



ASIGNACIÓN ÓPTIMA DE TURNOS PARA CALL CENTERS.

CIUDAD REAL, 16 de marzo de 2020

Índice general

Índice general	1
1. El problema de la planificación de turnos	3
1.1. El problema de la asignación óptima de turnos en “call centers”	4
1.1.1. Planificación inicial	8
1.1.2. Resolución de contingencias y actualización de la programación	13
1.2. Planteamiento y solución de la planificación inicial para las semanas del 15 al 29 de Julio de 2019	13
1.2.1. Maximización del CVaR con $\alpha = 0,95$	14
1.2.2. Maximización del CVaR con $\alpha = 0,90$	18
1.2.3. Maximización del CVaR con $\alpha = 0,75$	21
1.3. Consideración de la incertidumbre	21

Capítulo 1

El problema de la planificación de turnos

La planificación en un sentido amplio se puede definir como un proceso meditado con una ejecución metódica y estructurada, con el fin de obtener un objetivo determinado. De manera complementaria, se puede decir que la planificación es un proceso mediante el cual las personas establecen una serie de pasos y parámetros a seguir antes del inicio de un proyecto o proceso, con el fin de obtener los mejores resultados posibles. Cabe destacar que debe realizarse de forma metódica, estructurada y organizada de una manera ampliada con diferentes actividades complementarias y pasos a seguir, pautando resultados parciales dentro de un calendario establecido y distribuyendo los recursos de acuerdo a las pautas de realización establecidas.

Esta definición genérica es válida para multitud de actividades socioeconómicas, y se puede particularizar para distintos casos como por ejemplo la realización de proyectos de diseño, la construcción de infraestructuras, la planificación de la producción, o la planificación y organización de la plantilla entre otras muchas. Independientemente de las particularidades de cada caso concreto y de cada sector, en todos los casos lo que se pretende es organizar y gestionar los recursos disponibles, materiales y humanos, de forma que se cumplan los objetivos con unos mínimos criterios de garantía y calidad, con el menor coste posible, y además cumpliendo con las restricciones a las que están sometidos los distintos elementos que participan en el proceso productivo.

Un ejemplo claro en el que la planificación es muy importante es la planificación y gestión de turnos de empleados. En este caso concreto hay distintos tipos problemas que se pueden plantear y resolver, desde la planificación de la plantilla, la programación de turnos con una plantilla dada, hasta la reprogramación para resolver contingencias. Todas estas tareas son comúnmente desarrolladas por equipos de personas expertas, que con el conocimiento adquirido a lo largo de los años, en muchos casos desarrollando labores de planificación en el mismo ámbito, consiguen desarrollar planificaciones eficientes y robustas, aunque a costa de dedicar mucho tiempo en su elaboración. Sin embargo, en muchas organizaciones, especialmente aquellas con grandes crecimientos, los procesos de planificación pueden involucrar un número tal de variables y restricciones que hacen que incluso el planificador más experto no sea capaz de alcanzar, ni siquiera acercarse, a los niveles

de eficiencia potencialmente alcanzables de acuerdo con los recursos disponibles. En ESCISSION somos conscientes de este problema y de las dificultades que entraña, y por ese motivo en este documento se describe un modelo planificación de turnos diseñado “ad hoc” para “call centers”. El propósito de este documento es mostrar las capacidades del modelado matemático y la programación matemática para ser capaces de realizar planificaciones pseudo-automáticas que cumplan la legislación vigente en materia laboral, y que además maximicen la calidad del servicio prestado en función de la plantilla disponible en cada momento. Nótese que el modelo y las herramientas computacionales que ponemos a disposición de los clientes no son un sustituto a los “planificadores” tradicionales, sino que el propósito es que sirvan de soporte, para que centren sus esfuerzos en la adaptación del modelo y sus parámetros a sus intereses y empleen su conocimiento y experiencia en mejorar la calidad del servicio sin perder el tiempo en labores que pueden automatizarse. Este proceso se puede hacer en dos etapas bien diferenciadas:

Planificación inicial: El modelo proporciona una planificación inicial de base en un sentido “óptimo” desde un punto de vista matemático. Esta planificación, antes de su puesta a punto, deberá disponer del visto bueno del “planificador”. De esta manera si el “planificador” detecta alguna incoherencia no contemplada en las restricciones previamente impuestas, tiene la posibilidad de añadirlas y generar una nueva planificación de forma automática, hasta dar con la definitiva.

Solución de contingencias: En caso de que durante el desarrollo del proceso bajo la planificación aprobada inicialmente, surja algún imprevisto o contingencia que suponga una interrupción del proceso, es posible reorganizar los recursos para adaptarse a la nueva situación de forma que se minimicen los inconvenientes generados.

Pese a que puede haber multitud de situaciones que requieran variaciones y adaptaciones posteriores, el modelo propuesto recoge los elementos más importantes involucrados en el proceso.

1.1. El problema de la asignación óptima de turnos en “call centers”

Los “call centers” son centros que recogen llamadas de clientes asociados a distintos tipo de servicio, pero principalmente orientados a la atención al cliente. El problema de asignación de turnos en este caso es muy complejo porque tienen que ser capaces de atender a todos los clientes con unos ratios clientes/personal lo más bajos posibles, para reducir los tiempos de espera y para mejorar la calidad del servicio. El principal problema al que se enfrentan este tipo de organizaciones a la hora de gestionar los turnos es la incertidumbre de la demanda de llamadas.

La información básica disponible para la asignación de turnos es la siguiente:

1. Históricos de demandas de llamadas o pronóstico de demandas de llamadas si están disponibles. En la Figura 1.1 se muestra un ejemplo de la hoja EXCEL que contiene la información de las llamadas que entran en cada fecha e instante

para los días que se desean planificar. Como puede comprobarse, contienen información de la fecha y hora, el número de personas que hay que atender, y en este caso hemos incluido el idioma preferente en el que atender a los clientes, aunque se podría utilizar o hacer turnos por departamentos u otra clasificación en función de la actividad del “call center”.

	A	B	C	D	
1	Fecha	Hora	Nº de llamadas	Idioma	
2	20190715	05:50	21	DE	
3	20190715	06:00	17	DE	
4	20190715	06:00	2	DE	
5	20190715	06:50	19	DE	
6	20190715	06:50	27	DE	
7	20190715	06:55	152	DE	
8	20190715	06:55	6	DE	
9	20190715	07:00	3	DE	
10	20190715	07:00	2	DE	
11	20190715	07:00	101	DE	
12	20190715	07:05	2	DE	
13	20190715	07:05	132	DE	
14	20190715	07:05	10	DE	
15	20190715	07:05	3	DE	
16	20190715	07:15	10	DE	
17	20190715	07:20	5	DE	

Figura 1.1: Hoja EXCEL con la información de los vuelos para las semanas de planificación.

2. Información de los 22 turnos posibles en los que los empleados pueden trabajar. Esta información se muestra en la Tabla 1.1, con la hora de inicio de cada turno, la hora de finalización y el número de horas de trabajo de cada uno.
3. Información de los empleados. En la Figura 1.2 se muestra un ejemplo de la hoja EXCEL que contiene la información de los empleados. Como puede comprobarse, contiene información del identificador del empleado, las horas que puede realizar a la semana, al mes, horas complementarias, horas extra, horas al día, categoría profesional y los idiomas que domina para tratar con

	Inicio (24H)	Finalización (24H)	Duración del turno (H)
Turno 1	6:00	14:00	8
Turno 2	7:00	14:00	7
Turno 3	7:00	15:00	8
Turno 4	7:00	14:00	7
Turno 5	7:00	15:00	8
Turno 6	8:00	16:00	8
Turno 7	14:00	21:00	7
Turno 8	14:00	22:00	8
Turno 9	14:00	22:00	8
Turno 10	15:00	22:00	7
Turno 11	15:00	23:00	8
Turno 12	15:00	22:00	7
Turno 13	15:00	23:00	8
Turno 14	16:00	0:00	8
Turno 15	16:00	23:00	7
Turno 16	16:00	0:00	8
Turno 17	17:00	1:00	8
Turno 18	18:00	2:00	8
Turno 19	19:00	3:00	8
Turno 20	19:00	3:00	8
Turno 21	20:00	4:00	8
Turno 22	21:00	4:00	7

Tabla 1.1: Turnos considerados en el problema de la planificación de turnos de un “call center”.

los clientes. Nótese que se puede emplear una puntuación para priorizar y establecer un criterio de calidad del servicio en función del idioma aunque en este caso se ha empleado otro criterio que se puede adaptar a las necesidades del cliente.

	A	R	S	T	U	V	W	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS
1	id_user	hoursweek	hoursmonth	complementaryhours	annualextrahours	hoursday	category	SP	EN	FR	DA	DE	RU	IT	NO	PL	BE	NL
2	169079	48	180	30.00		80	8.00	Team Manager	5.00	5.00								
3	169080	48	180	30.00		80	8.00	Team Leader	5.00	5.00	5.00							
4	169081	48	180	30.00		80	8.00	Team Leader		5.00	5.00	5.00						
5	169082	48	180	30.00		80	8.00	Team Leader	5.00	5.00								
6	169102	48	180	30.00		80	8.00	Airport Rep	5.00	5.00			5.00					
7	169104	48	180	30.00		80	8.00	Airport Rep	5.00	5.00		5.00		5.00				
8	169106	48	180	30.00		80	8.00	Airport Rep	5.00	5.00								
9	169110	48	180	30.00		80	8.00	Airport Rep		5.00								
10	169111	48	180	30.00		80	8.00	Airport Rep	5.00	5.00								
11	169112	48	180	30.00		80	8.00	Airport Rep	5.00	5.00		5.00						
12	169115	48	180	30.00		80	8.00	Airport Rep	5.00	5.00								
13	169122	48	180	30.00		80	8.00	Airport Rep		5.00								
14	169132	48	180	30.00		80	8.00	Airport Rep	5.00	5.00								
15	169137	48	180	30.00		80	8.00	Airport Rep	5.00	5.00								
16	169140	48	180	30.00		80	8.00	Airport Rep	5.00	5.00								
17	169142	48	180	30.00		80	8.00	Airport Rep	5.00	5.00								
18	169143	48	180	30.00		80	8.00	Airport Rep	5.00	5.00								
19	169144	48	180	30.00		80	8.00	Airport Rep	5.00	5.00								
20	169150	48	180	30.00		80	8.00	Airport Rep	5.00	5.00			5.00					
21	169153	48	180	30.00		80	8.00	Airport Rep	5.00	5.00								

Figura 1.2: Hoja EXCEL con la información de los empleados.

Con esta información básica inicial, es necesario definir el criterio de asignación, ya que la definición de asignación óptima de turnos es un concepto subjetivo y difuso, que requiere su establecimiento en función de los criterios de calidad que la empresa quiera ofrecer a sus clientes. En principio y a falta de información más precisa sobre las preferencias del cliente final, se han seleccionado dos criterios de calidad:

1. El primer criterio es tratar de asignar turnos de forma que el ratio horario entre clientes a atender y empleados disponibles sea lo más bajo posible. El fundamento de este criterio radica en el hecho de que cuanto menos gente atienda un empleado, mejor va a ser su trato, menores los tiempos de espera de los clientes, y por tanto mejora la satisfacción del cliente.
2. El segundo criterio es tratar de asignar turnos de forma que los clientes sean atendidos por personal que domine sus idiomas de origen y/o destino. Esta característica además de hacer que los clientes se sientan más cómodos, aceleran los procesos de atención con lo cual aumenta la satisfacción global del cliente.

Estos dos criterios en determinadas ocasiones van de la mano y en ocasiones, pueden incluso contraponerse. Por ese motivo es necesario ofrecer un modelo que sea lo suficientemente flexible como para que los planificadores puedan seleccionar la mejor combinación de criterios para obtener los mejores estándares de calidad en cada momento. En este documento se emplea el concepto de óptimo para hacer referencia al mejor valor posible que se puede alcanzar de una función objetivo una vez que ésta ha sido definida, y por ese motivo la selección del criterio de optimización es crucial.

1.1.1. Planificación inicial

El problema de la planificación de tareas y turnos es conceptualmente muy sencillo. Dadas una serie de tareas que hay que realizar en unos periodos de tiempo preestablecidos, es necesario hacer una asignación de esas tareas por empleado, dentro de sus turnos correspondientes, y de forma que cada empleado haga aquella tarea para la que esté cualificado. Obviamente hay que tener en cuenta una serie de restricciones legales en torno al número máximo de horas que se pueden trabajar a la semana, por mes, u otro tipo de restricciones operativas específicas de cada empresa o tipo de empresa, como por ejemplo, el número mínimo de horas que han de transcurrir desde la salida de un trabajador de un turno hasta la entrada en el siguiente, o los descansos semanales de 36 horas. De forma más precisa, el problema de la planificación inicial consta de los siguientes elementos:

1. **Índices:** Dado que vamos a trabajar con variables asociadas a tareas, trabajadores, turnos, tiempos, etc. se definen los siguientes índices que van a caracterizar las dimensiones de las variables y datos que se definen con posterioridad:

Índice de periodos de tiempo (t): En este caso concreto las tareas se corresponden con clientes a atender, y por eso vamos a agregar a esas personas por hora e idioma. Para hacer la agregación se discretiza el periodo de tiempo de análisis en ventanas temporales caracterizadas por el índice de periodos de tiempo t . Este índice de periodos de tiempo se corresponde con horas.

Índice de idioma, o departamento (s): ("skill") Los empleados están capacitados para atender a todos los clientes en función de su capacidad para hablar el idioma nativo de los mismos, por ese motivo se define el índice de especialización o destreza asociada al idioma. También se podría usar para distinguir entre los distintos departamentos de atención al cliente.

Índice asociado a los empleados (e): Uno de los índices requeridos es el que caracteriza a los empleados. El número de empleados se corresponde con n_e .

Índice asociado a los turnos (ws) ("work shift"): Los empleados organizan sus jornadas de trabajo por periodos de tiempo predefinidos en los que están a cargo de una serie de tareas, esos periodos de tiempo se definen como turnos, y hay un índice específico que los caracteriza. Nótese que puede darse el caso de que el índice de periodos de tiempo coincida con el turno completo. El número de turnos posibles es n_{ws} .

Índices temporales: Dado que los empleados tienen una serie de restricciones de horas de trabajo por días, semanas, y meses. Se definen los índices adicionales asociados a días, semanas y meses: d (días del año que van del 1 al 366), w ("weeks", semanas del año que van del 1 al 52) y m (meses del año que van del 1 al 12) que se emplean para establecer balances de horas por días, semanas y meses y limitar sus valores con las restricciones pertinentes.

2. **Datos:** Los datos necesarios para plantear de forma adecuada la planificación son:

Periodo de planificación (n_t): Dado que se ha decidido discretizar el periodo de planificación en intervalos de tiempo caracterizados por el índice (t), el periodo de planificación establece la longitud de este registro.

Idiomas por empleado ($dem_{e,s}$): Datos “booleanos” (verdadero/falso) que permiten definir para cada empleado los idiomas en los que puede atender a los clientes.

Turnos ($tur_{t,ws}$): Datos “booleanos” (verdadero/falso) que permiten definir los intervalos de tiempo que abarcan cada turno posible dentro del periodo de planificación.

Horas por turno (hor_{ws}): Parámetro que define el número de horas por turno. Nótese que este valor se emplea para definir las restricciones de máximo número de horas que un trabajador puede cubrir a la semana y al mes. Este valor se puede obtener de la variable ($tur_{t,ws}$), lo cual indica que la definición de este parámetro ha de ser coherente con la definición de los turnos, y que podría no ser necesaria su definición, sin embargo se incluye por simplicidad en los cálculos.

Tareas ($ta_{t,s}$): El parámetro $ta_{t,s}$ define el número de clientes a atender en el periodo de tiempo t , preferiblemente con el idioma o departamento s .

Horas diarias trabajadas por cada empleado ($daywh_{d,e}$): Parámetro en el que se almacenan de forma acumulada las horas diarias trabajadas por cada empleado en turnos normales.

Horas extras trabajadas por cada empleado ($dayewh_{d,e}$): Parámetro en el que se almacenan de forma acumulada las horas extras diarias trabajadas por cada empleado.

Horas diarias de vacaciones por cada empleado ($dayhol_{d,e}$): Parámetro en el que se almacenan de forma acumulada las horas equivalentes trabajadas por cada empleado por cada día de vacaciones.

Máximo número de turnos por empleado e intervalo (max_{numtar}): Parámetro que fija el número máximo de turnos que un empleado puede hacer en un mismo intervalo de tiempo.

Máximo de turnos diarios (max_{tur}): Parámetro que fija el número de turnos máximo por empleado y día. Inicialmente este valor va a ser igual a 1, en caso de querer introducir turnos dobles se recomienda generar un nuevo turno asociado a ese turno doble.

Máximo de horas semanales ($max_{horweek}$): Parámetro que fija el número máximo de horas semanales que un empleado puede trabajar sin contar horas extras.

Máximo de horas mensuales ($max_{hormonth}$): Parámetro que fija el número máximo de horas mensuales que un empleado puede trabajar sin contar horas extras.

Mínimo número de horas entre turnos (min_{diftur}): La diferencia entre la hora de comienzo de un turno en el día “ $d + 1$ ” y la de finalización en el día “ d ” ha de ser mayor que el mínimo exigido “ min_{diftur} ”. En otras palabras, este parámetro fija el mínimo número de horas de descanso que han de transcurrir entre dos turnos en días consecutivos para cumplir con la legislación vigente.

Descanso mínimo semanal ($\min_{\text{desweek}}$): Descanso mínimo semanal en horas. Esta condición, dado que en España ese valor es de 36 horas, se transforma en una condición de número de turnos semanales asegurándose de que dejando un día sin turno, el descanso es de 36 horas, ya que en función de los turnos que se escojan puede ocurrir que aún dejando un día sin turno no se llegue a ese mínimo legal.

3. **Variables:** Las variables que hay que determinar son las siguientes :

Asignación de turnos por empleado y día ($x_{d,ws,e}$): Esta variable es de tipo binario, de forma que tiene un valor igual a 1 cuando para el día “d”, se le asigna al empleado “e” el turno “ws”, y cero en caso contrario.

Ratio de calidad empleado versus clientes (r_t): Variable positiva que representa para cada instante de tiempo el cociente entre el número de empleados que trabajan en una hora concreta dividido por el número de clientes que hay que atender. Nótese que el propósito de la asignación de turnos es hacer que estos valores sean lo mayores posibles, posteriormente se explica cómo.

Comentario 1 *Nótese que no se incluye la asignación específica de tareas pese a que se podría incorporar en el modelo. El motivo es que en este caso no se pueden definir de forma clara las tareas ya que se trata de atender a grupos de personas en una horquilla de tiempo. En la definición de la función objetivo se entenderá mejor la motivación para no hacer asignación directa de tareas en la planificación de los turnos.* ■

4. **Función objetivo:** La función objetivo que se va a considerar es una función multi-objetivo y secuencial.

a) Por un lado se trata de maximizar el ratio de calidad r_t y por otro asegurarse que el número de personas que no se podrían atender en su idioma porque no haya ningún empleado en ese momento que lo hable sea lo menor posible. Estos requerimientos se complican por el hecho de que se van a obtener tener tantos ratios de calidad (r_t) como intervalos de tiempo considerados en el periodo de análisis, y hay que decidir que criterio se emplea, pero ¿cómo?:

- ¿Maximizamos el peor caso? para asegurar un criterio de calidad mínimo
- ¿Maximizamos la media de los ratios de calidad?
- O maximizamos la media de un subconjunto de los ratios de calidad, como por ejemplo, un porcentaje de los peores ratios.

La ventaja del modelo que se propone es que es posible emplear cualquiera de los criterios sin más que modificar un parámetro, denominado nivel de confianza α , de forma que sea el planificador el que seleccione el criterio que mejor se ajusta a sus requerimientos. Nótese que los criterios anteriores se pueden englobar en un único concepto ampliamente

extendido en ámbitos financieros. Se trata del concepto de “valor en riesgo condicionado” o “Conditional Value-at-Risk (CVaR)” cuya interpretación gráfica se muestra en la Figura 1.3. Asíumase que la variable r_{α}^{CVaR} se corresponde con el valor en riesgo condicionado asociado al ratio de calidad de los intervalos de tiempo, esto implica que esta variable se corresponde con la media de los ratios más pequeños que el cuantil del $1 - \alpha$. Este cuantil se conoce como “valor en riesgo” o “Value-at-Risk (VaR)”, denominado en este caso r_{α}^{VaR} y cuya interpretación gráfica también se presenta en la Figura 1.3. Nótese que si $\alpha = 1$, el CVaR se corresponde con el mínimo ratio. Por lo tanto la función objetivo va a ser el CVaR del ratio de calidad r_{α}^{CVaR} . Por otro lado, si $\alpha = 0$, el CVaR se corresponde con la media de todos los ratios de calidad.

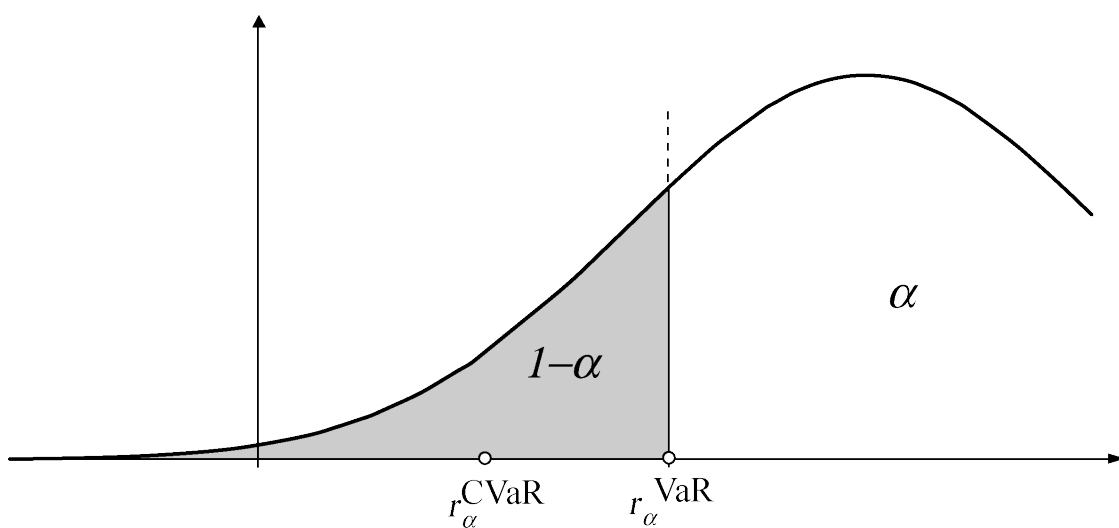


Figura 1.3: Interpretación del concepto de CVaR asociado a un nivel de confianza α .

Las ventaja de emplear estas variables como términos a maximizar en la función objetivo es que permiten maximizar unos criterios mínimos de calidad, que pueden modificarse sin más que modificar los niveles de confianza. Posteriormente se mostrará el efecto que tiene cambiar estos niveles de confianza en la asignación de turnos.

- b) Sin embargo, el CVaR del ratio de calidad no afecta a la calidad en cuanto a que haya empleados para atender en un idioma (departamento o especialidad) determinado. Por ese motivo, en la función objetivo se incluye un término de penalización de forma que se minimizen el número de personas que no se podrían atender en su idioma (departamento o especialidad) porque en la hora concreta no haya ningún empleado que lo hable (que pertenezca al departamento o especialidad). Este término tiene prioridad ante el CVaR.
- c) Por último, nos interesa aprovechar al máximo la plantilla disponible, por ese motivo también nos interesa, una vez alcanzado los estándares de calidad definidos por los términos anteriores, el maximizar el número de

turnos asignados en caso de que no haya logrado ya.

5. **Restricciones:** Una de las mayores dificultades de este tipo de problemas, y que suponen un escollo insalvable para los algoritmos voraces típicamente empleados en este contexto, especialmente cuando la dimensión del problema aumenta, es la consideración de restricciones o condiciones adicionales que ha de cumplir la asignación de tareas y turnos. En este modelo se van a considerar las siguientes restricciones:

Limitación de turnos por empleado y tiempo: A cada trabajador “e” en cada instante de tiempo “t” no se le puede asignar mas de un turno.

Máximo número de turnos al día: A cada trabajador “e” no se le pueden asignar más turnos en el día “d” que los definidos por el parámetro ($\max_{\text{tur}}$). Nótese que pese a que es posible modificar el valor de este parámetro inicialmente se emplea un máximo de 1 turno diario, y en caso de que haya que considerar dobles turnos estos se han de definir como turnos adicionales con un mayor número de horas en el día.

Máximo número de horas semanales por empleado: Cada trabajador “e” no puede trabajar más de un número máximo de horas a la semana dado por el parámetro “ $\max_{\text{horweek}}$ ”: *De momento no voy a considerar los balances de horas acumulados tanto para una semana si se planifican días sueltos dentro de una semana, como mensuales usando los parámetros ($\text{daywh}_{d,e}$, $\text{dayewh}_{d,e}$, $\text{dayhol}_{d,e}$) porque no están disponibles.*

Máximo número de horas mensuales por empleado: Cada trabajador “e” no puede trabajar más de un número máximo de horas al mes dado por el parámetro “ $\max_{\text{hormonth}}$ ”.

Mínimo número de horas entre turnos: Para cada empleado “e”, la diferencia entre la hora de comienzo del turno en el día “d + 1” y la de finalización en el día “d” ha de ser mayor que el mínimo exigido “ $\min_{\text{dif tur}}$ ”.

Mínimo número de horas de descanso semanal: En cada semana hay que incluir un descanso mínimo semanal de “ $\min_{\text{desweek}}$ ” horas, que en España son 36 horas.

El modelo descrito constituye el modelo básico, pero se podría adaptar y sofisticar más en función de las necesidades. Por ejemplo, se podrían implementar de forma sencilla las siguientes funcionalidades adicionales:

1. La posibilidad de limitar para cada empleado los turnos que pueden hacer.
2. Incluir los días de vacaciones de los empleados dentro del periodo de análisis.
3. La posibilidad de asignar horas extras.
4. La posibilidad de incluir distintos perfiles de empleado con distintos criterios de calidad por perfil para la asignación de turnos.

Pero las posibilidades no se limitan a estas opciones, y hay flexibilidad para introducir aquellas restricciones que el cliente crea que son necesarias para su negocio.

1.1.2. Resolución de contingencias y actualización de la programación

Es indudable que el modelo propuesto de asignación óptima de turnos y tareas puede constituir una herramienta de gran utilidad dentro del proceso productivo de cualquier empresa, sin embargo, la actividad productiva está sujeta a multitud de riesgos que pueden alterar la planificación inicial. De hecho es parte de la planificación el anticiparse a posibles casuísticas que puedan surgir alterando esa planificación inicial, planteando formas alternativas de replanificación. La ventaja del modelo propuesto en las subsecciones anteriores es que pequeñas modificaciones pueden permitir replanificar la asignación ante situaciones no contempladas inicialmente. En este caso se contemplan las siguientes casuísticas:

1. Bajas de uno o varios de los empleados con turnos asignados.
2. Solicitudes de cambio de turno.
3. Alteraciones en las tareas a realizar o en su secuencia temporal, independientemente de las causas.

La clave en este caso, es que es necesario actualizar la secuencia de tareas que hay que realizar, introducir las nuevas restricciones del problema, como por ejemplo, no asignarle turno a un empleado que se ha dado de baja repentinamente, y recalculer la planificación. Sin embargo para recalculer el problema es necesario introducir parámetros adicionales y cambiar la función objetivo para adaptarse a la nueva situación con los mismos criterios de calidad anteriores pero además tratando de modificar los menos posible los turnos, ya que un excesivo número de cambios puede crear malestar entre la plantilla.

1.2. Planteamiento y solución de la planificación inicial para las semanas del 15 al 29 de Julio de 2019

Con el propósito de demostrar el funcionamiento del modelo propuesto para la elaboración de turnos en este caso se va a realizar la planificación de las dos semanas más complicadas del año 2019, con un mayor número de clientes a atender. Nótese que en esas dos semanas se gestionó la atención de 176748 clientes. Los valores de los parámetros más significativos para este ejemplo son los siguientes:

1. El índice de periodos de tiempo abarca $t = 1, \dots, 336$, lo que se corresponde con dos semanas de planificación con intervalos de tiempo horarios.
2. El índice de especialización o destreza toma los valores $s = 1, \dots, 11$ para considerar cada uno de las 11 idiomas posibles.
3. El índice de empleados toma los valores $e = 1, \dots, 78$ para considerar cada una de las 78 personas empleadas.
4. El índice de turnos toma los valores $ws = 1, \dots, 22$ para considerar cada uno de los 22 turnos posibles en los que pueden trabajar los empleados.
5. El intervalo de tiempo considerado son $\Delta t = 60$ minutos.

6. La matriz de datos de los turnos posibles en el periodo de planificación $\text{tur}_{t,ws}$ se muestra parcialmente en la Figura 1.4. Nótese que por limitaciones de espacio sólo se muestra la primera semana, la segunda semana es exactamente la misma.
7. El máximo de turnos diarios es igual a $\max_{\text{tur}} = 1$.
8. El máximo de horas semanales se fija en $\max_{\text{horweek}} = 48$.
9. El máximo de horas mensuales se fija en $\max_{\text{hormonth}} = 180$.
10. El mínimo número de horas entre turnos se fija a $\min_{\text{diftur}} = 12$ horas.
11. El mínimo descanso semanal ($\min_{\text{desweek}}$) se fija en 36 horas.

1.2.1. Maximización del CVaR con $\alpha = 0,95$

Si se considera el nivel de confianza $\alpha = 0,95$ para el ratio empleados/clientes, la asignación de turnos óptima queda de la siguiente manera:

1. En las Figuras 1.5(a) y 1.5(b) se muestra la evolución del ratio entre el número de clientes a atender por hora versus el número de empleados disponibles, así como la evolución de número de clientes y número de empleados por separado. Puede observarse como no se excede en ningún caso de 52,3571 clientes por empleado y hora. Además en la gráfica de la Figura 1.5(b) se observa claramente cómo el número de empleados se adapta perfectamente a la demanda de clientes.
2. En este caso hay 2428 clientes a los que no se les puede atender en su idioma de procedencia, lo cual supone un 1.37% con respecto al número total de clientes.
3. En la Figura 1.6 se muestran los turnos asignados por empleado. Nótese que en este caso se asignan 6759 horas de las 7488 horas potenciales disponibles que se podrían asignar teniendo en cuenta la disponibilidad teórica total de los empleados.

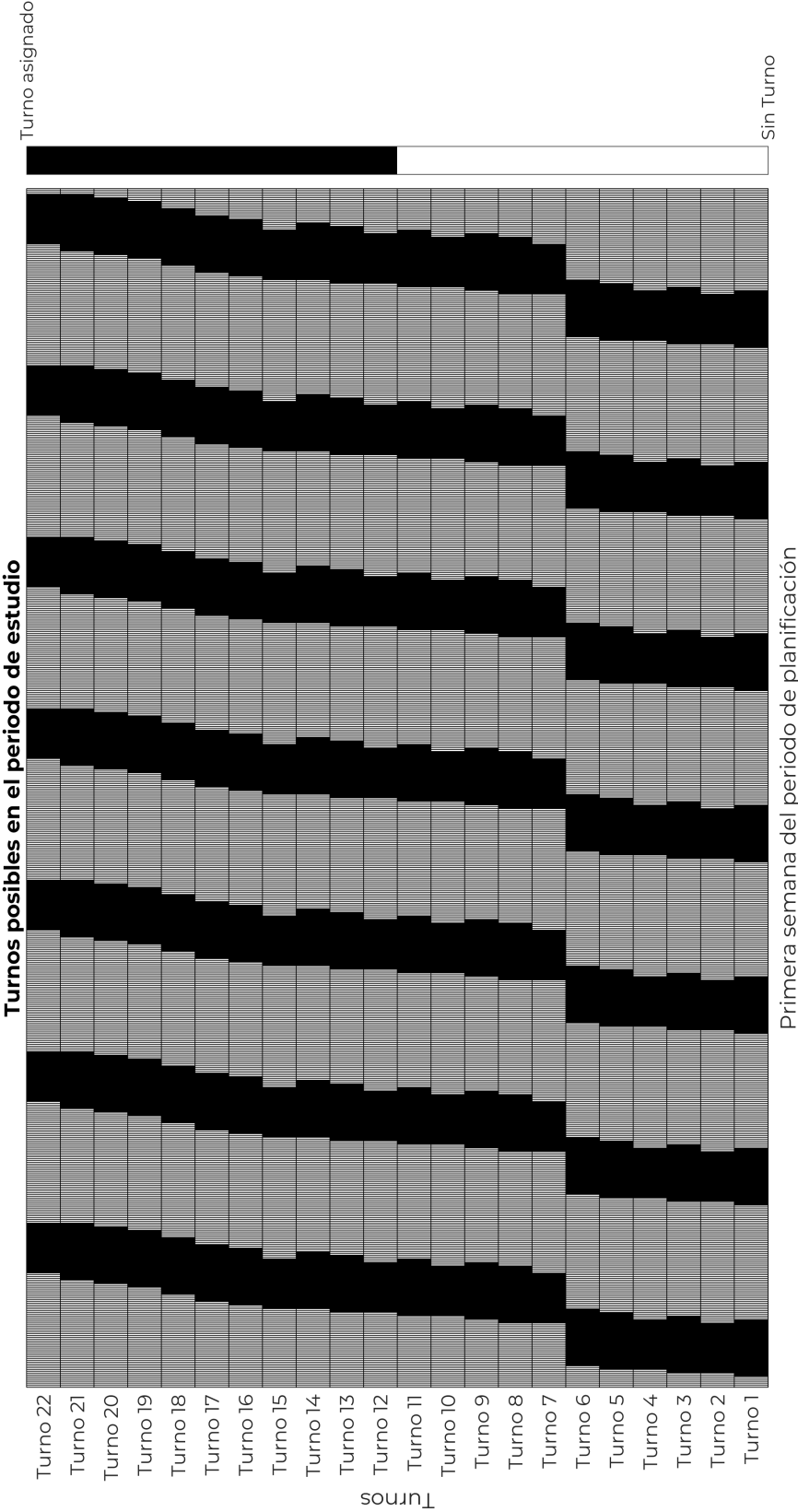
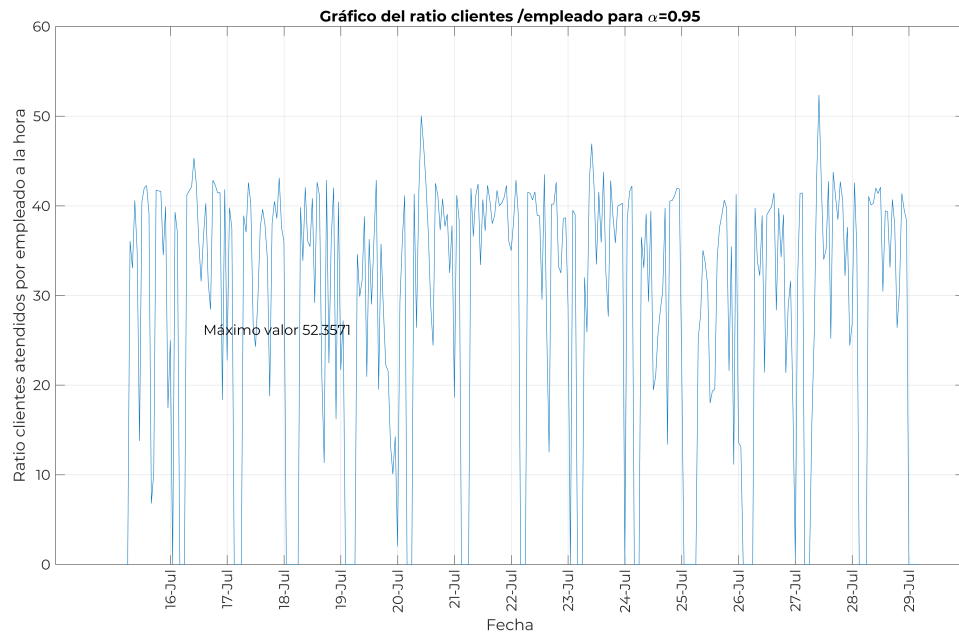
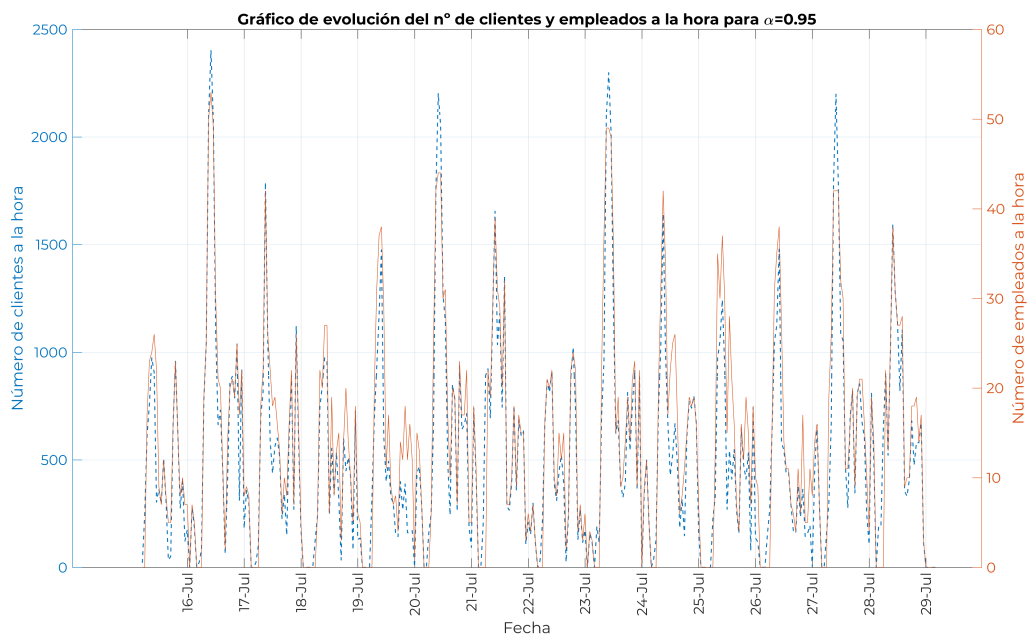


Figura 1.4: Turnos posibles en los que los empleados pueden trabajar para la primera semana de planificación en el caso realista



(a) Evolución del ratio n° de clientes/n° de empleados.



(b) Evolución del número de clientes por hora versus número de empleados.

Figura 1.5: Asignación óptima de turnos maximizando el CVaR con $\alpha = 0,95$.

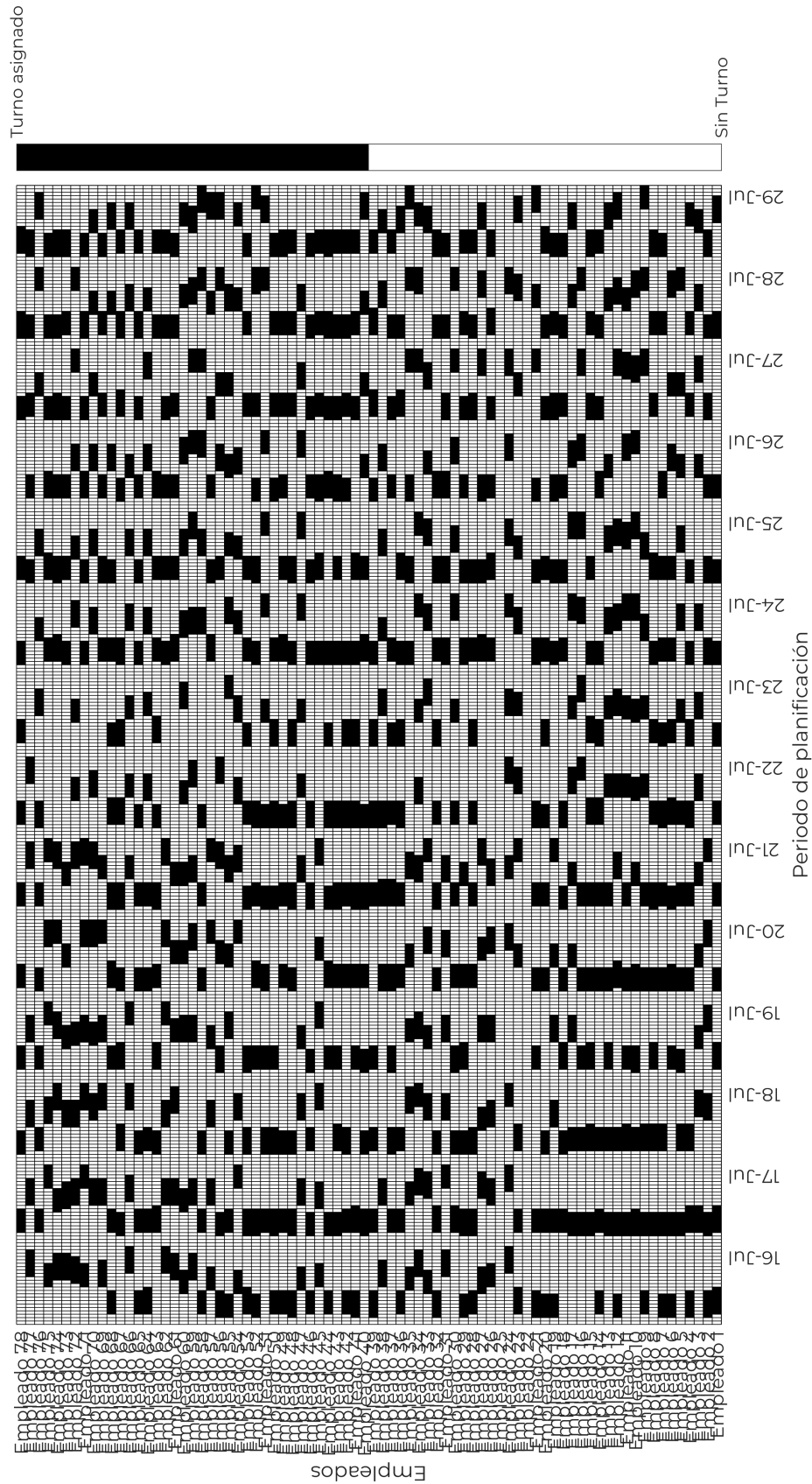
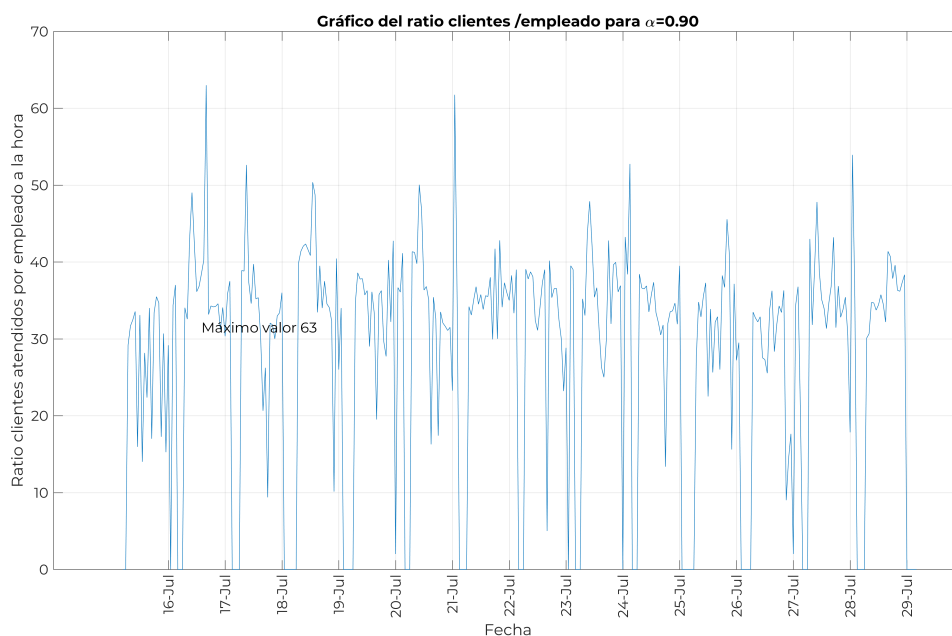


Figura 1.6: Asignación óptima de turnos maximizando el CVaR con $\alpha = 0,95$.

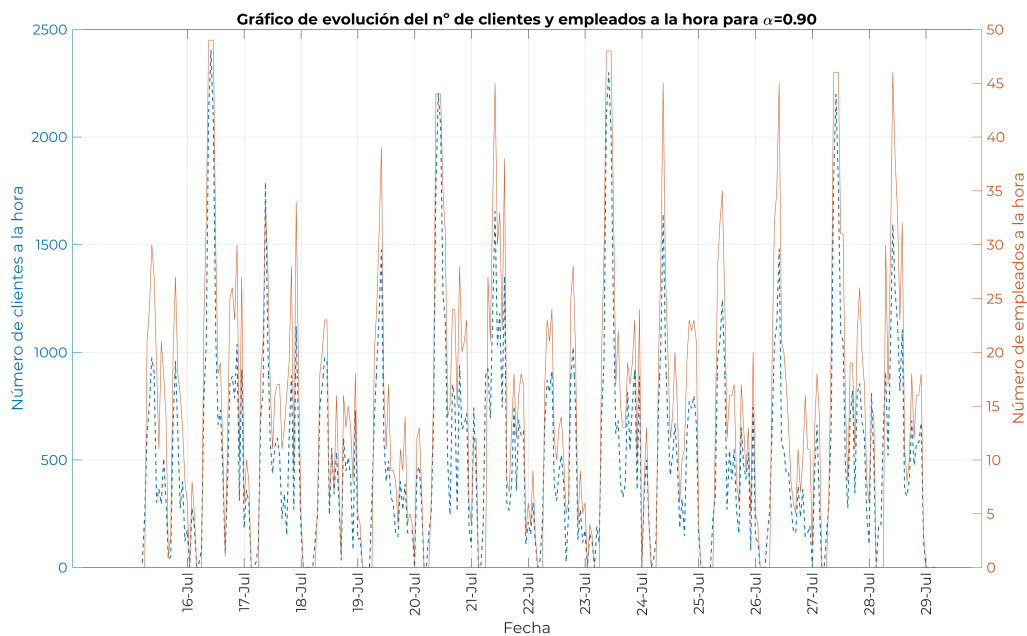
1.2.2. Maximización del CVaR con $\alpha = 0,90$

Si se considera el nivel de confianza $\alpha = 0,90$ para el ratio empleados/clientes, la asignación de turnos óptima queda de la siguiente manera:

1. En las Figuras 1.7(a) y 1.7(b) se muestra la evolución del ratio entre el número de clientes a atender por hora versus el número de empleados disponibles, así como la evolución de número de clientes y número de empleados por separado. Puede observarse como no se excede en ningún caso de 63 clientes por empleado y hora. Además en la gráfica de la Figura 1.7(b) se observa claramente cómo el número de empleados se adapta perfectamente a la demanda de clientes. Si comparamos estos resultados con los anteriores, se puede comprobar como se reduce la media de los peores ratios a costa de empeorar algunos de los ratios individuales. Este comportamiento es muy típico de los modelos de aversión al riesgo.
2. En este caso hay 2539 clientes a los que no se les puede atender en su idioma de procedencia, lo cual supone un 1.43 % con respecto al número total de clientes, ha aumentado ligeramente con respecto al caso anterior.
3. En la Figura 1.8 se muestran los turnos asignados por empleado. Nótese que en este caso se asignan 6633 horas de las 7488 horas potenciales disponibles que se podrían asignar teniendo en cuenta la disponibilidad teórica total de los empleados, con lo cual se reduce ligeramente con respecto al caso anterior.



(a) Evolución del ratio n° de clientes/n° de empleados.



(b) Evolución del número de clientes por hora versus número de empleados.

Figura 1.7: Asignación óptima de turnos maximizando el CVaR con $\alpha = 0,90$.

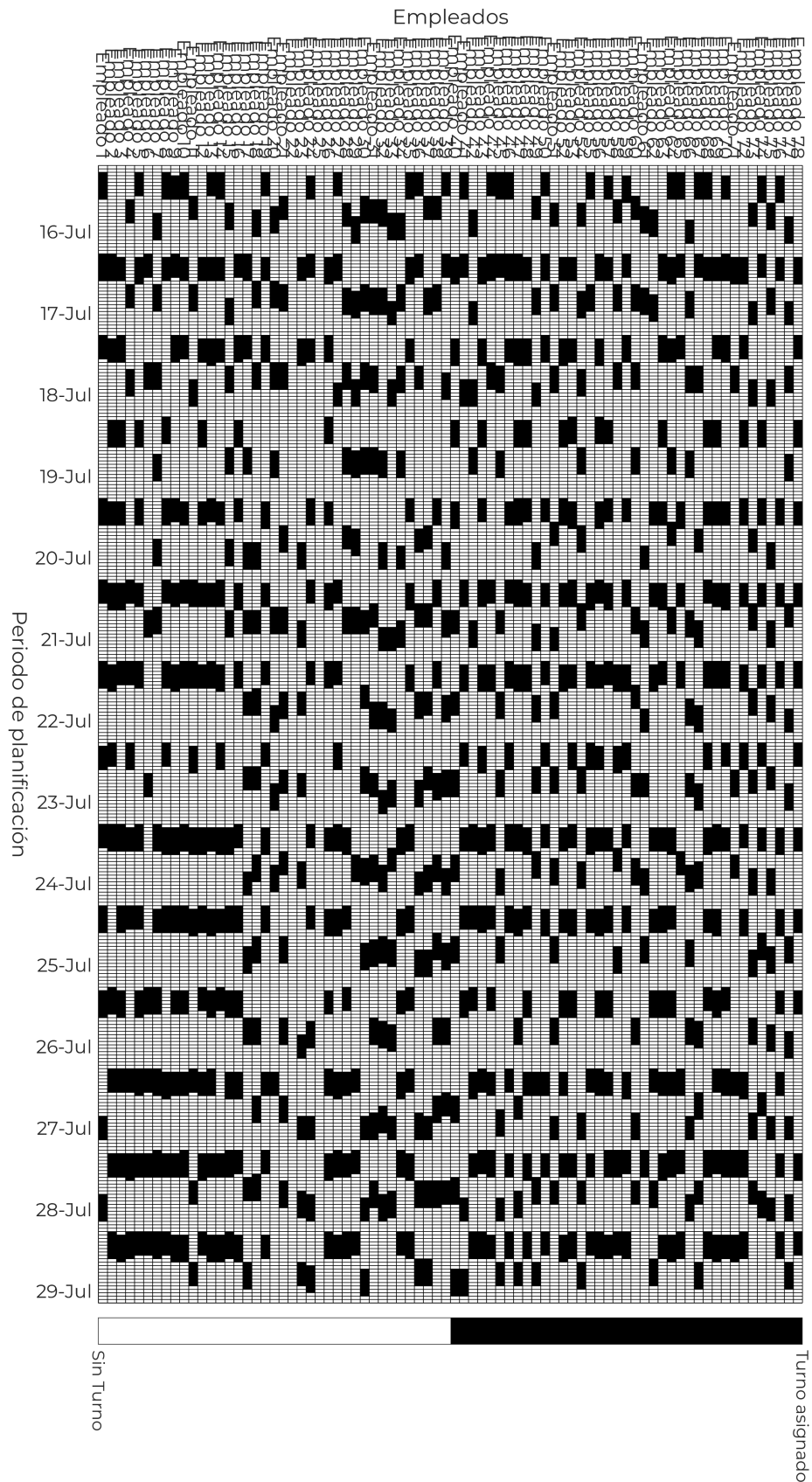


Figura 1.8: Asignación óptima de turnos maximizando el CVaR con $\alpha = 0,90$.

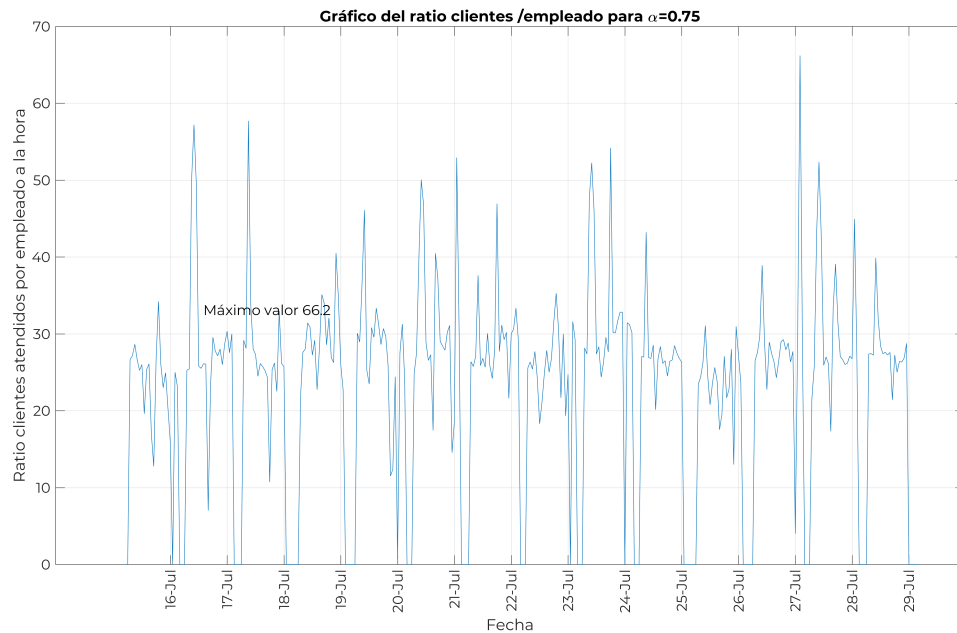
1.2.3. Maximización del CVaR con $\alpha = 0,75$

Si se considera el nivel de confianza aún más bajo de $\alpha = 0,75$ para el ratio empleados/clientes, la asignación de turnos óptima queda de la siguiente manera:

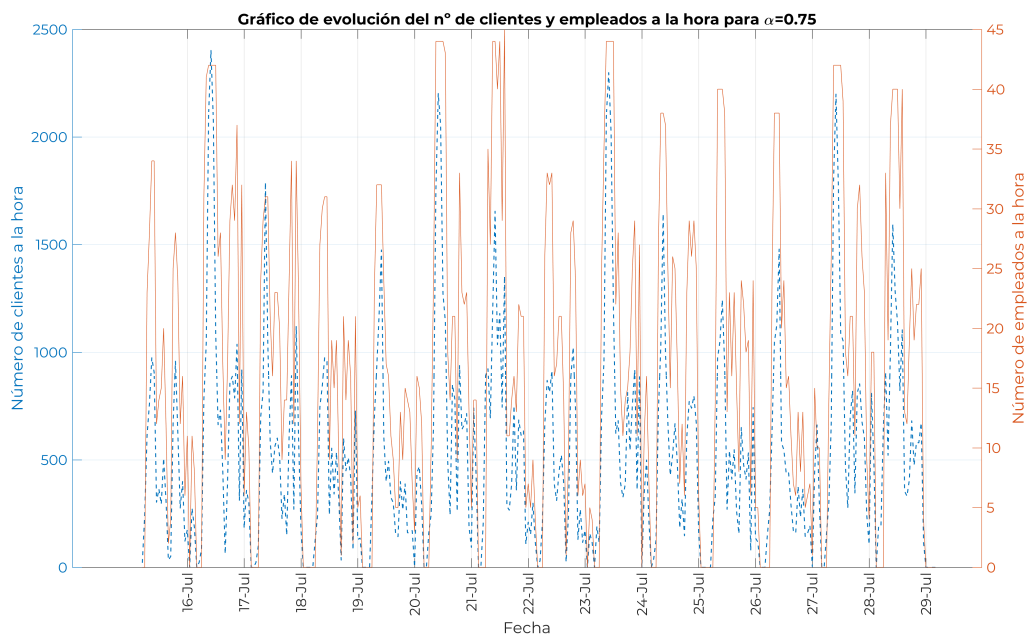
1. En las Figuras 1.9(a) y 1.9(b) se muestra la evolución del ratio entre el número de clientes a atender por hora versus el número de empleados disponibles, así como la evolución de número de clientes y número de empleados por separado. Puede observarse como no se excede en ningún caso de 66,2 clientes por empleado y hora. Además en la gráfica de la Figura 1.9(b) se observa que se pierde la sincronía entre la evolución de los clientes y empleados disponibles con respecto a los casos anteriores. Si comparamos estos resultados con los dos anteriores, se puede comprobar como se reduce la media de los peores ratios a costa de empeorar algunos de los ratios individuales. Este comportamiento es muy típico de los modelos de aversión al riesgo.
2. En este caso hay 2.428 clientes a los que no se les puede atender en su idioma de procedencia, lo cual supone un 1.37 % con respecto al número total de clientes, recuperando los valores obtenidos en el primer caso con $\alpha = 0,95$.
3. En la Figura 1.10 se muestran los turnos asignados por empleado. Nótese que en este caso se asignan 6845 horas de las 7488 horas potenciales disponibles que se podrían asignar teniendo en cuenta la disponibilidad teórica total de los empleados, con lo cual se aumenta con respecto al caso anterior.

1.3. Consideración de la incertidumbre

Otro aspecto relevante del modelo propuesto es que se pueden considerar distintos escenarios de evolución de la demanda de clientes a lo largo del tiempo para tener en cuenta su incertidumbre. Es muy complejo predecir cuál va a ser el número de llamadas en el futuro, y por ese motivo es conveniente tener en cuenta la falta de precisión y certeza en la estimación de demandas, que son claves para determinar los criterios de calidad mínimos exigidos. Para poder realizar este proceso es necesario disponer de información histórica lo más extensa posible en el tiempo para analizar los patrones de llamadas y su evolución en el tiempo.



(a) Evolución del ratio n° de clientes/n° de empleados.



(b) Evolución del número de clientes por hora versus número de empleados.

Figura 1.9: Asignación óptima de turnos maximizando el CVaR con $\alpha = 0,75$.

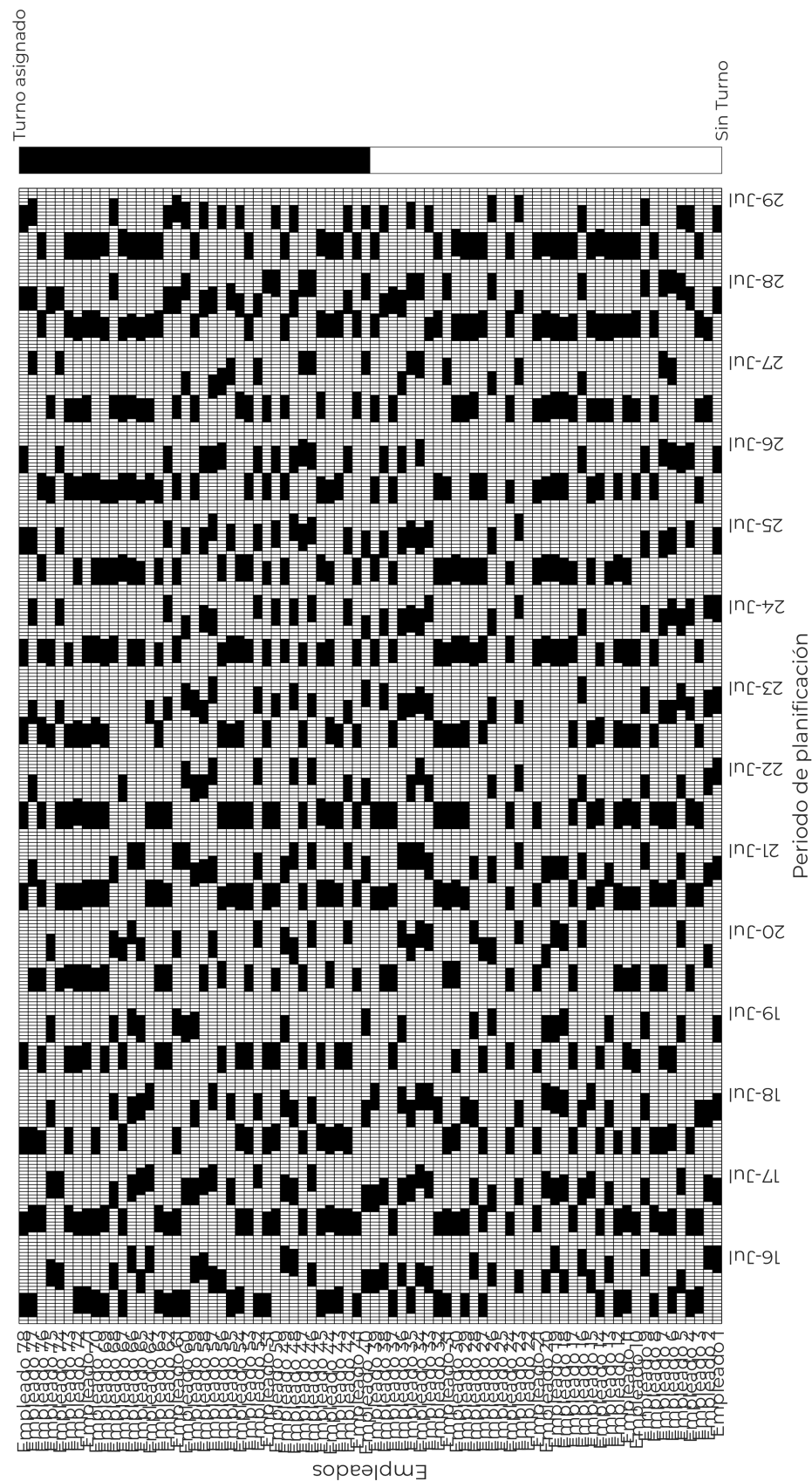


Figura 1.10: Asignación óptima de turnos maximizando el CVaR con $\alpha = 0,75$.

ESCISION

STOCHASTIC OPTIMIZATION

escission.com