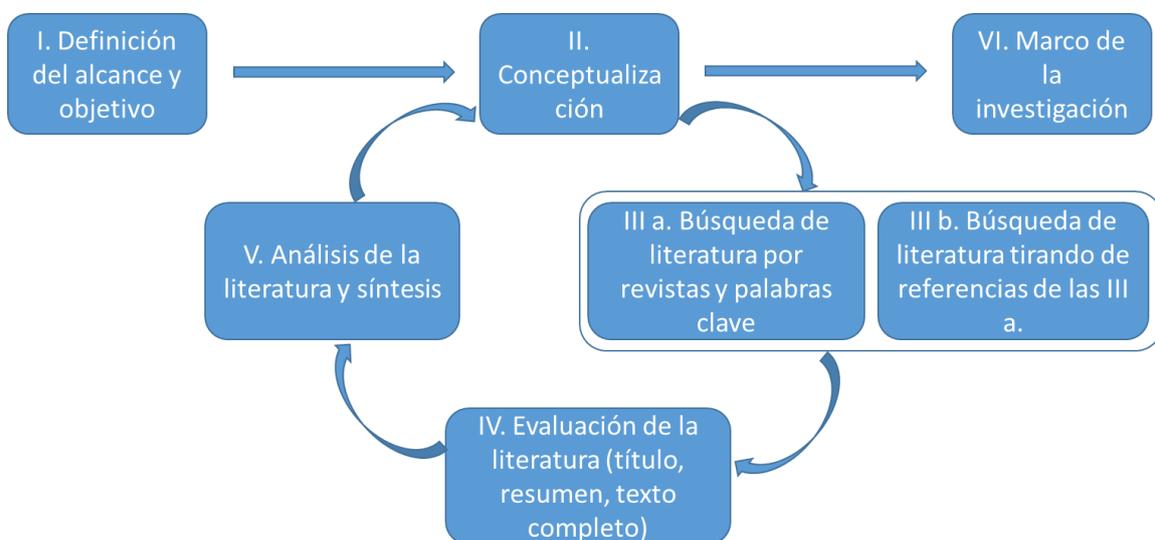


Figura 1.- Metodología de trabajo propuesta en *C. Gahm et al. (2015)*

I. Definición del alcance y objetivo

El alcance de la búsqueda, en línea con el alcance del trabajo completo, son los modelos que planteen estrategias de eficiencia energética en el sector industrial basados en la planificación de la producción (*scheduling*, en la terminología inglesa) y produzcan como resultado un beneficio económico al usuario, esto es, bien una disminución de los costes, un aumento de la producción o una combinación de ambas. En este sentido, se considera la eficiencia energética

desde el punto de vista de la energía eléctrica, queda por tanto fuera del alcance aquellos modelos que traten exclusivamente de energía térmica, aunque pueden incluirse aquellos en los que el modelo sea una combinación de ambos.

El objetivo es, inicialmente establecer un estado del arte de este tipo de soluciones aplicadas al sector industrial basadas en la disminución del consumo energético o la disminución del coste de este, y posteriormente detectar una oportunidad de investigación existente en modelos de este tipo que proponen una solución basada en la optimización de los términos de potencia y que justifica el desarrollo objeto de este trabajo

II. Conceptualización

En esta fase de conceptualización trataremos de identificar las palabras clave (*keywords*) que nos ayuden a direccionar la búsqueda de nuestro tema de interés en la bibliografía científica.

Estos términos serán los empleados en la primera fase de la búsqueda del siguiente paso definido en la metodología (paso III a.)

Por tanto, con lo expuesto en el presente trabajo hasta ahora las palabras clave que en la primera iteración de la búsqueda son las presentadas en la Tabla 5.

Tabla 5.- Determinación de las palabras clave para la primera fase de la búsqueda

Palabras clave	Keywords
Ahorro / reducción / eficiencia energética	Energy saving / reduction / efficiency
Gestión de picos de carga	Peak load management
Gestión energética	Energy management
Producción / fabricación sostenible	Sustainable production / manufacturing
Planificación	Scheduling
Industria	Industry
Caso de estudio	Case study
Modelado / simulación / algoritmo	Modelling /simulation / algorithm

Con ellas pretendemos acotar la búsqueda a publicaciones del campo de la eficiencia, el ahorro y la gestión energética en general dentro del sector industrial de la producción y la fabricación, con métodos de planificación de cargas. Además nos centraremos en aquellos artículos que propongan casos de estudio y modelos, algoritmos y simulaciones de la solución propuesta en cada caso.

III. (a). Búsqueda de literatura por revistas y palabras clave

En esta fase se han realizado las primeras iteraciones de la búsqueda empleando las palabras clave definidas anteriormente. En estas iteraciones se comenzó usando los términos más genéricos de los definidos (energy efficiency, sustainable production / manufacturing & industry) y posteriormente se fueron incorporando términos de un modo selectivo en función de los resultados arrojados por la búsqueda.

Como resultado de estas primeras iteraciones de la búsqueda se seleccionaron 18 artículos considerados de interés de cara a formar parte del estado del arte, que se corresponden con las primeras referencias incluidas en el apartado correspondiente.

Los motores de búsqueda principales usados para esta primera fase han sido Sciencedirect, springerlink e IEEE, y las revistas de interés detectadas han sido Energy Engineering, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Journal of Manufacturing Systems, Journal of Cleaner Production, European Journal of Operational Research, entre otras. También han sido revisados trabajos presentados en conferencias específicas del sector.

Cabe destacar que en la búsqueda, aunque no se incluyera como palabra clave, se ha prestado especial atención a los artículos que incluían en su título los términos “revisión” (review) o “estado del arte” (state of the art). En concreto el artículo de referencia para el establecimiento de esta metodología de búsqueda fue hallado en esta primera iteración con dicha consideración.

III. (b). Búsqueda de literatura a partir de las referencias de los artículos encontrados

A partir de las referencias incluidas en los 18 primeros trabajos detectados en la fase anterior se amplió hasta un total de 85 artículos la base de trabajo de cara al establecimiento del estado del arte.

Esta ampliación se realizó basada de nuevo en la búsqueda en los títulos de las referencias de las palabras clave definidas y buscando en los motores de búsqueda y revistas de referencia también mencionadas en el apartado anterior.

IV. Evaluación de la literatura (título, introducción, resumen, texto completo)

En esta fase se revisaron todos los artículos mediante una evaluación más específica del título, el párrafo de introducción y el apartado de resumen (*abstract*).

Con esta evaluación se limitó el elenco a aquellos artículos que se centraban en la reducción energética de procesos productivos mediante el uso de modelos de optimización. En concreto, de cara a alinear el estado del arte con el objetivo y el caso de estudio de este proyecto, tan solo se tuvieron en cuenta aquellos artículos cuyo enfoque se centrara en el consumo eléctrico, desechando para este caso aquellos que consideraban los procesos de energía térmica. Tan solo

en algunos casos concretos se han tenido en cuenta artículos que consideraran ambos términos en sus variables de optimización.

Con esta selección final se redujo el número de artículos para establecer el estado del arte hasta 27 artículos, que son los presentados de la Tabla 6 a la Tabla 14.

V. Análisis de la literatura y síntesis

Esta fase ha consistido en la lectura y estudio de los artículos seleccionados en la fase anterior. En dicho estudio además de revisar los modelos y soluciones concretas que cada trabajo presentaba, se trataron de estructurar los criterios generales en los que dichos trabajos se enfocaban, de cara a poder establecer una clasificación ordenada como se presenta en el apartado siguiente e, intentar detectar, una oportunidad de investigación cubriendo una combinación de criterios no explorados hasta el momento.

VI. Marco de la investigación

Finalmente, en este punto se puede concluir que el marco de investigación del presente trabajo es la planificación o *scheduling* en su denominación en inglés, e introducimos una definición de dicho paradigma:

En general, la planificación puede ser definida como la asignación de órdenes de producción (tareas) a las respectivas unidades productivas (máquinas) y la secuenciación y temporización asociada a las máquinas (C. Gahm et al., 2015)

Texto original:

Generally, scheduling can be defined as the allocation of production orders (jobs) to production units (machines) and the associated sequencing and timing on the machine (C. Gahm et al., 2015)

2. *Estado del arte. Modelos y estrategias en el campo de la eficiencia energética en el sector industrial*

Siguiendo los pasos de la metodología anteriormente descrita pasamos ahora a presentar el estado del arte en el que enmarcar el modelo a desarrollar en el presente proyecto. Como denominación general, se considera que nos encontramos dentro del campo de la **planificación** o *scheduling*, su denominación en lengua inglesa.

De la bibliografía consultada en este campo podemos realizar una primera gran división en el estado del arte, aquellos modelos que constan de una **única función objetivo** que optimizar, los denominaremos SO, de su nomenclatura en inglés (Single-objective); y aquellos modelos que plantean **múltiples funciones objetivo** en su labor de optimización, MO, de su nomenclatura en inglés (Multi-objective). Estas últimas pueden clasificarse además por el método que empleen para cuantificar el impacto de las distintas funciones objetivo en el resultado final (frontera

eficiente de Pareto, suma de pesos ponderados, soluciones lexicográficas, etc), no obstante, se consideran estas fuera del alcance de esta revisión, y por tanto, no se profundizará más en ellas salvo alguna referencia de especial interés, centrándonos por tanto en los modelos con una única función objetivo (SO).

Otra importante clasificación la podemos establecer en base a la relación existente al lapso de tiempo sobre el que se va a realizar la planificación y el grado de conocimiento sobre la **demanda** esperada para dicho lapso. Esto es, si la planificación se hace para un periodo futuro con la demanda y/o carga de trabajo conocida, o si la planificación se realiza al mismo tiempo en que va apareciendo la demanda y/o carga de trabajo, es decir, en tiempo real. También existen modelos que podríamos mixtos con respecto a este concepto, es decir, se realiza una planificación anterior que se revisa con la aparición real de la demanda y/o carga de trabajo (modelos de replanificación o re-scheduling)

Igualmente, podemos realizar también una clasificación generalista de los modelos de planificación en consideración al tipo de **criterio objeto de optimización**, en función de si se trata de un criterio “monetario” o “no monetario”. Es decir, aquellos modelos en los que la función objetivo considera términos como *coste total de la energía consumida (total energy cost)*, *coste total del producto (total product cost)*, *beneficio (profit)*, *costes de penalización (penalty costs)*, etc, y aquellos modelos en los que se consideran criterios como la *cobertura de la demanda (demand fulfillment)*, *tiempo productivo (makespan)*, *retardo máximo (maximum tardiness)*, *calidad (quality)*, etc.

Otra clasificación podría establecerse en función del método de resolución propuesto, así como la herramienta software planteada para buscar la solución, aunque este último criterio se considerará fuera del alcance de nuestra búsqueda. Sin embargo, sí que resaltaremos especialmente uno de los modelos estudiados, que sin presentar ninguna particularidad especial con respecto a otros en la formulación específica del modelo y sus restricciones, sí que presenta una interesante implementación real en su aplicación industrial.

Como resumen de la aplicación esta clasificación, se muestra de la Tabla 6 a la Tabla 14 en las cuales se presentan los diferentes trabajos analizados de la bibliografía científica contrastados con respecto a los diferentes criterios establecidos para estructurar en estado del arte.

Como criterio general, además, se ha considerado la **fecha de publicación** del artículo. Aunque se han analizado trabajos con fecha de publicación anterior, se ha minimizado la inclusión en el estado del arte (salvo excepciones de especial interés) artículos publicados con anterioridad al año 2010.

Tabla 6.-Clasificación de la bibliografía con respecto a los criterios establecidos 1/9

	Año publicación	Función Objetivo		Demanda		
		SO	MO	Previamente conocida	Tiempo real	Ambas (re-scheduling)
[1] S. Ashok. Peak-load management in steel plants.	2006	X		X		
[2] J. Lee et al. Production scheduling with energy efficiency constraints.	2007		X	X		
[3] C. Artigues et al. The energy scheduling problem: Industrial case-study and constraint propagation techniques.	2010	X		X		
[4] K. Fang et al. A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction.	2011		X	X		
[5] E. C. Eren et al. Efficient control for a multi-product quasi-batch process via stochastic dynamic programming.	2010	X		X		
[6] A.A.G. Bruzzone et al. Energy-aware scheduling for improving manufacturing process sustainability: A mathematical model for flexible flow shops.	2012	X		X		
[7] G. Chen et al. Energy-efficient production systems through schedule-based operations.	2013	X		X		
[8] M. Dai et al. Energy-efficient scheduling for a flexible shop using an improved genetic-simulated annealing algorithm.	2013		X	X		
[9] K. Fang et al. Flow shop scheduling with power consumption constrains.	2013	X		X		
[10] C. Pach et al. Reactive and energy-aware scheduling of flexible manufacturing systems using potential fields.	2013	X				X

Tabla 7.- Clasificación de la bibliografía con respecto a los criterios establecidos 2/9

	Año publicación	Función Objetivo		Demanda		
		SO	MO	Previamente conocida	Tiempo real	Ambas (re-scheduling)
[11] Z. Sun et al. Inventory control for peak electricity demand reduction of manufacturing systems considering the tradeoff between production loss and energy savings.	2014	X		X		
[12] X. Gong et al. An energy-cost-aware scheduling methodology for sustainable manufacturing.	2015	X		X		
[13] A. Sharma et al. Econological scheduling of a manufacturing enterprise operating under a time-of-use electricity tariff.	2015		X	X		
[14] D. Tang et al. Energy-efficient dynamic for scheduling for a flexible flow shop using an improved particle swarm optimization.	2015		X			X
[15] S. Afshin Mansouri et al. Green scheduling of a two-machine flowshop. Trade-off between makespan and energy consumption.	2015		X	X		
[16] C. Pach et al. Reactive control of overall power consumption in flexible manufacturing systems scheduling. A potential fields model	2015	X				X
[17] R. Zhang et al. Solving the energy-efficient job shop scheduling problem. A multi-objective genetic algorithm with enhanced local search.	2015		X	X		
[18] Ashok S. PLC-based load management in steel rolling mills.	2010	X		X		
[19] M. C. Georgiadis et al. Optimisation-based scheduling. A discrete manufacturing case study.	2005	X				X

Tabla 8.- Clasificación de la bibliografía con respecto a los criterios establecidos 3/9

	Año publicación	Función Objetivo		Demanda		
		SO	MO	Previamente conocida	Tiempo real	Ambas (re-scheduling)
[20] K. Nagasawa et al. Robust flow shop scheduling with random processing times for reduction of peak power consumption.	2015	X		X		
[21] F. Xiong et al. Scheduling a hybrid assembly-differentiation flowshop to minimize total flow time.	2014	X		X		
[22] J.M. Yusta et al. Optimal methodology for a machining process scheduling in spot electricity markets.	2010	X		X		
[23] X. Gong et al. An energy-cost-aware scheduling methodology for sustainable manufacturing.	2015	X		X		
[24] H. Hadera et al. Optimization of steel production scheduling with complex time-sensitive electricity cost.	2015	X				X
[25] H. Zhang et al. Energy-conscious flow shop scheduling under time-of-use electricity tariffs.	2014		X	X		
[26] X. Gong et al. A generic method for energy-efficient and energy-cost-effective production at the unit process level.	2015	X		X		
[27] A. Che et al. An efficient greedy insertion heuristic for energy-conscious single machine scheduling problem under time-of-use electricity tariffs.	2016	X		X		

Tabla 9.- Clasificación de la bibliografía con respecto a los criterios establecidos 4/9

	Criterio de optimización									
	Monetarios				No monetarios					Otros
	Coste total energía	Coste total producto	Beneficio	Coste penalización	Consumo energético	Cobert demanda	Tiempo	Retardo máximo	Calidad	Otros
[1] S. Ashok. Peak-load management in steel plants.	X									
[2] J. Lee et al. Production scheduling with energy efficiency constraints.	X									
[3] C. Artigues et al. The energy scheduling problem: Industrial case-study and constraint propagation techniques.	X									
[4] K. Fang et al. A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction.	X									
[5] E. C. Eren et al. Efficient control for a multi-product quasi-batch process via stochastic dynamic programming.										X

Tabla 10 Clasificación de la bibliografía con respecto a los criterios establecidos 5/9

	Criterio de optimización									
	Monetarios				No monetarios					Otros
	Coste total energía	Coste total producto	Beneficio	Coste penalización	Consumo energético	Cobert demanda	Tiempo	Retardo máximo	Calidad	Otros
[6] A.A.G. Bruzzone et al. Energy-aware scheduling for improving manufacturing process sustainability: A mathematical model for flexible flow shops.										X
[7] G. Chen et al. Energy-efficient production systems through schedule-based operations.										X
[8] M. Dai et al. Energy-efficient scheduling for a flexible shop using an improved genetic-simulated annealing algorithm.							X			
[9] K. Fang et al. Flow shop scheduling with power consumption constrains.							X			
[10] C. Pach et al. Reactive and energy-aware scheduling of flexible manufacturing systems using potential fields.					X					

Tabla 11.- Clasificación de la bibliografía con respecto a los criterios establecidos 6/9

	Criterio de optimización									
	Monetarios				No monetarios					Otros
	Coste total energía	Coste total producto	Beneficio	Coste penalización	Consumo energético	Cobert demanda	Tiempo	Retardo máximo	Calidad	Otros
[11] Z. Sun et al. Inventory control for peak electricity demand reduction of manufacturing systems considering the tradeoff between production loss and energy savings.		X								
[12] X. Gong et al. An energy-cost-aware scheduling methodology for sustainable manufacturing.	X									
[13] A. Sharma et al. Econological scheduling of a manufacturing enterprise operating under a time-of-use electricity tariff.	X									X
[14] D. Tang et al. Energy-efficient dynamic for scheduling for a flexible flow shop using an improved particle swarm optimization.	X				X		X			

Tabla 12.- Clasificación de la bibliografía con respecto a los criterios establecidos 7/9

	Criterio de optimización									
	Monetarios				No monetarios					Otros
	Coste total energía	Coste total producto	Beneficio	Coste penalización	Consumo energético	Cobert demanda	Tiempo	Retardo máximo	Calidad	Otros
[15] S. Afshin Mansouri et al. Green scheduling of a two-machine flowshop. Trade-off between makespan and energy consumption.	X				X		X			
[16] C. Pach et al. Reactive control of overall power consumption in flexible manufacturing systems scheduling. A potential fields model.							X			
[17] R. Zhang et al. Solving the energy-efficient job shop scheduling problem. A multi-objective genetic algorithm with enhanced local search.							X			
[18] Ashok S. PLC-based load management in steel rolling mills.		X								

Tabla 13.- Clasificación de la bibliografía con respecto a los criterios establecidos 8/9

	Criterio de optimización									
	Monetarios				No monetarios					Otros
	Coste total energía	Coste total producto	Beneficio	Coste penalización	Consumo energético	Cobert demanda	Tiempo	Retardo máximo	Calidad	Otros
[19] M. C. Georgiadis et al. Optimisation-based scheduling. A discrete manufacturing case study.										X
[20] K. Nagasawa et al. Robust flow shop scheduling with random processing times for reduction of peak power consumption.										X
[21] F. Xiong et al. Scheduling a hybrid assembly-differentiation flowshop to minimize total flow time.							X			
[22] J.M. Yusta et al. Optimal methodology for a machining process scheduling in spot electricity markets.			X							
[23] X. Gong et al. An energy-cost-aware scheduling methodology for sustainable manufacturing.	X									

Tabla 14.- Clasificación de la bibliografía con respecto a los criterios establecidos 9/9

	Criterio de optimización									
	Monetarios				No monetarios					Otros
	Coste total energía	Coste total producto	Beneficio	Coste penalización	Consumo energético	Cobert demanda	Tiempo	Retardo máximo	Calidad	Otros
[24] H. Hadera et al. Optimization of steel production scheduling with complex time-sensitive electricity cost.	X									
[25] H. Zhang et al. Energy-conscious flow shop scheduling under time-of-use electricity tariffs.	X									X
[26] X. Gong et al. A generic method for energy-efficient and energy-cost-effective production at the unit process level.	X									
[27] A. Che et al. An efficient greedy insertion heuristic for energy-conscious single machine scheduling problem under time-of-use electricity tariffs.	X									

3. Comentarios

En este apartado vamos a incorporar comentarios de algunos de los artículos incluido en la determinación del estado del arte.

En la referencia [1] *S. Ashok (2005)*, se presentan los resultados de mejora cuantitativos del caso de aplicación. También se presentan resultados de mejora en *X. Gong et al (2015)*, la referencia décimo segunda.

En la segunda de las referencias, *J. Lee et al. (2007)*, los dos criterios no monetarios son minimizar los retrasos en los envíos y minimizar en nivel de inventario necesario

En la cuarta de las referencias, *K. Fang et al (2011)*, el tercer criterio que introduce, no monetario, es la reducción de la huella de carbono.

En *E. C. Eren et al (2011)*, la quinta referencia indicada, se minimiza el coste total unificandolo en una única ecuación ponderada. Es decir, sería un modelo multiobjetivo convertido en una única función objetivo ponderada mediante una serie de coeficientes de peso. Este recurso también se emplea en la sexta referencia, *A.A.G. Bruzzone et al (2012)*, con los criterios de coste energético, tiempo productivo, penalizaciones, etc. Este modelo hace replanificación (re-scheduling), realiza una reasignación de tareas optimizadas previamente planificadas por el planificador

G. Chen et al. (2013), la séptima de las referencias, el criterio a minimizar es una solución de compromiso, un ratio definido como la energía consumida entre la productividad.

El artículo de la novena referencia, *K. Fang et al (2013)*, presenta cuatro aproximaciones distintas de la formulación del modelo, pero considera capacidad de acumulación intermedia ilimitada.

En *A. Sharma et al (2015)*, la décimo tercera referencia, el segundo criterio que considera para su optimización es el impacto ambiental generado en la producción.

En [15] *D. Tang et al (2015)* el modelo considera aspectos realistas en la industria (llegada de nuevas órdenes de trabajo, trabajos prioritarios, averías de máquinas, etc).

La referencia [16], *C. Pach et al (2015)*, más que un modelo presenta una estrategia de control reactiva y limita el consumo eléctrico como si fuera una restricción más del modelo.

En [18] *Ashok S (2010)*, se presenta una interesante implementación a nivel industrial mediante el uso de un solver como herramienta intermedia y un PLC como herramienta final para ejecutar la planificación, un sistema de especial interés para la posible ejecución de la solución propuesta en este trabajo. Presenta, además, los resultados de los beneficios económicos obtenidos.

El criterio de optimización propuesto en [19] *M. C. Georgiadis et al (2005)* es el coste total operativo. El artículo presenta un caso real de implementación de los resultados del modelo en la planificación real de la producción.

[20] *K. Nagasawa et al (2015)* es el único artículo que considera la optimización en términos de potencia. Los criterios que optimiza son la potencia de cada ciclo definido y el inventario de cada producto en ese ciclo, proponiendo una función objetivo simple como una solución ponderada de ambos criterios, es decir, una solución de compromiso. Presenta un sistema de optimización de dos pasos, el primero mediante el modelo clásico y el segundo mediante la introducción de

"tiempos ociosos" para desplazar actividades de un periodo a otro. Este es, junto con Ashok S (2010), el artículo de referencia para este trabajo.

En el trabajo [21], *F. Xiong et al (2014)*, el criterio de optimización es el tiempo productivo. Pero en este caso el tiempo productivo que se trata de minimizar no es el de una unidad sino el de un pedido o lote.

Por último, en [25] *H. Zhang et al (2014)*, se busca reducir el precio total de la energía y reducir las emisiones de carbono en la producción de la demanda en una solución de compromiso.

4. La planificación energéticamente eficiente. Los beneficios en números.

En este apartado se muestran los resultados cuantitativos incluidos en tres de los artículos consultados para establecer el estado del arte. De este modo, también nos permitirá realizar una comparativa entre las mejoras conseguidas por los distintos modelos existentes y la mejora producida por el sistema propuesto en este trabajo.

En la primera referencia, S. Ashok (2006), se muestra como, con una estrategia de uso de la energía en función de los precios por periodo (ToU, del inglés Time of Use) consigue reducir, de media, un 3,1% en el patrón diario del coste de la energía.

En la referencia [12], X. Gong et al. (2015), donde se plantean soluciones de compromiso entre el ahorro en costes y la dilatación de los tiempos productivos, se demuestra que, comparado con la estrategia clásica de funcionamiento, fabricar lo antes posible, se reduce hasta un 22% el coste energético prolongando el tiempo productivo un 63%. Con estrategias más agresivas se podría reducir hasta en un 69% este coste, aunque con una dilatación excesiva de los tiempos.

En Ashok S. 2010, la referencia [18], concluye como planificaciones optimizadas bajo criterios de producción según los precios variables por periodos (ToU) resultan en un ahorro en la factura eléctrica de un 5,21% en comparación con las condiciones de trabajo sin esta consideración. Además, con este tiempo de planificación, se menciona que podría resultar en otros ahorros relacionados con la reducción de picos de potencia, estrategia que será la seguida en este trabajo para conseguir ahorros en la factura.

5. Conclusiones del estudio del estado del arte y detección del campo de innovación

En función de lo expuesto anteriormente, se considera que existe una oportunidad de investigación en modelos de optimización con función objetivo única (SO) que utilicen el criterio de la potencia como variable de optimización (concretamente el exceso con respecto a una referencia), liberando o flexibilizando la cobertura total de la demanda e introduciendo un término de contrapartida en la función objetivo de modo que se obtengan soluciones de compromiso, considerando además replanificaciones con una frecuencia determinada como parámetro del propio modelo.

La demanda, además de ser una restricción blanda (no es obligatorio satisfacerla al completo), se considera desconocida o semi-desconocida, ya que solo se conocería su valor para el siguiente periodo de replanificación.

Esta consideración de oportunidad se basa en que únicamente se ha detectado un trabajo (*Nagasawa et al., 2015*) que haya realizado un enfoque similar en la revisión del estado del arte realizada, aunque con un planteamiento de problema que no hace posible su aplicación directa al caso de estudio objeto de este proyecto.

5. Descripción del caso de estudio

Como caso de estudio para analizar la posible aplicación de los métodos y estrategias estudiados hasta ahora se propone en este trabajo un escenario industrial particular como es un parque de atracciones.

Para ello vamos a proceder en este apartado a definir dicho escenario y exponer las particularidades que lo hacen especialmente interesante para ser caso de aplicación de este paradigma de la planificación energéticamente eficiente, y a su vez justificaremos la necesidad del desarrollo de una heurística particular para estudiar los potenciales ahorros, ante la imposibilidad de aplicar directamente el modelo expuesto en *Nagasawa et al., 2015*.

Definición de las cargas involucradas

Podemos dividir las cargas eléctricas que se encuentran presentes en las instalaciones de un parque de atracciones en dos grandes grupos, en un grupo incluiríamos todas aquellas que forman parte de la estructura general del parque, es decir, iluminación, bombas de agua, compresores, ventilación, climatización, sistemas de cámaras y seguridad, etc, denominando este grupo como “cargas auxiliares/funcionales” Y en otro grupo agruparíamos las cargas correspondientes a los motores eléctricos de las atracciones del parque, denominando a este grupo como “cargas principales”.

Del mismo modo, estas cargas principales asociadas a las atracciones, podemos dividir las en dos tipos, las cargas de funcionamiento continuo durante el ciclo de la atracción, es decir, atracciones tipo carrusel, y las cargas de funcionamiento en arranque, es decir, atracciones tipo montaña rusa, que tienen un periodo de remonte inicial y una fase de funcionamiento inercial de la atracción. Puede verse un ejemplo gráfico de ambos tipos de carga en la Ilustración 1.

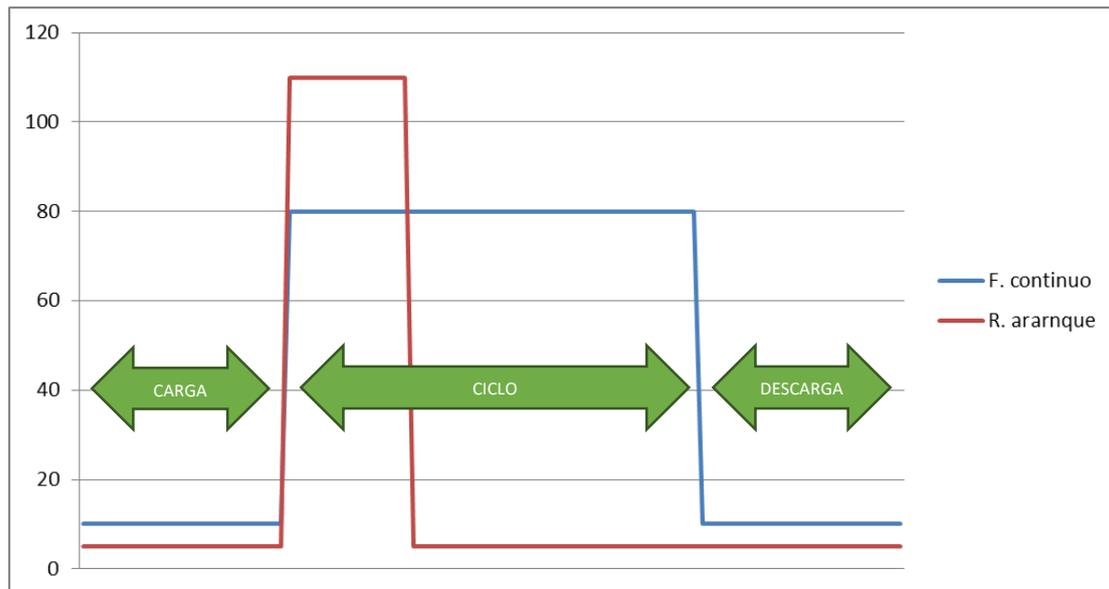


Ilustración 1.- Ejemplo gráfico de los dos tipos de cargas principales características de las atracciones

Este tipo de cargas de atracciones de funcionamiento en arranque serán, por tanto, las cargas objetivo de planificar su funcionamiento debido a su alta potencia y su relativo bajo tiempo de funcionamiento.

En la solución que presentamos en el siguiente apartado distinguimos por tanto dos potencias:

- La potencia base en cada instante, la cual se corresponde a la suma en un instante determinado de las *cargas auxiliares/funcionales* más las *cargas principales* de las atracciones de funcionamiento continuo. Se considera un parámetro conocido en cada instante en la solución.
- La potencia de las *cargas principales* de las atracciones de funcionamiento en arranque. También son parámetros conocidos de cara a la solución.

A continuación se presenta un pequeño esquema resumen de la distribución de cargas y su agrupación considerada de cara a la solución propuesta.

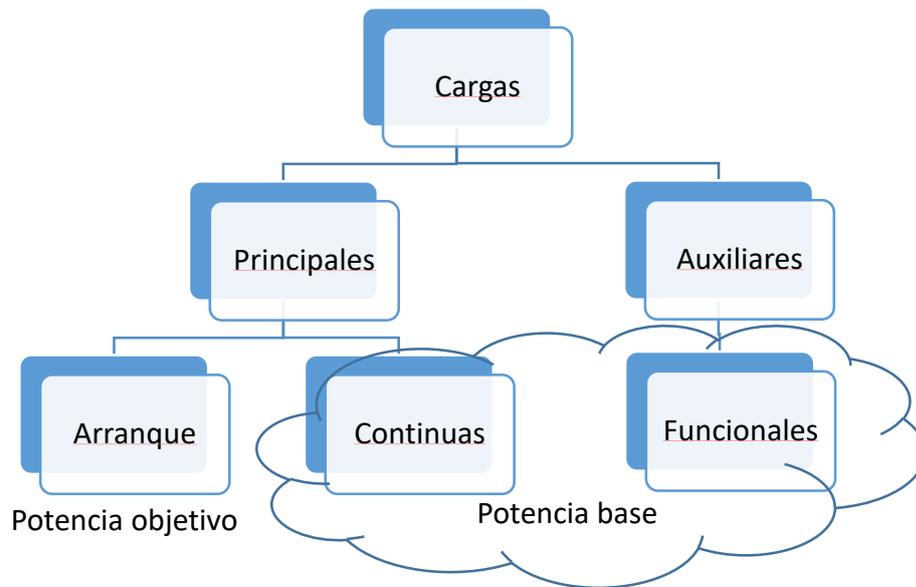


Ilustración 2.- Resumen de la agrupación de cargas en la solución

Tarifas eléctricas

El entorno industrial considerado de un parque de atracciones tiene un tipo de tarificación eléctrica, en función de lo presentado en apartado correspondiente, de 6 periodos.

Es decir, tiene definidos 6 niveles de potencia que cumplen la siguiente relación:

$$P_6 \geq P_5 \geq P_4 \geq P_3 \geq P_2 \geq P_1$$

Y son de aplicación cada uno según lo establecido en la Tabla 4, aplicándose en cada caso una penalización por exceso calculada como se presentó en el apartado *La composición de la factura eléctrica*.

En la solución heurística propuesta, la tarifa de aplicación en cada instante es tomada en consideración como un parámetro conocido para cada periodo de aplicación.

Contrapartidas a la eficiencia energética

Como se ha mostrado en el estudio del estado del arte, los modelos más realistas, más ajustados a la aplicación de los mismos en entornos industriales, consideran términos contraproducentes o de impacto negativo de la planificación energéticamente eficiente (como el retardo de los tiempos productivos, el posible incumplimiento de la demanda, las penalizaciones por retardo, etc) con el objetivo de buscar soluciones de compromiso.

En el caso de estudio, el término de contrapartida que se considera son los tiempos de espera generados (colas de personas) en las atracciones en los que se modifica su “ritmo productivo”, es decir, sus arranques.

Como en la solución propuesta no se disponen de los datos en cada instante del estado de los tiempos de espera de las atracciones objetivo, este término no es introducido directamente en la solución. No obstante, de cara a evaluar los ahorros potenciales sobre soluciones que pudieran ser implementadas, se proponen en la solución distintos modos de funcionamiento que provoquen distintos niveles de impacto, basándonos en razonamientos lógicos.

Se plantean por tanto tres modos de funcionamiento, el modo 1, 2 y 3, que son definidos en el apartado correspondientes, y con estos modos, se generan hasta 7 soluciones distintas como combinaciones lineales de la aplicación de dichos modos de funcionamiento. No obstante, esta casuística es explicada con mayor nivel de detalle en el apartado siguiente.

6. Presentación de la solución

En esta sección se va a presentar en detalle la solución heurística desarrollada para la evaluación de los potenciales ahorros a producir al aplicar un sistema control sobre la sincronización de arranques reduciendo por tanto las penalizaciones por exceso de potencia.

Justificación de una solución heurística

En primer lugar se va a argumentar que se propone una solución heurística ante la imposibilidad de aplicar directamente el modelo presentado en *Nagasawa et al., 2015*.

El criterio fundamental para ello es la particularidad de la demanda. En el caso de estudio propuesto no existe una demanda conocida, es decir, no existe para cada unidad productiva, esto es para cada atracción, un número de personas previamente definido de usuarios que servir o una cantidad de ciclos que cubrir, sino que la demanda va a apareciendo y gestionándose en tiempo real. Esto, por tanto imposibilita el hecho de emplear el modelo para distribuir las cargas de trabajo en los distintos periodos temporales, si no que como se ha mencionado, la demanda aparece y ha de gestionarse en tiempo real.

En el modelo dada una demanda conocida y una primera planificación se plantea la opción de adelantar ciertas cargas de trabajo, generando un inventario, aunque provocando un coste de inmovilizado que penaliza la solución objetivo, o postergar una tarea a un periodo posterior mediante la introducción de tiempos ociosos forzados en ciertas unidades productivas.

Por tanto, no es posible para el caso particular del parque de atracciones realizar una planificación por periodos, del orden de horas, sobre una carga de trabajo conocida, por lo que se propone una solución que gestiona en tiempo real una demanda que se va generando repentinamente y se toman decisiones en el corto plazo, del orden de segundos.

Diferencia entre la solución propuesta y el estado actual

La solución desarrollada se basa en la sincronización de arranques de una serie de atracciones del tipo montaña rusa (definidas como ya se ha expuesto anteriormente por una fase de arranque y una fase inercial) de alta potencia para evitar que estas coincidan en el tiempo en su fase de remonte (fase durante la cual los motores eléctricos están consumiendo potencia) para disminuir la potencia total registrada en el maxímetro (elemento de medida colocado en el interruptor de cabecera).

Actualmente, cuando una atracción dispone del número de personas suficientes en cola para llenar la capacidad de un carro, el operador lanza la atracción sin ningún tipo de consideración sobre el resto de las atracciones. Es decir, no existe un sistema de gestión global, sino que las atracciones funcionan de manera totalmente independiente y descoordinadas.

Cargas a considerar

Para la solución propuesta se va a considerar el control sobre el arranque de tres montañas rusas, es decir, en función de la definición de cargas expuesta en el apartado anterior, tres tipos de cargas principales con funcionamiento en arranque.

De cara a la formulación matemática de la solución, para cada atracción se definen las siguientes variables:

- X_i : Solicitud de arranque. Es un parámetro que se activa, tomando valor 1, cuando existe demanda suficiente de personas para lanzar la atracción 'i' y se quiere solicitar el arranque.
- Y_i : Autorización de arranque: Es la variable de decisión del sistema y se activa, tomando valor 1, cuando, tras haber solicitado arranque, el sistema comprueba que se dan las condiciones necesarias para el lanzamiento de la atracción 'i'.
- Z_i : Remonte en marcha. Es un parámetro que se activa tomando valor 1 durante el tiempo de remonte de la atracción (fase de funcionamiento de los motores)

Cumpléndose en cada instante de tiempo:

$$X_i + Y_i + Z_i \leq 1$$

Además, cada atracción viene definida por una serie de parámetros:

- P_i : Potencia nominal del motor de remonte de la atracción 'i'.
- T_i : Tiempo de remonte de la atracción 'i'.

Para las cargas consideradas se cumple que:

$$P_1 \geq P_2 \geq P_3$$

$$T_1 \geq T_2 \geq T_3$$

Modos de funcionamiento

Como ya se ha hecho referencia en anteriores ocasiones, la solución busca disminuir los picos de potencia instantáneos para reducir las penalizaciones por exceso sobre la potencia contratada mediante la introducción de pequeños tiempos de espera de modo que se evite el arranque simultáneo de las cargas relacionadas con atracciones de alta potencia eléctrica. Esto, aunque es difícil de cuantificar, provocará un efecto negativo en las colas de cada atracción, prolongando los tiempos de espera para los usuarios.

Por tanto, de cara a dar una visión realista de la solución se han definido diferentes modos de funcionamiento del sistema de sincronización de modo que se puedan ir obteniendo soluciones de compromiso entre la reducción de las penalizaciones y el efecto sobre los tiempos de espera, utilizando un modo u otro del sistema en función del aforo esperado del parque.

Los modos de funcionamiento se definen por tanto en función del número de cargas máximo que permitimos su simultaneidad en el arranque, esto es:

$$\sum_i Y_{it} \leq N_{\max}$$

Se describen del siguiente modo:

- Modo de funcionamiento 1

Es el modo más restrictivo. No se permite en este caso la simultaneidad en el arranque de ninguna de las tres atracciones, es decir, han de arrancar de una en una.

Cuando se trabaja con este modo de funcionamiento se provoca por tanto, como mínimo, una reducción de la potencia registrada en el maxímetro de P_2 más P_3 .

- Modo de funcionamiento 2

En este modo se permite la simultaneidad en el arranque de dos de las atracciones, siempre que una de ellas no sea la atracción de mayor potencia de las tres consideradas (P_1).

Cuando se trabaja con este modo de funcionamiento se provoca por tanto, como mínimo, una reducción de la potencia registrada en el maxímetro de P_1 .

- Modo de funcionamiento 2B

En este modo se permite la simultaneidad en el arranque de dos de las atracciones, sea cual sea la combinación de parejas.

Cuando se trabaja con este modo de funcionamiento se provoca por tanto, como mínimo, una reducción de la potencia registrada en el maxímetro de P_3 .

- Modo de funcionamiento 3

En este modo se permite la simultaneidad de las tres atracciones. En la práctica el sistema no actúa. La introducción de este modo de funcionamiento es para relajar el impacto en los periodos de máxima afluencia.

Cuando se trabaja con este modo de funcionamiento no se provoca ninguna reducción de la potencia registrada en el maxímetro.

Los distintos modos de funcionamiento, su condición matemática y el efecto provocado en el registro del maxímetro se resumen en la Tabla 15.

Tabla 15.- Resumen de los modos de funcionamiento

Modo	N_{max}	Ec de restricción	Potencia reducida (min)
Modo 1	1	$Y_1 + Y_2 + Y_3 \leq 1$	P2+P3
Modo 2	2	$1,5Y_1 + Y_2 + Y_3 \leq 2$	P1
Modo 2B	2	$Y_1 + Y_2 + Y_3 \leq 2$	P3
Modo 3	3	$Y_1 + Y_2 + Y_3 \leq 3$	0

Como puede observarse en la tabla anterior se ha realizado un pequeño reajuste en la ecuación de restricción del modo 2 para que se cumpla la condición del modo de funcionamiento.

Simulación de la coincidencia de los arranques

Como se ha mencionado ya con anterioridad, actualmente todas las atracciones del parque, incluidas las tres objeto de estudio en este proyecto, funcionan de manera independiente, sin ningún tipo de correlación entre ellas. Esto hace que los arranques de las atracciones coincidan en el tiempo provocando un pico de potencia registrado en el maxímetro. Para que la solución sea efectiva y que realmente se provoque un ahorro se ha estudiado previamente que en efecto estas coincidencias se producen cuando las atracciones se gestionan sin el sistema de sincronización. Para ello se han realizado simulaciones jugando con los tiempos característicos que definen un ciclo de funcionamiento, que son los que se definen a continuación:

T_c: Tiempo de carga de los pasajeros de la atracción 'i'

T_r: Tiempo de remonte de la atracción 'i'

T_i: Tiempo inercial de la atracción 'i'

T_d: Tiempo descarga de los pasajeros de la atracción 'i'

Para las simulaciones, se han considerado los tiempo de remonte e inercial como fijos (aunque tienen en realidad una ligera dependencia de la temperatura del aire y el porcentaje de humedad relativa), determinados por su tiempo medio. Para los tiempos de carga y descarga de los pasajeros, aunque tienden a comportarse con bastante regularidad existe algo más de variabilidad, y se ha considerado que, en un cinco por ciento de las ocasiones el tiempo de carga o descarga es igual a un noventa por ciento del tiempo medio, un ochenta por ciento de las ocasiones el tiempo de carga o descarga es el tiempo medio y un quince por ciento de las ocasiones el tiempo de carga o descarga es igual al ciento diez por ciento del tiempo medio. Esta variabilidad se resume en la Tabla 16:

Tabla 16.- Distribución de los tiempos usados en las simulaciones

Tiempo de carga	Tiempo de remonte	Tiempo inercial	Tiempo descarga
5% - $0,9 \times T_{Ci}$	T_i	T_{ii}	5% - $0,9 \times T_{di}$
80% - $1 \times T_{Ci}$			80% - $1 \times T_{di}$
15% - $1,1 \times T_{Ci}$			15% - $1,1 \times T_{di}$

Ejecutando las simulaciones con dichas consideraciones obtenemos que se cumplen las temidas simultaneidades en los arranques de las tres atracciones, como puede observarse a modo de ejemplo en un extracto de las simulaciones mostrado en la Ilustración 3.

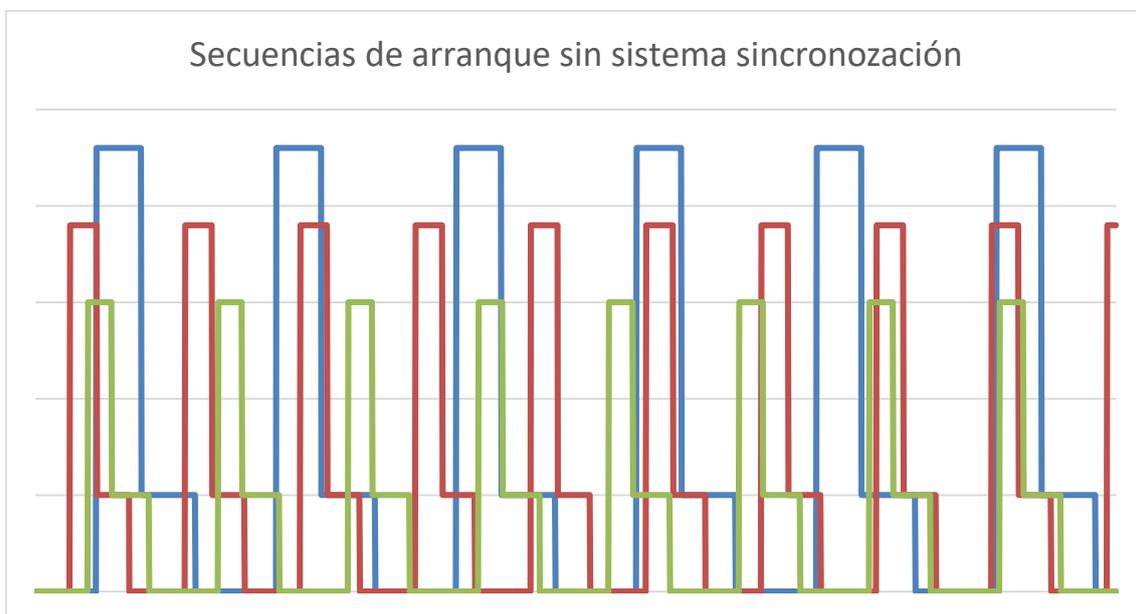


Ilustración 3.- Extracto de una simulación de arranque sin sistema de sincronización

Secuencia de resolución

En función de los modos de funcionamiento en esta sección se va a describir la secuencia de funcionamiento del sistema en función del modo en que esté actuando en cada momento.

Modo 1

- 1) Una vez llenado el carro de pasajeros el usuario activa la variable de solicitud de autorización de arranque. Imaginemos que nos situamos desde la atracción 1.

$$X_1=1;$$

$$Y_1=0;$$

$$Z_1=0;$$

- 2) Una vez solicitado el arranque, el sistema comprueba el estado de las otras dos atracciones, generándose la siguiente casuística:

- a. La atracción 2 se encuentra en remonte y la atracción 3 había solicitado la autorización de arranque con anterioridad a la atracción 1.
 - b. La atracción 2 se encuentra en remonte y la atracción 3 no ha solicitado autorización de arranque.
 - c. La atracción 3 se encuentra en remonte y la atracción 2 había solicitado la autorización de arranque con anterioridad a la atracción 1.
 - d. La atracción 3 se encuentra en remonte y la atracción 2 no ha solicitado autorización de arranque.
 - e. Ninguna de las otras dos atracciones se encuentra en arranque ni con la solicitud de autorización de arranque.
- 3) En función del resultado de la comprobación anterior, se le asigna un tiempo de espera para el arranque de la atracción para cada caso.
- a. El tiempo de espera asignado es igual al tiempo restante de remonte de la atracción 2 más el tiempo de remonte de la atracción 3.
 - b. El tiempo de espera asignado es igual al tiempo restante de remonte de la atracción 2.
 - c. El tiempo de espera asignado es igual al tiempo restante de remonte de la atracción 3 más el tiempo de remonte de la atracción 2.
 - d. El tiempo de espera asignado es igual al tiempo restante de remonte de la atracción 3.
 - e. No se asigna tiempo de espera.
- 4) Una vez consumido el tiempo de espera asignado a la atracción se autoriza durante un tiempo determinado (aproximadamente cinco segundos) el arranque de dicha atracción.

$$X_1=0;$$

$$Y_1=1;$$

$$Z_1=0;$$

- 5) La atracción ejecuta el arranque y lanza la atracción, por lo que durante su correspondiente tiempo de remonte el valor de las variables es el siguiente:

$$X_1=0;$$

$$Y_1=0;$$

$$Z_1=1;$$

- 6) Una vez finalizado el remonte de la atracción y entrado en fase inercial, se resetean las variables y se finaliza el ciclo. Del mismo modo, si alcanzado el punto 4, no se ejecuta el arranque durante el tiempo de autorización se salta directamente al punto 6.

$$X_1=0;$$

$$Y_1=0;$$

$$Z_1=0;$$

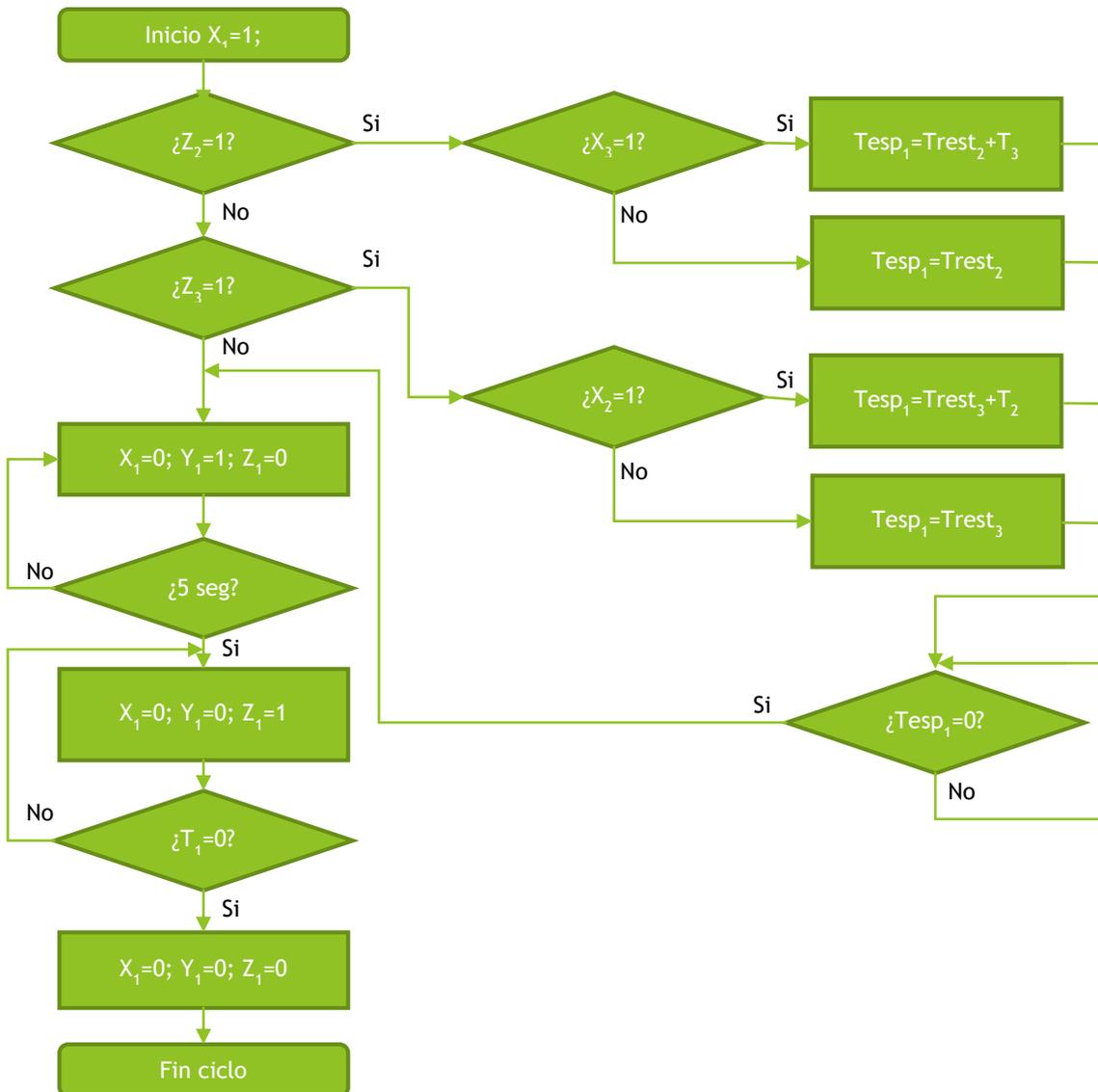


Ilustración 4.- Diagrama de flujo de la solución funcionando en modo 1 visto desde la atracción 1

Modo 2 (aplicado a la atracción 1)

- 1) Una vez llenado el carro de pasajeros el usuario activa la variable de solicitud de autorización de arranque. Imaginemos que nos situamos desde la atracción 1.

$X_1=1;$
 $Y_1=0;$
 $Z_1=0;$

- 2) Una vez solicitado el arranque, el sistema comprueba el estado de las otras dos atracciones, generándose la siguiente casuística:
 - a. La atracción 2 y la atracción 3 se encuentran en remonte.
 - b. La atracción 2 se encuentra en remonte.
 - c. La atracción 3 se encuentra en remonte.
 - d. Ninguna de las otras dos atracciones se encuentra en arranque ni con la solicitud de autorización de arranque.

- 3) En función del resultado de la comprobación anterior, se le asigna un tiempo de espera para el arranque de la atracción para cada caso.
- El tiempo de espera asignado es igual al máximo tiempo restante de remonte entre la atracción 2 y la atracción 3.
 - El tiempo de espera asignado es igual al tiempo restante de remonte de la atracción 2.
 - El tiempo de espera asignado es igual al tiempo restante de remonte de la atracción 3 más el tiempo de remonte de la atracción 2.
 - No se asigna tiempo de espera.
- 4) Una vez consumido el tiempo de espera asignado a la atracción se autoriza durante un tiempo determinado (aproximadamente cinco segundos) el arranque de dicha atracción.

$$X_1=0;$$

$$Y_1=1;$$

$$Z_1=0;$$

- 5) La atracción ejecuta el arranque y lanza la atracción, por lo que durante su correspondiente tiempo de remonte el valor de las variables es el siguiente:

$$X_1=0;$$

$$Y_1=0;$$

$$Z_1=1;$$

- 6) Una vez finalizado el remonte de la atracción y entrado en fase inercial, se resetean las variables y se finaliza el ciclo. Del mismo modo, si alcanzado el punto 4, no se ejecuta el arranque durante el tiempo de autorización se salta directamente al punto 6.

$$X_1=0;$$

$$Y_1=0;$$

$$Z_1=0;$$

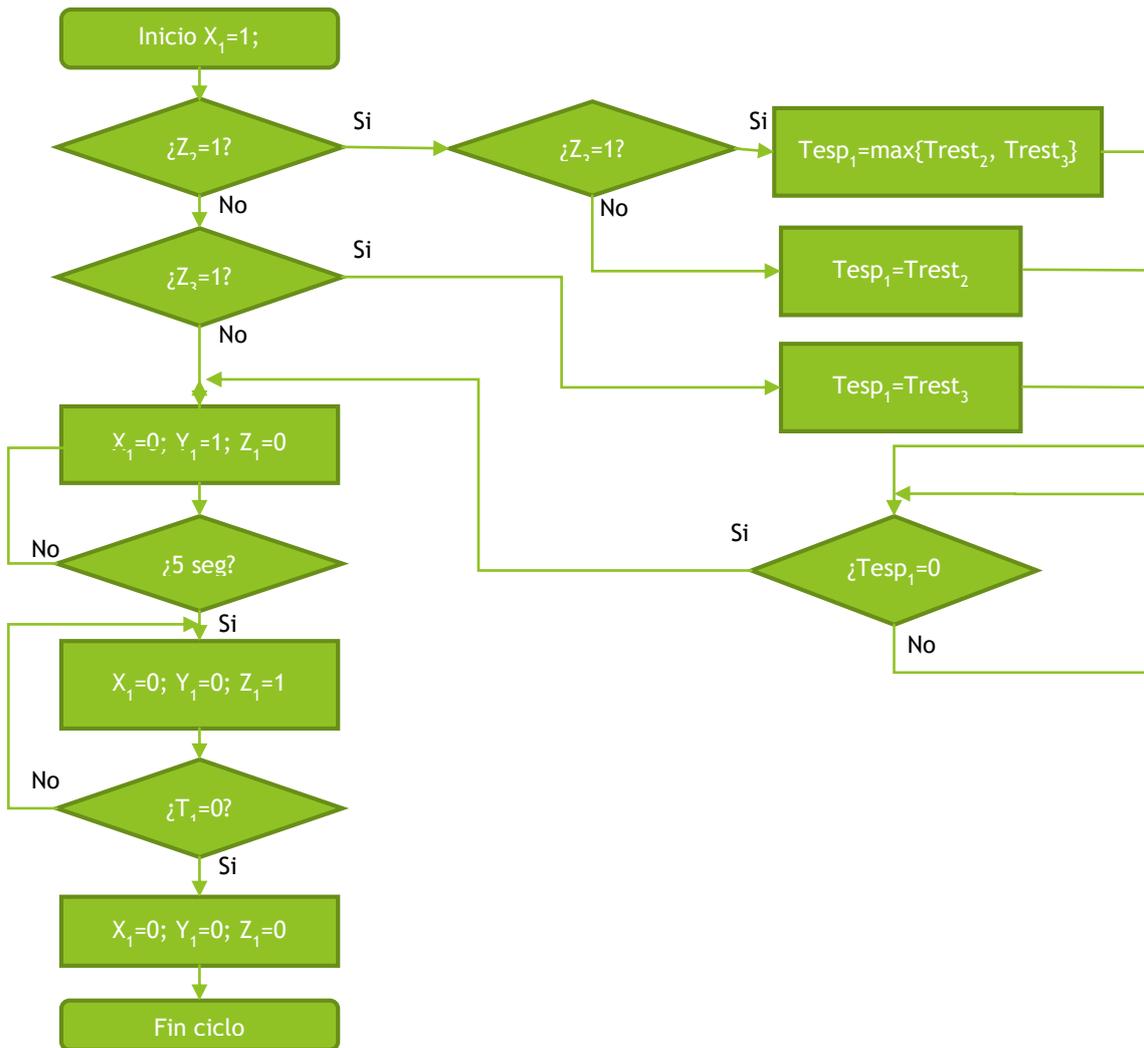


Ilustración 5.- Diagrama de flujo de la solución funcionando en modo 2 visto desde la atracción 1

Modo 2 (aplicado a las atracciones 2 y 3)

- 1) Una vez llenado el carro de pasajeros el usuario activa la variable de solicitud de autorización de arranque. Imaginemos que nos situamos desde la atracción 2.

$$\begin{aligned}
 X_2 &= 1; \\
 Y_2 &= 0; \\
 Z_2 &= 0;
 \end{aligned}$$

- 2) Una vez solicitado el arranque, el sistema comprueba únicamente en este caso el estado de la atracción 1, generándose la siguiente casuística:
 - a. La atracción 1 se encuentra en remonte.
 - b. La atracción 1 no se encuentra en remonte.
- 3) En función del resultado de la comprobación anterior, se le asigna un tiempo de espera para el arranque de la atracción para cada caso.
 - a. El tiempo de espera asignado es igual al tiempo restante de remonte de la atracción 1.
 - b. No se asigna tiempo de espera.

- 4) Una vez consumido el tiempo de espera asignado a la atracción se autoriza durante un tiempo determinado (aproximadamente cinco segundos) el arranque de dicha atracción.

$X_2=0;$

$Y_2=1;$

$Z_2=0;$

- 5) La atracción ejecuta el arranque y lanza la atracción, por lo que durante su correspondiente tiempo de remonte el valor de las variables es el siguiente:

$X_2=0;$

$Y_2=0;$

$Z_2=1;$

- 6) Una vez finalizado el remonte de la atracción y entrado en fase inercial, se resetean las variables y se finaliza el ciclo. Del mismo modo, si alcanzado el punto 4, no se ejecuta el arranque durante el tiempo de autorización se salta directamente al punto 6.

$X_2=0;$

$Y_2=0;$

$Z_2=0;$

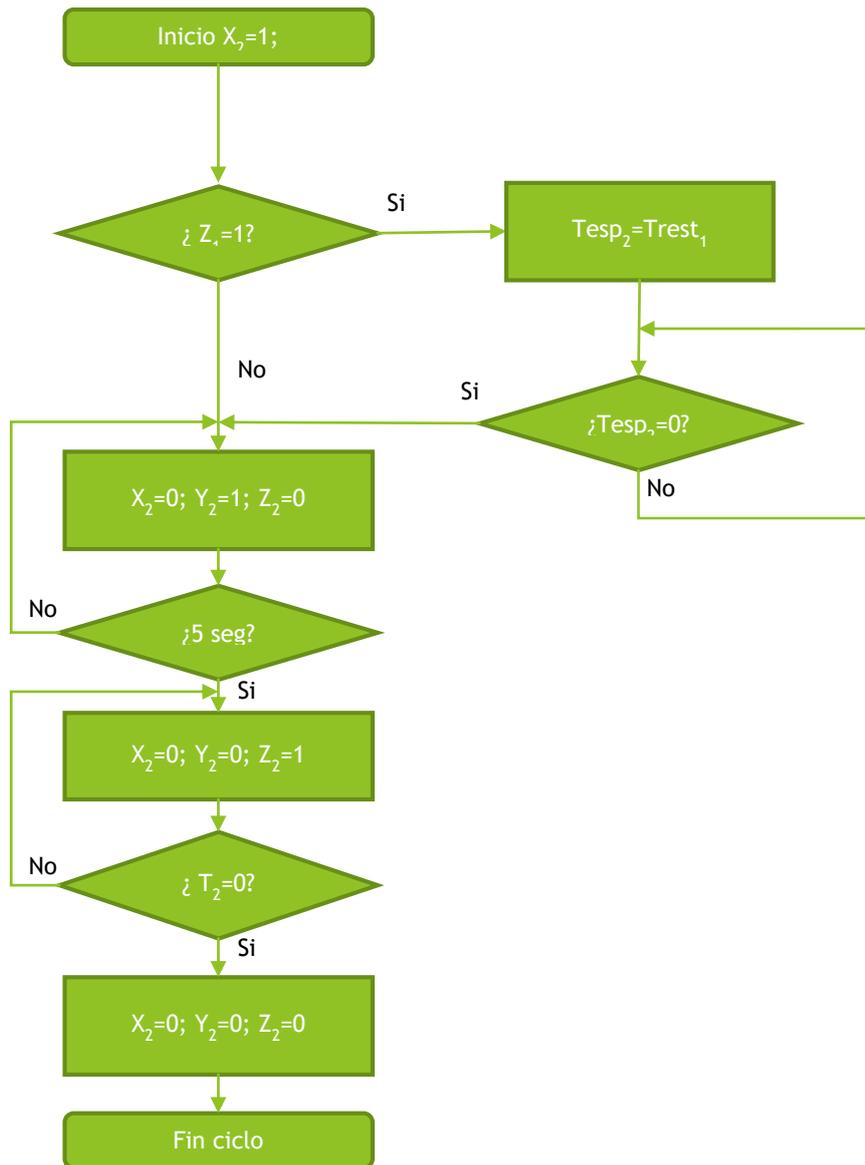


Ilustración 6.- Diagrama de flujo de la solución funcionando en modo 2 visto desde la atracción 2

Modo 2B

- 1) Una vez llenado el carro de pasajeros el usuario activa la variable de solicitud de autorización de arranque. Imaginemos que nos situamos desde la atracción 1.
 - $X_1=1;$
 - $Y_1=0;$
 - $Z_1=0;$
- 2) Una vez solicitado el arranque, el sistema comprueba únicamente en este caso el estado de la atracción 1, generándose la siguiente casuística:
 - a. La atracción 2 y la atracción 3 se encuentra en remonte.
 - b. Una o ninguna de las otras atracciones se encuentran en remonte.
- 3) En función del resultado de la comprobación anterior, se le asigna un tiempo de espera para el arranque de la atracción para cada caso.
 - a. El tiempo de espera asignado es igual al mínimo tiempo restante de remonte entre la atracción 2 y la atracción 3.

b. No se asigna tiempo de espera.

- 4) Una vez consumido el tiempo de espera asignado a la atracción se autoriza durante un tiempo determinado (aproximadamente cinco segundos) el arranque de dicha atracción.

$X_1=0;$

$Y_1=1;$

$Z_1=0;$

- 5) La atracción ejecuta el arranque y lanza la atracción, por lo que durante su correspondiente tiempo de remonte el valor de las variables es el siguiente:

$X_1=0;$

$Y_1=0;$

$Z_1=1;$

- 6) Una vez finalizado el remonte de la atracción y entrado en fase inercial, se resetean las variables y se finaliza el ciclo. Del mismo modo, si alcanzado el punto 4, no se ejecuta el arranque durante el tiempo de autorización se salta directamente al punto 6.

$X_1=0;$

$Y_1=0;$

$Z_1=0;$

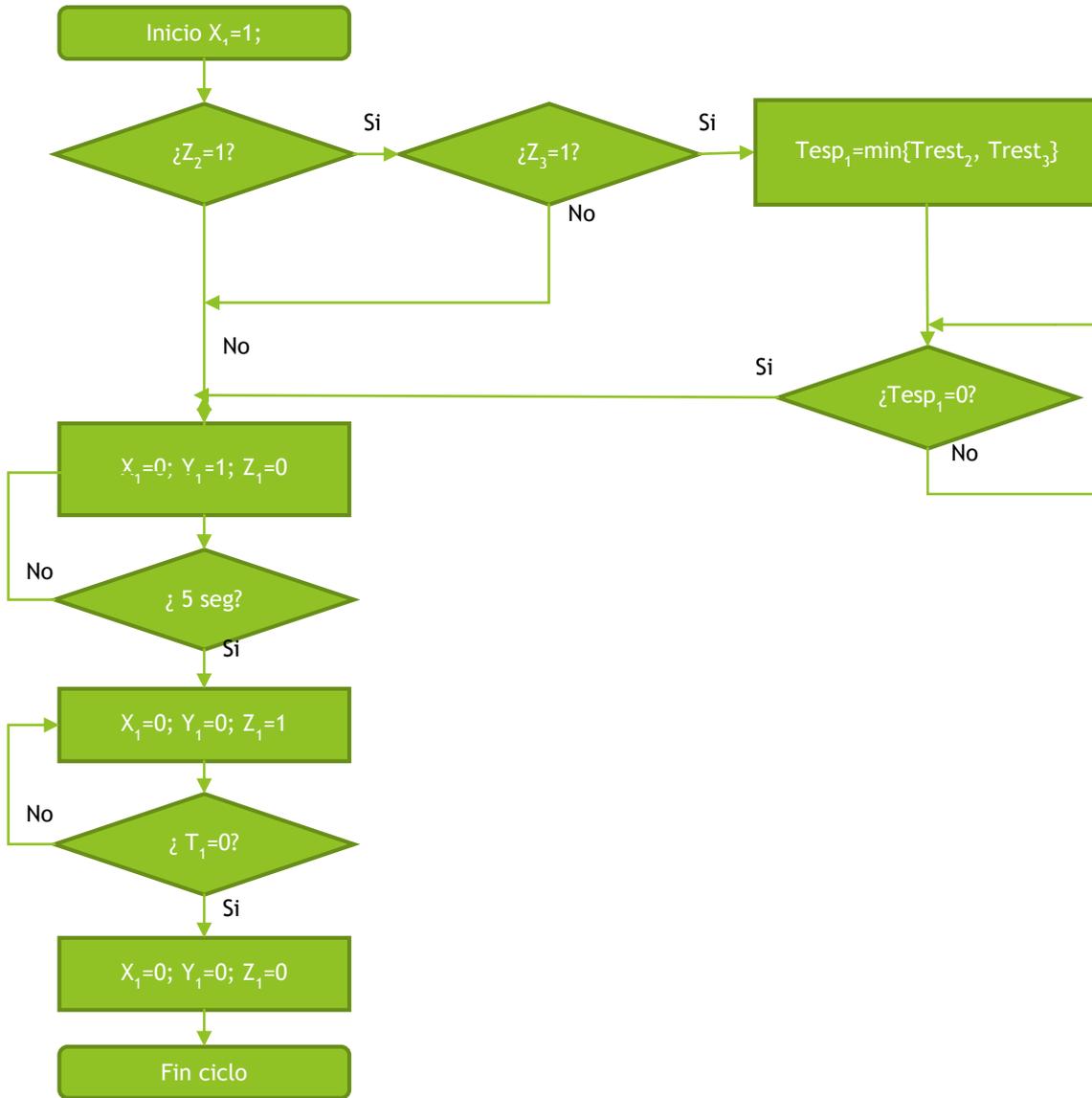


Ilustración 7.- Diagrama de flujo de la solución funcionando en modo 2B visto desde la atracción 1

7. Resultados potenciales de explotación

En esta sección se van a presentar los potenciales ahorros resultantes de la aplicación del sistema de sincronización de cargas en función de los distintos casos de estudio generados.

Casos de estudio

Para el estudio de los ahorros potenciales se han considerado hasta siete posibles casos de uso del sistema de sincronización.

Todos los casos tienen un punto en común, el sistema no actúa, es decir, lo hace en modo 3, en aquellos días y/o franjas horarias en las que la tarifa de aplicación es P6, esto es, los días festivos y los fines de semana, así como los días del mes de agosto.

Los tres primeros casos presentados se corresponden con el hipotético caso de que el sistema solo pudiera funcionar bajo un modo de funcionamiento durante todo el, o en caso contrario, estaría desactivado.

Los cuatro siguientes son casos en los que se combina el uso de los distintos modos en función del mes, debido los periodos de potencias de aplicación en cada mes a excepción de junio que se considera por quincenas, donde progresivamente se va desde un escenario de uso más intensivo del sistema (priorización de los modos 1 y 2) a escenarios menos intensivos (donde va prevaleciendo el uso del modo 2B).

A continuación en las siguientes tablas se resume la configuración del sistema en los diferentes casos de estudio:

- **Casos 1, 2 y 3**

Tabla 17.- Casos de estudio con funcionamiento fijo durante el año

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Enero	Modo 1	Modo 2	Modo 2B
Febrero	Modo 1	Modo 2	Modo 2B
Marzo	Modo 1	Modo 2	Modo 2B
Abril	Modo 1	Modo 2	Modo 2B
Mayo	Modo 1	Modo 2	Modo 2B
Junio (1ª quincena)	Modo 1	Modo 2	Modo 2B
Junio (2ª quincena)	Modo 1	Modo 2	Modo 2B
Julio	Modo 1	Modo 2	Modo 2B

Agosto	Modo 3	Modo 3	Modo 3
Septiembre	Modo 1	Modo 2	Modo 2B
Octubre	Modo 1	Modo 2	Modo 2B
Noviembre	Modo 1	Modo 2	Modo 2B
Diciembre	Modo 1	Modo 2	Modo 2B

- Casos 4, 5, 6 y 7

Tabla 18.- Casos de estudio con funcionamiento combinado

	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7
Enero	Modo 1	Modo 1	Modo 1	Modo 1
Febrero	Modo 1	Modo 1	Modo 1	Modo 1
Marzo	Modo 1	Modo 1	Modo 1	Modo 1
Abril	Modo 1	Modo 1	Modo 1	Modo 1
Mayo	Modo 1	Modo 1	Modo 1	Modo 1
Junio (1ª quincena)	Modo 2	Modo 2	Modo 2	Modo 2B
Junio (2ª quincena)	Modo 2	Modo 2	Modo 2B	Modo 2B
Julio	Modo 2	Modo 2B	Modo 2B	Modo 2B
Agosto	Modo 3	Modo 3	Modo 3	Modo 3
Septiembre	Modo 2	Modo 2	Modo 2	Modo 2
Octubre	Modo 1	Modo 1	Modo 1	Modo 1
Noviembre	Modo 1	Modo 1	Modo 1	Modo 1
Diciembre	Modo 1	Modo 1	Modo 1	Modo 1

¿Cómo se han cuantificado los ahorros?

Para la cuantificación económica de los ahorros se ha contado con los datos registrados del maxímetro durante todos los periodos cuartohorarios de un año completo. En función de dichos registros y conocidos los tramos de potencia contratados, el periodo de potencia de aplicación en cada periodo y el modo de funcionamiento en el que trabaja el sistema de sincronización en cada caso, se ha aplicado la siguiente regla de cálculo:

$$P_{\text{corregida}} = P_{\text{max}} - P_{\text{reducida}}$$

Esto es, la potencia corregida, que será la utilizada para recalcular las penalizaciones por exceso, es igual a la potencia registrada en el maxímetro menos la potencia reducida por el sistema, dependiendo en cada caso del modo de funcionamiento que se esté considerando (véase la Tabla 15)

Esta corrección le lleva a cabo para aquellos periodos cuartohorarios en los que se supera el límite de potencia contratada, y en los cuales se utilizaría el sistema de sincronización.

Una vez realizada la corrección en todos los cuartohorarios se vuelven calcular las penalizaciones incurridas por exceso de potencia contratada utilizando la fórmula expuesta en el apartado *La composición de la factura eléctrica*.

$$FEP = \sum_{i=1}^6 k_i \times 1,4064 \times A_{ei}$$

Donde:

Ki = coeficiente que tomará los siguientes valores dependiendo del período tarifario *i*:

Periodo	1	2	3	4	5	6
Ki	1	0,5	0,37	0,37	0,37	0,17

Aei = se calculará de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^{n=j} (P_{dj} - P_{ci})^2}$$

Donde:

Pdj = potencia demandada en cada uno de los cuartos de hora del período *i* en que se haya sobrepasado *Pci*.

Pci = potencia contratada en el período *i* en el período considerado.

Estas potencias se expresarán en kW. Los excesos de potencia se facturarán mensualmente.

A continuación, en la Ilustración 8, se muestra como con el sistema de sincronización activado las cargas no coinciden, por lo que se reduce la potencia máxima registrada. Puede compararse con la Ilustración 3, donde se comprobaba que sin el sistema funcionando, las cargas coinciden en el tiempo.

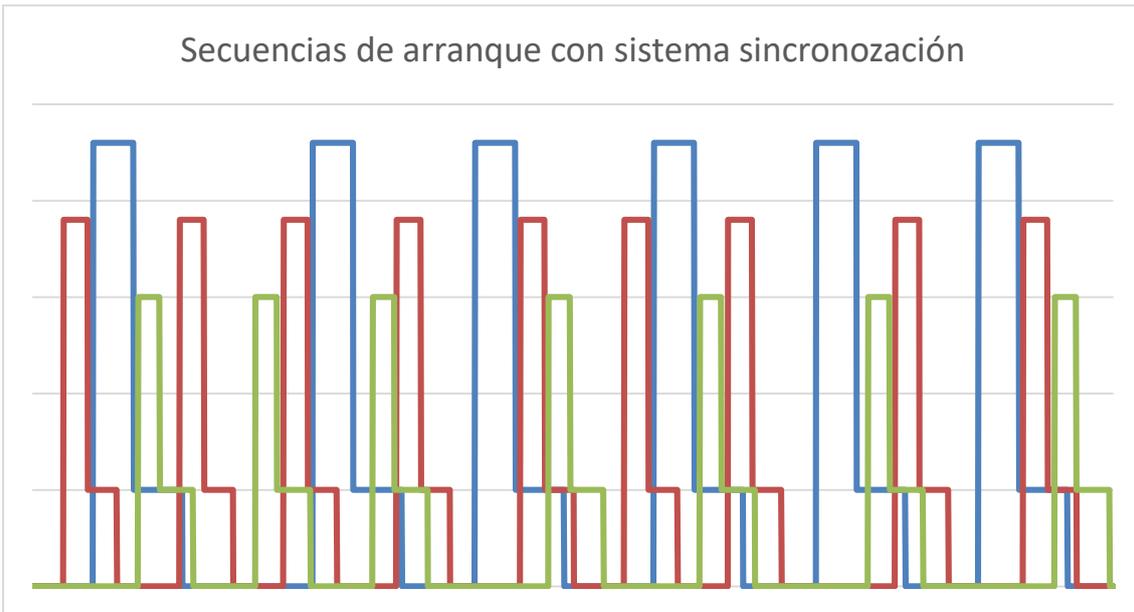


Ilustración 8.- Resultado de la simulación de cargas con el sistema de sincronización trabajando bajo el modo 1.

Extrapolando los resultados de la anterior ilustración, que cubría varios minutos de funcionamiento, al registro de un día completo, obtendríamos un par de gráficas como las mostradas en la Ilustración 9. En ellas podemos observar el dato de potencia registrado por el máxímetro para un día completo sin emplear el sistema de sincronización y empleándolo. Se observa por tanto como, para este día mostrado como ejemplo, los picos registrados entre las 15:00 y las 19:00 (aprox) se ven reducidos en la gráfica inferior gracias al uso del sistema de sincronización de cargas, y por tanto, las penalizaciones por exceso serán menores.



Ilustración 9.- Diferencia entre los picos de potencia de un día completo sin uso (arriba) y con uso del sistema de sincronización de cargas (abajo)

Y finalmente, basado en estos datos, considerando cada uno de los días para cada mes, se calcula la diferencia entre lo realmente pagado y lo que se pagaría en penalizaciones al emplear las nuevas potencias corregidas, obteniéndose los potenciales ahorros del uso del sistema, que se presentan a continuación.

Potenciales ahorros

A continuación se presentan los resultados potenciales del uso del sistema de planificación en función de caso de estudio.

En la primera columna de la Tabla 19 se presentan, adimensionalizadas, las penalizaciones incurridas en cada mes por excesos de potencia durante un año de operación real del parque, es decir, sin el uso del sistema de sincronización de cargas. En las columnas sucesivas se presentan las penalizaciones en las que se incurriría de haberse utilizado el sistema de planificación según el modo o modos de funcionamiento del caso concreto.

Se puede observar en la Tabla 19 cómo, en el caso de la estrategia de uso más agresiva, el modo 1, produciría un ahorro de casi un 30%, aunque sería de esperar un alto impacto traducido en colas de espera en las atracciones.

En los casos 2 y 3, con impactos presumiblemente menores se pueden conseguir ahorros de un 20,38% y 13,47% respectivamente.

Los casos más realistas son los que van desde el caso 4 al caso 7, ya que presentan un uso combinado del sistema de planificación en función de los aforos esperados en el parque, desde una estrategia más agresiva o en búsqueda de minimizar las penalizaciones, hacia más permisiva en la planificación de arranque que busca minimizar el impacto en la operativa, esto es, en los tiempos de espera provocados. En estos casos se puede concluir que el sistema de planificación puede reducir entre un 16,37% y un 21,77% los pagos por penalizaciones en la factura eléctrica, acotando el impacto producido.

Tabla 19.- Tabla resumen de los ahorros para cada uno de los casos de estudio

	Pagado	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7
Enero	-	-	-	-	-	-	-	-
Febrero	-	-	-	-	-	-	-	-
Marzo	2,35	0,65	1,11	1,50	0,65	0,65	0,65	0,65
Abril	2,71	1,04	1,44	1,77	1,04	1,04	1,04	1,04
Mayo	3,27	1,68	2,21	2,63	1,68	1,68	1,68	1,68
Junio	34,95	24,92	28,09	30,45	28,09	28,09	29,80	30,45
Julio	52,35	39,39	43,55	46,60	43,55	46,60	46,60	46,60
Agosto	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
Septiembre	3,81	2,19	2,65	3,03	2,65	2,65	2,65	2,65
Octubre	-	-	-	-	-	-	-	-
Noviembre	-	-	-	-	-	-	-	-
Diciembre	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	100,00	70,43	79,62	86,53	78,23	81,27	82,98	83,63
Ahorro		29,57	20,38	13,47	21,77	18,73	17,02	16,37

8. Conclusiones

- La regulación para la contratación de suministro eléctrico a nivel industrial es compleja y la facturación se establece en función de términos de energía y de potencia.
- Que existe una tendencia consolidada que apuesta por las medidas de eficiencia energética en el sector industrial como un mecanismo de competitividad y de responsabilidad ambiental.
- Que dentro de estas medidas, los modelos de planificación industrial o *scheduling* (su denominación en inglés) presentan un gran potencial de uso para conseguir estos objetivos de eficiencia.
- Que existe una gran cantidad de modelos de planificación que persiguen una optimización energética y/o económica mediante la minimización de la energía consumida.
- Que estos modelos, buscando un objetivo global similar, pueden tener una formulación muy variada tanto en sus funciones objetivo como en sus restricciones.
- Que como en relación con lo indicado en la primera conclusión, el término de potencia también puede considerarse una variable de optimización y pueden establecerse modelos de planificación en torno a ella.
- Que se ha detectado algún modelo que considera la potencia como objeto de optimización, en concreto buscando su minimización.
- Que existe todavía una oportunidad de desarrollo y profundización en modelos de eficiencia energética a nivel industrial que optimicen en función de la variable de potencia incluyendo términos “realistas” de aplicación industrial (penalizaciones por incumplimiento ,soluciones de compromiso, limitaciones de potencia, etc)
- Que se ha presentado en este trabajo una solución para la reducción de las penalizaciones considerando una solución de compromiso entre las generadas por exceso de potencia y las generadas por el impacto contra productor en el ritmo productivo.
- Que se han mostrado los ahorros potenciales que podrían obtenerse por el uso de dicha solución en el caso de aplicación industrial de un parque de atracciones.
- Que dicha solución heurística podría, con posteriores desarrollos, convertirse en un modelo de optimización para la reducción de picos de potencia en entornos productivos.

9. Referencias

- [1] Ashok, S. (2006). Peak-load management in steel plants. *Applied Energy*, 83(5), 413–424.
- [2] Jim Lee, Theodore Kozman and Xinchun Wang. (2007). Production Scheduling With Energy Efficiency Constraints. *Proceedings from the Twenty-ninth Industrial Energy Technology Conference*, New Orleans, LA, May 8-11
- [3] Artigues, C., Lopez, P., & Haït, A. (2010). The energy scheduling problem: Industrial case-study and constraint propagation techniques. *International Journal of Production Economics*, 143(1), 13–23.
- [4] Fang, K., Uhan, N.A., Zhao, F., & Sutherland, J. W. (2011). A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction. *Journal of Manufacturing Systems*, 30 (4), 234–240.
- [5] Eren, E. C., & Gautam, N. (2010). Efficient control for a multi-product quasi-batch process via stochastic dynamic programming. *IIE Transactions*, 43 (3), 192–206.
- [6] Bruzzone, A. A., Anghinolfi, D., Paolucci, M., & Tonelli, F. (2012). Energy-aware scheduling for improving manufacturing process sustainability: A mathematical model for flexible flow shops. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 61 (1), 459–462.
- [7] Chen, G., Zhang, L., Arinez, J., & Biller, S. (2013). Energy-efficient production systems through schedule-based operations. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 10 (1), 27–37.
- [8] Dai, M., Tang, D., Giret, A., Salido, M. A., & Li, W. D. (2013). Energy-efficient scheduling for a flexible flow shop using an improved genetic-simulated annealing algorithm. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29 (5), 418–429.
- [9] Fang, K., Uhan, N. A., Zhao, F., & Sutherland, J. W. (2013). Flow shop scheduling with peak power consumption constraints. *Annals of Operations Research*, 206 (1), 115–145.
- [10] Pach, C., Berger, T., Sallez, Y., Bonte, T., Adam, E., & Trentesaux, D. (2013). Reactive and energy-aware scheduling of flexible manufacturing systems using potential fields. *Computers in Industry*, 65 (3), 434–448.
- [11] Sun, Z., Li, L., Fernandez, M., & Wang, J. (2014). Inventory control for peak electricity demand reduction of manufacturing systems considering the tradeoff between production loss and energy savings. *Journal of Cleaner Production*, 82, 84–93.
- [12] Xu Gong, Toon De Pessemier, Wout Joseph, Luc Martens. (2015). An energy-cost-aware scheduling methodology for sustainable manufacturing. *The 22nd CIRP conference on Life Cycle Engineering*.
- [13] Abhay Sharma, Fu Zhao, John W. Sutherland. (2015). Econological scheduling of a manufacturing enterprise operating under a time-of-use electricity tariff. *Journal of Cleaner Production*, 108, 256-270.
- [14] Dunbing Tang, Min Dai, Miguel A. Salido, Adriana Giret. (2015). Energy-efficient dynamic for scheduling for a flexible flow shop using an improved particle swarm optimization. *Computers in Industry*.

- [15] S. Afshin Mansouri, Emel Aktas, Umut Besikci. (2015). Green scheduling of a two-machine flowshop. Trade-off between makespan and energy consumption. *European Journal of Operational Research*, 248, 772–788.
- [16] C. Pach, T. Berger, Y. Sallez, D. Trentesaux. (2015). Reactive control of overall power consumption in flexible manufacturing systems scheduling. A potential fields model. *Control Engineering Practice*, 44, 193-208.
- [17] Rui Zhang, Raymond Chiong. (2015). Solving the energy-efficient job shop scheduling problem. A multi-objective genetic algorithm with enhanced local search. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3361-3375.
- [18] Ashok S. (2010). PLC-based load management in steel rolling mills. *Energy Engineering*, 107 (4), 38-53.
- [19] Michael C. Georgiadis, Aaron A. Levis, Panagiotis Tsiakis, Ioannis Sanidiotis, Constantinos C. Pantelides, Lazaros G. Papageorgiou. (2005). Optimisation-based scheduling. A discrete manufacturing case study. *Computers & Industrial Engineering*, 49, 118–145.
- [20] Keisuke Nagasawa, Yuto Ikeda, Takashi Irohara. (2015). Robust flow shop scheduling with random processing times for reduction of peak power consumption. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 59, 102-113.
- [21] Fuli Xiong, Keyi Xing, Feng Wang. (2014). Scheduling a hybrid assembly-differentiation flowshop to minimize total flow time. *European Journal of Operational Research*, 240, 338-354.
- [22] J.M. Yusta, F. Torres, H.M. Khodr. (2010). Optimal methodology for a machining process scheduling in spot electricity markets. *Energy Conversion and Management*, 51, 2647-2654.
- [23] Xu Gong, Toon De Pessemer, Wout Joseph, Luc Martens. (2015). An energy-cost-aware scheduling methodology for sustainable manufacturing. *The 22nd CIRP conference on Life Cycle Engineering*, 185-190.
- [24] Hubert Hadera, Iiro Harjunkoski, Guido Sand, Ignacio E. Grossmann, Sebastian Engell. (2015). Optimization of steel production scheduling with complex time-sensitive electricity cost. *Computers and Chemical Engineering*, 76, 117-136.
- [25] Zhang, H., Zhao, F., Fang, K., & Sutherland, J. W. (2014). Energy-conscious flow shop scheduling under time-of-use electricity tariffs. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 63(1), 37-40.
- [26] Xu Gong, Toon De Pessemer, Wout Joseph, Luc Martens. (2015). A generic method for energy-efficient and energy-cost-effective production at the unit process level. *Journal of Cleaner Production*, 113, 508-522.
- [27] Ada Che, Yizeng Zeng, Ke Lyu. (2016). An efficient greedy insertion heuristic for energy-conscious single machine scheduling problem under time-of-use electricity tariffs *Journal of Cleaner Production*, 129, 565-577.
- [28] Jacek Blazewicz, Klaus H. Ecker, Erwin Pesch, Gunter Schmidt, Jan Weglarz. (2007). Handbook on Scheduling. From Theory to Applications. *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, pp 73-127.

- [29] H Yoon, E. Kim, M. Kim, J. Lee, G. Lee, S. Ahn. (2015). Towards greener machine tools - A review on energy saving strategies and technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 870-891.
- [30] A. Giret, D. Trentesaux, V. Prabhu. (2015). Sustainability in manufacturing operations scheduling: A state of the art review. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 126-140.

10. Definiciones

Maxímetro: elemento de medida y registro de datos colocado en el interruptor de cabecera de una instalación el cual se encuentra continuamente monitorizando la potencia consumida y registra el valor máximo para cada periodo cuartohorario.

Periodo cuartohorario: Periodo de quince minutos de duración que se emplea como periodo unitario en los cálculos de facturación eléctrica.

Interruptor de cabecera: Elemento eléctrico de protección que sirve además para diferenciar la propiedad de la instalación entre la distribuidora de energía (del interruptor hacia fuera) y el consumidor (del interruptor hacia dentro).

Potencia máxímetro: Potencia registrada en el máxímetro para cada periodo cuartohorario.

Potencia reducida: Potencia que resulta de la aplicación de la solución heurística para la sincronización de las cargas.

Solver: Software para la resolución de modelos de optimización.