

Resumen

La anualización de la jornada laboral es una herramienta de gestión de la mano de obra que permite a las empresas adaptar su capacidad productiva a las fluctuaciones de la demanda. Consiste en un sistema de contratación por un número total de horas anuales, permitiéndose su distribución de forma irregular durante el año (obviamente, respetando un conjunto de restricciones). La implantación de la anualización en una empresa hace necesaria una gestión del tiempo de trabajo. La primera fase consiste en realizar una planificación, en que se determina el número de horas a realizar por cada trabajador en cada semana, pero diversos elementos pueden hacer que la planificación inicial se convierta en infactible o ineficiente, momento en que se lleva a cabo la replanificación.

El objetivo de este proyecto es desarrollar una herramienta que permita replanificar el tiempo de trabajo en un contexto de jornada anualizada. Para ello se desarrolla un modelo matemático de programación lineal entera y mixta (PLM), para obtener una replanificación de horarios de trabajo a partir de una planificación inicial y de los nuevos acontecimientos o previsiones. Se pretende que la herramienta de negociación desarrollada ayude a pactar las condiciones que debe cumplir la nueva planificación de horarios respecto a la anterior, es decir, las condiciones que se deben respetar en la replanificación.

Para comprobar la validez y efectividad del sistema de replanificación propuesto, el modelo matemático es implementado mediante el software optimizador *ILOG CPLEX 4.2*. Se resuelve el modelo con 675 ejemplares diferentes para comprobar su funcionamiento en diferentes escenarios y la evolución del tiempo de cálculo en función de los diferentes parámetros que definen los ejemplares. También se muestra la resolución de un ejemplo concreto, comprobando la capacidad del sistema en el momento de la negociación.

Se concluye que el tiempo necesario para la ejecución del sistema de replanificación diseñado es aceptable, y que éste puede ayudar a valorar económicamente los acuerdos entre patronal y representantes de los trabajadores. En cuanto al coste económico, cada empresa deberá estudiar si le resulta rentable replanificar, considerando el coste de la replanificación y las pérdidas que le puede ocasionar no replanificar.





Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
1 PREFACIO	5
2 INTRODUCCIÓN	7
3 FLEXIBILIDAD EN LA EMPRESA	9
3.1 Introducción.....	9
3.2 Flexibilidad productiva.....	9
3.3 Flexibilidad en los recursos humanos.....	10
4 ANUALIZACIÓN DE LA JORNADA LABORAL	11
4.1 Definición de anualización de la jornada laboral.....	11
4.2 Origen de la jornada anualizada.....	11
4.3 Ventajas e inconvenientes de la anualización.....	12
4.3.1 Para la empresa.....	12
4.3.2 Para los trabajadores.....	13
4.4 Características de los problemas de anualización.....	13
5 PLANIFICACIÓN DE HORARIOS BAJO JORNADA ANUALIZADA	17
5.1 Etapas en la planificación del tiempo de trabajo.....	17
5.2 Estudios sobre planificación del tiempo de trabajo.....	18
6 MODELIZACIÓN DE LA PLANIFICACIÓN DE HORARIOS DE TRABAJO	21
6.1 Descripción de un problema de anualización de la jornada laboral.....	21
6.2 Modelo matemático de planificación M1.....	23
6.3 Modelo matemático de planificación M2.....	28
7 REPLANIFICACIÓN DE HORARIOS BAJO JORNADA ANUALIZADA	
7.1 Introducción.....	33
7.2 Estudios sobre replanificación de la producción y del tiempo de trabajo....	34



8	MODELIZACIÓN DE LA REPLANIFICACIÓN DE HORARIOS DE TRABAJO	37
8.1	Consideraciones en la modelización de la replanificación.....	37
8.2	Metodología de replanificación.....	37
8.3	Modelos matemáticos de replanificación.....	39
8.3.1	Modelo matemático de la fase I.....	42
8.3.2	Modelo matemático de la fase II.....	44
8.3.3	Modelo matemático de la fase III.....	47
8.3.4	Modelo matemático de la fase IV.....	49
9	EXPERIENCIA COMPUTACIONAL	51
9.1	Introducción	51
9.2	Elección de las restricciones y la función objetivo a implementar.....	52
9.3	Definición de criterios en la generación de los ejemplares.....	52
9.4	Análisis de los tiempos de resolución.....	59
9.5	Análisis de un escenario concreto	63
10	PRESUPUESTO	69
11	ESTUDIO DEL IMPACTO AMBIENTAL	71
	CONCLUSIONES	73
	BIBLIOGRAFIA	75
	Referencias bibliográficas.....	75
	Bibliografía complementaria.....	76



1 Prefacio

Actualmente, uno de los principales objetivos de las empresas es adaptar su capacidad productiva a la demanda que el mercado exige de su producto o servicio. La gran competencia existente en el mercado global hace que no adaptarse a dicha demanda constituya una desventaja competitiva y, por tanto, un gran riesgo de perder clientes.

Históricamente han surgido varias soluciones para dar respuesta a esta necesidad. Una de las más antiguas consiste en la creación de excedentes de producto en épocas de baja demanda. Sin embargo, esta solución tiene como principal inconveniente el elevado coste de almacenamiento y gestión de *stocks*. Además, las empresas de servicios no pueden crear *stock*, y las empresas que tratan con productos perecederos o de gran volumen tienen grandes limitaciones en su almacenaje.

Otra manera de conseguir la deseada armonización entre demanda y capacidad productiva es la adaptación de la capacidad productiva mediante la flexibilidad de los recursos humanos. Es habitual en muchas empresas la realización de horas extraordinarias para poder cumplir con los requerimientos del mercado. Sin embargo, el elevado coste de este método ha hecho necesaria la búsqueda de alternativas. Una nueva forma, cada vez más extendida, para conseguir la flexibilidad de recursos humanos es la anualización de la jornada laboral o cómputo anual.

La anualización de la jornada laboral consiste en la contratación de los trabajadores por un número determinado de horas al año, reservándose la empresa la posibilidad de distribuir dichas horas de forma irregular a lo largo del año. De esta forma, cuando la demanda es mayor, el número de horas trabajadas por los empleados también es mayor y cuando la demanda es menor, el número de horas trabajadas es menor. Obviamente en la distribución de las horas a lo largo del año deben respetarse un conjunto de reglas, impuestas tanto por la ley como por los convenios colectivos.

La implantación de la jornada anualizada comporta la necesidad de gestionar la distribución del tiempo de trabajo. Es decir, hace necesaria la elaboración de un plan que indique el número de horas a realizar por cada trabajador en cada periodo del horizonte



temporal. Habitualmente se toma como horizonte temporal el año natural y como periodo del horizonte una semana.

Pero puede ocurrir que antes de finalizar el horizonte de planificación se detecten incumplimientos del plan establecido, variación del número de trabajadores o bien se disponga de nueva información sobre la previsión de la demanda. Estos factores hacen necesario establecer una nueva planificación de los horarios: realizar la replanificación de horarios de los trabajadores. La replanificación se puede dar de manera periódica a lo largo del año (por ejemplo, cada mes o cada dos meses) o bien sólo ejecutarse cuando se produzcan determinados acontecimientos (por ejemplo, variaciones conocidas del número de trabajadores o nuevas y diferentes previsiones de la demanda).

La aplicación de la anualización de la jornada produce un empeoramiento en las condiciones laborales de los trabajadores, que normalmente es compensado mediante otros beneficios. En el momento en el que se lleva a cabo la replanificación de horarios, y para perturbar lo menos posible la vida personal de los trabajadores, se debe intentar que la replanificación sea lo más parecida posible a la planificación inicial.

Este proyecto intenta dar respuesta al problema, poco tratado hasta el momento, de la replanificación de horarios de los trabajadores en el contexto de la anualización de la jornada laboral. Cabe destacar que se enmarca dentro del proyecto de investigación "Planificación del Trabajo y de la Producción con Tiempo de Trabajo Flexible", financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, con la referencia DP12004-05797, que actualmente se desarrolla en el Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales (IOC) de la UPC.



2 Introducción

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar un sistema de gestión del tiempo de trabajo para la replanificación de horarios en el contexto de la jornada anualizada. Este sistema de gestión debe permitir replanificar los horarios de los trabajadores a partir de una planificación de horarios en curso y de los nuevos acontecimientos o previsiones que convierten dicha planificación inicial en infactible o ineficiente. Se desea que el sistema propuesto permita obtener una solución al problema de replanificación en un tiempo razonable.

Además, con el sistema de replanificación diseñado se pretende disponer de una herramienta de negociación que permita, tanto a los empresarios como a los representantes de los trabajadores, valorar económicamente los acuerdos en las negociaciones relacionadas con la replanificación.

La replanificación de horarios parte necesariamente de un plan, que se encuentra en estado de ejecución en el momento en que se plantea la replanificación. Por lo tanto, la metodología de realización de este proyecto consiste en el análisis de un modelo de planificación de horarios y posteriormente en el diseño de un sistema de replanificación que tenga en cuenta la nueva información disponible.

El sistema de replanificación propuesto se basa en un modelo matemático de programación lineal entera y mixta (PLM), que proporciona la nueva asignación de horas a trabajar en cada semana para cada trabajador, teniendo en cuenta los eventos que han hecho infactible o ineficiente la planificación de horarios original.

En la aplicación de la jornada anualizada a la industria, cada caso real presenta características particulares. No obstante, en este proyecto se pretende diseñar un sistema de replanificación en el contexto de anualización de la jornada laboral que sea suficientemente general, de forma que la resolución de un problema concreto se realice adaptando ligeramente el sistema diseñado.





3 Flexibilidad en la empresa

3.1 Introducción

Disponer de la flexibilidad necesaria para adaptarse a las necesidades del mercado constituye, para las empresas de nuestros días, una gran arma competitiva. El elevado número de empresas presentes en el mercado hace que la no satisfacción de la demanda requerida pueda derivar en una pérdida del cliente no servido.

3.2 Flexibilidad productiva

La variabilidad de la demanda puede presentarse básicamente en dos aspectos: en composición y/o en cantidad. Como exponen Corominas, Lusa y Pastor (2002a), la polivalencia del personal puede proporcionar flexibilidad para hacer frente a las fluctuaciones en la composición de la demanda. En cambio, para tratar la variabilidad de la demanda en cuanto a cantidad existen básicamente dos maneras: la creación de stock y la adaptación de la capacidad productiva a la demanda.

La creación de stock en épocas de baja demanda, para servir posteriores picos de ésta, no siempre es posible, como ocurre por ejemplo en las empresas que pertenecen al sector de servicios. Además, conlleva elevados costes de mantenimiento y gestión del excedente y diversos problemas de almacenaje, como puede ocurrir en productos perecederos.

La segunda opción consiste en adaptar la capacidad productiva de la empresa a la demanda y recibe el nombre de flexibilidad productiva. Gerwin (1987) define flexibilidad volumétrica como la habilidad o facilidad con la que pueden conseguirse cambios en la cantidad total o agregada de producción de un proceso productivo. La principal manera de conseguir flexibilidad productiva, como expone Slack (1991), es la flexibilidad en los recursos humanos.



3.3 Flexibilidad en los recursos humanos

La flexibilidad en los recursos humanos es, como se expone en el apartado anterior, una forma de conseguir flexibilidad productiva. Oke (2000) identifica las herramientas siguientes para conseguirla: horas extras, trabajadores a tiempo parcial, temporales, anualización de la jornada laboral, subcontratación de trabajo y contratación y despido de trabajadores.

La realización de horas extras es una práctica muy extendida en España, pero supone costes elevados para la empresa. En el caso de trabajadores temporales y subcontratados hay que tener en cuenta que suelen tener una relación débil con la organización, lo cual puede desembocar en unos niveles bajos de productividad y calidad; además, es necesario dedicar ciertos recursos a su formación y aprendizaje. Por otra parte, en cuanto a la contratación y despido de trabajadores, no se puede suponer libertad total en el despido y la contratación.

La anualización de la jornada laboral presenta diferentes ventajas respecto a los métodos de flexibilidad de los recursos humanos comentados anteriormente. En primer lugar, los trabajadores pertenecen a la plantilla fija de la empresa, por lo que en general están más involucrados en los objetivos de la misma. Además, se evita la inestabilidad laboral conseguida con la contratación y despido continuados de trabajadores. En cuanto al aspecto económico, con la anualización se disminuyen los costes en horas extras y subcontratación.



4 Anualización de la jornada laboral

4.1 Definición de anualización de la jornada laboral

La anualización de la jornada laboral es una forma de conseguir flexibilidad productiva cada vez más utilizada por las empresas para conseguir adaptar su capacidad productiva a las fluctuaciones de la demanda. Consiste en un sistema de contratación por un número total de horas anuales, permitiéndose su distribución de forma irregular a lo largo del año, intentando adaptarse lo mejor posible a la demanda prevista.

La irregularidad de las jornadas conlleva, en general, un empeoramiento en las condiciones laborales de los empleados, que normalmente son compensadas con otros beneficios, como por ejemplo la disminución de las horas anuales de trabajo o mejoras en el salario base. Por supuesto, en la aplicación de la anualización de la jornada laboral se debe tener en cuenta el cumplimiento de la Ley vigente y de los convenios colectivos de los trabajadores.

4.2 Origen de la jornada anualizada

En los años 70 se empezaron a dar los primeros casos de anualización de la jornada laboral en algunas empresas francesas, alemanas y escandinavas, como se explica en Gall (1996). Pero fue a finales de los años 80 cuando se empezó a utilizar de manera más mayoritaria, sobre todo en el sector de los servicios. Sin embargo, después de esto, el número de contratos de anualización no ha crecido tanto como era de esperar. Hutchinson (1993) atribuye esta falta de crecimiento al tiempo y compromiso necesarios para implantar un esquema de este tipo, ya que dicha implantación hace necesaria una gestión más compleja del tiempo de trabajo y numerosas negociaciones para pactar las compensaciones por el empeoramiento de las condiciones laborales.

Un gran impulso a la implantación de la anualización de la jornada laboral se da en Francia con la ley Aubry II o ley de las 35 horas, aprobada el año 2000. Esta ley



establece la reducción del tiempo de trabajo a 35 horas semanales en promedio sin reducción de salario a cambio de implantar la jornada anualizada, sujeta a reglas diversas.

La reivindicación de las 35 horas semanales ha sido planteada en numerosos países europeos, también en nuestro país, en que ha sido reclamada por ciertos sectores de la sociedad. En la mayoría de estos países la legislación vigente permite la disminución de la jornada a cambio de anualizarla. En concreto, la ley española permite llegar a acuerdos entre empresa y trabajadores que reduzcan el número de horas a cambio de anualizar la jornada laboral, tal y como establece el Estatuto de los Trabajadores.

4.3 Ventajas e inconvenientes de la anualización

En Corominas, Lusa y Pastor (2002a) se presentan varias ventajas y desventajas de la anualización, desde el punto de vista de la empresa, y del trabajador. Éstas se resumen a continuación:

4.3.1 Para la empresa

La principal ventaja para la empresa consiste en avanzar hacia la deseada flexibilidad productiva, es decir, poder adaptarse mejor a las variaciones de la demanda cuando ésta no es constante. Adoptando la anualización de la jornada laboral se reducen, o incluso se eliminan, las horas extra, con los elevados costes que éstas suponen. También disminuye la necesidad de personal subcontratado y el nivel de *stock*, en el caso de industrias manufactureras. Estos factores pueden hacer aumentar la productividad e incluso la calidad de los productos o servicios.

En cuanto a las principales dificultades que representa la implantación de la jornada anualizada para la empresa destaca la necesidad de hallar la planificación óptima del tiempo de trabajo. Además, la implantación de este sistema normalmente no es bien acogida por los representantes de los trabajadores, lo que hace necesario destinar recursos a la negociación de las compensaciones por el empeoramiento de las condiciones que supone la irregularidad de jornadas. La irregularidad de jornadas implica métodos más sofisticados del control de los trabajadores.



Las compensaciones para los trabajadores, en contraposición a las desventajas de la irregularidad de jornadas, hacen en muchos casos que el coste horario de cada trabajador aumente. Para que la aplicación del cómputo anual resulte beneficioso para la empresa, ésta debe cuantificar los beneficios que obtiene de la anualización (disminución de horas extras,...). Para que resulte rentable, éstos beneficios deben ser mayores que los costes que es necesario destinar a las compensaciones hacia los trabajadores por el empeoramiento de sus condiciones laborales, así como el coste de gestión de horarios.

4.3.2 Para los trabajadores

Para los trabajadores la principal desventaja de éste método es el ya citado empeoramiento de las condiciones laborales que supone la irregularidad en las jornadas. El hecho de no tener un horario fijo implica cierta dificultad al organizar su tiempo libre. Respecto a las horas extras, método muy utilizado por las empresas para hacer frente a las variaciones de demanda, cabe destacar que éstas tienen carácter voluntario, mientras que los horarios resultantes de la planificación anual con la jornada anualizada son de obligado cumplimiento. Además, las horas extras representan un ingreso económico extraordinario para los trabajadores en el momento en que éstas se realizan.

Las principales ventajas para los trabajadores derivan de las compensaciones que se pactan con las empresas, y no del propio método organizativo. Las compensaciones más habituales son el aumento del salario base y la reducción del número de horas trabajadas al año. Normalmente se consigue un salario más homogéneo que con la realización de horas extras. También ganan cierta seguridad de no ser despedidos en épocas de baja demanda.

4.4 Características de los problemas de anualización

La combinación de diferentes características (de la empresa, del entorno, del producto o servicio,...) constituye una caracterización del problema a resolver y cada problema concreto deriva en un tipo determinado de anualización a aplicar. En Corominas, Lusa y Pastor (2003), se identifican las características principales:



- a) La naturaleza del producto: si existe la posibilidad o no de almacenar stock y la perdurabilidad de éste.
- b) Naturaleza del proceso productivo: el número de trabajadores necesarios para llevar a cabo el proceso productivo; es decir, si todos los trabajadores deben tener el mismo horario o si por el contrario pueden tener horarios diferentes.
- c) Tipo de anualización a adoptar: se distinguen básicamente los 5 tipos siguientes.
 - I. Jornadas acotadas: en cada semana se permite un número cualquiera de horas entre un máximo y un mínimo.
 - II. Jornadas predeterminadas: el número de horas semanales ha de pertenecer a una lista de posibles jornadas semanales.
 - III. Bolsa de horas flexibles: inicialmente todas las semanas se planifican de la misma duración, pero hay un número de horas flexibles al año que se añaden a las jornadas habituales y se compensan con descanso.
 - IV. Bolsa de semanas flexibles: permite, durante un número máximo de semanas al año, jornadas superiores o inferiores a la habitual.
 - V. Intervalos: se divide el espacio temporal en intervalos y se fija, en un año, la cota inferior y superior del número de semanas que pertenecen a cada uno de ellos.
- d) Polivalencia del personal: puede ser que todas las categorías de trabajadores puedan realizar todas las tareas; o que haya una correspondencia biunívoca entre categorías y tareas, entonces el problema de anualización puede separarse por tipo de tarea. Otra opción es poder definir una matriz con las categorías y tareas que indica si una categoría puede realizar una tarea y con qué eficiencia.
- e) Condiciones que debe respetar la solución: la mayoría de dichas condiciones intentan no sobrecargar en exceso a los trabajadores. Las más habituales, según la legislación vigente y los convenios colectivos aprobados, son las siguientes:
 - I. Número de horas semanales limitado por una cota superior e inferior.
 - II. Cota superior del promedio de horas trabajadas en un número de semanas consecutivas.
 - III. Cota superior del número de semanas fuertes al año (semanas en que la jornada es superior a un valor dado).
 - IV. Cota inferior del número de semanas flojas al año (semanas en que la jornada es inferior a un valor dado).



- f) Satisfacción de la demanda: en cuanto a la demanda, puede considerarse necesario cumplirla en su totalidad, o bien que la parte no satisfecha sea diferida o perdida.
- g) Regulación de las horas extraordinarias: pueden estar permitidas o no. Si lo están deben estar definidas, fijado el número admisible por trabajador y año y su sistema de retribución.
- h) Posibilidad de contratar personal temporal: puede ser posible o no subcontratar personal temporal.
- i) Posibilidad de subcontratar la producción: puede ser posible o no subcontratar parte de la producción.
- j) Vacaciones: o son negociadas a parte de la planificación anual o también se deben resolver mediante la planificación anual teniendo en cuenta ciertas reglas.
- k) Criterios de evaluación de las soluciones: el más habitual es el criterio económico, pero también pueden tenerse en cuenta otros criterios, como por ejemplo la regularidad de la carga de trabajo, distribución equitativa del tiempo de trabajo, o bien la idoneidad en la asignación de categorías a tipos de tareas si existe polivalencia entre los trabajadores. Estos criterios también pueden jerarquizarse.

En función de las características que presente el problema a resolver, la jornada anualizada se implantará de diferente modo.





5 Planificación de horarios bajo jornada anualizada

5.1 Etapas en la planificación completa del tiempo de trabajo

Corominas, Lusa y Pastor (2002b) consideran que una solución completa de la planificación del tiempo de trabajo debe contener 3 etapas jerarquizadas, que van desde un ámbito más general hasta decisiones más detalladas:

- a) La planificación anual, es decir, el número horas de trabajo para cada operario en cada semana del año, de manera que se trabajen el número total de horas anuales estipuladas y se respeten ciertas restricciones.
- b) La programación de horarios semanales, es decir, el horario que debe realizar cada operario cada semana.
- c) La asignación de tareas a los trabajadores, es decir, qué tipo de trabajo llevará a cabo cada trabajador en cada momento.

La primera etapa, es decir, el problema de planificación anual de horarios en el contexto de jornada anualizada, consiste en la determinación del tiempo de trabajo (normalmente expresado en horas) a realizar en cada división del horizonte temporal por cada trabajador. Normalmente el horizonte temporal considerado es el año natural, y la división del horizonte es una semana. Por lo tanto, al inicio del año natural se determina el número de horas que cada miembro de la plantilla realizará en cada una de las semanas del año.

Esta planificación permite que las horas asignadas cumplan la demanda prevista, a la vez que cada trabajador cumpla con el número total de horas anuales estipuladas. Encontrar la planificación óptima implica un gran esfuerzo de gestión ya que, además de cumplir con las condiciones establecidas por la ley vigente o por convenios colectivos de los trabajadores, se intenta que el coste económico sea el menor posible.



Este proyecto se centra en la replanificación anual de horarios, es decir, la replanificación de la primera fase expuesta. Durante la ejecución de la planificación inicial de horarios, ciertos factores pueden hacer que se convierta en infactible o ineficiente (por ejemplo una nueva previsión de la demanda), momento en que puede ser conveniente replanificar. La replanificación de horarios consiste en encontrar una nueva asignación de horas para cada operario en cada semana restante (hasta el final del año natural). Es habitual intentar que la nueva asignación sea lo más parecida posible al plan original. Obviamente, seguirán vigentes las condiciones establecidas por la ley y por los convenios colectivos de los trabajadores.

5.2 Estudios sobre planificación del tiempo de trabajo

La planificación del tiempo de trabajo bajo jornada anualizada ha permanecido inexplorada hasta hace pocos años. Es en el sector de servicios en el que la flexibilidad en el uso de los recursos humanos ha sido más estudiada; las empresas de servicios a menudo invierten muchos esfuerzos y recursos en estimar y planificar el número apropiado de trabajadores para satisfacer cargas de trabajo que varían en el tiempo.

Un ejemplo se encuentra en Hur, Mabert y Bretthauer (2004), en que se trata la planificación y replanificación de las tareas de trabajo en el caso concreto de una cadena de restaurantes de comida rápida. La estrategia seguida en esta cadena se basa en tres fases. En la primera se establece el plan de trabajo a medio-largo plazo. En la segunda se establecen los requerimientos de personal para cada hora de la semana en estudio a partir de las previsiones de ventas. Esta planificación intenta minimizar las desviaciones entre el plan y los requisitos y preferencias del personal. Una vez realizado el plan, puede haber modificaciones por ausencias de empleados, cambios de turnos entre personal, etc; la tercera etapa consiste en la replanificación en tiempo real.

Otros estudios tratan la planificación de horarios en centros de salud, como el que se presenta en Cayirli y Veral (2003). Otro ejemplo de servicios es el estudiado en Mabert (1983), que trata el problema de la planificación de horarios en servicios de emergencia. Green, Kolesan y Soares (2003) estudia la planificación de horarios en *call centers*.



Aunque la planificación del tiempo de trabajo se lleva a cabo en numerosas empresas de servicios, en las que habitualmente se realizan también ajustes de dicha planificación, los estudios de investigación realizados hasta el momento sobre replanificación de horarios son escasos. Por el contrario, la replanificación de la producción ha sido más estudiada. Puede deberse, por ejemplo, a la avería de una máquina o a la llegada de piezas en un orden inesperado, hechos que provocan la realización de un nuevo plan, es decir, la replanificación.





6 Modelización de la planificación de horarios de trabajo

6.1 Descripción de un problema de anualización de la jornada laboral

La gran variedad de sistemas de producción existentes, con diferentes características, implica una gran variedad de problemas de anualización de la jornada laboral a resolver. En este proyecto se estudia un caso concreto de jornada anualizada, teniendo en cuenta que otro problema se puede resolver adaptando el sistema de gestión y los modelos aquí propuestos. Esta adaptación de los modelos puede realizarse mediante la modificación de la función objetivo, la eliminación o adición de nuevas restricciones, etc.

Es obvio que existe una gran relación de dependencia entre la replanificación y la planificación de horarios: para ejecutar la replanificación de horarios es necesario partir de una planificación inicial. Por este motivo, en este proyecto en primer lugar se presenta un modelo de planificación, el cual es tomado como base para, en una segunda fase, proponer un sistema de replanificación.

El problema estudiado es, básicamente, el problema de servicios presentado en Corominas, Lusa y Pastor (2002a), los cuales proponen para resolverlo un modelo lineal entero y mixto, que es probado y resuelto de manera eficiente con escenarios de hasta 250 operarios.

En este proyecto se desarrolla un sistema de replanificación basado en la resolución de PLMs, para dar respuesta al problema presentado en Corominas, Lusa y Pastor (2002a). A continuación se describen las principales características del problema de anualización de la jornada tratado, siguiendo la clasificación expuesta en el apartado 4.4:

- a) Naturaleza del producto: al tratarse de un problema del sector servicios, el producto no se puede almacenar.



- b) Naturaleza del proceso productivo: los trabajadores pueden tener horarios diferentes.
- c) Tipo de anualización a adoptar: anualización por jornadas acotadas; en esta modalidad, en cada semana se permite un número cualquiera de horas entre un máximo y un mínimo
- d) Polivalencia del personal: se define una matriz de penalizaciones con las categorías de trabajadores y las tareas a realizar, que indica si una categoría de trabajadores puede realizar una tarea y con qué penalización. Además de las penalizaciones, y como novedad respecto al problema tratado en Corominas, Lusa y Pastor (2002a), se considera que cada tipo de trabajador tiene eficiencias diferentes en la realización de los diferentes tipos de tareas que puede realizar.
- e) Condiciones que debe respetar la solución:
 - I. Número de horas semanales limitado por una cota superior e inferior.
 - II. Cota superior del promedio de horas trabajadas en un número de semanas consecutivas.
 - III. Cota superior del número de semanas fuertes al año (semanas en que la jornada es superior a un valor dado).
 - IV. Cota inferior del número de semanas flojas al año (semanas en que la jornada es inferior a un valor dado).
- f) Se considera necesario el cumplimiento total de la demanda.
- g) Está permitida la realización de horas extras. La cota superior del número de horas extras, para cada trabajador, se calcula como un porcentaje respecto al número de horas anuales que trabaja.
- h) Es posible contratar a personal temporal.
- i) Al tratarse de un problema del sector de servicios, no tiene sentido hablar de la posibilidad de subcontratar parte de la producción.
- j) Las vacaciones se determinan a priori, e independientemente de la planificación de horarios, y constan de dos semanas en invierno y 4 semanas en verano.
- k) El criterio de evaluación de la solución es el criterio económico.



6.2 Modelo matemático de planificación M1

A continuación se presenta el modelo matemático de planificación de horarios, que como ya se ha introducido, proviene de la modificación del modelo de programación matemática propuesto por Corominas, Lusa y Pastor (2002a).

Datos

- T número de semanas del horizonte de planificación, que habitualmente son 52 ($t = 1, \dots, T$).
- E conjunto de empleados.
- C conjunto de categorías de trabajadores ($j = 1, \dots, |C|$).
- F conjunto de tareas ($k = 1, \dots, |F|$).
- P matriz de penalizaciones. Cada elemento de la matriz, p_{jk} , corresponde a la penalización asociada a cada hora de trabajo de un trabajador de categoría j realizando una tarea tipo k ($\forall j \in C; \forall k \in F$). Si el elemento p_{jk} es igual a infinito significa que los trabajadores de la categoría j no pueden realizar tareas tipo k .
- U matriz de rendimientos. Cada elemento de la matriz, u_{jk} , representa la eficiencia con que los trabajadores de la categoría j desarrollan las tareas de tipo k ($\forall j \in C; \forall k \in F$). Los elementos u_{jk} tienen valores entre 0 y 1 ($0 \leq u_{jk} \leq 1$). El valor $u_{jk} = 0$ indica que los trabajadores de la categoría j no pueden llevar a cabo tareas de tipo k .
- \hat{C}_k conjunto de categorías de trabajadores que se pueden asignar a las tareas tipo k ($k = 1, \dots, |F|$).
- \hat{F}_j conjunto de tareas que pueden ser asignadas a los trabajadores de la categoría j ($j = 1, \dots, |C|$).
- \hat{E}_j conjunto de empleados de la categoría j ($j = 1, \dots, |C|$).



- r_{ik} demanda de tareas de tipo k en la semana t , expresada en horas de trabajo ($t = 1, \dots, T; k = 1, \dots, |F|$).
- A_i conjunto de semanas disponibles del trabajador i , sin tener en cuenta sus semanas de vacaciones ($\forall i \in E$).
- H_i horas anuales estipuladas de trabajo para el empleado i ($\forall i \in E$).
- λ parámetro para ponderar, en la función objetivo, las penalizaciones definidas por los términos p_{jk} , y así poderlos comparar con términos económicos.
- β_i coste, en unidades monetarias, de una hora extra del trabajador i ($\forall i \in E$).
- γ_k coste horario de un empleado subcontratado realizando una tarea de tipo k ($\gamma_k > \beta_i; \forall i | (i \in \hat{E}_j) \wedge (j \in \hat{C}_k); k = 1, \dots, |F|$).
- h_M límite superior del número de horas asignadas a cada trabajador en cada semana.
- h_m límite inferior del número de horas asignadas a cada trabajador en cada semana ($h_m < h_M$).
- α porcentaje máximo, para cada trabajador, de horas extras al año respecto a las horas anuales de contrato.
- L máximo número de semanas consecutivas en que el promedio de horas semanales no debe ser superior a h_L ($h_L < h_M$).
- N_S máximo número de semanas fuertes. Las semanas fuertes se definen como aquellas semanas en que el número de horas trabajadas es mayor que h_S .
- N_W mínimo número de semanas flojas. Las semanas flojas se definen como aquellas semanas en que el número de horas trabajadas es menor o igual que h_W .



Variables

- x_{it} número de horas asignadas al empleado i en la semana t ($\forall i \in E; \forall t \in A_i$).
- y_{ijk} número de horas asignadas en la semana t a los trabajadores de la categoría j realizando tareas de tipo k ($\forall k \in F; \forall j \in \hat{C}_k; t = 1, \dots, T$).
- v_i número de horas extras asignadas al empleado i ($\forall i \in E$).
- d_{tk} horas de trabajo asignadas a personal subcontratado para desarrollar tareas tipo k durante la semana t ($\forall k \in F; t = 1, \dots, T$).
- s_{it} variable binaria que indica si el trabajador i tiene asignado, en la semana t , un número de horas mayor que h_s ($\forall i \in E; \forall t \in A_i$). Es decir, la variable toma por valor 1 cuando la semana t es una semana fuerte para el trabajador i .
- w_{it} variable binaria que indica si el trabajador i tiene asignado, en la semana t , un número de horas menor o igual que h_w ($\forall i \in E; \forall t \in A_i$). Es decir, la variable toma por valor 1 cuando la semana t es una semana floja para el trabajador i .

Función objetivo

Se trata de minimizar el coste de las horas extras y de los empleados contratados temporalmente, considerando también las penalizaciones por la asignación de las diferentes tareas a las diferentes categorías de trabajadores. La función objetivo se expresa en la ecuación 6.2.1.

$$[MIN]Z = \sum_{i \in E} \beta_i \cdot v_i + \sum_{k \in F} \gamma_k \sum_{t=1}^T d_{tk} + \lambda \sum_{t=1}^T \sum_{k \in F} \sum_{j \in \hat{C}_k} p_{jk} \cdot y_{ijk} \quad (Ec. 6.2.1)$$



Restricciones

- Las horas requeridas para cada tipo de tarea k en cada semana t se satisfacen entre los trabajadores de la empresa y los contratados temporalmente, como se expresa en la ecuación 6.2.2.

$$\sum_{j \in \hat{C}_k} u_{jk} \cdot y_{tjk} + d_{tk} \geq r_{tk} \quad t = 1, \dots, T; \forall k \in F \quad (\text{Ec. 6.2.2})$$

- El número de horas asignadas al trabajador i en la semana t debe estar entre una cota superior (h_M) y una cota inferior (h_m), como se expresa en la ecuación 6.2.3.

$$h_m \leq x_{it} \leq h_M \quad \forall i \in E; \forall t \in A_i \quad (\text{Ec. 6.2.3})$$

- Se establece un máximo de horas extra al año respecto a las horas anuales de contrato, para cada trabajador, definido según el porcentaje α , como se expresa en la ecuación 6.2.4.

$$v_i \leq \alpha \cdot H_i \quad \forall i \in E \quad (\text{Ec. 6.2.4})$$

- La suma de horas asignadas al trabajador i durante todas las semanas de que éste dispone (A_i) ha de corresponder a la suma de horas ordinarias y horas extraordinarias, como se expresa en la ecuación 6.2.5.

$$\sum_{t \in A_i} x_{it} = H_i + v_i \quad \forall i \in E \quad (\text{Ec. 6.2.5})$$

- La relación entre las variables x_{it} , y_{tjk} se expresa en la ecuación 6.2.6.

$$\sum_{(i \in \hat{E}_j) \wedge (t \in A_i)} x_{it} = \sum_{k \in \hat{F}_j} y_{tjk} \quad t = 1, \dots, T; \forall j \in C \quad (\text{Ec. 6.2.6})$$



- El promedio de horas semanales durante L semanas consecutivas no debe ser superior a h_L , con $h_L < h_M$, como se muestra en la ecuación 6.2.7.

$$\sum_{t=\tau-L+1, \dots, \tau} x_{it} \leq L \cdot h_L \quad (\tau = L, \dots, T) \wedge (t \in A_i, \tau - L + 1 \leq t \leq \tau); \forall i \in E \quad (\text{Ec. 6.2.7})$$

- El número de semanas fuertes que pueden ser asignadas a un trabajador está limitado superiormente por N_S . Esta condición se expresa mediante las ecuaciones 6.2.8 y 6.2.9.

$$x_{it} \leq h_S + (h_M - h_S) \cdot s_{it} \quad \forall i \in E; \forall t \in A_i \quad (\text{Ec. 6.2.8})$$

$$\sum_{t \in A_i} s_{it} \leq N_S \quad \forall i \in E \quad (\text{Ec. 6.2.9})$$

- El número de semanas flojas que pueden ser asignadas a un trabajador está limitado inferiormente por N_W . Esta condición se expresa mediante las ecuaciones 6.2.10 y 6.2.11.

$$x_{it} \leq h_M - (h_M - h_W) \cdot w_{it} \quad \forall i \in E; \forall t \in A_i \quad (\text{Ec. 6.2.10})$$

$$\sum_{t \in A_i} w_{it} \geq N_W \quad \forall i \in E \quad (\text{Ec. 6.2.11})$$

- La caracterización de las variables se expresa en las ecuaciones de la 6.2.12 a la 6.2.16.

$$s_{it}, w_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i \in E; \forall t \in A_i \quad (\text{Ec. 6.2.12})$$

$$v_i \geq 0 \quad \forall i \in E \quad (\text{Ec. 6.2.13})$$

$$x_{it} \geq 0 \quad \forall i \in E; \forall t \in A_i \quad (\text{Ec. 6.2.14})$$

$$y_{ijk} \geq 0 \quad \forall k \in F; \forall j \in \hat{C}_k; t = 1, \dots, T \quad (\text{Ec. 6.2.15})$$

$$d_{tk} \geq 0 \quad \forall k \in F; t = 1, \dots, T \quad (\text{Ec. 6.2.16})$$



6.3 Modelo matemático de planificación M2

El modelo de planificación presentado anteriormente (M1) tiene varias soluciones óptimas (con el mismo coste mínimo). La que habitualmente proporciona el optimizador presenta una distribución irregular del número de horas semanales asignadas a los trabajadores a lo largo del año. Por este motivo, como se explica en Corominas, Lusa y Pastor (2002a), se desarrolla un segundo modelo de planificación (M2), que entre todas las soluciones de mínimo coste, escoge la más regular.

El procedimiento a seguir para encontrar la planificación anual de horarios consiste en ejecutar los modelos M1 y M2 de forma sucesiva. Después de ejecutar el modelo M1, los valores obtenidos de las variables binarias quedan fijados para la ejecución del modelo M2, operando como constantes en lugar de como variables. Lo mismo ocurre con las variables que corresponden a las horas extra de cada trabajador. Además, debe cumplirse una nueva restricción respecto al coste: el coste de la solución de M2 no puede ser mayor que el coste óptimo obtenido mediante M1.

En este segundo modelo, la función objetivo a minimizar consta de dos términos ponderados mediante sus correspondientes parámetros. El primero de ellos corresponde a la suma, para todas las semanas, de las diferencias entre las horas trabajadas por cada empleado y su promedio de horas trabajadas a lo largo del año. El segundo término constituye la suma de las discrepancias para el personal externo a la empresa. Es decir, el primer término hace que los horarios de los empleados en plantilla sean más regulares, haciendo que cada asignación semanal de horas se acerque lo más posible al promedio de horas a trabajar por cada trabajador. El segundo término hace lo mismo con el personal externo.

Datos

Es necesario añadir los siguientes datos a los del modelo M1:

- s_{it} parámetro que si vale 1 indica que la semana t es una semana fuerte para el trabajador i ($\forall i \in E; t \in A_i$).



- w_{it} parámetro que si vale 1 indica que la semana t es una semana floja para el trabajador i ($\forall i \in E; t \in A_i$).
- v_i número de horas extras asignadas al trabajador i ($\forall i \in E$).
- \bar{x}_i promedio del número de horas semanales asignadas al trabajador i , según el modelo M1. Este dato se calcula a partir de la solución óptima obtenida de la ejecución del modelo M1, tal y como se muestra en la ecuación 6.3.1.

$$\bar{x}_i = \frac{v_i + \sum_{\forall t \in A_i} x_{it}}{|A_i|} \quad \forall i \in E \quad (\text{Ec. 6.3.1})$$

- \bar{d}_k promedio del número de horas semanales correspondientes a tareas tipo k desarrolladas por personal externo a la empresa, según el modelo M1. Se calcula según la ecuación 6.3.2.

$$\bar{d}_k = \frac{\sum_{t=1, \dots, T} d_{tk}}{T} \quad \forall k \in F \quad (\text{Ec. 6.3.2})$$

- Z_1^* valor de la función objetivo obtenido en el modelo M1.
- ω_1, ω_2 parámetros que ponderan, en la nueva función objetivo, la suma de las discrepancias de las horas trabajadas por los empleados respecto a su media: ω_1 se refiere a los trabajadores de la empresa y ω_2 al personal externo.

Variables

Como ya se ha introducido, s_{it} , w_{it} y v_i dejan de ser variables y quedan fijadas como datos del modelo M2. Además, se definen las siguientes nuevas variables:



- δ_{it}^+ es la discrepancia positiva relativa a la media del número de horas trabajadas por el trabajador i en la semana t ($\forall i \in E; \forall t \in A_i$). Se define discrepancia positiva como la cantidad de horas de más que realiza el trabajador i en la semana t respecto a su media de horas trabajadas.
- δ_{it}^- es la discrepancia negativa relativa a la media del número de horas trabajadas por el trabajador i en la semana t ($\forall i \in E; \forall t \in A_i$). Se define discrepancia negativa como la cantidad de horas de menos que realiza el trabajador i en la semana t respecto a su media de horas trabajadas.
- γ_{ik}^+ es la discrepancia positiva relativa a la media del número de horas trabajadas por personal externo a la empresa en tareas k durante la semana t ($\forall k \in F; t=1, \dots, T$). Se define discrepancia positiva como el número de horas de más que personal externo a la empresa dedica a tareas k en la semana t respecto a la media de horas dedicadas a la tarea k por personal externo.
- γ_{ik}^- es la discrepancia negativa relativa a la media del número de horas trabajadas por personal externo en tareas k durante la semana t ($\forall k \in F; t=1, \dots, T$). Se define discrepancia negativa como el número de horas de menos que personal externo a la empresa dedica a tareas k en la semana t respecto a la media de horas dedicadas a la tarea k por personal externo

Función objetivo

La función objetivo del modelo M2 se expresa en la ecuación 6.3.3.

$$[MIN]Z_2 = \omega_1 \cdot \left(\sum_{(i \in E) \wedge (t \in A_i)} \delta_{it}^+ + \delta_{it}^- \right) + \omega_2 \cdot \left(\sum_{t=1, \dots, T; k \in F} \gamma_{ik}^+ + \gamma_{ik}^- \right) \quad (Ec. 6.3.3)$$



Restricciones

Sólo siguen vigentes las restricciones del modelo M1 expresadas en las ecuaciones 6.2.2,6.2.3, de la 6.2.5 a la 6.2.7 y de la 6.2.14 a la 6.2.16, ya que el resto hacen referencia a las horas extra, semanas fuertes y semanas flojas, que han dejado de ser variables. Además, se añaden las restricciones expresadas a continuación, en las restricciones de la 6.3.4 a la 6.3.10.

- El coste de la solución del modelo M2 no puede exceder el coste óptimo obtenido en el modelo M1, como se expresa en la ecuación 6.3.4.

$$\sum_{i \in E} \beta_i \cdot v_i + \sum_{k \in F} \gamma_k \sum_{t=1}^T d_{tk} + \lambda \cdot \sum_{t=1}^T \sum_{k \in F} \sum_{j \in \hat{C}_k} p_{jk} \cdot y_{ijk} \leq Z_1^* \quad (\text{Ec. 6.3.4})$$

- Las variables x_{it} se eliminan mediante la ecuación 6.3.5.

$$x_{it} = \bar{x}_i + \delta_{it}^+ + \delta_{it}^- \quad \forall i \in E; \forall t \in A_i \quad (\text{Ec. 6.3.5})$$

- Las variables d_{tk} se eliminan de la misma manera que las x_{it} , como se expresa en la ecuación 6.3.6.

$$d_{tk} = \bar{d}_k + \gamma_{tk}^+ + \gamma_{tk}^- \quad t = 1, \dots, T; \forall k \in F \quad (\text{Ec. 6.3.6})$$

- La caracterización de las nuevas variables se expresa en las ecuaciones de la 6.3.7 a la 6.3.10.

$$\delta_{it}^+ \geq 0 \quad \forall i \in E, \forall t \in A_i \quad (\text{Ec. 6.3.7})$$

$$\delta_{it}^- \geq 0 \quad \forall i \in E, \forall t \in A_i \quad (\text{Ec. 6.3.8})$$

$$\gamma_{tk}^+ \geq 0 \quad t = 1, \dots, T; \forall k \in F \quad (\text{Ec. 6.3.9})$$

$$\gamma_{tk}^- \geq 0 \quad t = 1, \dots, T; \forall k \in F \quad (\text{Ec. 6.3.10})$$





7 Replanificación de horarios bajo jornada anualizada

7.1 Introducción

Los dos principales motivos que hacen necesario replanificar la jornada laboral son: la variación en las previsiones, tanto de la demanda como de los recursos disponibles, y el no cumplimiento de las horas planificadas desde el inicio de la planificación hasta el instante de replanificación. En primer lugar, puede que se disponga de nueva información más actualizada sobre la previsión de la demanda requerida o de la disponibilidad futura de recursos; en segundo lugar, pueden haberse trabajado más o menos horas de las previstas.

La replanificación consiste en determinar, para cada empleado y cada semana del horizonte de replanificación, el número de horas a trabajar. Para ello se parte de la planificación de horarios en curso, de la nueva información sobre la demanda o disponibilidad futura de recursos y del nivel de cumplimiento del plan anterior. Se debe intentar que el plan resultante de la replanificación sea lo más parecido posible al plan anterior, para que así cause un menor impacto en la vida personal de los trabajadores.

Se define un intervalo de tiempo inmediatamente posterior al inicio del último plan (ya sea planificación o replanificación) llamado período de rigidez. El período de rigidez es el período durante el cual no se permite que se produzcan cambios.

La replanificación se realiza de manera periódica a lo largo del horizonte considerado. La planificación se hace al principio del año natural, mientras que la replanificación se lleva a cabo, por ejemplo, cada cuatro o seis semanas. El horizonte temporal de la replanificación es la parte restante del horizonte de planificación, desde el fin del período de rigidez. Es decir, es el conjunto de semanas que quedan desde el instante en que se lleva a cabo la replanificación hasta el final del año natural, pero sin tener en cuenta el período de rigidez (ya que el plan, en estas semanas, no puede ser cambiado).



Estos datos no pueden tomar cualquier valor. En primer lugar, el instante de replanificación, t_{replan} , ha de ser coherente con la frecuencia de replanificación escogida, y evidentemente no tiene sentido definir la replanificación en el mismo instante que la planificación. Por ejemplo, si se replanifica cada 4 semanas, los valores posibles del instante de replanificación son $t_{replan} = \{4, 8, 12, \dots\}$. La definición del período de rigidez, $T_{rigidez}$, también limita el conjunto de valores que puede tomar t_{replan} , ya que las últimas $T_{rigidez}$ semanas estarán siempre fijadas. Por ejemplo si $T = 52$ y el período de rigidez es de 4 semanas, el último instante en que se puede replanificar es en la semana 47, y el período a replanificar sería de una única semana.

7.2 Estudios sobre replanificación de la producción y del tiempo de trabajo

Como ya se ha comentado, la mayor parte de trabajos realizados sobre planificación de horarios de trabajo se dedican a la resolución de problemas en empresas del sector de servicios. Lo mismo ocurre con los problemas de replanificación, aunque la cantidad de estudios al respecto es aún menor.

En el caso ya citado de un restaurante de comida rápida presentado por Hur, Mabert y Bretthauer (2004), la replanificación se da en tiempo real y recibe el nombre de ajuste en tiempo real. Esta fase consiste en los ajustes de personal que los supervisores realizan varias veces al día. La maximización de beneficios es equivalente a la consecución de un buen servicio al cliente, pero intentando que el coste sea mínimo. En dicho coste se considera el número de empleados necesarios, el coste de asociación de los empleados a los trabajos y el número de trabajadores que ven variado su turno. También se intenta que con la asignación se consiga adjudicar a cada empleado la tarea en la que es más eficiente y minimizar el número de rotaciones de los trabajadores entre tareas.

Debido a la escasez de estudios sobre replanificación de horarios de trabajo, a continuación se analizan algunas investigaciones realizadas sobre replanificación de la producción.



En Vin y Ierapetritou (2000) se trata la planificación en la industria química, en plantas que generan lotes multi-producto. La replanificación en estas plantas es muy importante, ya que es habitual que ocurran eventos inesperados que pueden convertir la planificación inicial en no óptima o incluso en infactible. La solución propuesta consiste en usar un modelo matemático para encontrar la planificación óptima, maximizando el beneficio y con las correspondientes restricciones. En un segundo paso, un modelo matemático incorpora sistemáticamente las diferentes alternativas de replanificación que cumplan las nuevas condiciones para obtener la replanificación óptima.

En Méndez y Cerdá (2003) se presenta una formulación matemática mediante PLM, también para una planta multi-producto. A partir de la planificación en curso, el estado actual de la planta y las desviaciones en los parámetros de la planta u otros eventos inesperados se realizan múltiples replanificaciones al mismo tiempo. El objetivo es la mayor satisfacción del cliente o el máximo beneficio, pero teniendo en cuenta que la replanificación provoque el menor impacto posible en la planificación en proceso. La función objetivo del modelo propuesto minimiza la suma de adelantos y retrasos de los pedidos, y hay restricciones referentes a los lotes nuevos a programar y a los antiguos lotes que deben ser reasignados.





8 Modelización de la replanificación de horarios de trabajo

8.1 Consideraciones en la modelización de la replanificación

Como ya se ha comentado, la replanificación se lleva a cabo de manera periódica. A pesar de ello, en este proyecto sólo se estudia la modelización y resolución de la primera replanificación, considerándose que es la que presenta mayor dificultad, ya que en cada una de las replanificaciones siguientes el tamaño del problema a resolver es menor. El procedimiento es muy similar para todas ellas, la única diferencia es que la primera replanificación se basa en la planificación original, mientras que cada una de las siguientes replanificaciones toman como punto de partida la replanificación anterior.

Para simplificar el proceso de resolución, se considera que en las semanas anteriores al instante de la primera replanificación se han cumplido las horas indicadas por la planificación de horarios, realizada al inicio del año natural, y que no se han producido altas ni bajas de personal.

8.2 Metodología de replanificación

En este proyecto se propone un sistema de gestión para la replanificación de horarios de trabajadores en el contexto de jornada anualizada. Ante nuevas previsiones de demanda, se desea encontrar una nueva asignación de horas para cada trabajador durante cada una de las semanas restantes hasta el final del año natural. Es habitual intentar que el nuevo plan sea lo más parecido posible al plan original, pero al mismo tiempo sigue siendo de interés la minimización del coste económico (normalmente, el coste económico aumenta cuanto más parecida sea la replanificación al plan original).

Este conflicto se resuelve mediante la negociación entre la empresa y los representantes de los trabajadores, llegando a un acuerdo respecto a las condiciones que debe cumplir



la replanificación de horarios respecto al plan inicial (por ejemplo se puede limitar el número de horas a la semana que se pueden modificar para cada trabajador). Para ayudar a decidir sobre qué restricciones se deben cumplir, es interesante valorar económicamente cada una de ellas, y de esta manera encontrar un equilibrio entre coste económico y semejanza respecto al plan original.

En este proyecto se propone un sistema de gestión para replanificar horarios en el contexto de jornada anualizada que ayude a la toma de decisiones sobre las condiciones que debe cumplir el nuevo plan. En cuanto a la modelización, se proponen dos líneas de actuación: añadir restricciones que limiten los cambios entre el plan anterior y el plan resultante de la replanificación y/o incluir en la función objetivo, penalizándola, una medida de discrepancia entre ambos planes. A continuación se propone un método de cuatro etapas en que se combinan ambas acciones.

Etapa I. Cálculo del coste económico del nuevo plan. Consiste en determinar el coste del plan con los nuevos datos de previsión de la demanda, pero sin considerar ningún elemento que limite los cambios. El nuevo coste es Z^* .

Etapa II. Negociación de la inclusión de restricciones que acoten los cambios. Para cada restricción considerada que limita los cambios, se calcula el nuevo valor de la función objetivo Z^{*1} y se compara con el coste inicial Z^* . Se negocia una combinación de restricciones determinando el incremento de coste asumible respecto al coste inicial: $\Delta = Z^{*1} - Z^*$.

Etapa III. Cálculo del valor inicial de la medida de discrepancia entre planes a considerar. Se replanifica minimizando dicha medida de discrepancia y añadiendo la restricción $OF \leq Z^{*1}$, donde OF es el valor del coste del plan.

Etapa IV. Negociación de la disminución del valor de la medida de discrepancia en función del aumento de coste (o disminución de beneficio) admisible. Se resuelve el problema de la etapa III añadiendo la restricción $OF \leq \sigma \cdot Z^{*1}$ para diferentes valores de $\sigma > 1$.



8.3 Modelos matemáticos de replanificación

Para cada una de las fases de que consta el sistema de replanificación propuesto se propone usar modelos de programación matemática. A continuación se exponen los modelos matemáticos de cada una de las fases de replanificación. Los datos y las variables son comunes a todas las fases, mientras que las funciones objetivo y restricciones varían en cada fase del modelo.

Datos

Además de los datos de la planificación, que aparecen en el apartado 6.2 de este proyecto, hay que considerar los siguientes:

- μ instante, a partir del cual, se replanifica. Este instante debe respetar el final del periodo de rigidez, en el que no se pueden producir cambios en la planificación. Por lo tanto, las semanas que componen el horizonte de replanificación son: $t = \mu, \dots, T$.
- x'_{it} número de horas de trabajo realizadas en la parte transcurrida del año y a realizar en el período de rigidez por el empleado i en la semana t ($\forall i \in E; t = 1, \dots, \mu - 1 \wedge t \in A_i$).
- x''_{it} número de horas planificadas, según el plan anterior, para el empleado i en la semana t del período de replanificación ($\forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i$).
- s'_{it} parámetro que adopta valor 1 cuando el trabajador i ha realizado en la semana t un número de horas mayor que h_s ($\forall i \in E; t = 1, \dots, \mu - 1 \wedge t \in A_i$).
- s''_{it} parámetro que adopta valor 1 cuando el trabajador i realizará en la semana t , según la planificación, un número de horas mayor que h_s ($\forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i$).



- w'_{it} parámetro que adopta valor 1 cuando el trabajador i ha realizado en la semana t un número de horas menor o igual que h_w ($\forall i \in E; t = 1, \dots, \mu - 1 \wedge t \in A_i$)
- w''_{it} parámetro que adopta valor 1 cuando el trabajador i realizará en la semana t un número de horas menor o igual que h_w ($\forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i$)
- HR_i horas anuales restantes estipuladas que ha de trabajar el empleado i durante el horizonte de replanificación, $\forall i \in E$. Es decir, sus horas anuales estipuladas H_i menos las horas que ya ha trabajado y las que trabajará durante el período de rigidez, como se expresa en la ecuación 8.3.1.

$$HR_i = H_i - \sum_{t=1, \dots, \mu-1 \wedge t \in A_i} x'_{it} \quad \forall i \in E \quad (\text{Ec. 8.3.1})$$

- \hat{r}_{ik} nuevos valores de previsión de la demanda ($\forall k \in F; t = \mu, \dots, T$).
- ε' número máximo de horas modificadas, por encima o por debajo, respecto a la planificación original sin que se considere que para el trabajador i en la semana t se ha producido un cambio de horario.
- nS_{\max} número máximo de semanas en que se pueden producir cambios de horario para cada trabajador durante todo el horizonte de replanificación.
- nC_{\max} número de horas en que, como máximo, se permite modificar la asignación semanal de horas de cada trabajador respecto a la planificación original.
- nt_{\max} promedio de horas semanales que, como máximo, se permite modificar, respecto a la planificación original, la asignación para cada trabajador.
- ξ factor que pondera la importancia de los cambios que hacen aumentar el número de horas trabajadas respecto a los que las hacen disminuir ($\xi \geq 1$).
- D máximo número de semanas consecutivas en que la variación de horas en la asignación semanal de cada empleado no puede ser mayor que h_D .
- N_f número máximo de semanas para cada trabajador que se pueden convertir en fuertes aplicando la replanificación.
- Z^* coste económico de la replanificación considerando las restricciones que limitan los cambios. Se obtiene en la etapa II.



- $\sigma > 1$ parámetro de negociación de la etapa IV que permite aumentar el coste económico a cambio de disminuir la medida de discrepancia escogida.

Variables

Las variables son las mismas que para la planificación, pero para las que dependen del tiempo varía el intervalo en el que están definidas. También se hace necesaria la definición de nuevas variables. A continuación se muestran todas ellas:

- x_{it} número de horas asignadas al empleado i en la semana t según la replanificación ($\forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i$).
- y_{ijk} número de horas asignadas en la semana t , según la replanificación, a los trabajadores de la categoría j realizando tareas tipo k ($\forall k \in F; \forall j \in \hat{C}_k; t = \mu, \dots, T$).
- v_i número de horas extra asignadas al empleado i ($\forall i \in E$).
- d_{tk} horas correspondientes a tareas tipo k asignadas en la semana t a personal externo a la empresa, según la replanificación ($t = \mu, \dots, T; \forall k \in F$).
- s_{it} variable binaria que toma por valor 1 cuando el trabajador i tiene asignado en la semana t un número de horas mayor que h_s ($\forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i$).
- w_{it} variable binaria que toma por valor 1 cuando el trabajador i tiene asignado en la semana t un número de horas menor o igual que h_w ($\forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i$).
- ca_{it} variable binaria para cada trabajador i y cada semana del intervalo de replanificación, t , que toma valor 1 cuando en la semana t el número de horas asignadas al trabajador i cambia, entendiendo por cambio la modificación en más de ε' horas, como se define más adelante ($\forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i$).



- xc_{it}^+ variable que indica el número de horas de más que el trabajador i realiza en la semana t siguiendo la replanificación respecto al número de horas asignadas en la planificación ($\forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i$).
- xc_{it}^- variable que indica el número de horas de menos que el trabajador i realiza en la semana t siguiendo la replanificación respecto al número de horas asignadas en la planificación ($\forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i$).
- $xfuerte_{it}$ variable binaria que indica si la semana t se ha convertido en semana fuerte para el trabajador i ($\forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i$).

8.3.1 Modelo matemático de la fase I (R1)

Se trata de adaptar ligeramente y resolver el modelo inicial de planificación (M1) con los nuevos valores de previsión de la demanda en el instante de replanificación. El objetivo de esta fase es determinar el coste mínimo de la planificación de horarios con los nuevos valores de la demanda. Con este valor óptimo del coste, es posible valorar el incremento de coste que impone considerar (en la fase II) restricciones que limitan los cambios y/o elementos de discrepancia.

A continuación se detallan la función objetivo y las restricciones del modelo R1 de la etapa I, ya que existen algunas modificaciones respecto al modelo M1.

Función objetivo

En la ecuación 8.3.1.1 se expresa la función objetivo de la primera fase de la replanificación.

$$[MIN]Z_3 = \sum_{i \in E} \beta_i \cdot v_i + \sum_{k \in F} \gamma_k \sum_{t=\mu}^T d_{tk} + \lambda \cdot \sum_{t=\mu}^T \sum_{k \in F} \sum_{j \in \hat{C}_k} p_{jk} \cdot y_{ijk} \quad (Ec. 8.3.1.1)$$



Restricciones

En las ecuaciones de la 8.3.1.2 a la 8.3.1.16 se expresan las restricciones de la primera fase de la replanificación.

$$\bullet \sum_{j \in \hat{C}_k} u_{jk} \cdot y_{ijk} + d_{ik} \geq \hat{r}_{tk} \quad t = \mu, \dots, T; \forall k \in F \quad (\text{Ec. 8.3.1.2})$$

$$\bullet h_m \leq x_{it} \leq h_M \quad \forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i \quad (\text{Ec. 8.3.1.3})$$

$$\bullet v_i \leq \alpha \cdot H_i \quad \forall i \in E \quad (\text{Ec. 8.3.1.4})$$

$$\bullet \sum_{t=\mu, \dots, T \wedge t \in A_i} x_{it} = HR_i + v_i \quad \forall i \in E \quad (\text{Ec.8.3.1.5})$$

$$\bullet \sum_{(i \in \hat{E}_j) \wedge (t \in A_i)} x_{it} = \sum_{k \in \hat{F}_j} y_{ijk} \quad t = \mu, \dots, T; \forall j \in C \quad (\text{Ec. 8.3.1.6})$$

$$\bullet \sum_{t=\tau-L+1, \dots, \mu-1} x'_{it} + \sum_{t=\max(\mu, \tau-L+1), \dots, \tau} x_{it} \leq L \cdot h_L$$

$$\forall i \in E; (\tau = \max(L, \mu), \dots, T) \wedge (t \in A_i, \tau - L + 1 \leq t \leq \tau) \quad (\text{Ec. 8.3.1.7})$$

$$\bullet x_{it} \leq h_S + (h_M - h_S) \cdot s_{it} \quad \forall i \in E; (t = \mu, \dots, T) \wedge \forall t \in A_i \quad (\text{Ec. 8.3.1.8})$$

$$\bullet \sum_{(t=1, \dots, \mu-1) \wedge t \in A_i} s'_{it} + \sum_{(t=\mu, \dots, T) \wedge t \in A_i} s_{it} \leq N_S \quad \forall i \in E \quad (\text{Ec. 8.3.1.9})$$

$$\bullet x_{it} \leq h_M - (h_M - h_W) \cdot w_{it} \quad \forall i \in E; (t = \mu, \dots, T) \wedge \forall t \in A_i \quad (\text{Ec. 8.3.1.10})$$

$$\bullet \sum_{(t=1, \dots, \mu-1) \wedge t \in A_i} w'_{it} + \sum_{(t=\mu, \dots, T) \wedge t \in A_i} w_{it} \geq N_W \quad \forall i \in E \quad (\text{Ec. 8.3.1.11})$$

$$\bullet s_{it}, w_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i \in E; (t = \mu, \dots, T) \wedge \forall t \in A_i \quad (\text{Ec. 8.3.1.12})$$



$$\bullet \quad v_i \geq 0 \quad \forall i \in E \quad (\text{Ec. 8.3.1.13})$$

$$\bullet \quad x_{it} \geq 0 \quad \forall i \in E; (t = \mu, \dots, T) \wedge \forall t \in A_i \quad (\text{Ec. 8.3.1.14})$$

$$\bullet \quad y_{ijk} \geq 0 \quad \forall k \in F; \forall j \in \hat{C}_k; t = \mu, \dots, T \quad (\text{Ec. 8.3.1.15})$$

$$\bullet \quad d_{tk} \geq 0 \quad \forall k \in F; (t = \mu, \dots, T) \quad (\text{Ec. 8.3.1.16})$$

8.3.2 Modelo matemático de la fase II (R2)

En la etapa II se añaden las restricciones que limitan los cambios, tanto en número de horas modificadas respecto a la planificación como en número de cambios realizados. Hay varias condiciones posibles en función de los requerimientos de la empresa y de los acuerdos a los que se llegue con los empleados. El modelo de replanificación de cada empresa pasará por seleccionar la combinación de restricciones más adecuada a sus necesidades.

Cada restricción puede ser valorada económicamente calculando el incremento de coste que supone respecto al coste óptimo: se calcula la diferencia entre el valor de la función objetivo del modelo de la etapa I, Z_3^* , y el nuevo valor de dicha función objetivo, $Z_3^{*'}$, considerando las restricciones escogidas ($\Delta = Z_3^{*'}$ - Z_3^*).

Función objetivo

La función objetivo es la misma que en la fase I, expresada en la ecuación 8.3.1.1.

Restricciones

En cuanto a las restricciones, a continuación se presentan varias opciones:



- a) El número máximo de semanas, para cada trabajador, i , en que se producen cambios en el número de horas a trabajar está limitado por ns_{max} , como se expresa en la ecuación 8.3.2.1.

$$\sum_{t=\mu, \dots, T \wedge t \in A_i} ca_{it} \leq ns_{max} \quad \forall i \in E \quad (Ec. 8.3.2.1)$$

Es necesario definir el concepto de cambio y especificar el valor de la variable ca_{it} : no se considera cambio en la asignación de horas al empleado i en la semana t si se cumple que $x''_{it} - \varepsilon' \leq x_{it} \leq x''_{it} + \varepsilon'$. La variable ca_{it} queda definida mediante las ecuaciones de la 8.3.2.2 a la 8.3.2.4.

$$x_{it} \geq x''_{it} - \varepsilon' + (h_m - x''_{it} + \varepsilon') \cdot ca_{it} \quad \forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i \quad (Ec. 8.3.2.2)$$

$$x_{it} \leq x''_{it} + \varepsilon' + (h_M - x''_{it} - \varepsilon') \cdot ca_{it} \quad \forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i \quad (Ec. 8.3.2.3)$$

$$ca_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i \quad (Ec. 8.3.2.4)$$

- b) El número máximo de horas por trabajador y por semana que se pueden modificar son nc_{max} . En primer lugar esta restricción se modeliza mediante la función valor absoluto de la diferencia de horas entre la planificación y la replanificación (ecuación 8.3.2.5); posteriormente se linealiza, dando lugar a (8.3.2.6), (8.3.2.7), (8.3.2.8) y (8.3.2.9).

$$|x_{it} - x''_{it}| \leq nc_{max} \quad \forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i \quad (Ec. 8.3.2.5)$$

$$xc_{it}^+ + xc_{it}^- \leq nc_{max} \quad \forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i \quad (Ec. 8.3.2.6)$$

$$xc_{it}^+ \geq x_{it} - x''_{it} \quad \forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i \quad (Ec. 8.3.2.7)$$

$$xc_{it}^- \geq x''_{it} - x_{it} \quad \forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i \quad (Ec. 8.3.2.8)$$



$$xc_{it}^+, xc_{it}^- \geq 0 \quad \forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i \quad (Ec. 8.3.2.9)$$

- c) El número promedio máximo de horas semanales en que se puede modificar la asignación a un trabajador desde el instante de replanificación hasta el final del horizonte de replanificación es nt_{max} . En este caso también se utiliza la función valor absoluto (ecuación 8.3.2.10) y después se linealiza obteniendo las ecuaciones 8.3.2.11, 8.3.2.7, 8.3.2.8 y 8.3.2.9.

$$\sum_{t=\mu, \dots, T \wedge t \in A_i} |x_{it} - x''_{it}| \leq nt_{max} \sum_{t=\mu, \dots, T \wedge t \in A_i} 1 \quad \forall i \in E \quad (Ec.8.3.2.10)$$

$$\sum_{t=\mu, \dots, T \wedge t \in A_i} (xc_{it}^+ + xc_{it}^-) \leq nt_{max} \sum_{t=\mu, \dots, T \wedge t \in A_i} 1 \quad \forall i \in E \quad (Ec. 8.3.2.11)$$

- d) El número promedio máximo de horas en que se puede modificar la asignación a un trabajador desde el instante de replanificación hasta el final del horizonte de replanificación es nt_{max} . Se puede considerar que los cambios que hacen aumentar las horas asignadas a un trabajador i en una semana t , respecto a la planificación original, le perjudican más que aquellos que le hacen trabajar menos horas que en la planificación original. La restricción se expresa en la ecuación 8.3.2.12 y se definen las variables xc_{it}^+ , xc_{it}^- en las ecuaciones 8.3.2.7, 8.3.2.8 y 8.3.2.9.

$$\sum_{t=\mu, \dots, T \wedge t \in A_i} (xc_{it}^- + \xi \cdot xc_{it}^+) \leq nt_{max} \cdot \sum_{t=\mu, \dots, T \wedge t \in A_i} 1 \quad \forall i \in E \quad (Ec. 8.3.2.12)$$

- e) Puede haber como máximo D semanas consecutivas en que el promedio de horas semanales variadas sea superior a h_D . De nuevo se utiliza la función valor absoluto, expresada en la ecuación 8.3.2.13 y después se obtiene el equivalente linealizado en las ecuaciones 8.3.2.14, 8.3.2.7, 8.3.2.8 y 8.3.2.9.

$$\sum_{t=\tau-D+1, \dots, \tau} |x_{it} - x''_{it}| \leq D \cdot h_D$$

$$(\tau = \mu, \dots, T) \wedge (t \in A_i, \tau - D + 1 \leq t \leq \tau); \forall i \in E \quad (Ec. 8.3.2.13)$$



$$\sum_{t=\tau-D+1, \dots, \tau} xc_{it}^+ + xc_{it}^- \leq D \cdot h_D$$

$$(\tau = \mu, \dots, T) \wedge (t \in A_i, \tau - D + 1 \leq t \leq \tau) ; \forall i \in E \quad (\text{Ec. 8.3.2.14})$$

- f) El número de semanas que, para un trabajador, pasan de ser ordinarias o flojas a ser fuertes pueden ser como máximo Nf , como se expresa en las ecuaciones 8.3.2.15, 8.3.2.16 y 8.3.2.17.

$$\sum_{(t=\mu, \dots, T) \wedge t \in A_i} xfuerte_{it} \leq Nf \quad \forall i \in E \quad (\text{Ec. 8.3.2.15})$$

$$xfuerte_{it} \geq s_{it} - s''_{it} \quad \forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i \quad (\text{Ec. 8.3.2.16})$$

$$xfuerte_{it} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in E; t = \mu, \dots, T \wedge t \in A_i \quad (\text{Ec. 8.3.2.17})$$

8.3.3 Modelo matemático de la fase III (R3)

En esta etapa se sustituye la función objetivo anterior por otra que minimice una medida de los cambios y se añade una restricción que impida que el coste del nuevo plan aumente respecto al obtenido en la etapa II (Z_3^*).

Función objetivo

Existen varias alternativas para la función objetivo, tal y como se expresa a continuación:

- a) Una opción puede ser minimizar el número de semanas variadas para todos los trabajadores durante todo el horizonte de replanificación, como se muestra en la ecuación 8.3.3.1.

$$[MIN]Z_4 = \sum_{t=\mu, \dots, T} \sum_{i \in E} ca_{it} \quad (\text{Ec. 8.3.3.1})$$



El concepto de cambio y la variable ca_{it} ya han sido definidos anteriormente con las ecuaciones 8.3.2.2, 8.3.2.3 y 8.3.2.4.

- b) De la misma manera, se puede minimizar el número de horas variadas para todos los trabajadores durante todo el intervalo de replanificación. La función objetivo mostrada en la ecuación 8.3.3.2 se linealiza obteniendo las ecuaciones 8.3.3.3, 8.3.2.7, 8.3.2.8 y 8.3.2.9.

$$[MIN]Z_4 = \sum_{t=\mu \wedge t \in A_i} \sum_{i \in E} |x_{it} - x'_{it}| \quad (Ec. 8.3.3.2)$$

$$[MIN]Z_4 = \sum_{t=\mu \wedge t \in A_i} \sum_{i \in E} xc_{it}^+ + xc_{it}^- \quad (Ec. 8.3.3.3)$$

- c) También se puede considerar que los cambios en que los trabajadores trabajan más horas de las que tenían asignadas les perjudican más que los cambios que les proporcionan más tiempo libre, diferencia cuantificada mediante el parámetro $\xi \geq 1$. La función objetivo se expresa en la ecuación 8.3.3.4. Nuevamente, son necesarias las ecuaciones 8.3.2.7, 8.3.2.8 y 8.3.2.9.

$$[MIN]Z_4 = \sum_{t=\mu, \dots, T \wedge t \in A} \sum_{i \in E} xc_{it}^- + \xi \cdot xc_{it}^+ \quad (Ec. 8.3.3.4)$$

Restricciones

En esta tercera etapa de la metodología propuesta se impone, como se ha comentado, que el coste económico no debe ser superior al encontrado con la combinación de restricciones seleccionadas en la fase II (Z_3^*), como se expresa en la ecuación 8.3.3.5.

$$\sum_{i \in E} \beta_i \cdot v_i + \sum_{k \in F} \gamma_k \sum_{t=\mu}^T d_{tk} + \lambda \cdot \sum_{t=\mu}^T \sum_{k \in F} \sum_{j \in \hat{C}_k} p_{jk} \cdot y_{ijk} \leq Z_3^* \quad (Ec. 8.3.3.5)$$



8.3.4 Modelo matemático de la fase IV (R4)

De la etapa III se obtiene el valor de la medida de discrepancia seleccionada, es decir, el valor de una de las funciones objetivo mostradas en la etapa III (Z_4^*). En la etapa IV se negocia la disminución del valor de Z_4 permitiendo el aumento del coste (Z^*), controlado mediante el parámetro $\sigma > 1$. El modelo es el mismo que en la etapa III pero sustituyendo la ecuación 8.3.3.5 por la 8.3.4.1.

$$\sum_{i \in E} \beta_i \cdot v_i + \sum_{k \in F} \gamma_k \sum_{t=\mu}^T d_{tk} + \lambda \cdot \sum_{t=\mu}^T \sum_{k \in F} \sum_{j \in \hat{C}_k} p_{jk} \cdot y_{ijk} \leq \sigma \cdot Z_3^* \quad (\text{Ec. 8.3.4.1})$$





9 Experiencia computacional

9.1 Introducción

Para comprobar la viabilidad de la metodología propuesta y, en concreto, de los modelos matemáticos diseñados, se realiza un experimento computacional. En éste se resuelven los dos modelos de planificación y, seguidamente, las cuatro etapas de la replanificación para 675 escenarios diferentes. Dichos escenarios se generan mediante la combinación de diferentes elementos de decisión (que se explican más detalladamente en el apartado 10.3): tres posibilidades en cuanto al número de trabajadores, tres tipos de demanda y tres tablas de eficiencia para la asignación de las diversas categorías de trabajadores a las diferentes tareas. Además, se introduce cierta aleatoriedad, tanto en la definición de las vacaciones para cada trabajador como en la previsión de la demanda.

El software informático utilizado para llevar a cabo el experimento es el ILOG CPLEX 4.2, que mediante el lenguaje OPL permite introducir los modelos matemáticos a optimizar. El ordenador utilizado es un Pentium IV a 3,40 GHz con 1,00 Gb de RAM.

Este software permite fijar diferentes parámetros para la realización del experimento. Uno de los más significativos es el tiempo máximo de resolución, que en esta experimentación se ha fijado en 3.600 segundos: si después de una hora no se ha encontrado la solución óptima, el optimizador detiene la búsqueda y da como resultado la mejor solución conseguida hasta el momento.

Otro parámetro importante es el nivel de tolerancia admitido (*MIP gap*). El *MIP gap* se define como la diferencia relativa entre la cota inferior del problema y la solución óptima. En esta experimentación se ha fijado este parámetro al 1%, lo que significa que cuando el programa encuentra una solución que cumple la condición de $MIP\ gap \leq 0,01$, la considera como solución óptima.



9.2 Elección de las restricciones y la función objetivo a implementar

En el capítulo 8 se han presentado varias alternativas en cuanto a la limitación de los cambios entre la planificación y la replanificación. Como se ha comentado se pueden limitar los cambios de dos maneras: introduciendo restricciones que limiten dichos cambios o bien minimizándolos mediante una función objetivo. En este apartado se concretan las restricciones y la función objetivo seleccionadas para la realización del experimento computacional.

En primer lugar, las restricciones a considerar son la b y la f , que consisten, respectivamente, en acotar superiormente el número de horas cambiadas en cada semana y para cada trabajador, y el número de semanas que se pueden convertir en fuertes para cada trabajador. En segundo lugar, se utiliza la función objetivo c , que consiste en minimizar el número de horas que se cambian en la replanificación respecto a la planificación original para todos los trabajadores durante todo el intervalo de replanificación, considerando, además, una mayor penalización en los cambios que hacen aumentar el número de horas.

9.3 Definición de criterios en la generación de los ejemplares

Los datos necesarios para la realización del experimento pueden ser divididos en dos grandes grupos: aquellos que son necesarios para la planificación y aquellos que se utilizan en la replanificación. Tal y como se ha introducido, algunos datos se toman como invariables para todos los escenarios, mientras que otros toman diferentes valores, para, de la misma forma que la aleatoriedad, crear escenarios diferenciados.

Los datos necesarios para la planificación son los siguientes:

- El número de empleados ($|E|$) puede ser de 25, 50 ó 100 trabajadores.
- El número de semanas a trabajar a lo largo del año (T) es 52. De éstas, hay que descontar 6 semanas de vacaciones para cada trabajador.



- En cuanto a la distribución de las vacaciones, las 6 semanas de cada trabajador se agrupan en dos periodos: dos semanas consecutivas en la primera parte del año, que se pueden denominar vacaciones de primavera, y cuatro semanas consecutivas en la segunda mitad del año, las vacaciones de verano. Se estipula que para todos los trabajadores las vacaciones de verano deben asignarse entre las semanas 28 y 40 (es decir, pueden empezar entre la 28 y la 37), que comprenden aproximadamente los meses de julio, agosto y septiembre, los más deseados habitualmente por los trabajadores. Las vacaciones de primavera deben estar entre los meses de abril y mayo, es decir, aproximadamente entre las semanas 15 y 23. Sin pérdida de generalidad, se fijan las vacaciones de manera aleatoria para cada trabajador, dentro del periodo decidido para cada caso.
- Hay tres categorías de trabajadores ($|C| = 3$), el 50% de los empleados de la empresa pertenecen a la categoría 1, el 30% a la categoría 2, y el 20% restante a la categoría 3.
- Hay tres tipos de tarea ($|F| = 3$).
- Hay tres tipos de matriz de penalización (P), cada una de las cuales asigna una penalización a la realización de cada tipo tarea por cada categoría de trabajador. En la tabla 9.3.1 se muestran estas tres matrices.

	P-Tipo 1			P-Tipo 2			P-Tipo 3		
	Tarea ₁	Tarea ₂	Tarea ₃	Tarea ₁	Tarea ₂	Tarea ₃	Tarea ₁	Tarea ₂	Tarea ₃
Categoría ₁	0	5	∞	0	5	10	0	∞	∞
Categoría ₂	∞	0	2	∞	0	2	2	0	∞
Categoría ₃	∞	∞	0	∞	∞	0	5	∞	0

Tabla 9.3.1. Valores de las matrices de penalización.

- Hay tres tipos de matriz de eficiencia (U), como se muestra en la tabla 9.3.2. Cada tipo de eficiencia va acompañada por su correspondiente tipo de penalización, es decir, al tipo 1 de penalización le corresponde el tipo 1 de eficiencia y así sucesivamente.



	E-Tipo 1			E-Tipo 2			E-Tipo 3		
	Tarea ₁	Tarea ₂	Tarea ₃	Tarea1	Tarea ₂	Tarea ₃	Tarea ₁	Tarea ₂	Tarea ₃
Categoría ₁	1	0,9	0	1	0,9	0,8	1	0	0
Categoría ₂	0	1	0,9	0	1	0,9	0,9	1	0
Categoría ₃	0	0	1	0	0	1	0,8	0	1

Tabla 9.3.2. Valores de las matrices de eficiencia.

- Hay tres patrones de capacidad requerida (r_{tk}), que se expresa en número de horas trabajadas. El tipo 1 corresponde a una demanda no estacional, es decir, prácticamente constante a lo largo del año, con la introducción de ruido, como se muestra en la figura 9.3.1.

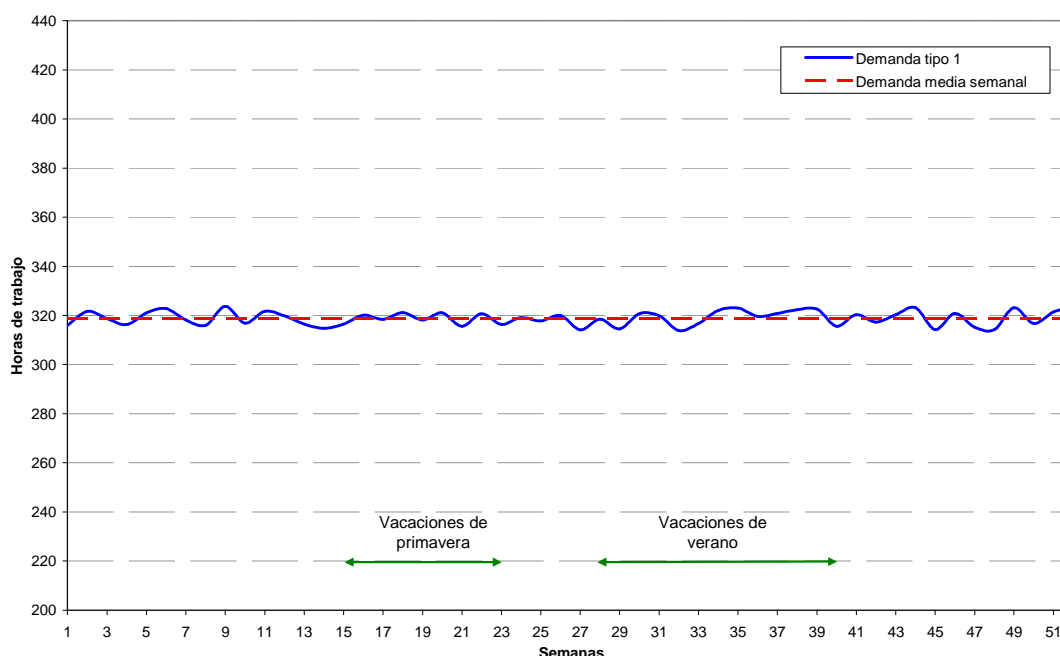


Figura 9.3.1. Demanda de tipo 1 para una tarea cualquiera con 25 trabajadores.

La demanda de tipo 2, mostrada en la figura 9.3.2., corresponde a una demanda estacional, en que se puede observar un pico de demanda, y a la que también se le introduce ruido.



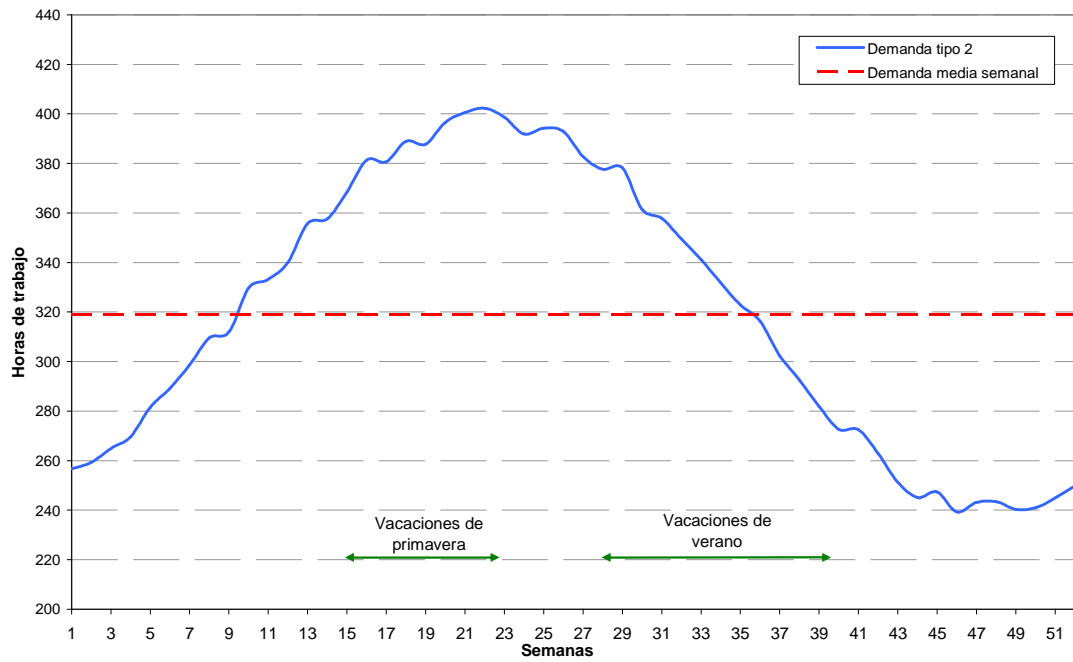


Figura 9.3.2. Demanda de tipo 2 para una tarea cualquiera con 25 trabajadores.

La demanda de tipo 3, como muestra la figura 9.3.3., corresponde a una demanda estacional, pero con dos picos de demanda y también con ruido.

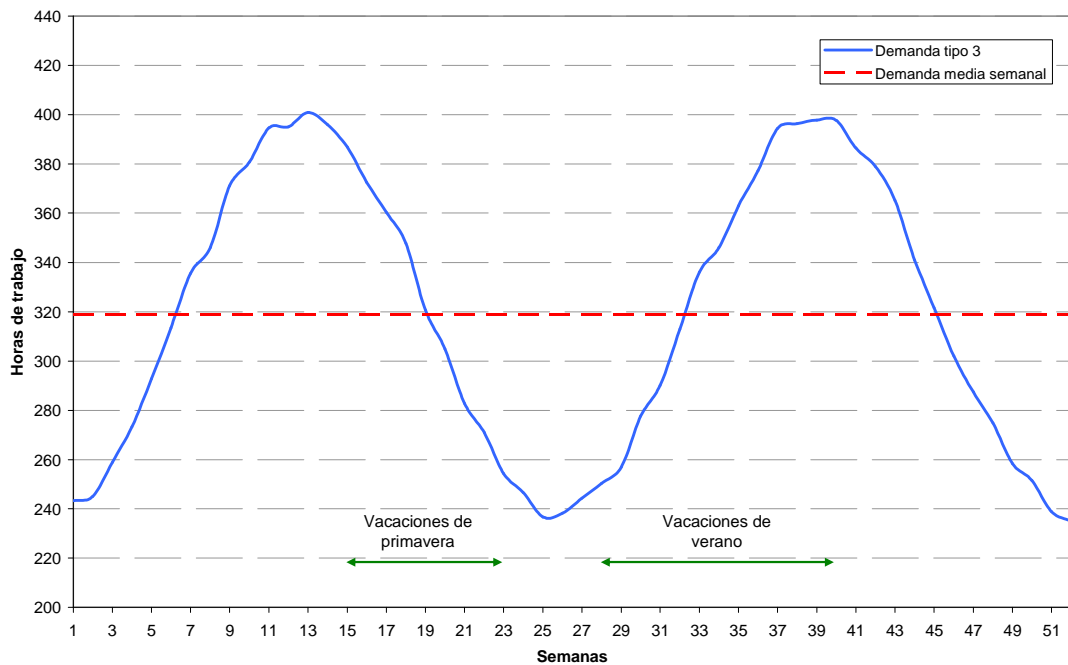


Figura 9.3.3. Demanda de tipo 3 para una tarea cualquiera con 25 trabajadores.



Cabe destacar que el ruido introducido en los tres tipos de demanda consiste en una variación de la capacidad semanal requerida de hasta un 5%. En todos los casos la demanda total es igual a la capacidad total, ya que se considera que los trabajadores son contratados en función de la demanda anual.

- Otros valores quedan fijados de la siguiente forma, tal y como proponen Corominas, Lusa y Pastor (2002a): $H_i = 1760 (\forall i \in E)$, $\alpha = 0,05$, $h_m = 20$, $h_M = 50$, $L = 12$, $h_L = 45$, $N_w = 10$, $h_w = 28$, $N_s = 10$, $h_s = 48$, $\beta_i = 1 (\forall i \in E)$, $\gamma_k = 1,5 (\forall k \in F)$, $\lambda = 0,001$.

Cada combinación de número de empleados, tipo de demanda y tipo de eficiencia constituye un escenario diferente. Así se consiguen 27 combinaciones diferentes, como se muestra en la tabla 9.3.3. Para cada una de estas combinaciones, se generan 25 ejemplares diferentes, introduciendo aleatoriedad en el ruido en la demanda y en las semanas de vacaciones de cada empleado. De esta manera se consiguen 675 ejemplares diferentes.



Escenario	Número de empleados	Tipo de eficiencia	Tipo de demanda
1	25	1	1
2	50	1	1
3	100	1	1
4	25	2	1
5	50	2	1
6	100	2	1
7	25	3	1
8	50	3	1
9	100	3	1
10	25	1	2
11	50	1	2
12	100	1	2
13	25	2	2
14	50	2	2
15	100	2	2
16	25	3	2
17	50	3	2
18	100	3	2
19	25	1	3
20	50	1	3
21	100	1	3
22	25	2	3
23	50	2	3
24	100	2	3
25	25	3	3
26	50	3	3
27	100	3	3

Tabla 9.3.3. Escenarios posibles obtenidos de la combinación de tres parámetros.

Los datos necesarios para ejecutar la replanificación son los siguientes:

- $\mu = 9$, es decir, se inicia la replanificación al inicio de la semana 9.
- \hat{r}_{ik} es la nueva previsión de la demanda ($\forall k \in F; t = \mu, \dots, T$). La nueva demanda se desplaza 4 semanas hacia la derecha respecto a la previsión inicial de la demanda, y además, se genera nuevamente el ruido. En las figuras 9.3.4, 9.3.5 y 9.3.6 se muestra un ejemplo de previsión de demanda inicial y de la nueva



previsión de la demanda para los tres tipos de demanda en el caso de 25 empleados.

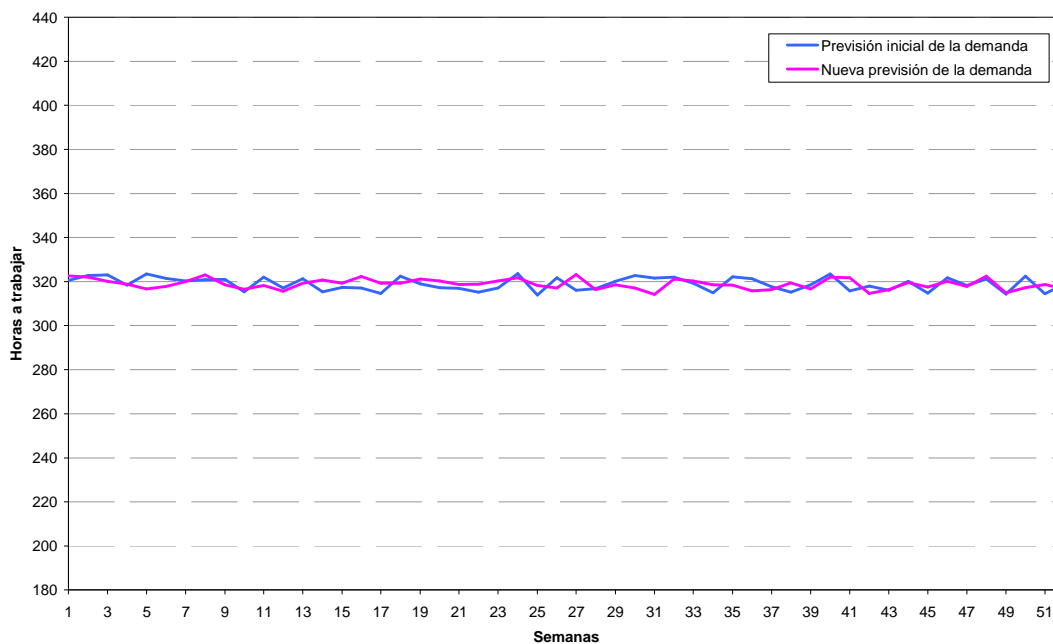


Figura 9.3.4. Previsión inicial y posterior de la demanda de tipo 1.

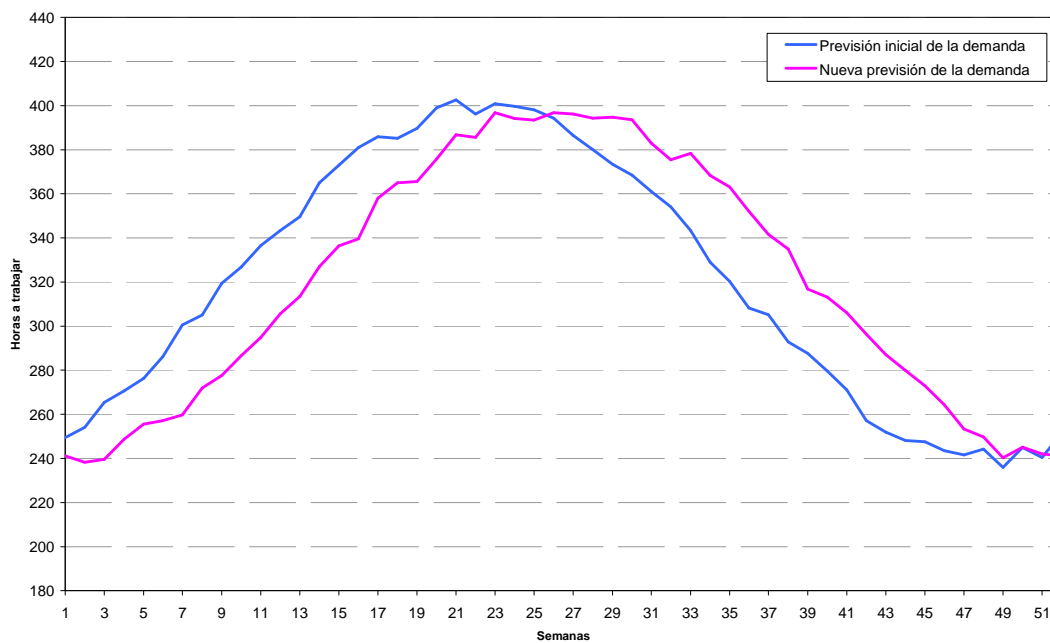


Figura 9.3.5. Previsión inicial y posterior de la demanda de tipo 2.



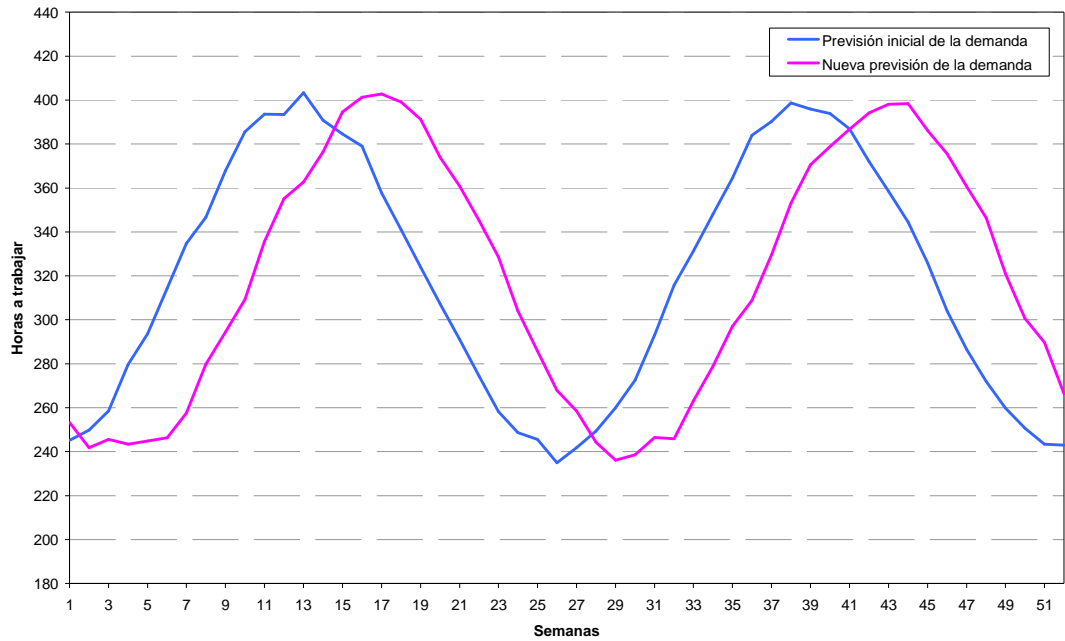


Figura 9.3.6. Previsión inicial y posterior de la demanda de tipo 3.

- Otros valores quedan fijados como sigue: $\gamma = 1,05$, $nc_{\max} = 15$, $N_f = 6$, $\sigma = 1,05$, $\xi = 0,7$.

9.4 Análisis de los resultados

Se pretende analizar la efectividad de la metodología y, en concreto, de los modelos propuestos; es decir, si el problema se resuelve para diferentes escenarios, y si lo hace con tiempos de cálculo aceptables. Resulta interesante analizar si los tiempos de cálculo que necesita el PC para la resolución de los modelos varían en función del tamaño del problema a resolver.

En la tabla 9.4.1 se muestran los tiempos de cálculo de la resolución del modelo M1 de la planificación, expresados en segundos, para cada uno de los tamaños de modelo. En la tabla se muestran los valores del mínimo tiempo computacional (t_{\min}), el promedio de tiempo (\bar{t}) y el máximo tiempo (t_{\max}). Los valores del tiempo expresados en la tabla son valores promedio, ya que en realidad para cada tamaño de modelo se han resuelto 225 ejemplares. Además se muestra el número de variables y de restricciones, que no sólo



dependen del número de empleados, sino también de la posibilidad o no de que un tipo de empleado realice un tipo de tarea, por eso los valores expresados en la tabla son promedios.

Número de trabajadores	t_{\min} (seg.)	\bar{t} (seg.)	t_{\max} (seg.)	Promedio del número de variables binarias	Promedio del número de variables reales	Promedio del número de restricciones
25	0,14	0,48	6,44	2.300	1.626	5.044
50	0,22	0,61	1,84	4.600	2.901	9.794
100	0,13	1,31	2,73	9.200	5.101	19.294

Tabla 9.4.1. Tiempos de cálculo necesarios para la resolución del modelo M1 de planificación.

Como se puede observar, y se concluye en el artículo Corominas, Lusa, Pastor (2002a), los tiempos de cálculo para el modelo M1 de planificación son bastante bajos. Además, no se observa un aumento muy significativo de los tiempos de cálculo con el aumento del número de trabajadores.

En la tabla 9.4.2 se muestran los tiempos de cálculo de la resolución del modelo M2 de planificación y el tamaño del modelo matemático.

Número de trabajadores	t_{\min} (seg.)	\bar{t} (seg.)	t_{\max} (seg.)	Promedio del número de variables binarias	Promedio del número de variables reales	Promedio del número de restricciones
25	0,14	0,40	3,57	0	4.177	4.051
50	0,21	0,70	1,84	0	7.827	7.651
100	0,35	1,82	4,38	0	14.477	14.851

Tabla 9.4.2. Tiempos de cálculo necesarios para la resolución del modelo M2 de planificación.



La ejecución del modelo M2 de planificación presenta tiempos de cálculo inferiores a los tiempos de cálculo del modelo M1 para los casos de 25 y 50 trabajadores. Además, se observa que el número de restricciones del modelo M2 es inferior al número de restricciones del modelo M1. Los promedios de tiempo (\bar{t}) necesarios para la ejecución de los modelos aumentan, tanto en el modelo M1 como en el M2, al aumentar el número de trabajadores.

En la tabla 9.4.3 se muestran los mismos valores para la resolución de la fase 1 de la replanificación (R1).

Número de trabajadores	t_{\min} (seg.)	\bar{t} (seg.)	t_{\max} (seg.)	Promedio del número de variables binarias	Promedio del número de variables reales	Promedio del número de restricciones
25	0,19	0,39	9,23	1.900	2.875	4.764
50	0,21	0,58	16,36	3.800	6.079	9.264
100	0,26	1,77	153,26	7.600	11.829	18.264

Tabla 9.4.3. Tiempos de cálculo necesarios para la resolución de la primera fase de replanificación.

Los valores promedio (\bar{t}) de los tiempos de cálculo de la primera fase de replanificación son menores que los del modelo M2 de planificación.

En la tabla 9.4.4 se muestran los mismos valores para la resolución de la fase 2 de la replanificación (R2).



Número de trabajadores	t_{\min} (seg.)	\bar{t} (seg.)	t_{\max} (seg.)	Promedio del número de variables binarias	Promedio del número de variables reales	Promedio del número de restricciones
25	0,56	9,92	132,35	5.700	7.004	9.564
50	0,60	9,56	329,35	11.400	13.679	18.864
100	2,03	13,90	343,72	22.800	27.029	37.464

Tabla 9.4.4. Tiempos de cálculo necesarios para la resolución de la segunda fase de replanificación.

Los tiempos de cálculo de la segunda fase de replanificación son bastante bajos, aunque aumentan respecto a los obtenidos en la primera fase de replanificación.

En la tabla 9.4.5 se muestran los mismos valores para la resolución de la fase 3 de la replanificación (R3).

Número de trabajadores	t_{\min} (seg.)	\bar{t} (seg.)	t_{\max} (seg.)	Promedio del número de variables binarias	Promedio del número de variables reales	Promedio del número de restricciones
25	0,98	3,40	65,35	5.700	7.004	9.565
50	0,99	10,52	326,55	11.400	13.679	18.865
100	2,65	42,48	809,40	22.800	27.029	37.465

Tabla 9.4.5. Tiempos de cálculo necesarios para la resolución de la tercera fase de replanificación.

En la tabla 9.4.6 se muestran los mismos valores para la resolución de la fase 4 de la replanificación (R4).



Número de trabajadores	t_{\min} (seg.)	\bar{t} (seg.)	t_{\max} (seg.)	Promedio del número de variables binarias	Promedio del número de variables reales	Promedio del número de restricciones
25	0,77	16,12	263,92	5.700	7.004	9.565
50	1,67	41,34	1205,04	11.400	13.679	18.865
100	4,25	55,62	1211,10	22.800	27.029	37.465

Tabla 9.4.6. Tiempos de cálculo necesarios para la resolución de la cuarta fase de replanificación.

Con el análisis de los tiempos de cálculo del experimento computacional, se concluye que la metodología de replanificación presentada, y más concretamente los modelos matemáticos que la componen, se resuelven en un PC ordinario en tiempos asumibles para las empresas. En esta experiencia computacional con 675 ejemplares, el máximo tiempo necesario para solucionar uno de los modelos del sistema ha sido de 1.211 segundos, lo que equivale aproximadamente a 20 minutos. También se observa que, en general, los tiempos de cálculo aumentan al aumentar el número de empleados, y por tanto el tamaño del problema.

9.5 Análisis de un escenario concreto

Para comprobar la efectividad, el uso y el potencial de la metodología de replanificación propuesta, a continuación se analiza de un caso concreto; el objetivo es demostrar que la metodología propuesta puede actuar como una herramienta de negociación eficiente.

En primer lugar, se muestra la planificación inicial de los horarios, punto de partida de la replanificación. En la figura 9.5.1 se muestra la planificación anual para un trabajador escogido al azar dentro de un sistema con 50 empleados, tipo de demanda 2 (demanda estacional con un pico) y matrices de eficiencia y penalización de tipo 2. En esta figura se puede observar cómo la distribución de horas al aplicar el modelo M2 es más regular que si sólo se aplica el modelo M1.



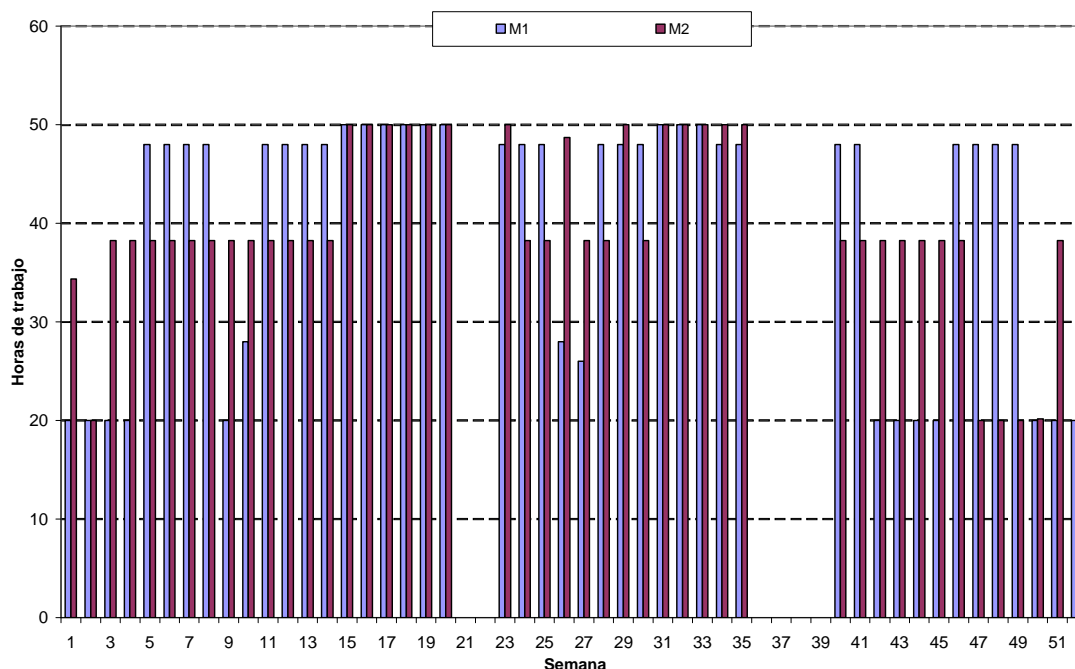


Figura 9.5.1. Comparativa entre la distribución anual de horas del modelo M1 y del modelo M2 para un trabajador en plantilla.

La manera de utilizar la metodología de replanificación presentada como una herramienta para las negociaciones, consiste, en primer lugar, en analizar el coste económico que supone añadir las restricciones que limitan los cambios. Es decir, analizar el incremento de coste entre la fase II y la fase I de la replanificación con diferentes valores de los parámetros que limitan los cambios. En segundo lugar, una vez escogidas las restricciones que limitan los cambios, se intenta minimizar una nueva medida de discrepancia entre planes, permitiéndose la negociación del aumento de ésta medida mediante el aumento del coste económico.

A continuación se analiza el incremento de coste al añadir las restricciones que limitan los cambios en el caso anterior de 50 trabajadores, tipo de demanda 2 y tipo 2 de eficiencia y de penalización. Para este escenario concreto se analiza el valor de la función objetivo de la fase II de la replanificación en función de los parámetros nc_{max} y N_f , tal y como se muestra en la tabla 9.5.1. En esta tabla aparece también el valor de la función objetivo de la fase I, que corresponde a la casilla (∞, ∞) , ya que la fase I consiste en no considerar las restricciones que limitan los cambios, es decir, tomar los valores que los limitan como infinito.



		nc_{\max}					
		∞	30	20	10	5	0
N_f	∞	32.177,91	32.219,04	32.247,63	32.260,54	32.283,74	32.385,65
	10	32.219,04	32.223,22	32.247,63	32.258,33	32.295,79	32.377,66
	5	32.228,42	32.243,02	32.320,87	32.394,85	32.401,51	32.503,84
	4	32.271,82	32.299,47	32.442,52	32.480,67	32.501,66	32.526,88
	3	32.310,39	32.330,12	32.410,88	32.557,15	32.602,44	32.708,55
	2	32.379,58	32.487,18	32.501,67	32.580,40	32.636,80	32.804,99
	1	32.454,54	32.666,47	32.591,58	32.635,56	32.705,83	32.779,50
	0	32.554,68	32.680,77	32.693,42	32.706,97	32.780,41	32.812,49

Tabla 9.5.1. Tabla de negociación que muestra el valor de la función objetivo de la etapa II de la replanificación.

En la tabla se puede observar cómo aumenta el coste de la replanificación a medida que se limitan los cambios. Es decir, cuando el número máximo de horas que se permiten modificar en cada semana y para cada trabajador (nc_{\max}) disminuye, el coste económico aumenta; por el contrario, si el máximo de horas modificadas es infinito, el coste disminuye. Lo mismo ocurre con el número de semanas que es posible que se conviertan en fuertes: cuantas más semanas se puedan convertir (menos limitados estén los cambios) el coste económico es más cercano al de la fase I.

Para poder observar el aumento de coste respecto a la fase I de manera más clara, se denomina Z_3^* al coste económico de la replanificación sin restricciones que limiten los cambios (valor de la función objetivo de la fase I). En el análisis del ejemplo tratado $Z_3^* = 32.177,91$ unidades monetarias. En la tabla 9.5.2 se expresan los valores del coste económico teniendo en cuenta las restricciones que limitan los cambios (valor de la función objetivo de la fase II) en función de Z_3^* .



		nc_{max}					
		∞	30	20	10	5	0
N_f	∞	Z_3^*	$1,0013 \cdot Z_3^*$	$1,0022 \cdot Z_3^*$	$1,0026 \cdot Z_3^*$	$1,0033 \cdot Z_3^*$	$1,0065 \cdot Z_3^*$
	10	$1,0013 \cdot Z_3^*$	$1,0014 \cdot Z_3^*$	$1,0022 \cdot Z_3^*$	$1,0025 \cdot Z_3^*$	$1,0037 \cdot Z_3^*$	$1,0062 \cdot Z_3^*$
	5	$1,0016 \cdot Z_3^*$	$1,0020 \cdot Z_3^*$	$1,0044 \cdot Z_3^*$	$1,0067 \cdot Z_3^*$	$1,0069 \cdot Z_3^*$	$1,0101 \cdot Z_3^*$
	4	$1,0029 \cdot Z_3^*$	$1,0038 \cdot Z_3^*$	$1,0082 \cdot Z_3^*$	$1,0094 \cdot Z_3^*$	$1,0101 \cdot Z_3^*$	$1,0108 \cdot Z_3^*$
	3	$1,0041 \cdot Z_3^*$	$1,0047 \cdot Z_3^*$	$1,0072 \cdot Z_3^*$	$1,0118 \cdot Z_3^*$	$1,0132 \cdot Z_3^*$	$1,0165 \cdot Z_3^*$
	2	$1,0063 \cdot Z_3^*$	$1,0096 \cdot Z_3^*$	$1,0101 \cdot Z_3^*$	$1,0125 \cdot Z_3^*$	$1,0143 \cdot Z_3^*$	$1,0195 \cdot Z_3^*$
	1	$1,0086 \cdot Z_3^*$	$1,0152 \cdot Z_3^*$	$1,0129 \cdot Z_3^*$	$1,0142 \cdot Z_3^*$	$1,0164 \cdot Z_3^*$	$1,0187 \cdot Z_3^*$
	0	$1,0117 \cdot Z_3^*$	$1,0156 \cdot Z_3^*$	$1,0160 \cdot Z_3^*$	$1,0164 \cdot Z_3^*$	$1,0187 \cdot Z_3^*$	$1,0197 \cdot Z_3^*$

Tabla 9.5.2. Tabla de negociación que muestra el valor de la función objetivo de la etapa II de la replanificación (en unidades monetarias) en función del valor de la función objetivo de la fase I.

A partir de estos valores, representantes de los trabajadores y representantes de la empresa pueden pactar, en función del coste económico, qué limitaciones de los cambios quieren aplicar a la replanificación. En el ejemplo en estudio, por ejemplo, si no se quisiera aumentar el coste en más del 3% se podrían elegir cualquiera de las combinaciones de parámetros que se encuentran coloreadas en amarillo en la tabla 9.5.2.

Una vez elegidas las restricciones que limitan los cambios, se ejecuta la fase III de la replanificación. En el modelo matemático de dicha fase, la función objetivo deja de ser el coste económico para convertirse en una medida de la discrepancia entre planificación y replanificación, sin permitir un aumento de coste respecto al coste de la fase II. En la fase IV se introduce un margen en cuanto al coste económico, permitiéndose el aumento del coste en un porcentaje, cuantificado mediante el parámetro σ ($\sigma > 1$) que decide el usuario.

Por lo tanto, una vez elegidos los parámetros que limitan los cambios, el siguiente paso en las negociaciones es negociar un valor de σ , es decir, negociar el nivel de margen respecto al coste económico de la fase II de la replanificación. Por ejemplo, si en la fase II anterior se eligen los valores de $nc_{max} = 15$ y $N_f = 6$, se puede resolver la replanificación para diferentes valores del parámetro σ y obtener la variación que sufre la



medida de discrepancia escogida para constituir la función objetivo de las fases III y IV. En la figura 9.5.2 se muestra la evolución de la función objetivo de la fase IV del ejemplo en estudio en función de diferentes valores de σ . En el problema presentado, la función objetivo de la fase IV representa el número de horas que se permiten de diferencia entre la planificación original y la replanificación.

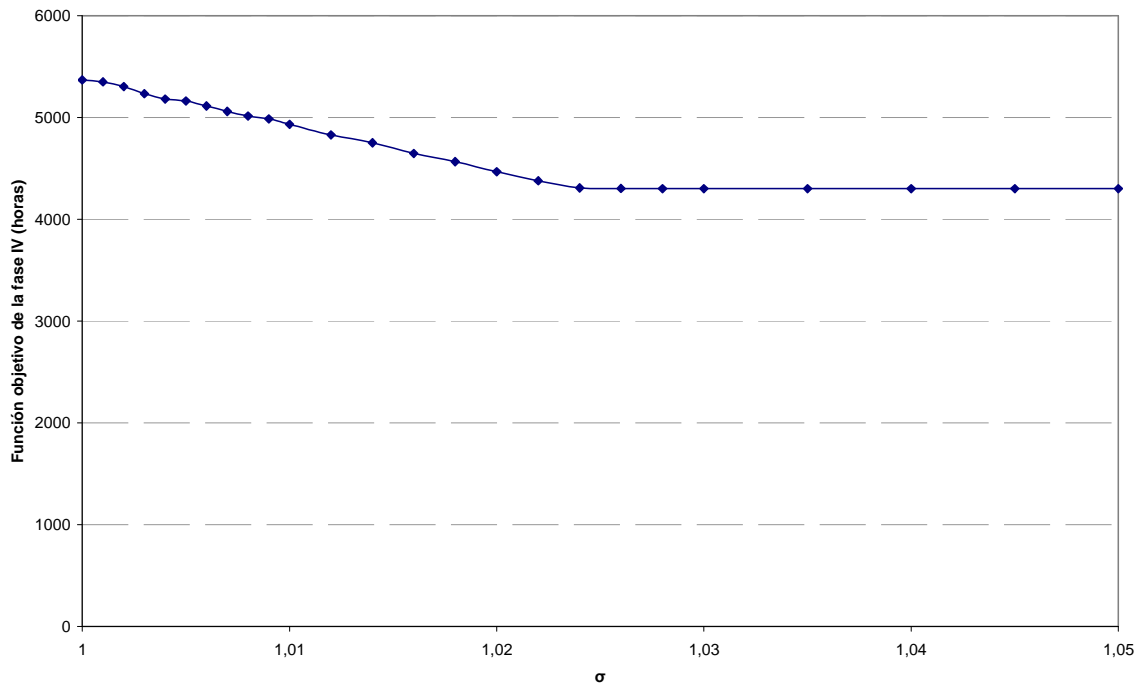


Figura 9.5.1. Evolución de la función objetivo de la fase IV en función del parámetro σ .

En el gráfico se observa cómo al permitir un aumento del coste económico cada vez mayor (aumento de σ), disminuye el número de horas que se modifican en la replanificación respecto a la planificación original. Es decir, a medida que el coste económico aumenta, la replanificación es más parecida a la planificación original.

En esta etapa debe pactarse un valor de σ , es decir, un valor del aumento de coste permitido en función del número de horas que cambia la replanificación respecto a la planificación original. Por ejemplo, si se decide que el coste no debe aumentar más de un 1% respecto al de la fase II ($\sigma = 1,01$), el número de horas que se modifican respecto a la planificación original entre todos los trabajadores son 4932,57.



Mediante el análisis de este ejemplo se ha mostrado más detalladamente el funcionamiento de la metodología de replanificación propuesta en este proyecto; además, se ha comprobado el correcto funcionamiento de los modelos de planificación de horarios tomados como referencia.

En la replanificación, primero se toma como referencia el coste de la replanificación sin ninguna condición (fase I), después se llega a un acuerdo sobre qué condiciones debe respetar el nuevo plan con respecto al plan anterior (fase II). Posteriormente, se elige una medida de discrepancia entre ambos planes para que ésta sea minimizada (fase III) y finalmente se permite aumentar el coste respecto al de la fase II a cambio de una disminución de la medida de discrepancia elegida (fase IV). El sistema de gestión propuesto es un elemento de ayuda en la toma de decisiones, ya que permite cuantificar cada una de ellas en términos económicos.



10 Presupuesto

En la realización del presupuesto de este proyecto deben considerarse varios grupos de costes: el coste del personal, el coste de las aplicaciones informáticas (tanto hardware como software), y el coste de materiales fungibles y de oficina. En la tabla 11.1 se encuentra el presupuesto del proyecto detallado según estos conceptos.

Concepto	Unidades	Coste unitario	Coste [€]
Ingeniero <i>Senior</i>	50 horas	100 €/h	5.000 €
Ingeniero <i>Junior</i>	700 horas	45 €/h	31.500 €
Coste de personal			36.500 €

Concepto	Coste total [€]	Período de amortización	Coste imputable al proyecto [€]
Coste de hardware(PC)	1.000	4 años	125 €
Coste del software	2.200	3 años	52 €
Coste del servidor	3.000	1 año	43 €
Coste de servicios informáticos			220 €

Concepto	Unidades	Coste unitario	Coste [€]
Impresiones	500 copias	0,03 €/copia	15 €
Fotocopias	100 copias	0,04 €/copia	4 €
Papel y material de oficina			30 €
Electricidad oficina			30 €
Coste de consumibles			79 €

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN		36.799 €
---------------------------------	--	-----------------

Beneficio de la consultora	20%	7.360 €
----------------------------	-----	---------

PRESUPUESTO SIN IVA		44.159 €
----------------------------	--	-----------------

IVA (16%)	16%	7.065 €
-----------	-----	---------

PRESUPUESTO TOTAL		51.224
--------------------------	--	---------------

Tabla 10.1. Presupuesto detallado del proyecto.

Los datos de los elementos informáticos han sido proporcionados por el Instituto de Organización y Control de Sistemas Industriales de la UPC. A continuación se especifica



la manera de imputar éstos costes al proyecto, ya que pueden ser costes de adquisición o costes que cubren períodos superiores a un año:

- a) El coste de adquisición del PC (Pentium IV a 3.40 GHz) es de 1000 €. Se considera que un ordenador personal de este tipo tiene un período de amortización de 4 años. Considerando que la duración del proyecto ha sido de 6 meses (medio año) y que durante este tiempo el ordenador no ha sido utilizado para ningún otro proyecto, el coste imputable al proyecto es el siguiente:

$$\text{Coste anual del PC} = \frac{1000\text{€}}{4} = 250\text{€}$$

$$\text{Coste del PC imputable al proyecto} = \frac{250\text{€}}{2} = 125\text{€}$$

- b) El coste de la licencia del programa de optimización ILOG CPLEX 4.2, para instituciones de enseñanza, es de 2200 € cada tres años. Las condiciones de esta licencia permiten trabajar a la vez a un máximo de 7 usuarios con este programa. El coste imputable al proyecto se calcula:

$$\text{Coste anual del la licencia} = \frac{2200\text{€}}{3} = 733\text{€}$$

$$\text{Coste anual del la licencia por usuario} = \frac{733\text{€}}{7} = 104\text{€}$$

$$\text{Coste imputable al proyecto (6 meses)} = \frac{105\text{€}}{2} = 52\text{€}$$

- c) El servidor usado en el Instituto de Organización y Control de Organizaciones Industriales tiene un coste anual de 3000€, que se puede imputar a 35 usuarios. El coste imputable al proyecto se calcula:

$$\text{Coste anual del servidor por usuario} = \frac{3000\text{€}}{35} = 86\text{€}$$

$$\text{Coste imputable al proyecto (6 meses)} = \frac{86\text{€}}{2} = 43\text{€}$$



11 Estudio del impacto ambiental

La realización de este proyecto, por tratarse de un estudio principalmente de investigación, provoca un pequeño impacto medioambiental. Este impacto se puede resumir, principalmente, en los siguientes términos:

- Gasto de papel y material diverso de oficina, que además genera unos residuos a tratar, preferentemente mediante su reciclado, si éste es posible.
- Gasto de energía para la alimentación del ordenador.
- Gasto de energía en la iluminación de la oficina. Además, la iluminación mediante fluorescentes (la más habitual actualmente en las oficinas) genera un residuo que será necesario gestionar de manera especial.
- Gasto de energía para la alimentación de las impresoras y fotocopiadoras.
- Contaminación acústica de las impresoras y fotocopiadoras.
- Gestión específica de los residuos generados por los recambios de las impresoras y fotocopiadoras.

La implantación del presente proyecto de replanificación en una planta industrial provocaría un impacto muy diferente en función de las características del sistema productivo, de las condiciones pactadas en la replanificación, de las nuevas previsiones de la demanda, etc. A continuación se enumeran algunas de las características a tener en cuenta en la evaluación del impacto ambiental al realizar la replanificación de horarios propuesta en este proyecto:

- Si la distribución de horas a lo largo del día cambia con motivo de la replanificación, puede que se derive un mayor o menor gasto de energía, en función del grado de aprovechamiento de la luz natural.
- Si la replanificación provoca jornadas diarias más cortas, es posible que el almuerzo no se realice en las instalaciones de la empresa, con lo que el impacto será menor.
- Si la demanda aumenta y la replanificación hace que la productividad deba aumentar para adaptarse, la cantidad de residuos provenientes del sistema productivo será mayor.





Conclusiones

El proyecto ha propuesto una metodología de replanificación, en el contexto de la anualización de la jornada laboral, a partir de un modelo de planificación; para ello se ha utilizado la programación lineal entera y mixta (PLM). La implementación del modelo en un software de optimización (ILOG) ha permitido la resolución de los modelos matemático con diferentes escenarios dentro del problema de anualización a resolver.

Del análisis de los tiempos de cálculo necesarios para la resolución del problema se concluye que los dos modelos presentados para la planificación se resuelven en tiempos aceptables. La metodología de replanificación propuesta, desglosada en cuatro fases, también se resuelve en tiempos razonables para todos los ejemplares probados, con lo que queda probada la eficiencia de la metodología propuesta para la determinación de una nueva planificación de horarios cuando por motivos diversos la planificación anterior se convierte en infactible. También se observa, como es intuitivo suponer, un aumento del tiempo de procesamiento necesario en los modelos de mayor tamaño, es decir, en aquellos que por representar un mayor número de empleados tienen un mayor número de variables y de restricciones.

Como ya ha sido explicado, la replanificación que se modeliza en este proyecto es la primera replanificación, por ser la que mayor dificultad presenta. Por ello, al obtener tiempos de cálculo aceptables para esta replanificación, se considera que las siguientes también serán factibles, con unos tiempos menores.

Mediante el análisis de un ejemplo concreto, se ha propuesto una manera de utilizar la metodología de replanificación como una herramienta de negociación: puede ayudar a pactar las condiciones que limitan los cambios permisibles entre la planificación y la replanificación.

Se ha presentado el presupuesto de la realización del presente proyecto de investigación sobre la replanificación de horarios en el contexto de jornada anualizada. Éste coste es un coste de gestión del tiempo que implica la decisión de realizar la replanificación de horarios. Cabe destacar, no obstante, que antes de implantar la anualización de la jornada, y en concreto antes de realizar replanificaciones, en una organización se debe



tener en cuenta si los beneficios que se obtienen por el hecho de ajustarse más a la demanda son mayores a los gastos de compensación de los trabajadores por el empeoramiento de las condiciones laborales y los gastos de gestión.

En cuanto a posibles líneas de investigación futuras, puede añadirse una quinta etapa en la replanificación propuesta, que tienda a conseguir una distribución homogénea de los cambios en los trabajadores. Se trataría de evitar que, debido a la replanificación, unos trabajadores vean sus horarios muy modificados mientras que para otros éstos varíen ligeramente.



Bibliografía

La bibliografía de este proyecto se clasifica en dos grandes grupos. En primer lugar se enumeran las referencias citadas a lo largo del proyecto. En segundo lugar, se muestran aquellas referencias bibliográficas consultadas que no han sido citadas en el proyecto, pero que se considera que pueden ser de interés para los lectores.

Referencias

- CAYIRLI, T., VERAL, E. *Outpatient scheduling in health care: A review of literature*. Production and Operations Management. Vol. 12 (4), 2003, p. 519-549.
- COROMINAS, A., LUSA, A., PASTOR, R. *La jornada anualizada como medio para hacer frente a las variaciones de la demanda*. Revista de dirección, organización y administración de empresas. Vol. 16 (30), 2002a, p.170-177.
- COROMINAS, A., LUSA, A., PASTOR, R. *Using MILP to plan annualised hours*. Journal of the Operational Research Society. Vol. 53, 2002b, p. 1101-1108.
- COROMINAS, A., LUSA, A., PASTOR, R. *La actualización de la jornada laboral: nuevos problemas de optimización en la organización del tiempo de trabajo*. Boletín de la Sociedad de Estadística e Investigación operativa. Vol. 19(2), 2003, p. 4-7.
- GALL, G. *All year round: the growth of annual hours in Britain*. Personnel Review. Vol. 25, 1996, p. 35-52.
- GERWIN, D. *An agenda for research on the flexibility of manufacturing processes*. International Journal of Operations and Production Management. Vol. 7, 1987, p. 39-49.
- GREEN, L.W., KOLESAR, J., SOARES, J. *An improved heuristic for staffing telephone call centers with limited operating hours*. Production and operations Management. Vol. 12 (1), 2003, p. 46-61.
- HUR, D., MABERT, V.A., BRETTHAUER, K.M. *Real-Time work schedule adjustment decisions: An investigation and evaluation*. Production and Operations Management Society. Vol. 13 (4), 2004, p. 322-339.
- HUTCHINSON, S. *The Changing Face of Annual Labour*. Personnel Management. 1993, p. 42-44.



- MABERT, V.A. *Planning police communications support*. AIIE Transactions. Vol. 15 (4), 1983, p. 313-319.
- MÉNDEZ, C. A., CERDÁ, J. *Dynamic scheduling in multiproduct batch plants*. Computers and Chemical Engineering. Vol. 27, 2003, p.1247–1259.
- OKE, A. *Linking human resource flexibility with manufacturing flexibility: enablers of labour capacity flexibility in manufacturing plants*. Proceedings of the First World Conference on Production and Operations Management (POM). Sevilla, 27 de Agosto al 1 de Septiembre, 2000.
- SLACK, N. *The manufacturing advantage*. Mercury Books, 1991.
- VIN, J.P., IERAPETRITOU, M.G. *A new approach for efficient rescheduling of multi-product batch plants*. Industrial and Engineering Chemistry Research. Vol. 39, 2000, p. 4228–4238.

Bibliografía complementaria

- CAO, J.M., KANAFANI, A. *The value of runway time slots for airlines*. European Journal of Operational Research. Vol. 126, 2000, p. 491–500.
- CARLSON, R.C., JUCKER, J.V., KROPP, D.H. *Less nervous MRP systems: A dynamic economic lot-sizing approach*. Management Science. Vol. 25 (8), 1979, p. 754-761.
- COROMINAS, A., LUSA, A., PASTOR, R. *Planning annualised hours with a finite set of weekly working hours and joint holidays*. Working paper, IOC-DT-P-2002-16; UPC; Barcelona.
- COROMINAS, A., LUSA, A., PASTOR, R. *Planning annualised hours with a finite set of weekly working hours and cross-trained workers*. Working paper, IOC-DT-P-2002-22; UPC; Barcelona.
- MÉNDEZ, C.A., CERDÁ, J., GROSSMAN, I.E., HARJUNKOSKI, I. *State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes*. Computers and Chemical Engineering. Vol. 30, 2006, p. 913–946.
- ROSLÖF, J., HARJUNKOSKI, J., BJÖRKQVIST, S., KARLSSON, T., WESTERLUND, T. *An MILP-based reordering algorithm for complex industrial scheduling and rescheduling*. Computers and Chemical Engineering. Vol. 25, 2001, p.821–828.



- TANG, O., GRUBBSTRÖM, R.W. *Planning and replanning the master production schedule under demand uncertainty*. International Journal of Production Economics. Vol. 78, 2002, p. 323-334.
- TSUBORNE, H., FURUTA, H. *Replanning timing in hierarchical production planning*. International Journal of Production Economics. Vol. 44, 1996, p.53-61.

