



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA INDUSTRIAL

ESQUEMA DE ENFOQUE GRASP PARA EL PROBLEMA DE ASIGNACION Y
DESPACHO DE CAMIONES MEZCLADORES CON VENTANAS DE TIEMPO: UN CASO
DE USO EN SANTIAGO DE CHILE.

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER
EN GESTION DE OPERACIONES**

MAURICIO DAVID CERDA JER

PROFESOR GUIA:
CRISTIAN CORTES CARRILLO
PROFESOR CO GUIA:
PABLO REY

MIEMBROS DE LA COMISION
DENIS SAURÉ VALENZUELA
ZDENKO KOSCINA MONTECINOS

SANTIAGO DE CHILE
2018

Resumen

RESUMEN DE LA TESIS PARA OPTAR AL
GRADO DE: Magister en Gestión de
Operaciones
POR: Mauricio Cerda Jer
FECHA: 05/09/2018
PROFESOR GUÍA: Cristian Cortés Carrillo

Esquema de enfoque GRASP para el problema de asignación y despacho de camiones mezcladores con ventanas de tiempo: un caso de uso, en Santiago de Chile.

En la presente tesis, se presenta un esquema de solución para resolver un *problema de asignación y despacho de camiones mezcladores con ventanas de tiempo*. Se resuelve el problema a nivel táctico, por lo que la naturaleza del problema es estática. Los insumos, clientes, recursos, procesos y viajes poseen valores conocidos. El problema consiste en que, dados los requerimientos de los clientes, se les debe abastecer de hormigón, y para ello se debe decidir qué recursos se utilizaran en la producción y despacho de productos. El esquema de solución presenta dos procesos descritos a continuación:

- Considerando las solicitudes de los clientes, se conforman despachos de pedido, que incluyen una ventana de horario de entrega, sku , M^3 , obra y espaciamiento entre despachos.
- Resolver el problema de asignación de despacho a depósitos de producción y camiones, mediante un enfoque *greedy* y *GRASP*.

Respecto de los resultados numéricos, el algoritmo propuesto (ADH), obtiene resultados bastante favorables con respecto a la evidencia empírica de la operación actual de una empresa de producción y despacho de hormigón en Santiago de Chile. Se construyeron escenarios con información real, que presentaron los problemas a la que se somete la industria, a través de su demanda, costos y escasez de recursos. El esquema presenta mejoras en la calidad de servicio y disminución de costos.

Dedicatoria

Dedico esta tesis a...

...a mi madre, que siempre está para apoyarme

...a mis hermanos, que me alegran el día y me dan energías para seguir

...a mis abuelos, que siempre puedo contar con ellos

...a mi familia

...a mis compañeros y amigos, con los que inicié este proceso, juntos

...a mis profesores, que me guiaron en este período

...por sobre todo a Valentina, mi polola y compañera. Quien me acompañó en cada instante de este período, me animó cuando no tenía energías, me entregó su amor cada instante y creyó siempre en mí...

“el camino a la excelencia no tiene límite de velocidad”

Agradecimientos

Por formar mi carácter, entregarme valores y alentarme a superarme siempre. Por tantos años de trabajo, de esfuerzo y dedicación hacia tus hijos...

... Porque tú más grande título, es el de madre, Gracias...

A mi Madre, Ana Jer.

A mis abuelos, por el apoyo y el cariño. A Patricio, porque los lazos sanguíneos no son los que nos convierten en familia, sino el afecto. A mis hermanos, por ser mi motor e inspiración. A mi familia en general, porque siempre estuvieron ahí cuando los necesite.

A mis profesores, por enseñarme las herramientas técnicas que de ahora en adelante serán el soporte de mi vida laboral. En especial a Cristian y Pablo.

A mis compañeros: Pablo, Fernando y Jorge. Siempre en nuestros recuerdos estará esta etapa, compañeros, colegas y amigos.

A Valentina por tu paciencia, tu apoyo en las buenas y en las malas, por darme ánimos, por compartir mis enojos, por ñoñear juntos, por soñar juntos, pero por sobre todo, por el amor de todos estos años.

A los amigos que encontré en el camino y se convirtieron en una segunda familia.

Tabla de contenido

Resumen.....	I
Dedicatoria.....	II
Agradecimientos	III
Tabla de contenido	IV
Índice de tablas.....	VI
Índice de figuras.....	VII
1. Introducción	2
1.1 Motivación	3
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Estructura del trabajo	4
2. Estado del Arte.....	5
2.1. Problemas de ruteo de vehículos.....	5
2.2. RMCDP.....	6
3. Contexto de Aplicación.....	17
3.1 Descripción de la empresa de aplicación	17
3.2 Gestión de la demanda	18
3.2.1 <i>E-Commerce</i>	19
3.2.2 Coordinación de equipo de venta – despacho	19
3.2.3 Formato de compra y despacho.....	19
3.3 Torre de Control.....	20
3.3.1 Inbound	20
3.3.2 Programación Fina	21
3.3.3 Control de Flota y Servicio	22
3.4 Producción.....	23
3.4.1 Depósitos.....	23
3.4.2 Torre de producción	23
3.5 Transporte	24

3.6	Caracterización de la Oferta	25
3.7	Caracterización de la Demanda	27
4.	Análisis de Datos	28
4.1	Análisis descriptivo	28
4.1.1	Gestiones de la demanda	30
4.1.2	Gestión de la información	34
4.2	Modelación de programación entera del problema de asignación y despacho de Melón Hormigones	37
4.2.1	Modelos de programación entera para el análisis del impacto de los depósitos	37
4.2.2	Escenario con gestión del espaciamento horario	43
4.2.3	Modelos de programación para la medición de flota	45
5.	Modelación definitiva del problema de manera integral	49
5.1	Problema a resolver	49
5.2	Supuestos	49
5.3	Entradas, Salidas y transformaciones del modelo	50
5.3.1	Entradas	50
5.3.2	Objetivos, salidas y restricciones	52
5.4	Modelo de programación entera mixta	52
6.	Esquema Heurístico de Resolución	60
6.1	ADH	60
6.2	Pseudocódigo	65
7.	Resultados	68
7.1	Descripción de la instancia	68
7.2	Calibración del esquema	69
7.3	Diferencias respecto de los resultados de la operación real	72
7.4	Utilización de los recursos	75
7.4	Resumen de hallazgos	77
8.	Conclusión	78
8.2	Trabajos futuros	78
	BIBLIOGRAFIA	80

Índice de tablas

2.1: Parámetros de la función objetivo para meta heurística de Misir et al. (2011)	9
2.2: Parámetros del modelo CDP de ruteo propuesto por Kinable et al. (2014)	11
2.3: Variables del modelo CDP de ruteo propuesto por Kinable et al. (2014).....	12
2.4: Variables del modelo CDP de calendarización propuesto por Kinable et al. (2014)	13
3.1: Ubicación de sucursales y número de depósitos	26
4.1: Parámetros del modelo de secuenciamiento de despachos en un depósito	38
4.2: Variables del modelo de secuenciamiento de despachos en un depósito	38
4.3: Parámetros del modelo de secuenciamiento de despachos en varios depósitos	39
4.4: Variables del modelo de secuenciamiento de despachos en varios depósitos.....	40
4.5: Porcentaje de atrasos en instancia de medición de recursos, real y optimizada.....	42
4.6: Porcentaje de atrasos en sucursal 1 espaciada.	44
4.7: Parámetros del modelo de secuenciamiento de despachos en un depósito y asignación de flota	45
4.8: Variables del modelo de secuenciamiento de despachos en un depósito y asignación de flota.....	46
5.1: Parámetros del modelo de asignación y despacho	53
5.2: Variables del modelo de asignación y despacho	54
5.3: Cantidad de variables en formulación	57
5.4: Cantidad de restricciones en formulación	57
7.1: Descripción de la instancia de prueba	68

Índice de figuras

2.1: Esquema de una hiper heurística	10
2.2: Esquema de Simulación de Biruk et al. (2015)	16
3.1: Torre de Producción de depósitos de sucursal Lo Espejo	24
3.2: Caracterización de la oferta (Melón Hormigones, 2016)	26
3.3: Distribución de los despachos (Melón Hormigones, 2016)	27
4.1: Metodología de Árbol aplicado a Melón Hormigones	29
4.2: Proporción de pedidos atrasados según tramos horarios (2016)	30
4.3: Promedio de despachos solicitados según tipo de cliente en franja de 15 minutos (2016)	31
4.4: Promedio de despachos diarios según formato de compra (2016)	31
4.5: Promedio de despachos en m^3 diarios según formato de compra (2016)	32
4.6: Núm. de despachos solicitados en cada minuto, dentro de una hora, según despachos totales y primeros despachos de un tren (2016)	33
4.7: Frecuencia de minutos de espaciamiento para todos los despachos y el primer despacho de un tren (2016)	33
4.8: Procesos de despacho de hormigón	34
4.9: Tiempos de procesos en sucursales (2016)	36
4.10: Tasa de cancelaciones por día a día (2016)	37
4.11: Trabajos en proceso en instancia de medición de recursos	43
4.12: Trabajos en proceso en instancia 1 espaciada	44
4.13: Conteo de atrasos, según tamaño de flota, en sucursales con un depósito	47
4.14: Suma de minutos de atrasos estándar 15 minutos, según tamaño de flota.	48
5.1: Modelo conceptual de la problemática a resolver	51
5.2: Cantidad de variables y restricciones según el número de despachos	58
6.1: ADH	62
6.2: Formato de costeo de transporte	63
7.1: Distribución de carga de trabajo por sucursal y horas del día	69
7.2: Puntualidad y costo de operación según valorización de un minuto de atraso	70
7.3: Perfil de puntualidad según tramos horarios	71
7.4: Número de despachos asignados en ADH según el valor dado a un minuto de atraso.	71
7.5: Número de despachos asignados en la operación real y en ADH a sucursales	72
7.6: Distribución de largos de jornadas laborales reales y de ADH medido en horas	73

7.7: Curva de Lorenz de la distribución de carga laboral entre operadores de vehículos	74
7.8: Utilización de recursos en ADH.....	75
7.9: Horas de trabajo antes de hora de almuerzo en ADH	76

1. Introducción

Actualmente en Chile la industria de la construcción aporta el 6,5% del PIB, según el Banco Central (2018), convirtiéndose en una fuente no menor de recursos estatales. La industria de la construcción puede ser desagregada en industrias más pequeñas, pero de gran relevancia e impacto en el sector, y dentro de estas, encontramos a la industria del hormigón.

Existen numerosas empresas que proveen este servicio a nivel mundial. En particular, en Chile existe una alta competencia por entregar la mejor calidad de servicio, en una industria que ha mostrado una baja calidad en su servicio, si se mide por medio de su ítem de puntualidad. Se debe entender que cuando se hace referencia al hormigón, se esté hablando de un bien perecible, que debe ser producido *just in time* y que debe incurrir en altos costos operacionales en términos de coordinación logística, gestión administrativa, producción y a su vez se debe contar con una red de transporte acorde al tamaño de los vehículos con los cuales se transporta el hormigón. El problema surge en encontrar un punto de equilibrio entre calidad de servicio y costo; es decir, surge de la necesidad de utilizar óptimamente los recursos acorde al objetivo definido, ya que el sobredimensionamiento de los recursos podría encarecería altamente los costos, mientras que lo contrario podría resultar en la pérdida de clientes debido a entregas en plazos ineficientes para los clientes.

El problema del despacho de hormigón es similar al de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo, con la imposición adicional de que el producto es de tipo *just in time*, ya que el vehículo es parte del ciclo productivo, dado que es el que mezcla el producto. Adicional a la incorporación del camión mezclador en el proceso productivo, se debe cumplir con espaciamiento entre camiones mezcladores a una obra dado que se debe asentar bien una carga de hormigón antes de colocar la siguiente, pero tampoco debe existir un espaciamiento muy amplio de tiempo, dado que el producto puede secarse.

En adelante se denotará un tren de camiones a dos o más camiones que deban coordinarse para entregar el mismo producto, en la misma obra y que tengan un grado de espaciamiento requerido, debido a la idea de que cada camión mezclador es un vagón que depende del avance del camión mezclador anterior. Las decisiones más importantes en la operación son: desde donde despachar un pedido y que camión mezclador atenderá dicho pedido, lo que involucra la gestión de dos recursos escasos: los depósitos y los camiones mezcladores.

Es por toda la coordinación anterior que el problema ha sido complejo de resolver en la operación diaria y es importante generar una técnica que logre tomar decisiones óptimas en la asignación de pedidos a depósitos productivos, la calendarización de tareas en los depósitos y finalmente en la asignación a los camiones mezcladores que transportaran el pedido al cliente.

1.1 Motivación

El problema que se quiere resolver es de la familia de los de *ruteo de vehículos capacitados* (CVRP) con ventanas de tiempo, combinado con un *problema de calendarización de máquinas paralelas* (PMSP). El primer problema consiste en determinar rutas de despacho de producto, vinculando la cantidad de vehículos necesarios con la demanda desde diversos sitios de origen de carga hacia los clientes, buscando reducir los costos de transporte. Por otra parte, el segundo problema resuelve la elección de qué depósito realizará cada tarea, buscando el menor costo posible. Para el caso de estudio, se consideraran depósitos heterogéneos y vehículos homogéneos. El *problema de despacho de hormigón* (RMCDP, *Ready Mixed Concrete Dispatch Problem*) como se mencionó anteriormente es una combinación de CVRP y PMSP, ambos considerados NP-Duros (Yan & Lai, 2007; Schmid et al., 2010), por tanto se presenta gran complejidad computacional (Naso et al., 2007; Asbach et al., 2009; Schmid et al., 2010). El problema es complejo de resolver en forma exacta, incluso en instancias pequeñas.

En la industria existen diversas técnicas usadas para ejecutar este tipo de programaciones operacionales, comúnmente mediante ejecución de procesos de coordinación que funcionan de forma tanto proactiva como reactiva, involucrando una gran cantidad de tomadores de decisión. Existen complejas heurísticas computacionales basadas en conocimiento y experiencia de las diversas empresas para resolver el problema operacional, las que involucran adaptaciones locales a casos muy particulares, tanto de red, como de cultura empresarial. Dentro de las particularidades de estas técnicas, se prioriza ya sea el costo o la calidad de servicio, pero no ambas en conjunto. Lo anterior genera un espacio de desarrollo no resuelto y una gran oportunidad de aporte a una industria influyente en Chile.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo de esta tesis es generar un esquema de solución para resolver el Problema de Despacho de Hormigón (RMCDP) con ventanas de tiempo, considerando tanto los costos de operaciones y la calidad de servicio, el cual además debe ser implementado computacionalmente en un formato eficiente.

El problema en estudio contempla una flota de vehículos homogénea y un conjunto de plantas de producción no homogénea.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica sobre técnicas usadas o desarrolladas para la resolución del *problema de despacho de hormigón con ventanas de tiempo*.

- Estudiar, comprender y modelar la situación actual que debe enfrentar la empresa Melón Hormigones en la gestión de operaciones para el despacho y calendarización de pedidos de hormigón.
- Implementar computacionalmente un esquema de solución para el *problema de despacho de hormigón con ventanas de tiempo*, que permita considerar costos de operación y calidad de servicio con vehículos homogéneos, depósitos heterogéneos y espaciamiento entre vehículos de un tren.
- Resolver instancias reales para el Problema de Despacho de Hormigón con ventanas de tiempo que tiene Melón Hormigones y generar una comparación con la evidencia empírica de la metodología actual de los procesos.

1.3 Estructura del trabajo

En el Capítulo 2, se realiza una revisión de la literatura relacionada con el Problema de Despacho de Hormigón, en la cual se describe el estado del arte, abordando formulaciones variadas y métodos de resolución, lo que apoya el desarrollo del esquema presentado en esta investigación.

En el Capítulo 3 se describe el contexto del problema a resolver, describiendo la situación de la empresa, sus particularidades, los tópicos incómbentes al modelamiento y los procesos de gestión.

En el Capítulo 4 se analizan los datos a utilizar en esta investigación y se detallan modelos experimentales que fueron utilizados en el desarrollo.

En el Capítulo 5 se plantea el modelo a resolver y en el Capítulo 6 se presenta el esquema heurístico propuesto.

En el Capítulo 7 se describen las instancias utilizadas para probar el esquema heurístico y los resultados obtenidos.

En el Capítulo 8 se presentan las conclusiones obtenidas de esta investigación.

2. Estado del Arte

El *problema de despacho de hormigón (RMCDP) con ventanas de tiempo* se basa en el *problema de ruteo de vehículos (VRP, Dantzig et al., 1954)*, combinado con el *problema de secuenciamiento de máquinas paralelas (PMSP, Graham et al., 1979)*.

2.1. Problemas de ruteo de vehículos

El VRP consiste en que, dada una flota homogénea despachada de un depósito central, debe abastecer a un conjunto de clientes geográficamente distribuidos con demanda de algún bien a ser entregado por los vehículos, al menor costo de operación posible. El VRP considera una capacidad acotada de flota y que cada vehículo debe comenzar y terminar en el depósito central. Como resultado entrega rutas definidas para cada vehículo, tal que se cubren las demandas de todos los clientes.

El VRP tiene varios supuestos, algunos de ellos son superados en la literatura más próxima y acercan este problema al caso práctico de RMCDP. Los supuestos son los siguientes (Ebensperger et al., 2009):

- I. Los tiempos de viaje son constantes y conocidos.
- II. Los vehículos atienden desde una sola bodega.
- III. Los clientes solo son atendidos por un único vehículo.
- IV. No se consideran ventanas de tiempo.

Respecto del primer supuesto, este se mantiene para el RMCD, por lo que no se profundiza en el problema estocástico. El segundo supuesto no aplica en este caso, ya que el hormigón al ser un bien perecedero, al poco tiempo de ser producido y al considerar los tiempos de desplazamiento dentro de cualquier ciudad, requiere de más de un punto de origen de carga, por lo cual finalmente se establecen radios perimetrales que son dados por el máximo tiempo de trayecto factible desde algún punto dado. Esto último refleja la necesidad de tomar la decisión desde donde efectuar la carga de producto, convirtiendo este problema en una generalización del PMSP. Existe una línea de investigación que relaciona ambos problemas y presenta un caso particular del RMCDP, enfocada en el Problema de Ruteo de Vehículos con Depósitos Múltiples (MDVRP, Gillet y Johnson, 1976). El tercer supuesto es corregido en el Problema de Ruteo de Vehículos con Despacho Particionado (Split Delivery Vehicle Routing Problem, SDVRP), mientras que el cuarto supuesto es trabajado en el Problema de Ruteo de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRPTW, Solomon, 1987).

2.2. RMCDP

El Problema de Despacho de Hormigón es una generalización del VRP y del PMSP. El hormigón es una de las materias primas más importantes en las construcciones actuales, según datos entregados por Biruk (2015); entre el 60% y 70% de ellas son de este material, y es usado desde fundaciones hasta techos y muy comúnmente utilizado en obras de infraestructura y edificios. La fabricación del hormigón se realiza en un ambiente controlado, en sitios llamados *depósitos*. El hormigón es un bien perecible, que debe ser producido *Just in time* para satisfacer las solicitudes de demanda de los clientes.

El hormigón comienza su proceso en un depósito de producción, donde se conectan silos de almacenamiento de cemento, agua, áridos y otros aditivos que conformaran cada producto. Estos depósitos funcionan como una boca de carga, bajo la cual se posiciona un vehículo mezclador, dependiendo del nivel de preparación con el que se entregue el hormigón. El hormigón una vez en el vehículo mezclador, tiene un tiempo de entrega máxima (Asbach et al., 2009). El hormigón si pasa un rango máximo de tiempo en el camión mezclador corre el riesgo de solidificarse, en cuyo caso se debe incurrir en elevados gastos para retirar el hormigón del camión mezclador, o incluso es necesario romper el barril del camión, que es el lugar donde se almacena el hormigón en el camión. Una vez en la obra de construcción, el hormigón es vaciado del camión mezclador con cuadrillas de obreros, bomba de descarga u otra forma particular, dependiendo el tipo de construcción.

Muchas veces, no es posible entregar la cantidad de hormigón solicitada en un solo despacho y es ahí donde surge el concepto de tren de camiones mezcladores. Un tren es un conjunto de camiones coordinados para entregar un producto en una obra, de forma que pase un tiempo controlado entre uno y otro, tal que el hormigón no se fragüe, impidiendo la unión correcta con el hormigón del siguiente camión mezclador del tren. Es importante aclarar que un camión mezclador no puede entregar a más de un cliente sin volver a un depósito a rellenar su carga, y esto viene dado por la imposibilidad de dividir carga dentro de un mezclador. Todo lo anteriormente descrito limita el número de clientes que es factible atender, aumenta la competencia entre depósitos de empresas competidoras y aumenta la necesidad de coordinación en depósitos de una misma empresa.

Problemas asociados a la industria del despacho de hormigón han sido estudiados en la literatura de operaciones desde hace más de 50 años (Balinski & Quandt, 1964) y en particular el problema enfrentado en esta investigación es una variante del de Kinable et al. (2014).

Tommelein y Li (1999) abordan la problemática de modelar un sistema de producción *just in time*. Para ello desarrollan dos modelos desde dos perspectivas distintas; el primero considera que el transporte es realizado por el productor del concreto, mientras que en el segundo es el cliente quien se encarga del transporte. Feng y Wu (2000) resuelven el problema de despacho de hormigón con métodos heurísticos y plantean un modelo para un solo depósito. En este modelo se busca minimizar los tiempos ociosos. Durbin (2003) implementa un sistema de gestión, en el que considera vehículos homogéneos.

Otro caso aplicado se puede apreciar en Feng et al. (2004), quienes resuelven la problemática de despacho considerando solo un depósito, aplicado en Hong Kong. Estos autores consideraron y definieron dos categorías de solicitudes por parte de los clientes:

- Por adelantado: Se consideró que una solicitud es por adelantado si y solo si fue realizada a lo menos con un día de anticipación al día de la operación planificada.
- En el momento: Se consideró en esta categoría a todos aquellos requerimientos realizados durante el día de la ejecución del programa. Estas solicitudes afectan las programaciones diarias del depósito, y por lo mismo, es posible rechazarlas o aceptarlas. Esta última decisión debe ser tomada rápidamente.

Feng et al. (2004) implementó un software computacional de uso fácil, en el cual se utilizan algoritmos genéticos que tenían como objetivo minimizar el tiempo en cola, para el secuenciamiento de vehículos mezcladores en la programación, y simulación para la operación de solicitudes en el momento. Algunas de las conclusiones empíricas fueron las siguientes: debido a la expiración pronta del concreto, muchas veces se limita el número de clientes potenciales, lo que conlleva un limitado de número de clientes potenciales posibles de atender, aumentando así la competencia. Dado lo anterior, los depósitos deben esforzarse por disminuir los costos, pero sin perder de vista el foco en la calidad de servicio para permanecer vigentes en el competitivo mercado del hormigón. Otro hecho notado por Feng et al. es que la demanda no sigue una distribución uniforme durante el día, y posee horas punta entre las 7:00 y las 9:00, y luego entre las 13:00 y las 15:00.

Matsinis (2004) aborda el problema de despacho de concreto con depósitos múltiples y ventanas de tiempo definidas por los clientes. Se presenta un modelo que utiliza vehículos mezcladores y bombas surtidoras para apoyo en la descarga. Las bombas surtidoras se envían de forma tal que la llegada a la obra de construcción debe ser en paralelo a los vehículos mezcladores. A este esquema se denota *problema de ruteo multivehículo con ventanas de tiempo* y su función objetivo apunta a minimizar un híbrido entre los costos operacionales y la calidad de servicio. En este caso en particular, el autor evidencia que tampoco existe una distribución uniforme de la demanda durante el día, estableciéndose horarios punta entre las 9:30 y las 11:30, y luego entre las 14:30 y las 17:00.

Naso et al. (2007) resuelve el problema global, separándolo en dos problemas de optimización: asignación de órdenes a depósitos y asignación de vehículos mezcladores. Se plantea un modelo no lineal que busca minimizar el costo de distribución, incluyendo costos de carga transporte, descarga, contratación *spot* y horas extras. El problema se resuelve dividiendo a un cliente según el número de entregas requeridas, y de esta forma trabajar con despachos individuales y no trenes. Se propone una metaheurística para su resolución, utilizando algoritmos genéticos para la asignación de órdenes a depósitos y una heurística de construcción para la asignación de vehículos mezcladores. Esta investigación fue probada en un caso real, en Holanda, y programada en MATLAB.

Feng et al. (2006) aborda el problema RMCDP con multidepósito y flota homogénea. Las decisiones que se busca tomar son desde donde abastecer a un cliente y que vehículo

mezclador debe hacerlo. Se plantea un modelo multiobjetivo con camiones alquilados. Esta formulación involucra una gran cantidad de variables binarias y con ello un tiempo de cálculo muy alto. Otra formulación para un solo depósito con flota homogénea que integra producción y ruteo se encuentra en Yan et al. (2008).

En el estudio de Asbach et al. (2009) se desarrolla un modelo de optimización para resolver el problema en su totalidad, que como se muestra resulta ser NP-duro. Asbach considera algunos de los supuestos definidos anteriormente:

- El hormigón es perecedero: cada vez que un camión mezclador atiende a un cliente debe volver a cargarse a un depósito
- Existe espaciado mínimo y máximo entre camiones mezcladores de un tren.
- Los vehículos y depósitos son heterogéneos.
- Existen ventanas de tiempo dadas por el cliente y por el largo de un periodo de planificación.
- El modelo es estático.
- El modelo permite no atender clientes: se penaliza en la función objetivo, junto a los costos de operación.

El modelo cumple con muchos de los supuestos requeridos, pero solo fue resuelto a optimalidad en instancias pequeñas, mediante CPLEX. Finalmente para instancias de tamaño real utiliza una heurística, que en instancias pequeñas consigue un 4% de gap. La heurística consiste, en una primera etapa, en encontrar una solución básica factible; luego mediante la definición de vecindad, busca mejoras; si encuentra mejoras, actualiza la solución base, de otra forma, permanece con la solución anterior. La búsqueda consiste en fijar algunas variables y permutar otras. Al proceso de permutación se le denomina subproblema. El subproblema consiste en cambiar las asignaciones de depósitos y vehículos de pedidos.

Schmid et al. (2009) proponen tres modelos de flujo multi producto, y todos son resueltos con algoritmos de búsqueda de vecindario variable. Los problemas resueltos son de flota homogénea y buscan penalizar la no cobertura de un cliente. Schmidt et al. (2010) reformulan el modelo anterior y lo resuelven con un algoritmo que combina búsqueda de vecindario variable y un modelo de programación mixta, además de extenderse la búsqueda a un vecindario mayor.

Misir et al. (2011) resuelven el problema de RMCDP para flota heterogénea de vehículos mezcladores, en las que se evitan grandes intervalos de tiempo entre entregas. Los autores proponen una hiper heurística, que implica un mecanismo adaptativo de aceptación de heurísticas de bajo nivel. Misir et al. realizan un análisis de rendimiento de su heurística, comparándola con otras de la literatura, aplicadas a un caso real.

Los parámetros y función a resolver, propuestas por los autores, son descritos a continuación:

Parámetro	Definición
T	Conjunto de trenes
D	Conjunto de despachos
D_t	Conjunto de despachos de tren t
V	Conjunto de camiones
c_t	Demanda solicitada en tren t
c_{td}	Capacidad de camión que despacha d para tren t
w_t	Desperdicio de tren t
l_t	Retraso de primer despacho de tren t
$Tlag_d$	Tiempo entre despachos
$psok_{td}$	Toma el valor 1 si despacho d es servido desde depósitos preferente para tren t. 0 si no.
t_v	Tiempo total de viaje de camión v
a_i	Peso de la restricción i

Tabla 2.1: Parámetros de la función objetivo para meta heurística de Misir et al. (2011)

Se minimiza la siguiente función:

$$F_{objetivo} = \sum_{t \in T} \left(a_1 l_t + a_2 w_t + a_3 \sum_{d \in D_t} (a_3 psok_{td} + a_4 tlag_d) \right) + a_5 \sum_{v \in V} t_v$$

Una híper heurística consiste en dos mecanismos principales: la selección de una heurística de bajo nivel y la aceptación posterior de un movimiento. Utilizando una heurística seleccionada en el primer paso, se construye una solución parcial y a continuación se examina la calidad de la solución entregada basándose en métricas predefinidas que configuran el segundo mecanismo, el de aceptación. Si cumple con los requisitos de aceptación, se construye la nueva solución, si no, se mantiene la actual. El método es de la siguiente forma:

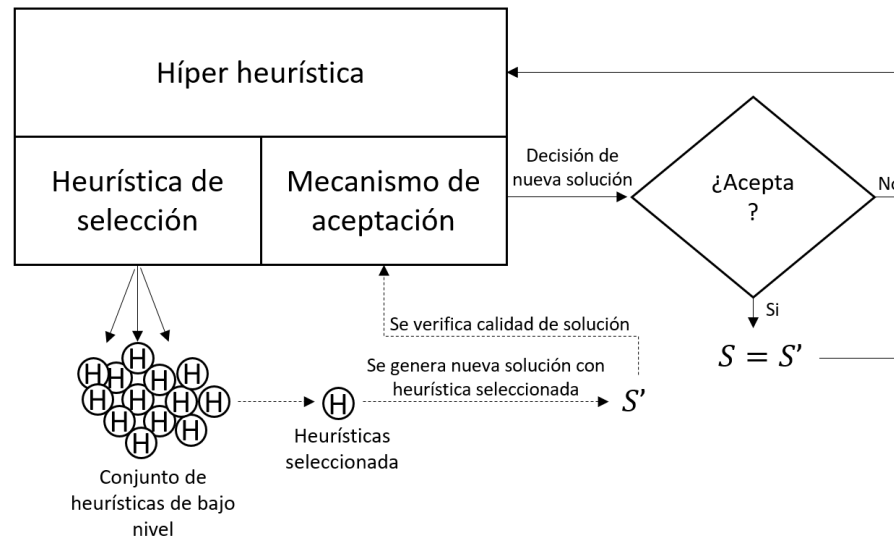


Figura 2.1: Esquema de una hiperheurística

Para el caso de la hiperheurística de Misir et al. se selecciona aleatoriamente la heurística a utilizar y usando un método de aceptación llamado AILLA-F, el que consiste en aceptar una solución siempre y cuando no supere un umbral determinado y constante respecto de la mejor solución actual. Se guarda una lista de tamaño predefinido con las mejores soluciones y sobre ellas se verifica la calidad de solución. Otro criterio es el límite de iteraciones. Se compara el método AILLA-F contra otros de la literatura: *Simulated Annealing*, *Great Deluge*, *Late Acceptance* e *Improving or Equal*. La solución inicial se construye ordenando los despachos según su tiempo de inicio de carga ideal y seleccionando los vehículos al azar.

Respecto de las heurísticas de bajo nivel, se consideran las siguientes:

- H_1 : cambiar la estación de retorno de un vehículo al azar.
- H_2 : cambiar el vehículo de una entrega al azar.
- H_3 : eliminar todas las entregas de un tren y armarlas de nuevo.
- H_4 : cambiar la posición de un despacho a otra posición de la secuencia.
- H_5 : mover un despacho entre entregas de un tren al azar.
- H_6 : cambiar la cantidad a entregar en un despacho al azar.
- H_7 : cambiar el depósito de un despacho al azar.
- H_8 : intercambiar vehículos entre dos despachos de un tren seleccionado al azar.

- H_9 : intercambiar vehículos entre dos despachos seleccionadas al azar.

Hertz (2011) propone un modelo que prioriza el ruteo y las restricciones de los vehículos, aunque no considera ventanas de tiempo entregadas por clientes. El problema considera flota homogénea de vehículos, varios depósitos y separa los trenes en despachos individuales. El problema global es separado en dos MIP; asignación y ruteo. Ambos MIPs son resueltos mediante heurísticas. La secuencia de solución consiste en asignar despachos a los vehículos mezcladores y luego se asignan rutas para resolver las secuencias.

Park et al. (2011) presentan un ejemplo de aplicación en Singapur, donde desarrollan un software que mediante simulaciones dinámicas, resuelve el problema de manera integrada. En esta investigación se considera la posibilidad de enviar suministros auxiliares a obra.

Yan et al. (2012) proponen una variante estocástica del problema, donde el tiempo de viaje es la variable aleatoria. La situación se modela como un problema de flujo en redes con variables enteras. Finalmente se resuelve mediante simulaciones.

Kinable et al. (2014) construyen dos modelos de programación lineal secuenciales, uno de ruteo (CDP ruteo) y otro de calendarización (CDP calendarización). Considera en sus supuestos un depósito central desde el cual parten y terminan su jornada todos los vehículos, establece ventanas horarias de entrega a los clientes, definen un mínimo y un máximo espaciamiento en un tren, indica que solo es posible atender a un cliente dentro de una ventana horaria, pero que podría no ser atendido. Finalmente, su función objetivo apunta a maximizar la demanda satisfecha. El modelo CDP ruteo es una variante del CVRP con ventanas de tiempo y despacho fraccionado, y el PMSP con ventanas de tiempo y máximo tiempo de atraso. El modelo establece la posibilidad de que un cliente sea abastecido por más de un vehículo, pero no es posible que un vehículo realice más de una entrega a un cliente. El problema se inicia con un vehículo saliendo desde el depósito central de la compañía distribuidora, viajando a sus depósitos y finalmente al cliente. Es importante aclarar que Kinable considera a un cliente cubierto solo si éste recibió la totalidad de camiones mezcladores necesarios para cubrir toda se demanda. La gran crítica a esta formulación es que no integra la posibilidad de atraso. El problema de CDP de ruteo es descrito a continuación.

Los parámetros utilizados en su formulación son los siguientes:

Parámetro	Definición
D	Conjunto de sitios de construcción.
N	$\{0\} \cup \{n + 1\} \cup D$, donde 0 y $n + 1$ representan los nodos de depósitos, de comienzo y fin del día.
V	Conjunto de vehículos.
Q^k	Toneladas máximas de concreto enviadas en vehículo v .

q_i	Toneladas de concreto solicitadas por cliente i .
a_i	Tiempo de inicio de ventana de cliente i .
b_i	Tiempo de fin de ventana de cliente i .
p_v	Tiempo de descarga de camión k .
t_{ij}	Tiempo necesario desde fin de atención de cliente i hasta llegada a cliente j .

Tabla 2.2: Parámetros del modelo CDP de ruteo propuesto por Kinable et al. (2014)

Las variables utilizadas en su formulación son las siguientes:

Variable	Tipo	Definición
x_{ijv}	Binario	Toma el valor 1 si el vehículo v realiza un viaje de i a j ; 0, en otro caso.
C_v^i	Entero	Tiempo en que cliente i es despachado por camión mezclador v .
y_i	Binario	Toma el valor 1 si cliente i es atendido; 0, en otro caso.

Tabla 2.3: Variables del modelo CDP de ruteo propuesto por Kinable et al. (2014)

La formulación del CDP de ruteo es la siguiente:

$$\max \sum_{i \in D} q_i y_i \quad (2.1)$$

s. a.

$$\sum_{v \in V} \sum_{j \in \delta^+(i)} Q^k x_{ijv} \geq q_i y_i \quad \forall i \in D \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in \delta^+(0)} x_{0jv} = \sum_{j \in \delta^-(n+1)} x_{i,n+1,v} = 1 \quad \forall v \in V \quad (2.3)$$

$$\sum_{j \in \delta^+(i)} x_{ijv} = \sum_{j \in \delta^-(i)} x_{jiv} \quad \forall i, j \in N, v \in V \quad (2.4)$$

$$C_v^i + t_{ij} - M(1 - x_{ijv}) \leq C_v^j - p_v \quad \forall i \in N, v \in V \quad (2.5)$$

$$a_i + p_v \leq C_v^i \leq b_i \quad \forall i \in N, v \in V \quad (2.6)$$

$$x_{ijv} \in \{0,1\}, C_v^i \in \mathbb{Z}, y_i \in \{0,1\} \quad (2.7)$$

La restricción (2.2) indica que la suma de las capacidades de vehículos mezcladores enviados a algún cliente debe ser superior a la demanda solicitada por el cliente. La restricción (2.3) establece que todo vehículo mezclador debe salir del depósito inicial y debe volver al depósito final. La restricción (2.4) establece que si se realiza un despacho, se debe hacer otro despacho o se debe ir al depósito final. La restricción (2.5) indica que la hora de llegada a una construcción por parte de un vehículo mezclador debe ser mayor a la hora de llegada de su despacho anterior más el tiempo de ruta y descarga que los separa. La restricción (2.6) establece que la hora de llegada a una construcción está dentro de una ventana horaria. La función objetivo (2.1) considera la maximización de clientes cubiertos en su totalidad.

Una vez definida la carga sobre el vehículo por parte del CDP de ruteo, el CDP de calendarización realiza la adjudicación de carga a depósitos. El CDP de calendarización corresponde a un modelo de secuenciamiento.

El modelo CDP plantea el secuenciamiento de vehículos en la entrega de un despacho. Es necesario definir vehículos artificiales al inicio y fin de un despacho para obtener el secuenciamiento, por lo que para modelar el CDP de calendarización se introduce el conjunto $V_0 = V \cup \{v_0\}$, donde v_0 es un vehículo mezclador dummy. Adicionalmente se establece γ como máximo tiempo entre despachos de un tren.

Las variables utilizadas en su formulación son las siguientes:

Variable	Tipo	Definición
z_{wv}^i	Binario	Toma el valor 1 si el vehículo v realiza un viaje a cliente i antes que vehículo w ; 0, en otro caso.
C_v^i	Entero	Tiempo en que cliente i es despachado por vehículo v .
y_i	Binario	Toma el valor 1 si cliente i es atendido; 0, en otro caso.

Tabla 2.4: Variables del modelo CDP de calendarización propuesto por Kinable et al. (2014)

La formulación del CDP de calendarización es la siguiente:

$$\max \sum_{i \in D} q_i y_i \quad (2.8)$$

s. a.

$$\sum_{v \in V} \sum_{w \in V} q_v z_{vw}^i \geq q_i y_i \quad \forall i \in D \quad (2.9)$$

$$\sum_{w \in V_0} z_{v_0 w}^i = 1 \quad \forall i \in N \quad (2.10)$$

$$\sum_{w \in V} z_{vw}^i = \sum_{w \in V} z_{wv}^i \quad \forall v, w \in V, v \neq w, i \in N \quad (2.11)$$

$$C_v^i - M(1 - z_{vw}^i) \leq C_w^i - p_w \quad \forall v, w \in V, v \neq w, i \in N \quad (2.12)$$

$$C_w^i - p_w - M(1 - z_{vw}^i) \leq C_v^i + \gamma \quad \forall v, w \in V, v \neq w, i \in N \quad (2.13)$$

$$a_i + p_v \leq C_v^i \leq b_i \quad \forall i \in N, v \in V \quad (2.14)$$

$$z_{vw}^i \in \{0,1\}, \quad C_v^i \in \mathbb{Z}^+, \quad y_i \in \{0,1\} \quad (2.15)$$

La restricción (2.9) es idéntica a la (2.2). La restricción (2.10) establece que todo cliente tiene asignado un vehículo dummy, para asegurar secuenciamiento. La restricción (2.11) establece que el número de veces que un vehículo atiende a un cliente, debe ser el número de veces que se retira desde esa construcción. La restricción (2.11) también indica que posterior a la atención de un vehículo, existirá otro que atenderá a ese cliente, obligando a cerrar la atención un vehículo dummy. La restricción (2.13) establece que la hora en que vehículo empieza a atender a un cliente debe ser mayor a la hora en que terminó de atenderlo el vehículo anterior. La restricción (2.14) establece que existe un máximo espaciamiento entre que termina de trabajar un vehículo y empieza otro de su tren de descarga. La restricción (2.15) indica que un vehículo debe llegar a destino antes de una ventana inferior y debe retirarse antes de una ventana superior. La función objetivo (2.8), considera la maximización de clientes cubiertos.

Finalmente, para la resolución del problema utiliza cuatro métodos: MIP, *Constrain Programming* (IBM's CP Optimizer), una heurística de construcción hacia adelante y otra híbrida que considera la elección heurística de variables fijas y optimiza mediante un MIP las variables no prefijadas. La heurística de construcción es la que entrega mejores tiempos de resolución, mientras que la resolución mediante *Constraint Programming* es la que entrega mejor calidad de solución.

Maghrebi et al. (2014) presentan un modelo de flota homogénea de vehículos para un problema con un solo depósito. En esta investigación se menciona que existen dos tipos fundamentales de modelos en la literatura: un depósito y múltiples depósitos. Esta investigación se enfoca en resolver la formulación del RMCDP con un solo depósito,

reduciendo el número de variables y restricciones con respecto a Asbach et al. (2009), logrando una resolución más rápida. Se considera una descomposición de un depósito en sub depósitos, que simbolizan capacidad de cargar un despacho, según su capacidad y a su vez descomponen a un cliente en sub clientes, que representan los despachos que solicitan.

El modelo de Maghrebi et al. considera nodos de inicio, desde los cuales viajan los camiones mezcladores hacia los depósitos, luego desde los depósitos a un cliente y de vuelta al depósito, finalizando su jornada laboral volviendo a un nodo final. Se introduce una notación para diversos problemas de la literatura:

- RDP homogéneo - estático: considera que la flota es homogénea y no hay límite al tiempo de servicio.
- RDP heterogéneo - estático: considera que no hay límite en el tiempo de servicio, pero los vehículos mezcladores poseen diferente capacidad y costo por ruta.
- RDP dinámico: considera que existe un tiempo de servicio total para el despacho y máximo tiempo de transporte.

El artículo se centra en el RDP homogéneo (Ready Mix Dispatch), donde establece que dado que no hay límite en el tiempo de servicio, en el óptimo todo sale del depósito más barato y el valor a minimizar es el costo de viajes. Con lo anterior logra simplificar la problemática y reducir el número de variables para resolverlo como un MIP.

Maghrebi et al. (2015) plantea que en el despacho del concreto existe una falta de soluciones reales y aplicables, y dada la ausencia de sistemas informáticos, es interesante contrastar las soluciones con expertos. El principal problema que identifica es que si bien es posible formular matemáticamente la situación, solo es posible resolver instancias de pequeñas. Se presentan dos heurísticas para instancias de mayor tamaño, dado justamente que no se puede aspirar a soluciones exactas con sentido de aplicación real. Las soluciones obtenidas son comparadas con las obtenidas por expertos, para así evaluar que gap se entrega en términos de calidad de servicio. La principal conclusión resultante es que los modelos de optimización minimizan de gran manera los costos, pero no consideran la estabilidad que el experto logra mediante la toma de decisiones en tiempo real, analizando caso a caso. Es importante destacar que las heurísticas lograron GAP cercanos al 90%.

Biruk (2015) muestra un modelo de simulación para asignaciones de despacho, las cuales evalúa y finalmente decide que camión mezclador escoger. Mediante programación en "GPSS World Discret Simulation", se crearon tres módulos: declaración de entrada, motor de simulación y recopilación de datos.

El módulo de declaración de entrada define los parámetros a utilizar en la instancia, como lo son el número de obras de destino y demanda (en camiones mezcladores), horas de inicios de trenes, flota disponible, depósitos paralelos, parámetros de carga, descarga y

viajes tanto de ida como de vuelta. Los valores de los tiempos de viaje, carga y descarga son entregados para generar valores aleatorios distribuidos triangulares.

El segundo módulo simula las operaciones de los camiones y depósitos, tomando las decisiones de destinos de camiones mezcladores y su carga, de la siguiente forma:

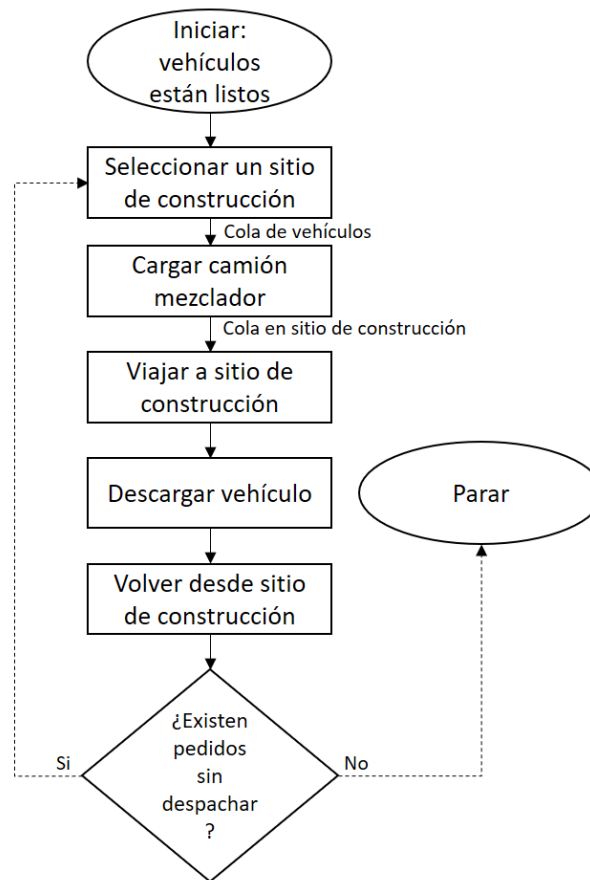


Figura 2.2: Esquema de Simulación de Biruk et al. (2015)

En las simulaciones, un camión es cargado y dirigido a la obra donde hace menos fila. El tercer módulo es encargado de entregar los resultados de las simulaciones.

En la literatura, el problema ha sido abordado desde distintas perspectivas: determinística o estocástica, de forma agregada o en dos problemas, con programación matemática o heurísticas. Se pueden encontrar formulaciones no resueltas o no aplicadas a casos reales, y en los casos aplicados el problema no ha sido resuelto a optimalidad y son las heurísticas quienes se hacen cargo de instancias reales. Es por todo lo anterior que se aplicarán heurísticas en esta investigación, dado el gran tamaño de las instancias a tratar.

3. Contexto de Aplicación

En este capítulo se describe el contexto del problema a desarrollar para la calendarización y despacho de hormigón para una empresa en Santiago de Chile: Melón Hormigones. Esta es una empresa del rubro cementero, encargada de producir, transportar y entregar mezclas de hormigón a sus diversos clientes. Melón es una empresa ícono en su rubro y la segunda mayor distribuidora en Chile.

3.1 Descripción de la empresa de aplicación

Melón Hormigones posee una separación zonal para su administración. En la zona de la Región Metropolitana existen diversas sucursales, las cuales son entes administrativos y físicos con capacidad autónoma de gestión a nivel productivo y de transporte, y es dentro de ellas donde se localizan los depósitos. Las sucursales reciben como entrada la información de la cantidad de carga laboral asignada desde un área de administración central, llamada Torre de Control, la cual está localizada en la principal sucursal de la Región. Por su parte las demás zonas poseen administración autónoma por sucursal, incluso en su asignación de carga laboral.

En particular, en este proyecto se trabajó con Melón Hormigones Región Metropolitana de Chile.

El producto ofrecido en el Problema de Despacho y Calendarización de Concreto no es solo el concreto, sino más bien, su entrega en la hora correcta, lugar correcto y con las especificaciones técnicas correctas. El concreto se vende en formato de M^3 , con una ventana de horario de entrega y un espaciamiento necesario entre las llegadas de vehículos mezcladores. Todo lo anterior involucra un seguimiento y un control logístico que permita asegurar con la mayor probabilidad que el producto cumpla con todas las especificaciones.

El productor requiere coordinación y trato exclusivo por despacho, ya que los productos son tan variados como el cliente solicite. En Melón Hormigones se utiliza como nombre de un producto su código, de modo de generar una estructura ordenada y común a todos los trabajadores, dado que su código contiene la información del conjunto de especificaciones técnicas propias del pedido. El código de un producto es una combinación alfanumérica, donde los dos primeros términos son letras y representan el tipo de producto base a entregar, los siguientes tres términos son números y representan la resistencia del hormigón en $\frac{Kg}{cm^3}$, los posteriores dos números indican el nivel de confianza que se tiene de que el producto al llegar a la obra cumpla con las especificaciones. En específico a mayor valor, mayor rigidez, y a menor valor, mayor fluidez. Finalmente se vierte en un cono el concreto, para luego ser retirado. Al retirarse el cono el concreto presenta un decaimiento de su altura que es medido en milímetros representa los últimos dos números del código.

Por ejemplo, el código *HB4009010* es un producto que corresponde a un hormigón bombeable (HB), de $400 \frac{Kg}{cm^3}$, con un 90% de rigidez y un decaimiento de cono de 10 milímetros.

3.2 Gestión de la demanda

Los clientes de Melón Hormigones son clasificados por la empresa en dos categorías: Clientes P y cliente noP.

Un cliente P es aquel que en un plazo de un año calendario solicita una cantidad de pedido inferior a $5000 M^3$ mientras que un cliente noP es aquel que sí cumple con esa cantidad mínima. La sigla P indica que es un cliente de vivienda particular. El proceso de atención, compra y venta depende del tipo de cliente.

Un cliente noP es atendido telefónicamente por un ejecutivo de ventas específico y único, quien es asignado a su zona, mientras que un cliente P es asignado a algún ejecutivo disponible, quien no necesariamente seguirá gestionando sus compras futuras.

El cliente cotiza con su ejecutivo los productos que le interesan y este último le entrega un valor de acuerdo a los costos del producto y los costos promedio de viaje. El cliente, si está conforme, procede a realizar su compra y es en este punto donde se bifurcan nuevamente las formas de gestión con el cliente:

- Un cliente P deberá comprar los productos y realizar el pago por ellos.
- Un cliente noP tendrá la opción de realizar la adquisición de los productos con compromiso de pago futuro.

Es importante clarificar que si bien un cliente es asociado a un RUT y no a una obra, la asignación de una compra sí es propia de una obra y cada compra tiene una única dirección. Una vez generada la venta, el cliente deberá coordinar con la Torre de Control los horarios de entrega de sus despachos. El cliente envía semanalmente una programación vía correo electrónico a la Torre de Control para agendar horarios de entrega de sus productos. La programación es aprobada salvo incapacidad de producción. A estas solicitudes se les llama *adelantadas*.

La mayoría de los pedidos se hacen con anticipación. Sin embargo, existen demandas que ocurren durante el día de la ejecución de la programación y a estas les llamaremos, solicitudes *instantáneas*. En este trabajo se considerará sólo las solicitudes coordinadas por adelantado.

La programación es enviada un día predefinido de la semana anterior, de forma tal de completar la planificación de la semana próxima con antelación. Una vez aprobada, la programación es ingresada al sistema de gestión de producción.

3.2.1 E-Commerce

Existe una segunda forma para que un cliente solicite un producto; la tienda virtual. En este caso, el cliente ingresa su pedido de forma manual, el cual es almacenado en una nube virtual de información, eliminando la intermediación del ejecutivo de ventas.

En la tienda virtual no existe diferenciación de tipo de clientes y en esta modalidad de compra el cliente ingresa su pedido y solicita en el mismo portal su horario de entrega de producto. A diferencia de la compra vía ejecutivo, en esta modalidad no se entrega una hora específica de recepción, sino más bien una ventana horaria.

Para integrar la información de *e-commerce* al sistema de gestión de producción, se descarga desde la plataforma web de la tienda virtual una planilla y se digita en el sistema de gestión de la producción de forma manual, para de esta manera, poder consolidar la información. Posterior al registro, el despacho solicitado por *e-commerce* es realizado de forma equivalente al resto de despachos ingresados.

3.2.2 Coordinación de equipo de venta – despacho

Como se mencionó anteriormente, los clientes P no poseen crédito de productos, por lo que deben pagar anticipadamente a la recepción, lo que involucra una coordinación correcta entre el equipo de ventas y la torre de control. El cliente al enviar una solicitud de programación de horarios de despacho a la torre de control, ésta es ingresada para que el equipo de ventas verifique que el cliente posea el saldo necesario de productos comprados. Es posible notar que en el modo de compra virtual esta comprobación puede generarse sin mayor esfuerzo computacional de forma automática y por tanto elimina el sesgo de los clientes que no cumplen con los créditos necesarios para gestionar su planificación.

Se ha adoptado una política de priorización de los clientes de tienda virtual para ser ingresados a la programación, proceso que está asociado a un esfuerzo corporativo por orientar las ventas a la utilización de la tienda virtual, permitiendo destinar a los ejecutivos a otras funciones.

3.2.3 Formato de compra y despacho

Cada vez que un cliente solicita un producto mediante un ejecutivo de ventas o la tienda virtual, se emite una orden de compra. Una orden de compra se asocia a un cliente, una obra y uno o más productos con sus respectivos volúmenes.

Los vehículos mezcladores son los encargados de transportar el producto hacia los clientes. Los vehículos poseen una capacidad máxima de carga. En el caso de este trabajo, se considera una flota homogénea con vehículos de capacidad $8m^3$. Los vehículos

mezcladores son capaces de llevar solo un tipo de producto a la vez y no pueden rutear sus entregas. Es decir un vehículo mezclador sale de la sucursal hacia una obra y debe volver necesariamente a una sucursal para atender a un nuevo cliente.

Una orden de compra posee más de una entrega en muchas ocasiones y cada unidad de entrega es un despacho, asociado a una guía de despacho. El conjunto de vehículos que completan una orden de compra es un tren. Las guías de despacho también pueden estar asociadas a un ingreso de caja y no necesariamente a una orden de compra. Un ingreso de caja es una compra de M^3 por parte de un cliente.

3.3 Torre de Control

La Torre de Control se compone de tres áreas y se preocupa de las coordinaciones no comerciales de cara al cliente. Estas áreas son:

- Inbound
- Programación fina
- Control de flota y servicio

3.3.1 Inbound

El área de Inbound es la encargada de comunicarse con el cliente la semana previa para agendar los horarios en que se realizarán los despachos y responder consultas, anulaciones, reducciones de carga y número de despachos.

Los llamados de los clientes comúnmente son para consultar por el instante en que llegará el vehículo mezclador, esta información que se tiene en tiempo real mediante dispositivos GPS.

Una vez a la semana, el personal de inbound es el encargado de recibir las programaciones de los despachos solicitados por los clientes y a su vez de consolidar la información de E-Commerce. En muchas ocasiones, estos empleados son también los encargados de informar al cliente respecto de la imposibilidad de cumplir con una programación. Inbound es también quien recibe las solicitudes instantáneas de los clientes y deben decidir si aceptan o no la solicitud; es por ello que es el área que está conectada a todos los indicadores de tiempo real que posee la torre.

Las solicitudes de programación por contacto, es decir las que no involucran el sistema E-Commerce, pueden llegar mediante dos formatos: llamadas telefónicas y vía *email*. En esta área, los digitadores son a su vez ejecutivos de *call center*, por lo que están capacitados

para realizar cualquier tipo de ingreso. La programación es ingresada posteriormente en el sistema de gestión de producción, como se mencionó anteriormente.

Inbound puede rechazar una solicitud bajo tres causales: la primera es que un cliente P esté solicitando una cantidad de producto superior a lo que previamente cotizó y pagó; la segunda es que un cliente noP esté solicitando una cantidad de producto a crédito que excede el monto máximo autorizado; la tercera causal es por incapacidad productiva o de despacho. Para las dos primeras, luego de revisada la programación enviada por el cliente, inbound envía una solicitud de revisión de saldo al área de ventas para que se autorice o no la programación.

3.3.2 Programación Fina

El área de Programación Fina es la encargada de programar las operaciones del día siguiente.

Esta área es la encargada de llamar al cliente el día previo al despacho para confirmar la programación solicitada a Inbound la semana anterior. Estas confirmaciones incluyen el horario, el espaciamiento, la cantidad de m^3 y el largo de tren. Esta operación de confirmación de pedidos permite reducir la incertidumbre de las cancelaciones diarias. La empresa, mediante esta gestión, identifica el 75% de las cancelaciones diarias con antelación.

Si bien con el método del llamado del día previo se anticipan las cancelaciones, existe otro porcentaje que fue confirmado y que la evidencia empírica indica que será cancelado igualmente. Por tratarse de una industria que involucra altos costos en transporte, no es recomendable tener sobredimensionada la flota. Luego, los operadores logísticos deciden realizar la planificación de los recursos del siguiente día, considerando una tasa de cancelación extra. Dicha tasa no utiliza una fórmula definida, sino más bien responde al juicio de los operadores, que dentro de otras cosas, consideran quienes son los grandes clientes del día siguiente, el clima, día de la semana, proximidad de días festivos, ubicación de las obras y otros.

Una vez dimensionada la carga laboral, se procede a definir desde donde saldrá cada despacho programado. A través de la experticia de los planificadores logísticos se define la distribución de la carga laboral por sucursal. Si bien esto se define el día previo a la ejecución de la programación, durante el mismo día también se realiza gestión en este aspecto, moviendo cargas de despachos de una sucursal a otra por mal dimensionamiento de la capacidad de producción o por cancelaciones. La distribución de las cargas se realiza para equilibrar la carga entre depósitos en cada sucursal, considerando las capacidades de producción.

Programación Fina tiene la potestad de cerrar una sucursal por un día ante una baja demanda y así ahorrar una gran cantidad de costos involucrados a la apertura diaria de una

sucursal. En términos generales, la demanda de una sucursal cerrada se redistribuye a las sucursales de gran tamaño más próximas.

Mediante el dimensionamiento de las labores que realiza cada sucursal, se deciden las jornadas laborales de camiones mezcladores por sucursal.

Otra de las labores de Programación Fina es la gestión de pedidos “complejos”, tales que la modificación en el día de la ejecución impacta potencialmente el desempeño de la operación de manera considerable, implicando costos altos. Otro caso crítico es reagendar a clientes que no es posible atender en el horario solicitado debido a falta de capacidad de producción o envío; esto puede ser tanto por alto nivel de demanda de despachos o por una solicitud en un horario poco común. Adicionalmente, existen productos especiales llamados VAP, que necesitan aditivos especiales y pueden involucrar un pre-montaje de las condiciones necesarias de producción en el depósito o en el vehículo mezclador, o algún lavado especial de depósito o vehículo una vez entregado el producto.

Para apoyar la planificación operacional, se asignan colores en la interfaz del sistema de gestión, que establecen la importancia de cada uno de los clientes y así se reduce la complejidad de la toma de decisiones al momento de priorizar despachos a entregar. También se verifican las bases de datos para encontrar duplicaciones de pedidos ingresados erróneamente.

Como última tarea se realizan diversos reportes. Los más importantes son:

- **Carga media:** consiste en un informe acerca de la carga promedio por viaje, el cuál es un KPI del uso de flota.
- **Informe 11 y 13 hrs.:** consiste en un informe acerca de los m^3 despachados por los clientes más importantes, m^3 despachados totales y m^3 pendientes, en estos dos cortes temporales.
- **Overbook Tarde:** consiste en gráficos de cargas de m^3 realizadas por hora. Se consideran 3 series: máxima carga, carga ideal y carga programada.

3.3.3 Control de Flota y Servicio

El área de Control de Flota y Servicio es la encargada de gestionar la contingencia. El área se dedica a la gestión de operadores y clientes en la operación.

Una de las tareas es el control de los recursos productivos durante el día de la entrega de los despachos. Esta área es la encargada de la coordinación de depósitos y flota. Uno de los problemas es la ausencia de vehículos en los depósitos, tanto por déficit en la programación como por ausencias no programadas. La principal atribución para resolver el problema de capacidad de flota o depósitos es reasignar carga a otros depósitos donde sí se disponga de flota y de holgura para producción.

Durante el traslado del vehículo mezclador a la obra se debe establecer comunicación directa con el operador, ya sea apoyar el ruteo hacia destino o consultar el porqué de su demora en llegar a la obra donde espera el cliente su despacho. Para ello la comunicación es vía sistema GPS, para saber la posición exacta o por radio manteniendo comunicación directa con el operador del vehículo.

Una de las principales contingencias son los atrasos en la entrega de los despachos. Para ello se debe gestionar qué hacer con los despachos atrasados. En el caso que el atraso se deba a la incapacidad de la empresa, se debe presentar las excusas al cliente y consultar si es factible atrasar entregas.

Otra gestión realizada por Control de Flota y Servicio, es el control de las acumulaciones de vehículos en obras. Se debe validar que la frecuencia de envío de vehículos sea acorde a la frecuencia de descarga de vehículos en obra. En caso de espera excesiva de un vehículo en obra, se negocia con el cliente el retiro, debido al elevado costo quitar el concreto seco de un vehículo. En caso de retirar el vehículo, se le solicita la firma de la documentación correspondiente para que el asuma el costo de botar el concreto.

3.4 Producción

La producción del hormigón es realizada en los depósitos y coordinada en las torres de producción.

3.4.1 Depósitos

Los depósitos consisten en silos en los cuales se almacenan los insumos: cemento, áridos, agua y aditivos especiales. El vehículo debe posicionarse en una cavidad bajo el depósito para que se viertan los insumos necesarios para la fabricación del hormigón. La cantidad vertida sobre el vehículo es controlada por la torre de producción.

3.4.2 Torre de producción

La Torre de Producción es un área y un edificio que se encarga de la asignación de carga a los vehículos y la creación del concreto, incluyendo la gestión de sus materias primas. Existe una Torre de Producción por sucursal.

Para la creación del concreto se debe adquirir cemento, agua, áridos y otros aditivos. El cemento es abastecido por un proveedor único; los áridos son adquiridos por proveedores cercanos a las sucursales y los aditivos también provienen de un proveedor único. El cemento y los áridos se gestionan de forma tal que los silos estén siempre llenos.

La Torre de Control es quien comunica al vehículo mezclador en que depósito será cargado para realizar un despacho, escogiendo al vehículo según orden FIFO.

Otra tarea que se realiza es la producción del concreto, la que es efectuada computacionalmente. Las mezclas son introducidas mediante fórmulas de porcentajes y m^3 .



Figura 3.1: Torre de Producción de depósitos de sucursal Lo Espejo

3.5 Transporte

Los costos de producción se separan en dos fundamentales: 70% materias primas y 30% en transporte.

En Melón Hormigones el 95% de la flota es subcontratada y eso involucra un costo fijo por uso de vehículos mezcladores. Adicional al costo fijo de contratación, los vehículos mezcladores poseen un costo variable según distancias en cada trayecto realizado. El costo es según un radio de tiempos de trayectos preestablecidos, a los que se llaman anillos. Las clasificaciones de anillos son las siguientes:

- Anillo 1: tiempos de viaje entre 0 y 15 minutos. Poseen un costo fijo.
- Anillo 2: tiempos de viaje entre 15 y 30 minutos. Poseen un costo fijo.
- Anillo 3: tiempos de viaje entre 30 y 45 minutos. Poseen un costo fijo.

- Anillo 4: tiempos de viaje mayores a 45 minutos. Poseen un costo fijo igual al de anillo 3 más variable, que se calcula en función de cada kilómetro adicional a los 45 minutos de trayecto.

Existen compromisos contractuales con los transportistas, que son los dueños de los vehículos. Los transportistas mensualmente deben recibir un mínimo de carga de m^3 distribuido. Al momento de traspasar los costos de transporte al cliente, es posible notar que a menor cantidad de m^3 , el costo de transporte es mayor por m^3 .

El transportista debe asegurar la disponibilidad de la flota contratada en todo instante. Los contratos son de renovación mensual, plazo en que se dimensiona la flota siguiente, aunque la evidencia empírica indica que no hay mayor variabilidad. Al momento de contratar un vehículo, éste se hace propio de una sucursal, pero es posible que al volver de un despacho se envíe a otra sucursal, aunque debe comenzar y acabar su jornada en su sucursal de pertenencia.

Los encargados de la operación de la flota son los Operadores. Los operadores de vehículos mezcladores son contratados por los transportistas, quienes interactúan y entregan el concreto a los clientes. Los operadores reciben incentivos económicos según la cantidad de despachos que realicen.

3.6 Caracterización de la Oferta

Como se ha explicitado a lo largo del capítulo, los recursos escasos son los depósitos, repartidos en sucursales, y los vehículos mezcladores. En particular en Melón Hormigones existen 11 depósitos o plantas, repartidas en 6 sucursales y más de 200 vehículos mezcladores¹.

En la Región Metropolitana hay 6 sucursales, desde las cuales es posible abastecer a los clientes de la ciudad. Estas sucursales están distribuidas espacialmente dentro de la región, con énfasis en la ciudad de Santiago, que es el núcleo comercial de la actividad de la empresa. La distribución se presenta en el mapa de la figura 3.2:

¹ Toda los datos presentados en este capítulo son a fecha 31 de diciembre de 2016

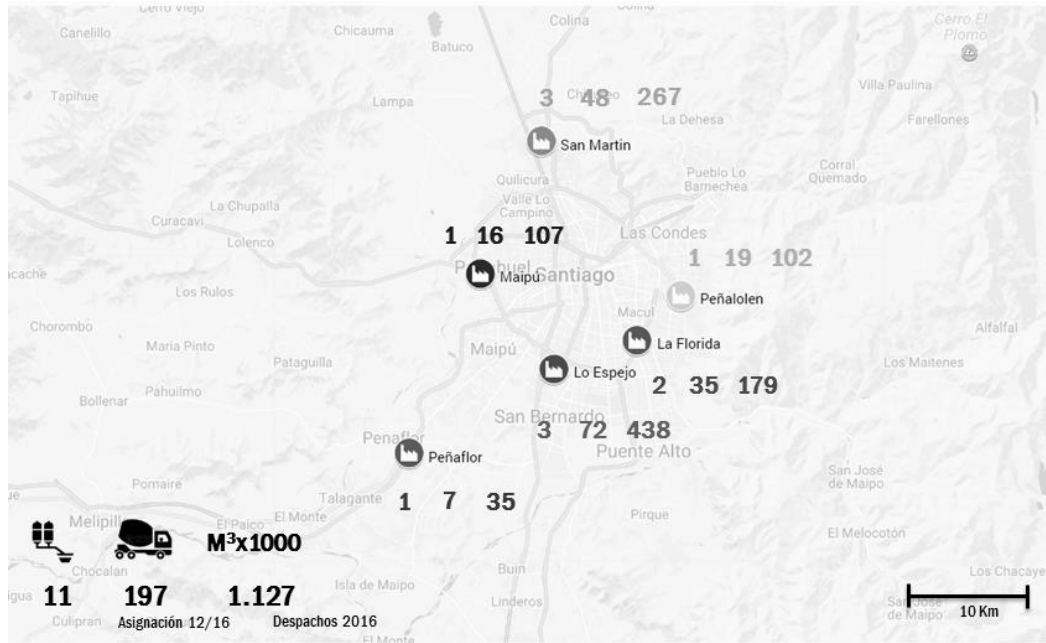


Figura 3.2: Caracterización de la oferta (Melón Hormigones, 2016)

Las sucursales se ubican en las comunas descritas en la tabla 3.1.

Sucursal	Comuna	Número de depósitos
Peñaflo	Peñaflo	1
Maipú	Pudahuel	1
San Martín	Colina	3
Lo Espejo	San Bernardo	3
La Florida	La Florida	2
Peñalolen	Peñalolen	1

Tabla 3.1: Ubicación de sucursales y número de depósitos

Las sucursales poseen distinto número de depósitos en cada una, mientras que en Peñaflo, Maipú y Peñalolen existe 1 depósito, en La Florida hay 2 y finalmente San Martín y Lo Espejo poseen 3 depósitos. Todos los datos anteriores según la dotación 2016.

Cada sucursal tuvo distinta cantidad de vehículos asignados para satisfacer su demanda y de M^3 de carga durante el año 2016, tal como se presenta en la figura 3.2.

3.7 Caracterización de la Demanda

Para entender la magnitud del problema es importante establecer cuál es la dimensión histórica de número de despachos, m^3 despachados y distribución espacial de los clientes

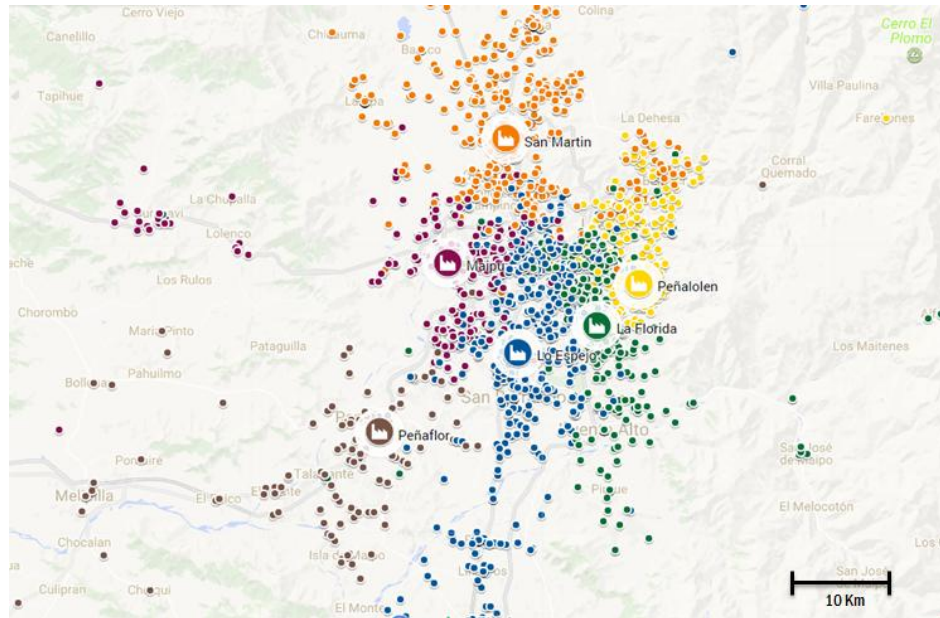


Figura 3.3: Distribución de los despachos (Melón Hormigones, 2016)

En la figura 3.3 se presenta la distribución espacial de los clientes de la Región Metropolitana durante el año 2016. Los colores indican desde que sucursal fueron atendidos los clientes.

Las sucursales con mayor número de depósitos son aquellas que a su vez abarcaron la mayor cantidad de clientes. La asignación de clientes durante el año 2016 fue realizada según su cercanía espacial y capacidad de los depósitos.

Se puede observar que existe gran coordinación entre áreas y ello no solo plantea el ámbito sobre el cual se desarrolla la investigación, sino más bien configura la motivación de la resolución de la problemática. Dado que a mayor orgánica en la toma de decisiones, mayor es el esfuerzo de coordinación que debe existir, suma gran importancia desarrollar una técnica de toma de decisiones centralizada, con información completa y que apunte en la dirección de reducir costos, mejorar calidad de servicio en función de puntualidad y liberar a los recursos tomadores de decisiones que participan activamente en las determinaciones de producción y despacho, para ser utilizados en otras funciones.

4. Análisis de Datos

En este capítulo se realiza una descripción de los datos de producción y despachos, durante el año 2016 de Melón Hormigones. Entender las magnitudes de la información que se utiliza permite describir el contexto de aplicación de forma numérica y a su vez entrega un enfoque en los tópicos que generen mayor valor. Posterior a la presentación de datos, se muestran las propuestas de mejoras que impacten la generación de valor de la empresa y que pueden involucrar esfuerzos de diversa magnitud.

4.1 Análisis descriptivo

El objetivo de la empresa es generar valor al producto entregado al cliente, a través de eficiencia y eficacia; es decir, se busca utilizar la menor cantidad de recursos y entregar al cliente la mayor calidad posible, tal que se cumpla lo solicitado y en las condiciones establecidas por el cliente. El objetivo anterior se responde aumentando la puntualidad y la eficiencia en el uso de recursos, de forma de minimizar los costos.

La demanda si no es gestionada tiende a concentrarse en ciertos horarios, generando dificultades para cumplir puntualmente con los clientes. Algunas formas de corregir el problema es orientar a los clientes a que realicen solicitudes homogéneamente repartidas en el día, o incluso dentro de una hora, para que la demanda no se concentre en horas cerradas en este último caso. Una tercera forma es orientar a los clientes a horarios de menor demanda.

Por otra parte, se puede planificar de mejor forma el uso de los recursos, dimensionando el tamaño correcto de la flota de servicio, fiscalizando la operación y generando un correcto cruce entre los recursos existentes y las solicitudes de los clientes.

Para generar una asignación correcta de recursos es necesario analizar la componente temporal de las asignaciones, ya que estas pueden ser decisiones estáticas o dinámicas, es decir, con información fija o con información variable. Esta investigación se centra justamente en las asignaciones de recursos a nivel estático.

Las asignaciones estáticas de recursos involucran la asignación de despachos a vehículos y depósitos, incluyendo el orden en que se deben ejecutar los despachos. Las asignaciones dinámicas responden a iguales solicitudes de toma de decisión que las estáticas, solo que son tomadas en la operación, involucrando decisiones instantáneas como respuesta a lo estocástico del día a día.

En la figura 4.1 se presenta el diagrama de la metodología utilizada y la cadena de sucesiones lógicas utilizadas para acotar el problema global en un conjunto de problemas validables, mejorables y medibles.

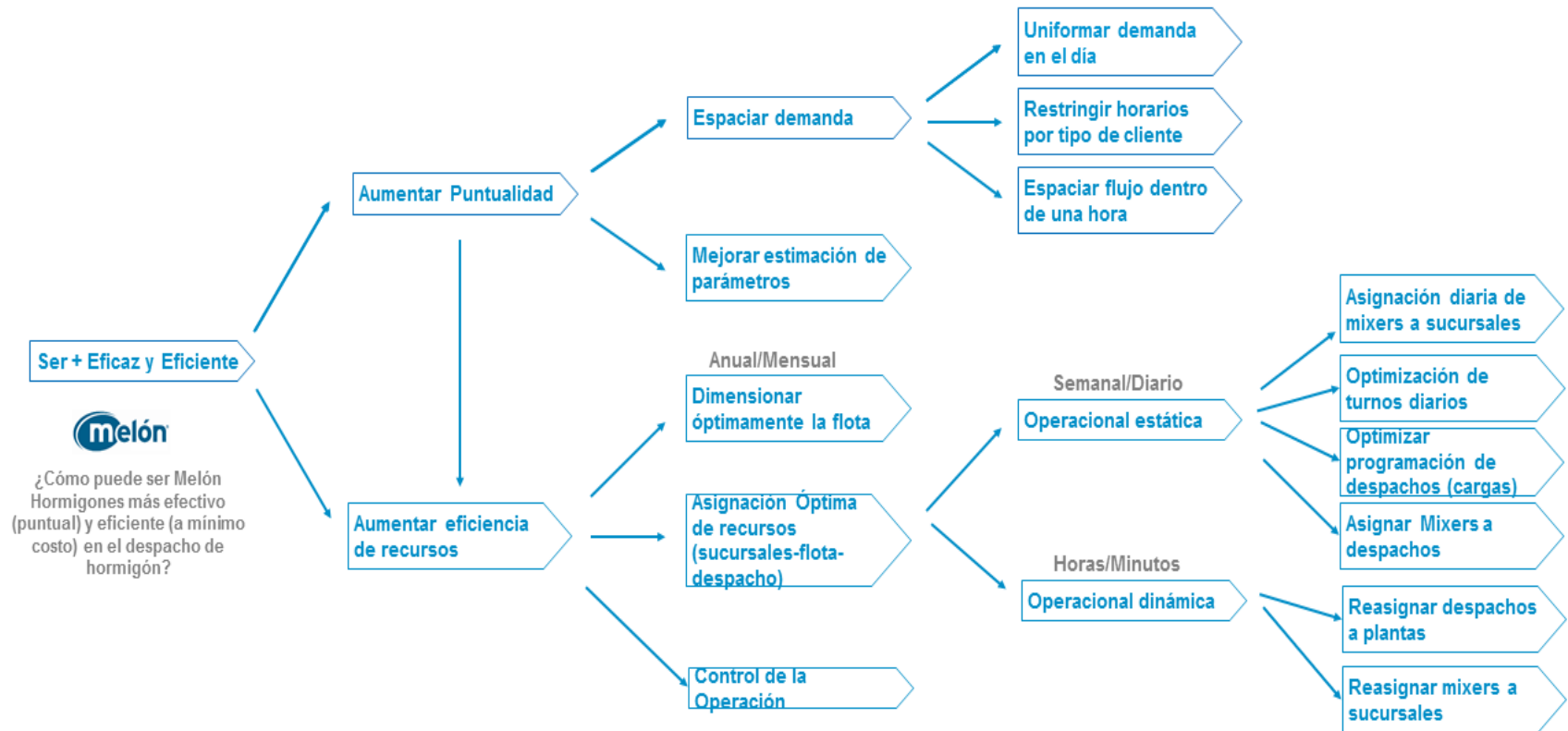


Figura 4.1: Metodología de Árbol aplicado a Melón Hormigones

4.1.1 Gestiones de la demanda

Como se estableció anteriormente, los indicadores a evaluar son aquellos vinculados a la calidad de servicio y los costos de ejecución. Entonces, una de las primeras necesidades que surge, es validar si con los recursos actuales es posible mejorar la calidad de servicio. Para ello, se establece como calidad de servicio la llegada oportuna de los despachos solicitados por el cliente, dentro de su ventana horaria.

En adelante se considera que un despacho es puntual, si y solo si, llega entre la hora solicitada menos 15 minutos y la hora solicitada más 15 minutos. Se realiza el análisis con ventanas de 15, 30 y 45 minutos, que son considerados por la empresa como atrasos leve, grave y muy grave respectivamente.

En la figura 4.2 se presenta el nivel de servicio actual.

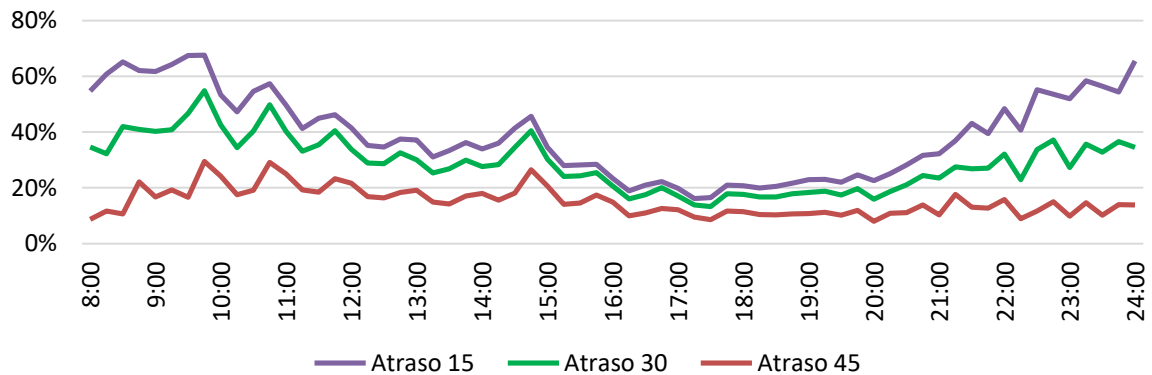


Figura 4.2: Proporción de pedidos atrasados según tramos horarios (2016)

Como es posible evidenciar, el nivel de atraso por sobre los 45 minutos es aproximadamente homogéneo a lo largo del día, mientras que de 15 y 30 minutos crecen hacia los extremos del día. Lo anterior se debe a la dotación de vehículos durante los extremos, según la experiencia de los operadores logísticos de la empresa. Como se evidencia, a partir de la figura 4.2 y 4.3, cuando mayor es la carga de trabajo, mejor es la puntualidad.

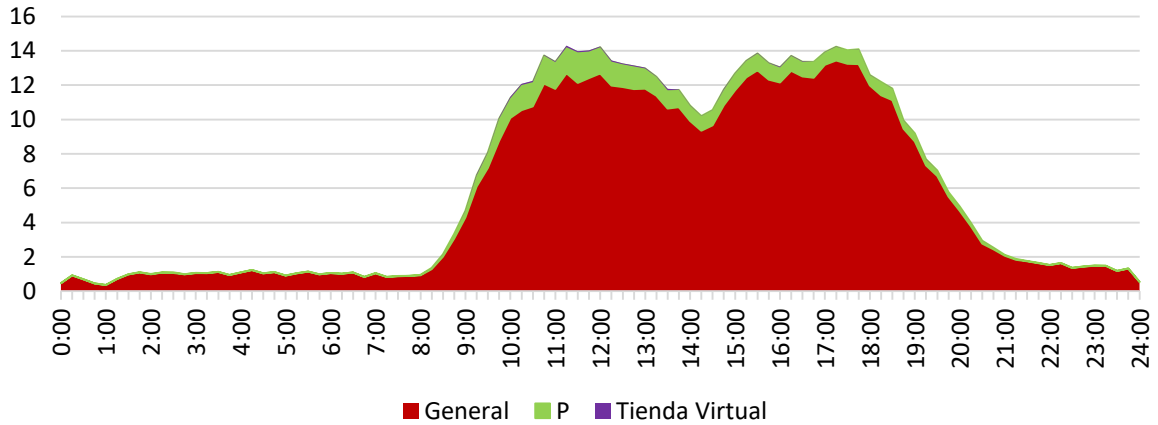


Figura 4.3: Promedio de despachos solicitados según tipo de cliente en franja de 15 minutos (2016)

En la figura 4.3 se presenta la demanda solicitada por los clientes en promedio según tramo horario en 2016. Los clientes fueron separados según el formato de compra, en clientes P, clientes noP atendidos mediante ejecutivo de ventas, y clientes atendidos por tienda virtual.

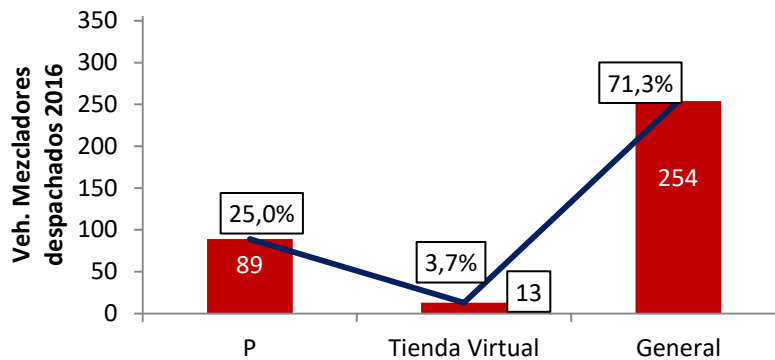


Figura 4.4: Promedio de despachos diarios según formato de compra (2016)

Si bien la mayor parte de los despachos son solicitados por clientes tipo General, es decir clientes noP que solicitan vía ejecutivo de venta, los clientes P comparten sus horarios preferentes de solicitud de despachos.

Los clientes P configuran un público potencialmente más flexible respecto de sus horarios de demanda, ya que en su mayoría son hogares que solicitan una baja cantidad de producto. Como muestra la figura 4.5, solo el 11,1% de la carga entregada por Melón Hormigones de 2016 es hacia clientes P, mientras que los clientes noP involucran el restante 88,9% de los m^3 despachados.

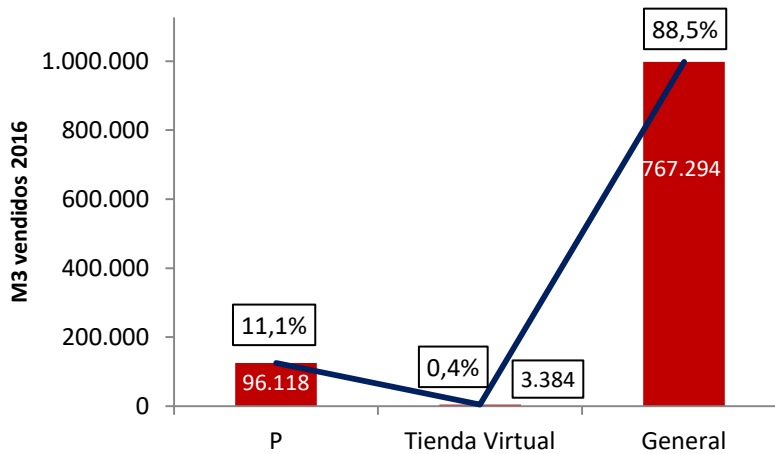


Figura 4.5: Promedio de despachos de m^3 diarios según formato de compra (2016)

Se puede notar que la mayoría de los clientes es de tipo noP. A pesar de ello, los clientes P solicitan pedidos en los mismos horarios y esto conlleva una gran cantidad de atrasos. Una solución posible, pasa por reducir el estrés del sistema con el espaciamiento de estos clientes, otorgando grandes mejoras en la calidad de servicio. Por lo anterior, existe una oportunidad de mediante gestión de orientación al cliente P, cuyo potencial de flexibilidad horaria permite dicha orientación, hacia horarios de menor estrés sistémico.

Otra posibilidad de gestión de la demanda está dada por la gestión de las horas cerradas. Según la información de horas de despacho solicitadas por los clientes de Melón Hormigones, estos concentran sus solicitudes tanto en el minuto 0 como en el 30, estresando al sistema con un exceso de flujo en ciertos instantes durante una hora, lo que se traduce en tardanzas y falta de capacidad de producción, recordando que este es un sistema *just in time*.

Como muestra la figura 4.6, la concentración horaria es cada 30 minutos, mientras que los tramos 15 y 45 están siendo desaprovechados y más bien son utilizados para cubrir despachos atrasados de los tramos 0 y 30 minutos.

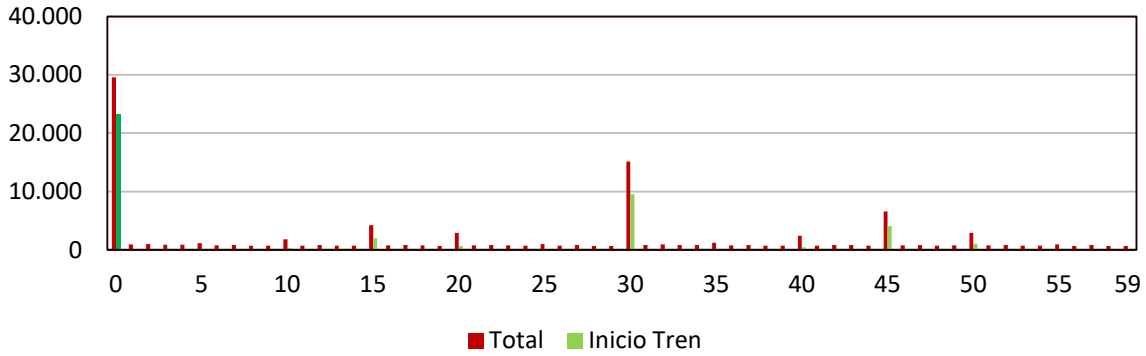


Figura 4.6: Núm. de despachos solicitados en cada minuto, dentro de una hora, según despachos totales y primeros despachos de un tren (2016)

En la figura se presentan también las solicitudes de minutos dentro de una hora, del primer vehículo de un tren. Recordemos que los despachos son solicitados como trenes de despachos, siendo solo el primer despacho una solicitud directa y el resto son derivados de la llegada de un despacho anterior más el tiempo de espaciamento entre ellos.

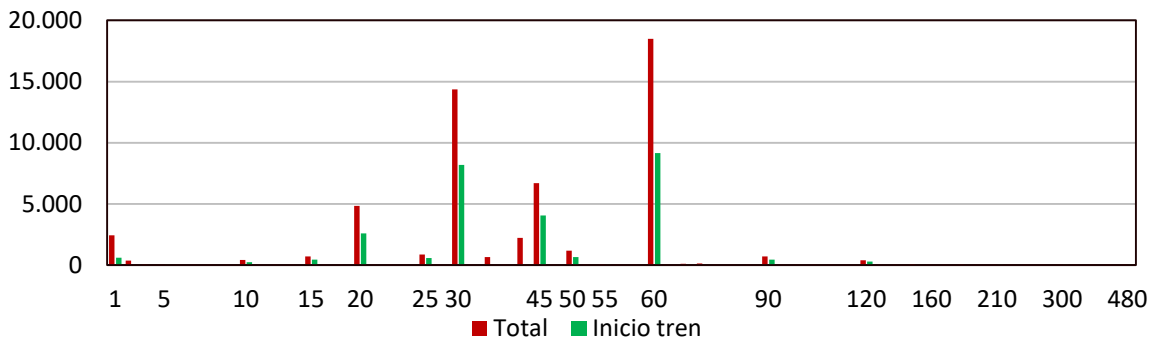


Figura 4.7: Frecuencia de minutos de espaciamento para todos los despachos y el primer despacho de un tren (2016)

Los espaciamentos entre despachos se concentran en 30, 45 y 60 minutos, como muestra la figura 4.7. Para el caso de los espaciamentos de 45 minutos, y dado que los horarios iniciales de un tren se focalizan en 0 y 30 minutos, se produce que cada dos vehículos dentro de un tren, la demanda se concentra nuevamente en 0 y 30 minutos.

Para el caso en que el espaciamento sea de 30 o 60 minutos, y dado que los trenes inician mayoritariamente en 0 y 30 minutos, se produce en cada solicitud una concentración de la demanda en el minuto 0 y 30 nuevamente. Es decir, en la medida que las solicitudes iniciales se concentren, dado el nivel de espaciamento solicitado, siempre existirá estrés del sistema en ciertos minutos de la hora.

Es posible notar que con una política de orientación a la mitad de los clientes a que soliciten su pedido en los 15 y 45 minutos, y manteniendo los otros en 0 y 30 minutos, es posible conseguir espaciar la demanda dentro de una hora reloj, de modo de establecer no solo 2 puntos de alta demanda, sino 4 de mediana demanda.

4.1.2 Gestión de la información

En Melón hormigones, un vehículo realiza una serie de procesos para entregar el producto a la obra y volver a su planta, como se muestra en la figura 4.8.

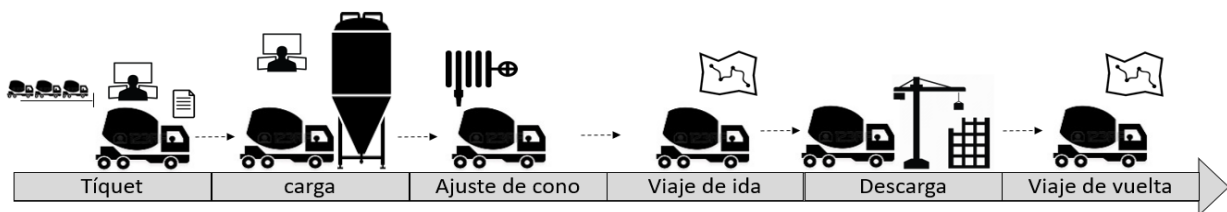


Figura 4.8: Procesos de despacho de hormigón

Cada vehículo inicia un ciclo productivo posterior a ser tíqueteado, entendiendo esto como el proceso de adjudicación de un tiquete físico en el cual se le notifica su ruta, horario y descripciones de trabajo para el siguiente despacho. Los vehículos deben posicionarse bajo el depósito para ser cargados, luego se vierte agua de forma de ajustar el hormigón, posteriormente debe viajar a la obra y descargar el producto, para finalmente volver a la sucursal.

Los procesos tardan tiempos variables en realizarse, salvo el ajuste de cono, que es un proceso estandarizado. Los tiempos a considerar como parámetros para la resolución del problema son el tiempo de carga, viaje de planta a obra (ida), espera en obra, tiempo de descarga y viaje de obra a planta (vuelta).

4.1.2.1 Tiempos de carga

Consiste en el tiempo que pasa desde que el vehículo se posiciona bajo el silo de la torre de producción, hasta que finalmente sale de la geocerca de la sucursal, siendo esta última la delimitación física registrada en el controlador de GPS, de algún edificio u obra. Este tiempo se consigue a través de un sensor que registra el momento en que el vehículo comienza a girar su mezcladora, dando a entender que comienza el proceso de inicio de carga, hasta que el GPS detecta que salió de la geocerca.

4.1.2.2 Tiempos de viaje de planta a obra

Consiste en el tiempo que pasa desde que el vehículo sale de la geocerca de la sucursal, hasta que llega a la geocerca de la obra. Este tiempo se consigue a través del GPS que registra el momento en que el vehículo sale de la geocerca de la sucursal, hasta que entra a la geocerca del cuadrante donde se encuentra la obra.

4.1.2.3 Tiempos de espera en obra

Consiste en el tiempo que pasa desde que el vehículo entra a la geocerca de la obra, hasta que se activa el sensor de descarga. El vehículo cuando comienza su descarga gira su mezcladora en dirección inversa hacia donde gira cuando está en proceso de carga. Este tiempo incluye la espera efectiva en la obra y el posicionamiento del vehículo en obra.

4.2.2.4 Tiempos de descarga

Consiste en el tiempo que pasa desde que el vehículo comienza la descarga, hasta que sale de la geocerca de la obra. Este tiempo se consigue desde que el sensor de descarga notifica el inicio, hasta que el GPS notifica que salió de la geocerca del cuadrante donde se encuentra la obra.

4.1.2.5 Tiempos de viaje de obra a planta

Consiste en el tiempo que pasa desde que el vehículo sale de la geocerca de la obra, hasta que llega a la geocerca de la sucursal. Este tiempo se consigue a través del GPS que registra el momento en que el vehículo sale de la geocerca de la obra, hasta que entra a la geocerca del cuadrante donde se encuentra la sucursal.

En la figura 4.9 se presentan los valores de los tiempos de ejecución de los procesos que realiza un vehículo mezclador en su faena de despacho, según cada sucursal. Como es posible notar, los tiempos varían según cada sucursal.

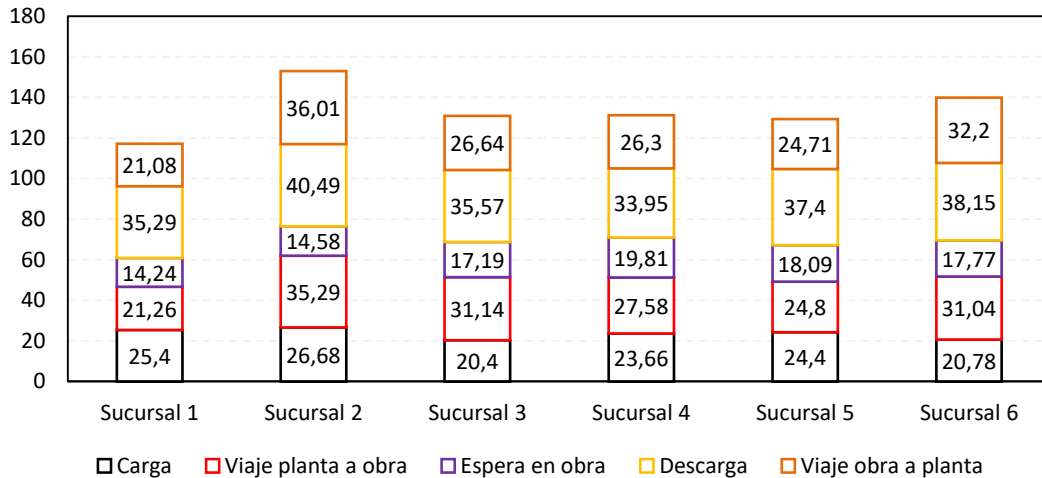


Figura 4.9: Tiempos de procesos en sucursales (2016)

A pesar de los esfuerzos de Melón Hormigones por generar una distribución equitativa de tiempos de trabajos, los valores difieren entre sucursales.

Actualmente, para la estimación de los tiempos de carga se utiliza un valor constante más uno variable según los m^3 de cada despacho, para cada depósito. Para los tiempos de ida se utiliza una media móvil simple de los tres últimos viajes de ese par origen destino, al igual que para los tiempos de vuelta, aunque intercambiando el origen por el destino. Para los tiempos de espera en obra más el tiempo de descarga, se considera el espaciamiento solicitado por el cliente como un equivalente.

Para el caso de una implementación dinámica, también es necesario considerar la tasa de cancelaciones. En la figura 4.10 se presenta la tasa de cancelación de despachos de miércoles a viernes, dado que son el foco de interés de Melón Hormigones, ya que son los días de mayor demanda.

Como es posible notar, la razón de cancelaciones por tramo horario tiene un patrón que se repite consistentemente según la hora del día, por lo tanto existen oportunidades de analizar y comprender el fenómeno de las cancelaciones, con lo que se lograría una comprensión que permita reaccionar a tiempo ante una cancelación. Las cancelaciones al inicio del día son mayores y a partir de las 9 a 18 hrs se medianamente mantienen estableces, oscilando entre 20 y 30%.

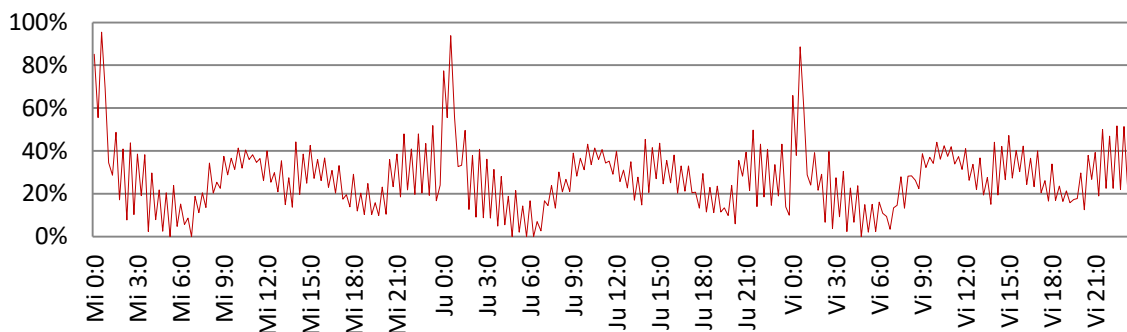


Figura 4.10: Tasa de cancelaciones por día a día (2016)

Cómo es posible notar de lo visto en este capítulo, existen diversos procesos que influyen en la modelación del problema de la coordinación eficientemente de los despachos de hormigón. Melón hormigones maneja grandes volúmenes de producción y se evidencian oportunidades efectivas de mejoras potenciales. La coordinación de recursos productivos involucra la comprensión de estos mismos, incluyendo la magnitud de sus volúmenes y su variabilidad.

4.2 Modelación de programación entera del problema de asignación y despacho de Melón Hormigones

Si se desea mejorar la eficiencia de recursos, deben tomarse buenas decisiones en la producción y despacho de hormigón. Como se mencionó en capítulos anteriores, el RMCDP es un problema NP-Duro y en general se separa en dos problemas esenciales: asignación despacho – sucursal y asignación despacho – flota.

4.2.1 Modelos de programación entera para el análisis del impacto de los depósitos

Es necesario clarificar el impacto de la escasez de los recursos. En primera instancia se medirá el impacto de los depósitos como único recurso escaso, ya que es el recurso de más de compleja adquisición. Por lo anterior, se presentan dos modelos de programación lineal, en los que se asumirá que la flota es un recurso ilimitado y se utilizará la asignación a sucursal de forma empírica, utilizada por Melón Hormigones. Con lo anterior, se evalúa si el uso de los depósitos es eficiente, si los depósitos son el recurso escaso y si es posible mejorar la asignación, a partir de la asignación a sucursales.

Para ejecutar una instancia, se utilizará el día más colapsado de despachos del año 2016. El primer modelo responde a una calendarización de despachos dentro de un único depósito,

tal que los despachos lleguen dentro de una ventana horaria, considerando que es factible atrasarse. La función objetivo busca minimizar la suma de minutos de atraso. Los parámetros utilizados en su formulación son los siguientes:

Parámetro	Definición
I	Conjunto de despachos.
Q	Tiempo de carga, en minutos. Se utilizará un tiempo constante fijado en el percentil 80.
p_i	Tiempo desde inicio de carga hasta llegada a obra de despacho i , en minutos. Para este valor se utiliza el tiempo empírico.
a_i	Borde inferior de la ventana horaria de despacho i , en minutos.
b_i	Borde superior de la ventana horaria de despacho i , en minutos.

Tabla 4.1: Parámetros del modelo de secuenciamiento de despachos en un depósito

Las variables utilizadas en su formulación son las siguientes:

Variable	Tipo	Definición
y_i	No negativa	Tiempo de atraso sobre 15 ventana horaria de despacho i , en minutos.
t_i	No negativa	Hora de inicio de carga en depósito de despacho i , en minutos.
x_{ij}	Binaria	Toma el valor 1 si despacho i es realizado antes que j ; 0, en otro caso.

Tabla 4.2: Variables del modelo de secuenciamiento de despachos en un depósito

La formulación del modelo es la siguiente:

$$\min \sum_{i \in I} y_i \quad (4.1)$$

s. a.

$$t_i + Q \leq t_j + M(1 - x_{ij}) \quad \forall i, j \in I \quad (4.2)$$

$$x_{ij} + x_{ji} = 1 \quad \forall i, j \in I \quad (4.3)$$

$$t_i + p_i \geq a_i \quad \forall i \in I \quad (4.4)$$

$$t_i + p_i \leq b_i + y_i \quad \forall i \in I \quad (4.5)$$

$$t_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (4.6)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in I \quad (4.7)$$

La restricción (4.2) indica que si el despacho j es cargado después que i , debe iniciar su carga después de que termine cargarse i . La restricción (4.3) establece un orden lógico de inicios de carga de vehículos mezcladores; es decir, i comienza a cargar antes que j o después, pero no en paralelo. La restricción (4.4) establece que la llegada a obra debe ser posterior al borde inferior de la ventana horaria comprometida con el cliente. La restricción (4.5) establece que la llegada a obra debe ser anterior al borde superior de la ventana horaria comprometida con el cliente; en caso se considera atraso. Las restricciones (4.6) y (4.7) indican la naturaleza de las variables. La función objetivo (4.1) considera la minimización de la suma de los tiempos de atraso.

A continuación, se extiende el modelo anterior para aquellas sucursales que presentan más de un depósito. Este problema agrega la complejidad de escoger cual depósito realizará cada carga.

Los Parámetros utilizados en su formulación son las siguientes:

Parámetro	Definición
I	Conjunto de despachos.
D	Conjunto de depósitos.
Q	Tiempo de carga, en minutos. Se utilizará un tiempo constante fijado en el percentil 80.

p_i	Tiempo desde inicio de carga hasta llegada a obra de despacho i , en minutos. Para este valor se utiliza el tiempo empírico.
a_i	Borde inferior de la ventana horaria de despacho i , en minutos.
b_i	Borde superior de la ventana horaria de despacho i , en minutos.

Tabla 4.3: Parámetros del modelo de secuenciamiento de despachos en varios depósitos

Las variables utilizadas en su formulación son las siguientes:

Variable	Tipo	Definición
y_i	No negativa	Tiempo de atraso sobre 15 ventana horaria de despacho i .
t_i	No negativa	Hora de inicio de carga en depósito de despacho i .
x_{ij}	Binaria	Toma el valor 1 si el despacho i es realizado antes que j ; 0, en otro caso.
v_{id}	Binaria	Toma el valor 1 si el despacho i es cargado en depósito d ; 0, en otro caso.

Tabla 4.4: Variables del modelo de secuenciamiento de despachos en varios depósitos

La formulación del modelo es la siguiente:

$$\text{Min } \sum_{i \in I} y_i \quad (4.8)$$

s. a.

$$\sum_{d \in D} v_{id} = 1 \quad \forall i \in I \quad (4.9)$$

$$t_i + Q \leq t_j + M(1 - x_{ij}) \quad \forall i, j \in I \quad (4.10)$$

$$x_{ij} + x_{ji} \leq 1 \quad \forall i, j \in I \quad (4.11)$$

$$x_{ij} + x_{ji} \geq v_{id} + v_{jd} - 1 \quad \forall i, j \in I, d \in D \quad (4.12)$$

$$t_i + p_i \geq a_i \quad \forall i \in I \quad (4.13)$$

$$t_i + p_i \leq b_i + y_i \quad \forall i \in I \quad (4.14)$$

$$y_i, t_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (4.15)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in I \quad (4.16)$$

$$v_{id} \in \{0,1\} \quad \forall i \in I, d \in D \quad (4.17)$$

La restricción (4.9) establece que todo despacho debe ser realizado en algún depósito. La restricción (4.10) indica que si el despacho j es cargado después que i , debe iniciar su carga después de que termine de cargarse i . La restricción (4.11) establece un orden lógico de inicios de carga de vehículos mezcladores, es decir, i puede comenzar a cargar antes que j o después, pero no ambos casos. La restricción (4.12) establece un segundo orden lógico de inicios de carga de vehículos mezcladores para aquellos que comparten depósito; es decir, i se comienza a cargar antes que j o después, pero no en paralelo si comparten depósito. La restricción (4.13) establece que la llegada a obra debe ser posterior al borde inferior de la ventana horaria comprometida con el cliente. La restricción (4.14) establece que la llegada a obra debe ser anterior al borde superior de la ventana horaria comprometida con el cliente; en caso contrario se considera atraso. Las restricciones (4.15), (4.16) y (4.17) indican la naturaleza de las variables. La función objetivo (4.8) considera la minimización de la suma de los tiempos de atraso.

Se utiliza el día con mayor cantidad de despachos programados durante el 2016 en Melón Hormigones como instancia de prueba con objeto de evaluar la capacidad de los depósitos en una situación compleja. Para la construcción del caso se utiliza el registro de despachos 2016 de Melón Hormigones, tiempos de trayecto reales de ese día, tiempos de carga histórica y la asignación de despachos a sucursales.

En la tabla 4.5 se presentan los resultados del porcentaje de atrasos en la entrega de pedidos, tanto en la operación efectiva como en el modelo, por sucursal.

Sucursal		1	2	3	4	5	6
% atraso >15	Actual	88%	54%	74%	84%	77%	84%
	Modelo	74%	0%	0%	0%	0%	0%
% atraso >30	Actual	65%	23%	49%	65%	63%	65%
	Modelo	64%	0%	0%	0%	0%	0%

Tabla 4.5: Porcentaje de atrasos en instancia de medición de recursos, real y optimizada

Como es posible notar, se consiguen grandes mejoras en calidad de servicio en todas las sucursales, utilizando como criterio una ventana ya sea de 15 o 30 minutos. En 5 de las 6 sucursales se consigue entregar los despachos sin atraso. En la sucursal 1 se logra mejorar en 14% la puntualidad con una ventana superior de 15 minutos y 1% con una ventana superior de 30 minutos.

Es importante mencionar que los resultados anteriormente presentados no incluyen la componente estocástica de los tiempos de transporte, los cuales se suponen conocidos. En particular, se utilizaron los tiempos reales de ese día, como se mencionó anteriormente. El modelo no considera trenes de despachos, sino un conjunto de despachos individuales. El modelo considera también, que la flota es un recurso ilimitado, y si bien esto ayuda a mejorar la calidad de la solución, dado los resultados, se demuestra que solo en el caso de la sucursal 1, los depósitos son recursos escasos.

En la figura 4.11 se presenta el esquema de vehículos en proceso durante el día de la instancia, tanto en la realidad de la ejecución, como en el resultado del modelo. Se presenta en color rojo el número real de vehículos los distintos en procesos en cada instante durante el día y en azul el resultado de los modelos. En la esquina superior derecha de cada gráfico se presenta el número de vehículos asignados para cada sucursal ese día.

Los resultados anteriores permiten establecer en conjunto a la figura 4.2 la hipótesis de que gran parte de los atrasos se deben a la gestión de la flota, ya que como muestra dicha figura los atrasos son sistemáticos e incluso se profundizan en horas de baja demanda.

Como es posible notar, los perfiles de vehículos en procesos son similares en la ejecución y el modelo, pero con un nivel de desfase, lo que podría implicar un retraso sistemático por iniciar tarde los despachos. Otra conclusión que es posible extraer es que en la sucursal 1 y 3 se utilizaron una menor cantidad de vehículos en el punto de mayor utilización y por tanto la mejora en la calidad de servicio era posible dada la dotación. Para las sucursales 2, 4, 5 y 6 si bien se utilizó una mayor cantidad de vehículos que los utilizados en la operación real, están por debajo de la máxima capacidad de vehículos en proceso en cada sucursal en la instancia.

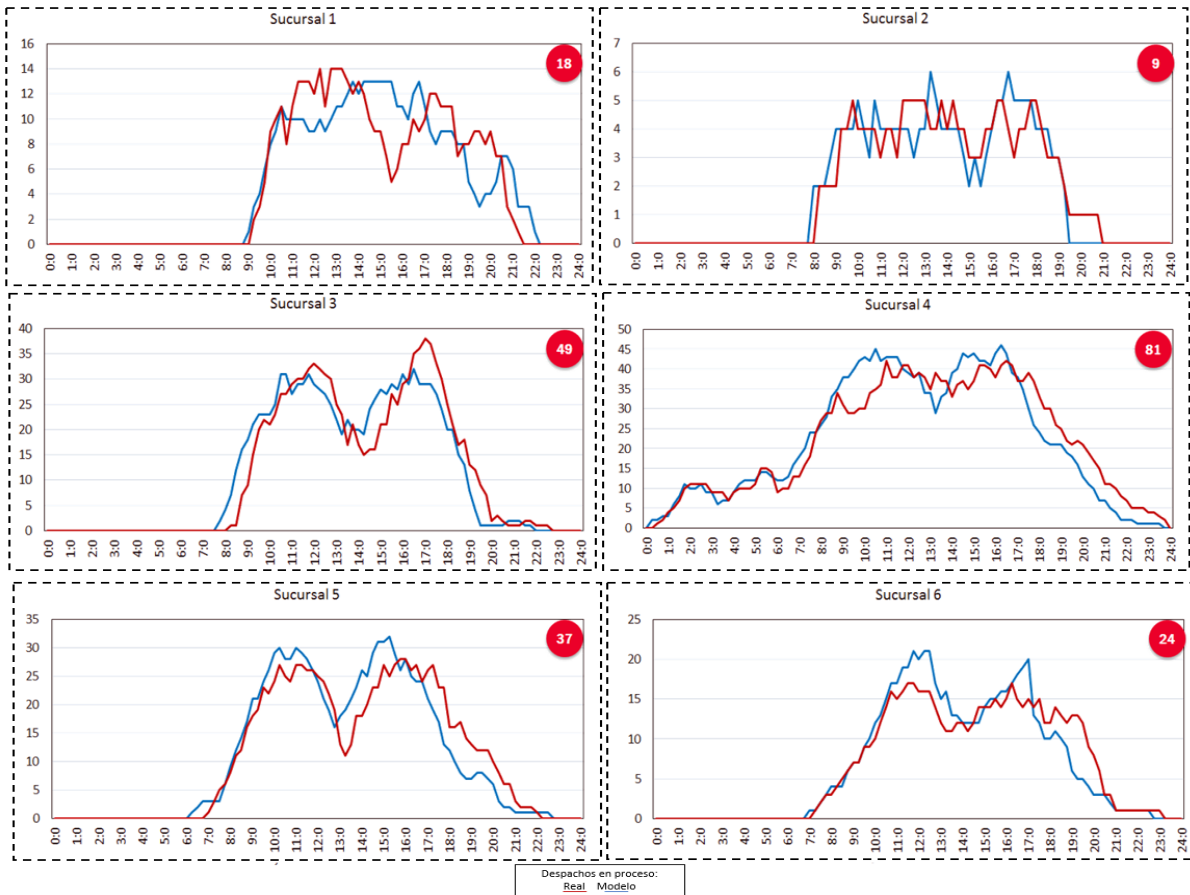


Figura 4.11: Trabajos en proceso en instancia de medición de recursos

4.2.2 Escenario con gestión del espaciamiento horario

Una de las potenciales soluciones propuestas para reducir la cantidad de atrasos fue la gestión de la demanda a lo largo de una hora, ya que como se estableció, ésta se concentra en el minuto 0 y 30 dentro de una hora reloj. Se consideró la instancia anterior, y mediante un criterio arbitrario se decidió mover la mitad de los despachos concentrados en el minuto 0 hacia el 15. Lo mismo se repite con el minuto 30 hacia el 45.

El criterio para espaciar la demanda consiste en considerar los despachos solicitados en los minutos 15 y 30, y balancearlos. Se realiza el mismo procedimiento para los minutos 45 y 0.

A continuación, se ejecutó el modelo de programación logrando los resultados de tabla 5.6, para el caso de la sucursal 1. Se consideró sólo la sucursal 1, ya que el resto de las estaciones logró 0% de atrasos con el modelo sin gestión de la demanda.

Sucursal		1
% atraso >15	Actual	88%
	Modelo	74%
	Espaciado + Modelo	56%
% atraso >30	Actual	65%
	Modelo	64%
	Espaciado + Modelo	40%

Tabla 4.6: Porcentaje de atrasos en sucursal 1 espaciada.

En la Tabla 4.6 se muestra que el resultado del espaciado de la modelación entrega resultados 32% mejores que la operación actual con una ventana superior de 15 minutos y 25% con una ventana superior de 30 minutos. Dado a lo anterior, el espaciado puede ser una gran iniciativa, ya que, para esta instancia particular, logra mejoras en la calidad de la solución por sobre las del modelo. El modelo sin aplicar espaciado entrega una mejora del 14% con respecto a la operación actual, mientras que el modelo con espaciado entrega una mejora de 32% con respecto a la operación actual, bajo un criterio de ventana superior de 15 minutos. Si se aplica un criterio de ventana de 30 minutos, los resultados indican una diferencia aún mayor. Cabe destacar que este resultado sólo es exploratorio de las potencialidades, ya que es una instancia de un día en particular.

En la Figura 4.12 se presenta el perfil de vehículos en proceso con espaciado en sucursal, el perfil real y el modelado sin espaciado. Se mantiene la nomenclatura de la figura 4.11 y se adiciona en color verde el perfil del modelo con espaciado.

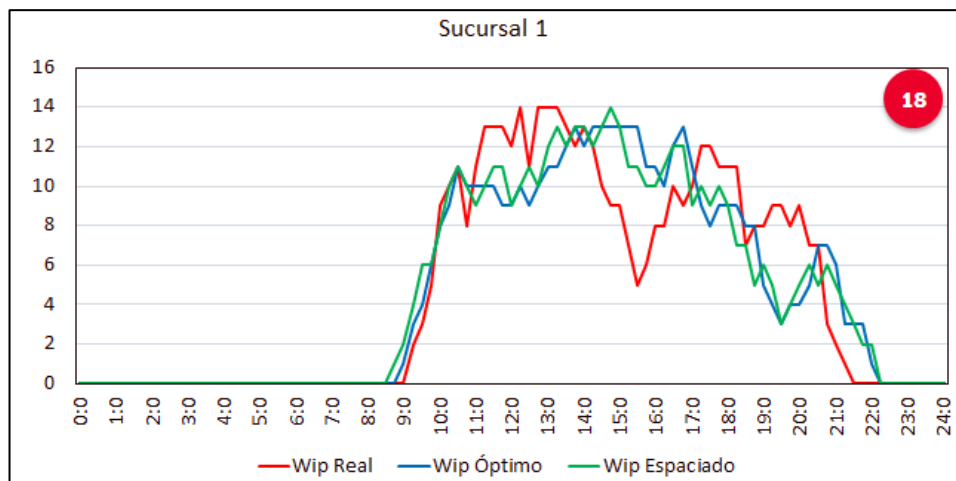


Figura 4.12: Trabajos en proceso en instancia 1 espaciada

Como muestra el perfil de la figura anterior, el espaciado provoca que el modelo presente una curva de crecimiento y disminución de vehículos menos abrupta, lo que sugiere un uso más estable de los recursos productivos a lo largo del día.

4.2.3 Modelos de programación para la medición de flota

Otro de los recursos en cuestión, es la dimensión de flota asignada. Habiendo ya hecho el análisis cuando la única restricción de la solución son los depósitos, es necesario restringir también la flota. Para ello, se presenta un modelo de programación lineal para el problema de secuenciamiento de maquinarias con asignación de flota; es decir, esta vez se asumirá que la flota es un factor influyente, aunque se continúa asumiendo una asignación despacho a depósito ya dada, manteniendo la instancia de aplicación.

El primer modelo para la medición de la flota busca calendarizar los despachos dentro de un único depósito, cumpliendo todas las restricciones del primer modelo descrito en 4.2.1, adicionando la decisión de cual vehículo deberá atender cada despacho. La función objetivo busca minimizar la suma de minutos de atraso.

Los parámetros utilizados en su formulación son las siguientes:

Parámetro	Definición
I	Conjunto de despachos.
V	Conjunto de vehículos mezcladores.
Q	Tiempo de carga, en minutos. Se utilizará un tiempo constante fijado en el percentil 80.
p_i	Tiempo desde inicio de carga hasta llegada a obra de despacho i , en minutos. Para este valor se utiliza el tiempo empírico.
r_i	Tiempo desde inicio de descarga de despacho i hasta llegada a depósito, en minutos. Para este valor se utiliza el tiempo empírico.
a_i	Borde inferior de la ventana horaria de despacho i , en minutos.
b_i	Borde superior de la ventana horaria de despacho i , en minutos.

Tabla 4.7: Parámetros del modelo de secuenciamiento de despachos en un depósito y asignación de flota

Las variables utilizadas en su formulación son las siguientes:

Variable	Tipo	Definición
y_i	No negativa	Tiempo de atraso sobre 15 ventana horaria de despacho i , en minutos.
t_i	No negativa	Hora de inicio de carga en depósito de despacho i , en minutos.
x_{ij}	Binaria	Toma el valor 1 si despacho i es realizado antes que j ; 0, en otro caso.
w_{iv}	Binaria	Toma el valor 1 si despacho i es realizado por vehículo v ; 0, en otro caso.

Tabla 4.8: Variables del modelo de secuenciamiento de despachos en un depósito y asignación de flota

La formulación del modelo es la siguiente:

$$\text{Min} \sum_{i \in I} y_i \quad (4.18)$$

s. a.

$$t_i + Q \leq t_j + M(1 - x_{ij}) \quad \forall i, j \in I \quad (4.19)$$

$$x_{ij} + x_{ji} = 1 \quad \forall i, j \in I \quad (4.20)$$

$$t_i + p_i + r_i \leq t_j + M(3 - x_{ij} - w_{iv} - w_{jv}) \quad \forall i, j \in I, v \in V \quad (4.21)$$

$$\sum_{v \in V} w_{iv} = 1 \quad \forall i \in I \quad (4.22)$$

$$t_i + p_i \geq a_i \quad \forall i \in I \quad (4.23)$$

$$t_i + p_i \leq b_i + y_i \quad \forall i \in I \quad (4.24)$$

$$t_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (4.25)$$

$$x_{ij}, w_{jv} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in I, v \in V \quad (4.26)$$

La restricción (4.19) indica que si el despacho j inicia su carga después que i , debe iniciar su carga después que termine de cargarse i . La restricción (4.20) establece un orden lógico de inicios de carga de vehículos mezcladores; es decir, i se comienza a cargar antes que j o después, pero no en paralelo. La restricción (4.21) indica que si el despacho i y el despacho j son hechos por el mismo vehículo y j se realiza después de i , el proceso completo de este último despacho debe haber sido completado antes de comenzar a cargar j . La restricción (4.22) establece que todo despacho debe ser realizado por algún vehículo. La restricción (4.23) indica que la llegada a obra debe ser posterior al borde inferior de la ventana horaria comprometida con el cliente. La restricción (4.24) establece que la llegada a obra debe ser anterior al borde superior de la ventana horaria comprometida con el cliente; en caso contrario, se debe contabilizar el atraso. Las restricciones (4.25) y (4.26) indican la naturaleza de las variables. La función objetivo (4.18) considera la minimización de la suma de los tiempos de atraso.

Este modelo resuelve el problema para sucursales con sólo un depósito. Se generó un modelo que adaptara el caso a sucursales con más de un depósito, pero no fue posible encontrar una solución con GUROBI Versión 7.5.2 ni CPLEX Versión 12.6 en un Intel Core i-5 CPU 1.8 GHZ de 8 GB RAM, durante 30 minutos.

En las figuras 4.13 se presenta el conteo de atrasos obtenidos por el modelo, según el tamaño de flota. En línea roja se muestra el resultado aplicando un criterio de máximo atraso de 15 minutos y en verde para atrasos de más de 30 minutos. En formato de puntos se presenta la situación empírica ocurrida por decisiones de expertos.

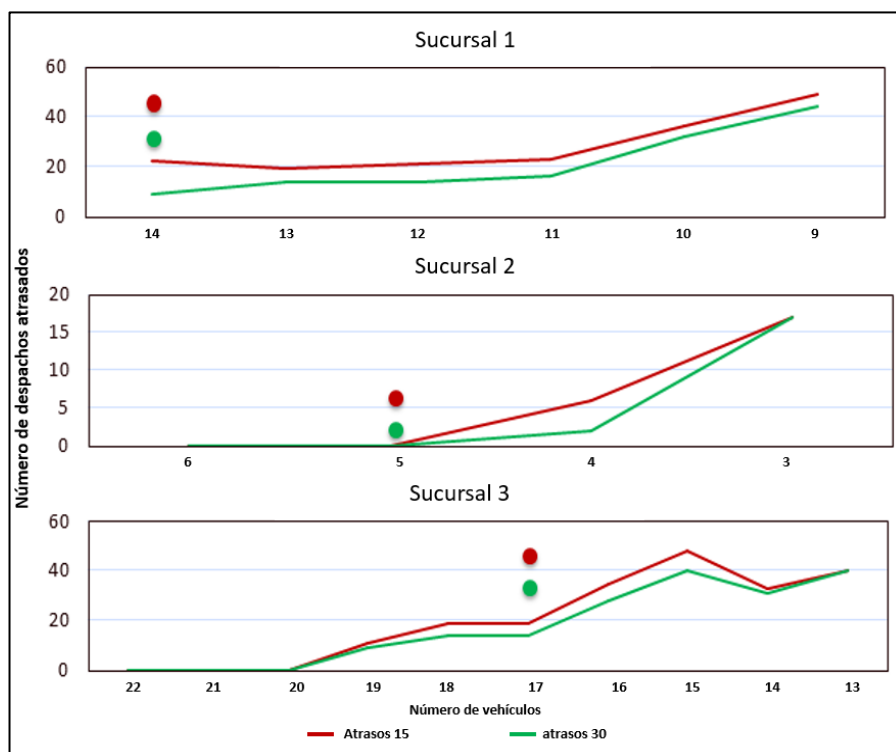


Figura 4.13: Conteo de atrasos, según tamaño de flota, en sucursales con un depósito

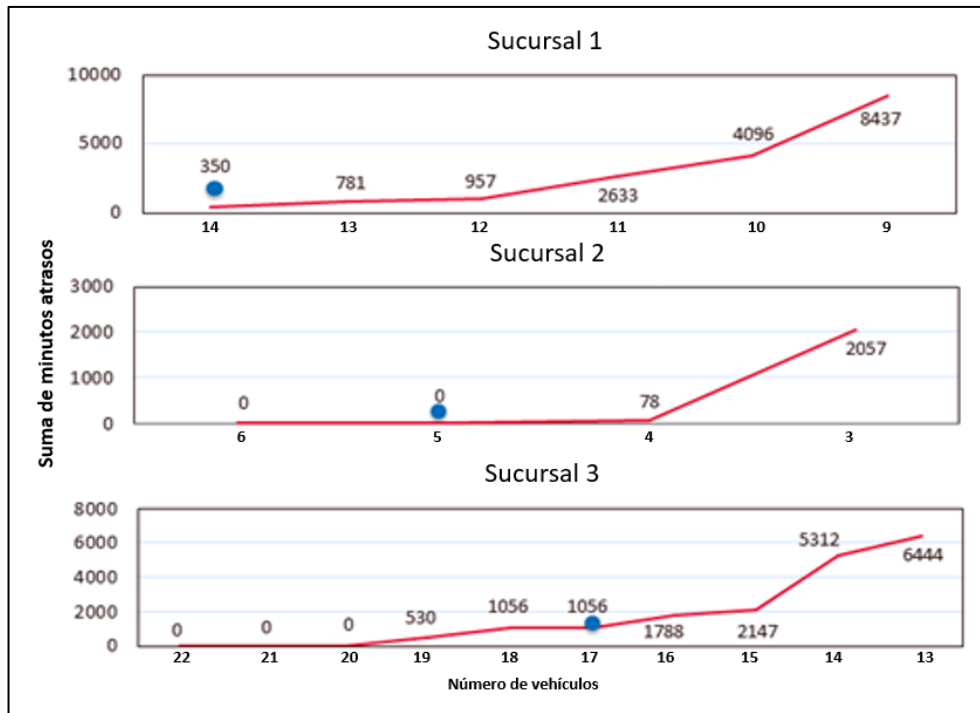


Figura 4.14: Suma de minutos de atrasos estándar 15 minutos, según tamaño de flota.

En las figuras 4.14 se presenta la suma de minutos de atrasos obtenidos por el modelo, según el tamaño de flota. La línea roja presenta el resultado aplicando un criterio de máximo atraso de 15 minutos, mientras que el punto azul presenta la situación actual.

Se infiere del análisis conjunto de ambas figuras, que la flota es un recurso que limita bastante la calidad de servicio, pero tiene un gran margen de mejora en calidad de servicio con una buena gestión. La sucursal 1 presenta una mejora sustancial tanto en el número de atrasos como en la suma de atrasos. La sucursal 2 presenta también un potencial de mejora alto, tanto en calidad de servicio, como en eliminar un recurso ocioso. La sucursal 5 mantiene su nivel de servicio empírico, evidenciando la buena gestión realizada y la escasez del recurso flota.

Se puede concluir que muchos recursos no aprovechan todo su potencial y que por tanto existen oportunidades de mejora, algunas de fácil implementación y otras que involucran una gran cantidad de esfuerzos, dada la magnitud de los recursos y la complejidad de su coordinación en la toma de decisiones.

5. Modelación definitiva del problema de manera integral

En este capítulo se presentan los supuestos, parámetros, variables y restricciones que conllevan a la formulación conceptual del problema a resolver. Posteriormente se presenta un modelo de programación matemática que resuelve el problema integral.

5.1 Problema a resolver

El problema que tratar consiste en la determinación de los horarios de producción, despacho y entrega de hormigón, para lo cual se gestionarán dos recursos escasos: depósitos donde se producen las mezclas de productos que conforman el hormigón y vehículos mezcladores. Se desea encontrar la asignación de despachos a depósitos desde donde producir y el vehículo que llevará el hormigón, de forma tal de minimizar los costos de la operación y entregar mejor calidad de servicio, medido en términos de tiempo de atraso.

Como fue explicado con anterioridad, hay diversos modelos en la literatura que intentar abordar el problema de producción y despacho de hormigón. Para este caso se construyó un modelo global, que plantea ambos problemas, y por tanto ambas gestiones en paralelo. Se propone un modelo inédito y específico para las particularidades descritas anteriormente. El modelo se enfoca en la resolución del problema RMCDP con ventanas de tiempo, multidepósitos heterogéneos y flota heterogénea.

Para el problema bajo estudio se consideran algunos supuestos.

5.2 Supuestos

Para aplicar el modelo se debe recurrir a supuestos acerca del comportamiento del consumo. Estos supuestos son:

- La demanda es independiente de los cambios en el sistema. Esto se refleja en que independiente de un atraso en la entrega de un despacho de un tren, todos los demás despachos seguirán siendo solicitados.
- La demanda es conocida.
- Homogeneidad de los productos; es decir, un determinado producto generado en un depósito es idéntico al generado en otro depósito, siempre que ambos puedan ser realizados.

- Las ubicaciones de los clientes y depósitos son parámetros conocidos al momento de tomar decisiones.
- Las localizaciones de los clientes y depósitos se modelan como un grafo que conecta a los primeros con los segundos y viceversa, pero no así internamente entre ellos.
- Cada depósito cumple con ciertas especificaciones técnicas de producción de Sku.
- Un despacho es la unidad mínima e indivisible de una entrega de sku. Todo despacho pertenece a un tren y existirá un espaciamiento mínimo y máximo entre despachos de un tren. El atraso de un despacho se calcula contra la hora planificada sin atrasos.
- La demanda debe ser cubierta en su totalidad por los depósitos y flota.
- Es posible que un tren sea atendido desde dos o más depósitos.

Todos estos supuestos son necesarios para poder llevar a cabo el modelamiento.

5.3 Entradas, Salidas y transformaciones del modelo

El problema por tratar toma algunos elementos revisados en la literatura. Por lo tanto, es necesario acotar y definir el ámbito de la problemática a tratar específicamente en esta investigación, de manera conceptual y esquemática.

En la figura 5.1 se presenta un modelo conceptual del problema a resolver, donde es posible identificar macroscópicamente las reglas generales, las decisiones que se busca tomar, las restricciones propias y específicas que presenta el problema y finalmente los objetivos que se persiguen.

5.3.1 Entradas

Al momento de resolver una problemática, es importante establecer cuales valores del sistema a modelar deben ser impuestos y cuales son jurisdicción de quien toma las decisiones en dicho sistema. Los datos entregados del sistema, que no configuran el conjunto de decisiones, sino más bien se imponen, son parámetros del modelo matemático. Los parámetros de este modelo se separan en 3 tipos: demanda, recursos productivos y red.

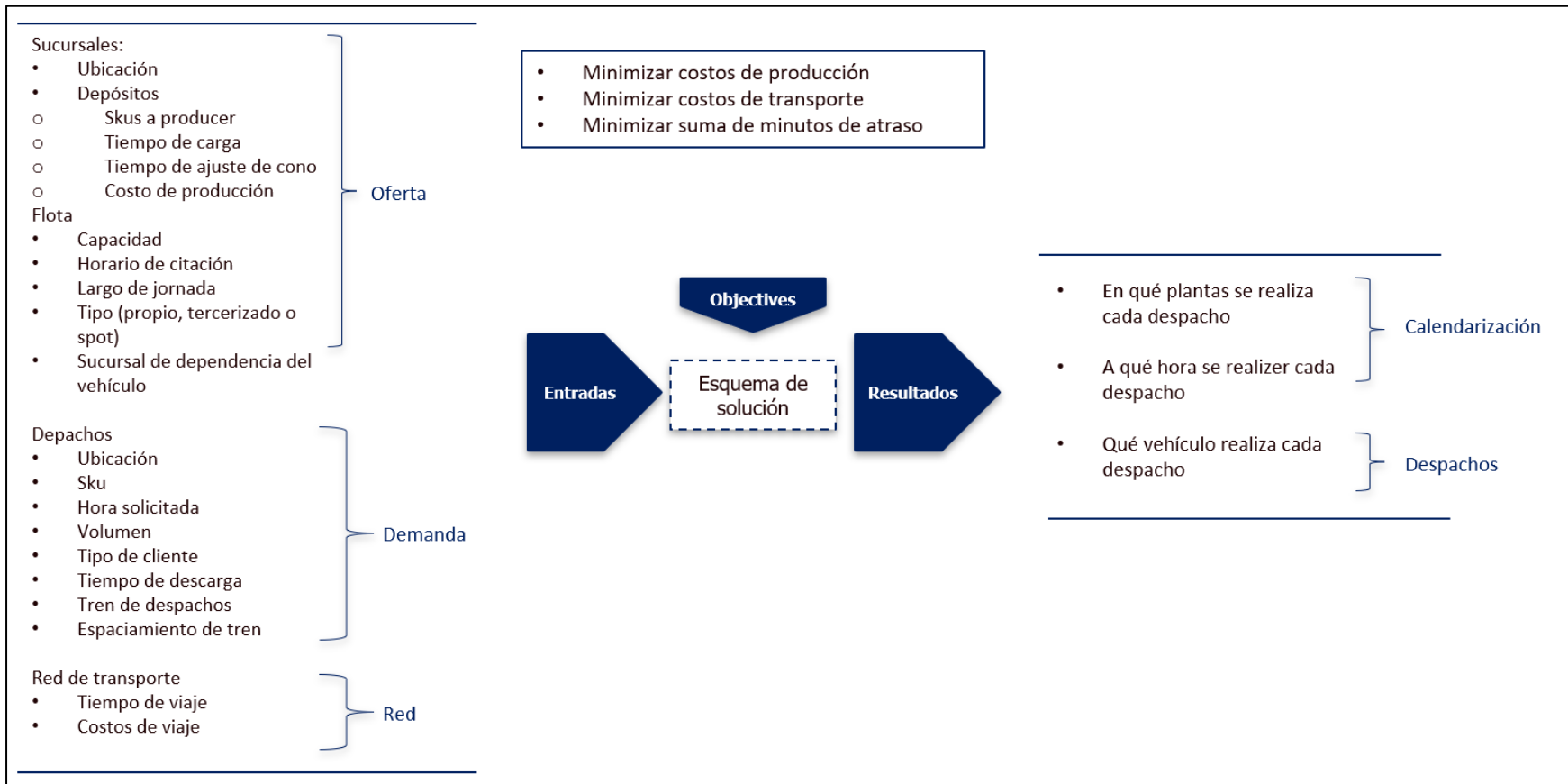


Figura 5.1: Modelo conceptual de la problemática a resolver

Las entradas vinculadas a la demanda vienen dadas por los requerimientos de los clientes. El cliente solicita la entrega de hormigón en una obra específica, hora de primer despacho, espaciamiento de vehículos dentro de un tren de despachos, *sku* y volumen de entrega. Mediante el volumen de entrega solicitado, es posible definir el número de vehículos a despachar, y en conjunto con el espaciamiento se define la hora de solicitud de cada despacho individualmente.

Las entradas vinculadas a la oferta de recursos se separan en 2: flota y sucursales. La flota posee capacidad en sus vehículos, que en particular es homogénea en este caso particular, además de tipo de vehículo en función del contrato, lo que afecta directamente en los costos de transporte, y los horarios de citación de cada uno de ellos. Por otra parte, las sucursales también son un recurso escaso, y estas poseen ubicación, tipo de *sku* que es capaz de generar, tiempo de carga por m^3 , tiempo fijo de asentamiento posterior a la carga y costo de producir cada *sku* en cada sucursal.

Finalmente, las entradas vinculadas a la red determinan los costos y tiempos de transporte asociados a cada par O/D entre sucursales y obras, y viceversa. No se consideran viajes directos entre sucursales.

5.3.2 Objetivos, salidas y restricciones

El objetivo principal que se busca, para este caso particular, es aumentar la calidad de servicio y disminuir los costos de producción y transporte. Aumentar la calidad de servicio consiste en minimizar la suma de minutos de atraso, con respecto a la hora solicitada por el cliente.

Las salidas son todas aquellas decisiones que finalmente configuran la forma ideal de proceder en este modelo. Las decisiones a tomar son: en qué depósito o planta realizar cada despacho, en qué hora se realizará el despacho y en que vehículo. Es posible notar que, para asignar un despacho a un vehículo, éste debe estar en horario laboral.

5.4 Modelo de programación entera mixta

A continuación, se presenta el modelo de optimización que formula el problema descrito por el modelo conceptual. El modelo busca minimizar los costos de transporte, producción la suma de minutos de atraso, sujeto a que se debe satisfacer la demanda, asignando cada despacho a un depósito y un vehículo.

Los parámetros utilizados en su formulación son las siguientes:

Parámetro	Definición
I	Conjunto de despachos.
D	Conjunto de depósitos.
D^i	Conjunto de depósitos capaces de producir el despacho i .
V	Conjunto de vehículos mezcladores.
ϱ^v	Conjunto de slot de despachos de vehículo mezclador v .
Π^d	Conjunto de slot de despachos de depósito d .
I_i^0	Despacho exactamente anterior a despacho i en tren.
Q_d	Tiempo de carga de un m^3 en depósito d , en minutos.
N_i	Volumen del despacho i , en m^3 .
F_{id}	Tiempo de trayecto de ida desde depósito d para despacho i , en minutos.
R_{id}	Tiempo de trayecto de vuelta desde despacho i para depósito d , en minutos.
P_d	Tiempo desde fin de carga de despacho hasta salida de geocerca de la sucursal d , en minutos. Tiempo dado para el asentamiento de la mezcla en el vehículo.
G_i	Tiempo de descarga de despacho i , en minutos.
L	Tiempo de precarga, en minutos. Dado por la gestión administrativa.
ω	Tiempo de mínimo espaciamiento, en minutos.
Ω	Tiempo de máximo espaciamiento, en minutos.
Δ	Máximo atraso permitido para un despacho, con respecto a su hora original, en minutos.
a_i	Borde inferior de la ventana horaria de despacho i , en minutos.
b_i	Borde superior de la ventana horaria de despacho i , en minutos.
C_i	Valorización económica de un minuto de atraso en despacho i .
K_{id}	Costo de producir despacho i desde depósito d .
J_{idv}	Costo de transporte desde depósito d hacia obra de despacho i , en vehículo v .
H_{idv}	Costo de transporte desde obra de despacho i hacia depósito d , en vehículo v .
ψ_v	Largo de jornada laboral de vehículo v , en minutos.
ξ_v	Duración del período de almuerzo, en minutos.
Λ_v	Horario en que comienza a operar el vehículo v , en minutos.

Tabla 5.1: Parámetros del modelo de asignación y despacho

Las variables utilizadas en su formulación son las siguientes:

Variable	Tipo	Definición
y_i	No negativa	Tiempo de atraso sobre ventana horaria de despacho i , en minutos
t_i	No negativa	Hora de inicio de carga en depósito de despacho i , en minutos
x_{ivk}	Binaria	Igual a 1 si despacho i es realizado en vehículo v , en el k -ésimo $slot$; Igual a 0, en otro caso.
S_{idk}	Binaria	Igual a 1 si despacho i es realizado en depósito d , en el k -ésimo $slot$; Igual a 0, en otro caso.
μ_{idv}	Binaria	Igual a 1 si despacho i se carga en depósito d en vehículo v ; Igual a 0, en otro caso.
λ_{idv}	Binaria	Igual a 1 si luego de despacho i se vuelve a depósito d en vehículo v ; Igual a 0, en otro caso.

Tabla 5.2: Variables del modelo de asignación y despacho

La formulación del modelo es la siguiente:

$$\min \sum_{i \in I} y_i C_i + \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} \mu_{idv} (K_{id} + J_{idv}) + \sum_{i \in I} \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} \lambda_{idv} H_{idv} \quad (5.1)$$

s. a.

$$\sum_{d \in D} \sum_{v \in V} \mu_{idv} = 1 \quad \forall i \in I \quad (5.2)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{v \in V} \lambda_{idv} = 1 \quad \forall i \in I \quad (5.3)$$

$$\sum_{v \in V} \sum_{k \in Q^v} x_{ivk} = 1 \quad \forall i \in I \quad (5.4)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ivk} \leq 1 \quad \forall k \in Q^v, v \in V \quad (5.5)$$

$$\sum_{d \in D^i} \sum_{k \in \Pi^d} S_{idk} = 1 \quad \forall i \in I \quad (5.6)$$

$$\sum_{i \in I} S_{idk} \leq 1 \quad \forall d \in D, k \in \Pi^d \quad (5.7)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ivk} \geq \sum_{j \in I} x_{jv(k+1)} \quad \forall v \in V, k \in Q^v \setminus |Q^v| \quad (5.8)$$

$$\sum_{i \in I} S_{idk} \geq \sum_{j \in I} S_{jd(k+1)} \quad \forall d \in D, k \in \Pi^d \setminus |\Pi^d| \quad (5.9)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{Q}^v \setminus \{q^v\}} (x_{ivk} + x_{jv(k+1)}) + \sum_{\hat{k} \in \Pi^d} S_{jd\hat{k}} - 2 \leq \lambda_{idv} \quad \forall i, j \in I, d \in D, v \in V \quad (5.10)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{Q}^v} x_{ivk} + \sum_{\hat{k} \in \Pi^d} S_{id\hat{k}} - 1 \leq \mu_{idv} \quad \forall i \in I, d \in D, v \in V \quad (5.11)$$

$$t_i + \sum_{d \in D} (Q_d N_i + P_d + F_{id}) \mu_{idv} + G_i + \sum_{d \in D} R_{id} \lambda_{idv} + L \leq t_i + M (2 - x_{ivk} - x_{jv(k+1)}) \quad \forall i, j \in I, v \in V, k \in \mathcal{Q}^v \quad (5.12)$$

$$t_i + Q_d N_i \leq t_j + M (2 - S_{idk} - S_{jd(k+1)}) \quad \forall i, j \in I, d \in D, k \in \Pi^d \quad (5.13)$$

$$t_i + \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} (Q_d N_i + P_d + F_{id}) \mu_{idv} \geq a_i \quad \forall i \in I \quad (5.14)$$

$$t_i + \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} (Q_d N_i + P_d + F_{id}) \mu_{idv} \leq b_i + y_i \quad \forall i \in I \quad (5.15)$$

$$t_j + \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} (Q_d N_j + P_d + F_{id}) \mu_{jdv} + \omega \leq t_i + \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} (Q_d N_i + P_d + F_{id}) \mu_{idv} \quad \forall j \in I_i^0, i \in I \quad (5.16)$$

$$t_j + \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} (Q_d N_i + P_d + F_{id}) \mu_{jdv} + \Omega \geq t_i + \sum_{d \in D} \sum_{v \in V} (Q_d N_i + P_d + F_{id}) \mu_{idv} \quad \forall j \in I_i^0, i \in I \quad (5.17)$$

$$y_i \leq \delta \quad \forall i \in I \quad (5.18)$$

$$t_i \geq \Lambda_v + L - M \left(1 - \sum_{k \in \mathcal{Q}^v} x_{ivk} \right) \quad \forall i \in I, v \in V \quad (5.19)$$

$$t_i + \sum_{d \in D} (Q_d N_i + P_d + F_{id}) \mu_{idv} + G_i + \sum_{d \in D} R_{id} \lambda_{idv} \leq \Lambda_v + \psi_v + M \left(1 - \sum_{k \in \mathcal{Q}^v} x_{ivk} \right) \quad \forall i \in I, v \in V \quad (5.20)$$

$$t_i + \sum_{d \in D} (Q_d N_i + P_d + F_{id}) \mu_{idv} + G_i + \sum_{d \in D} R_{id} \lambda_{idv} + \xi_v \leq t_j x_{jv3} + M (1 - x_{iv2}) \quad \forall v \in V \quad (5.21)$$

$$\sum_{i \in I} \mu_{idv} \leq \sum_{j \in I} \lambda_{jdv} \quad \forall d \in D, v \in V, \quad (5.22)$$

$$y_i, t_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (5.23)$$

$$x_{iiv}, s_{iid}, \mu_{idv}, \lambda_{idv} \in \{0,1\} \quad \forall i, \hat{i} \in I, d \in D, v \in V \quad (5.24)$$

La restricción (5.2) establece que todo despacho debe ser realizado en un depósito y algún vehículo. La restricción (5.3) indica que posterior a la entrega de un despacho, el vehículo debe ir a algún depósito. La restricción (5.4) establece que todo despacho debe ser realizado en un vehículo en algún turno. La restricción (5.5) indica en cada turno, un vehículo puede realizar sólo un despacho. La restricción (5.6) establece que todo despacho debe ser realizado en un depósito en algún momento. La restricción (5.7) indica que en cada turno, un depósito puede realizar sólo un despacho. La restricción (5.8) establece un orden lógico en la entrega de despachos en un vehículo. La restricción (5.9) indica un orden lógico en la entrega de despachos en un depósito. La restricción (5.10) establece la relación entre la variable de asignación de depósito de destino posterior a la entrega de un despacho por parte de un vehículo, con las variables de asignación del despacho a dicho vehículo y su secuencia de despachos a entregar. La restricción (5.11) indica la existencia de una relación entre la variable de asignación de despacho a vehículo y depósito, con las variables de secuenciamiento de despachos al mismo. La restricción (5.12) establece que un vehículo solo puede comenzar un nuevo despacho, si terminó todos los procesos de su anterior despacho y está preparado en el depósito del despacho nuevo, para poder efectuar su carga. La restricción (5.13) indica que dos despachos, tales que el primero de ellos es realizado justamente antes que el segundo en el mismo depósito. Se debe tener un espaciamiento de tiempo suficiente en sus horarios de inicio de carga, para que se complete la carga del primero antes de que el segundo inicie su carga. La restricción (5.14) establece que todo despacho debe llegar después de la hora solicitada por el cliente a la obra. La restricción (5.15) indica que todo despacho no debe llegar antes de una hora entregada por el cliente a la obra, y en caso de hacerlo, debe asumir una penalización en términos de calidad de servicio, dada por el atraso. Las restricciones (5.16) y (5.17) establecen márgenes mínimos y máximos, respectivamente, para el espaciamiento entre dos despachos contiguos de un tren. La restricción (5.18) impone una cota máxima tolerable para el nivel de atraso de un despacho. La restricción (5.19) establece que una carga realizada por un vehículo debe comenzar posteriormente a que éste haya comenzado su jornada laboral y cargue. La restricción (5.20) indica que una carga realizada por un vehículo debe terminar antes que éste haya finalizado su jornada laboral. La restricción (5.21) establece que posterior al segundo despacho de cada vehículo, este tendrá su hora de colación. La restricción (5.22) indica que el número de veces que sale de un depósito es el mismo número de veces que se vuelve a él. Con esto se garantiza que el vehículo vuelva a su depósito inicial. Las restricciones (5.23) y (5.24) indican la naturaleza de las variables. La función objetivo (5.1) considera la minimización de la suma de los minutos de atraso valorizados económicamente, los costos de producción en depósitos, el costo de transporte de ida y vuelta.

Como es posible notar, existe un gran número de decisiones que son necesarias de considerar al momento de modelar la situación y por extensión son muchas las decisiones que debe afrontar este modelo.

Las variables en el modelo son:

Variable	Cantidad
y_i	$ I $
t_i	$ I $
x_{ivk}	$ I V q^v $
S_{idk}	$ I D \Pi^d $
μ_{idv}	$ I D V $
λ_{idv}	$ I D V $
Λ_v	$ V $
Total	$2 I + V + 2 I D V + I D q^v + I D \Pi^d $
Complejidad	$O(I D (V + q^v + \Pi^d))$

Tabla 5.3: Cantidad de variables en formulación

Las restricciones en el modelo son:

Restricción	Cantidad	Restricción	Cantidad
(6.2)	$ I $	(6.13)	$ I ^2 \Pi^d D $
(6.3)	$ I $	(6.14)	$ I $
(6.4)	$ I $	(6.15)	$ I $
(6.5)	$ q^v V $	(6.16)	$ I $
(6.6)	$ I $	(6.17)	$ I $
(6.7)	$ \Pi^d D $	(6.18)	$ I $
(6.8)	$(q^v - 1) V $	(6.19)	$ I V $
(6.9)	$(\Pi^d - 1) D $	(6.20)	$ I V $
(6.10)	$ I ^2 D V $	(6.21)	$ V $
(6.11)	$ I D V $	(6.22)	$ D V $

(6.12)	$ I ^2 q^v V $
Total	$9 I + V + I ^2(D V + \Pi^d D + q^v V) + (2 q^v - 1) V + (2 \Pi^d - 1) D + I D V + V (2 I + D)$
Complejidad	$O(I ^2(D V + \Pi^d D + q^v V))$

Tabla 5.4: Cantidad de restricciones en formulación

Contextualizando la dimensión del problema a resolver, existen 11 depósitos. La evidencia empírica indica que cada vehículo mezclador es capaz de realizar 3,3 despachos promedio diario y un máximo de 6 despachos. En la figura 5.2 se presenta el número de variables y restricciones que poseería un problema según el número de despachos a entregar, considerando:

- $|D| = 11$. Este es el número de depósitos a considerar.
- $|V| = \max \left\{ 1; \left\lceil \frac{1}{3,3} \right\rceil \right\}$. Este es el número de vehículos a considerar.
- $|q^v| = \min \{6; |I|\}$. Este el número máximo de viajes a realizar por cada vehículo.
- $|\Pi^d| = \min \{100; |I|\}$. Este el número máximo de cargas a realizar por cada depósito.

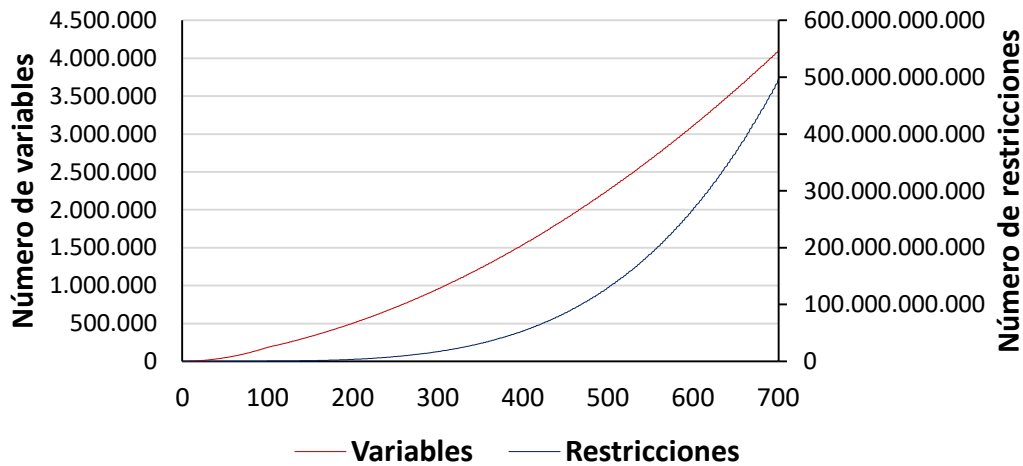


Figura 5. 2: Cantidad de variables y restricciones según el número de despachos

El número de despachos actuales para la empresa Melón Hormigones está entre 450 y 700 diarios. A modo de ejemplo, una instancia de 450 despachos implica más de 1.800.000 variables y más de 85.000.000.000 restricciones. Es posible concluir que las dimensiones del problema supera con creces la capacidad de resolución computacional, con el modelo de programación propuesto.

En esta investigación, se determinó el gran potencial de mejora en la utilización de los recursos productivos y la dificultad de coordinar todos estos recursos para los expertos. Dada la complejidad del modelo desarrollado y el dinamismo de las decisiones, además de lo estocástico de los parámetros en la operación diaria, cualquier técnica que se busque implementar en el día a día de la operación deberá responder de manera veloz ante la posibilidad de un recalcu de condiciones. Todo lo anterior conlleva a la necesidad de desarrollar una heurística que responda velozmente a la solución, en particular se decidió una constructiva.

6. Esquema Heurístico de Resolución

Para resolver el problema, se presenta un algoritmo heurístico, al que llamaremos ADH, por las siglas de asignación y despacho de hormigón. Un algoritmo es un conjunto finito de pasos o procedimientos que genera un resultado.

Debido al grado de dificultad de resolución del problema planteado y a la necesidad de resolver instancias reales, se utilizará un método heurístico inspirado en los hallazgos y la experiencia del desarrollo de los modelos exactos que se muestran en el capítulo anterior.

El algoritmo busca asignar los despachos a vehículos y depósitos de forma de minimizar los costos de producción, costos de transporte y el tiempo de atraso total de los despachos. Al ejecutar el algoritmo, este necesita todas las entradas descritas en la figura 5.1 y genera una calendarización de despachos, indicando para cada uno: hora de carga, depósito desde el cual se debe realizar el despacho y vehículo que lo transporta.

En una primera etapa, el algoritmo ordena los despachos según su hora ideal de carga, de menor a mayor, para irlos asignando de manera secuencial. Se inicia evaluando las mejores combinaciones de planta y vehículo para cada despacho, luego el procedimiento escoge un conjunto de las mejores combinaciones de duplas y las postula como candidatas a realizar el despacho.

Para seleccionar la dupla que realizará finalmente el despacho se utiliza el método GRASP. El método GRASP es la abreviación de “Greedy Randomizer Adaptive Search Procedure”, es decir “Procedimiento de búsqueda adaptativa aleatoria voraz”. GRASP es un algoritmo meta heurístico comúnmente aplicado a problemas de optimización combinatorial. Generalmente está inserto en un esquema de soluciones iterativas. El algoritmo consiste en dada una vecindad de soluciones o pasos, escoger aleatoriamente el cómo proceder. Dicha elección no se escoge dentro de toda la vecindad de soluciones posibles, sino más bien se desarrollan criterios para establecer una terna de soluciones, e inclusive a las soluciones pertenecientes a la terna se les puede definir algún criterio de valorización que pueda aumentar o disminuir sus probabilidades de ser escogida. En ADH se utilizará GRASP para sortear, según una función de probabilidades que da mayores posibilidades a aquellas combinaciones que involucren menor costo a la función objetivo, la cual se compone de costos de producción, transporte y valorización económica del atraso, como fue mencionado anteriormente.

Finalmente, se obtiene una calendarización completa de un día, la que se presenta como una solución del problema. Este proceso se realiza iterativamente y se selecciona aquella solución con menor función objetivo como solución definitiva de esa instancia.

6.1 ADH

El algoritmo ADH es un esquema heurístico que busca asignar todos los despachos a un depósito y vehículo. La secuencia de pasos del algoritmo se presenta en la figura 6.1.

El algoritmo utiliza como entrada la información propia de la demanda solicitada por el cliente; es decir: producto solicitado, cantidad en m^3 , hora de inicio de primer vehículo de entrega y espaciamento entre despachos de un tren. Mediante la información de m^3 y la capacidad de los vehículos, se determina el largo del tren de despachos. Con el largo de tren, espaciamento y hora inicio de tren, se determina un conjunto de despachos individuales con hora de entrega particular cada uno, m^3 y con una posición específica dentro del tren de entrega.

Una vez transformada la información en un lote de despachos individuales, pero conectados con su tren, se determina la sucursal más cercana para cada despacho. Con la información de la sucursal más cercana, es posible saber el horario ideal en que se debe cargar cada despacho para llegar a tiempo a cada obra. Se establece una lista de despachos a entregar, priorizados en términos del tiempo en que deben iniciar su carga para llegar a la hora solicitada por el cliente. Si bien el cálculo de la hora ideal de carga es realizado considerando la sucursal más cercana, está finalmente podría no ser la asignada y sólo se utiliza para elaborar la lista de orden de procesamiento. Los despachos son procesados en orden según la lista ordenada.

Se evalúan en orden los despachos. Primero se toma el despacho a evaluar y se calcula la hora mínima en que podría cargarse en cada depósito, según disponibilidad y siempre que estos produzcan el sku correspondiente al despacho. Luego, se consideran todos los vehículos factibles de realizar la tarea del despacho, y estos serán aquellos que potencialmente alcanzan a cumplirla antes que completen su jornada laboral. Para cada dupla se calcula la hora mínima en que es posible iniciar la carga del despacho. Luego, se estima la hora mínima en que podría iniciar la carga del despacho, proyectando llegar con el cliente al inicio de la ventana horaria que éste definió para su recepción. Finalmente, se calcula la hora en que cada dupla vehículo-depósito realizaría potencialmente cada despacho, respetando disponibilidad de los recursos así como no llegar a obra antes de la hora solicitada. Para cada dupla se calcula a su vez el tiempo de atraso y se le asigna un costo asociado:

$$C_{dupla}(Depósito_d, Vehículo_v) = C_{producción}(d) + C_{transporte}(v) + C_{atraso}(d, v) \quad (6.1)$$

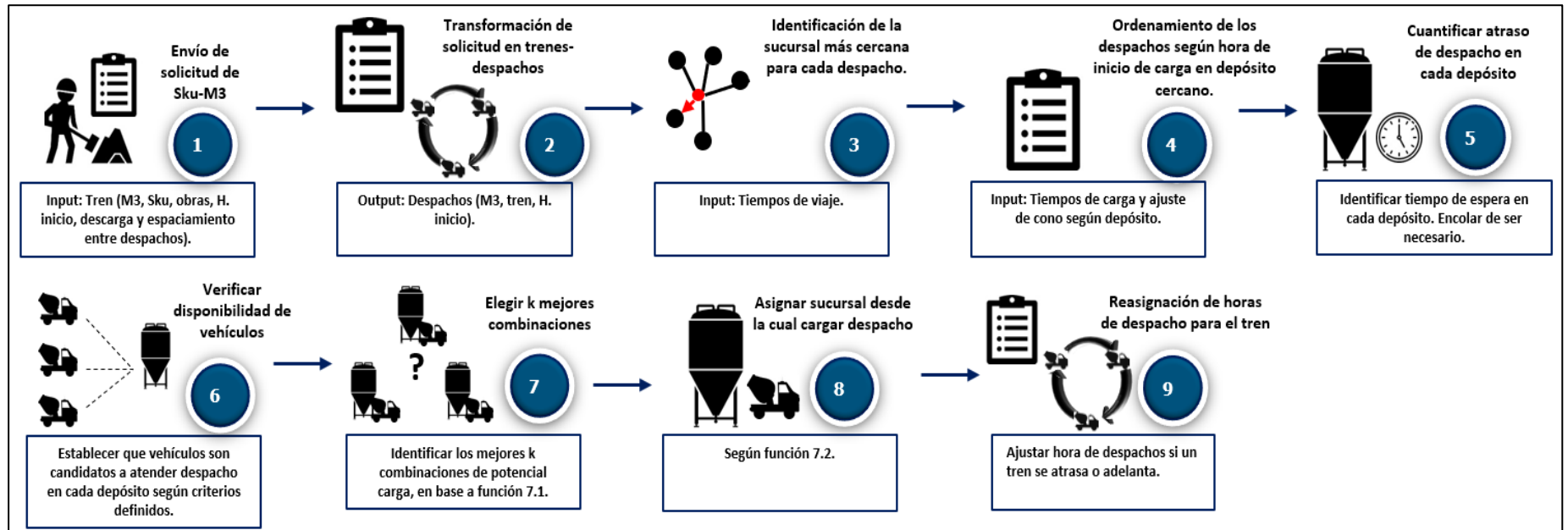


Figura 6.1: ADH

El costo de producción se calcula como función del sku y del depósito. El costo de transporte se calcula según si el vehículo inicia jornada o ya ha realizado al menos un despacho. Para vehículos que inician sus funciones, el costo de transporte esta dado por la valorización del viaje de ida desde su sucursal de origen hacia la obra, el viaje de la obra hacia la sucursal de origen del vehículo y un costo de inicio de jornada. Para vehículos que ya han iniciado su jornada, la valorización está dada por el costo de viaje de obra anterior hacia el depósito de carga del nuevo despacho, luego el viaje a la nueva obra y finalmente el viaje desde la nueva obra hacia la sucursal de origen del vehículo, menos el viaje desde la obra anterior hacia la sucursal de origen del vehículo. En la Figura 6.2 se presenta una visualización del costeo de transporte.

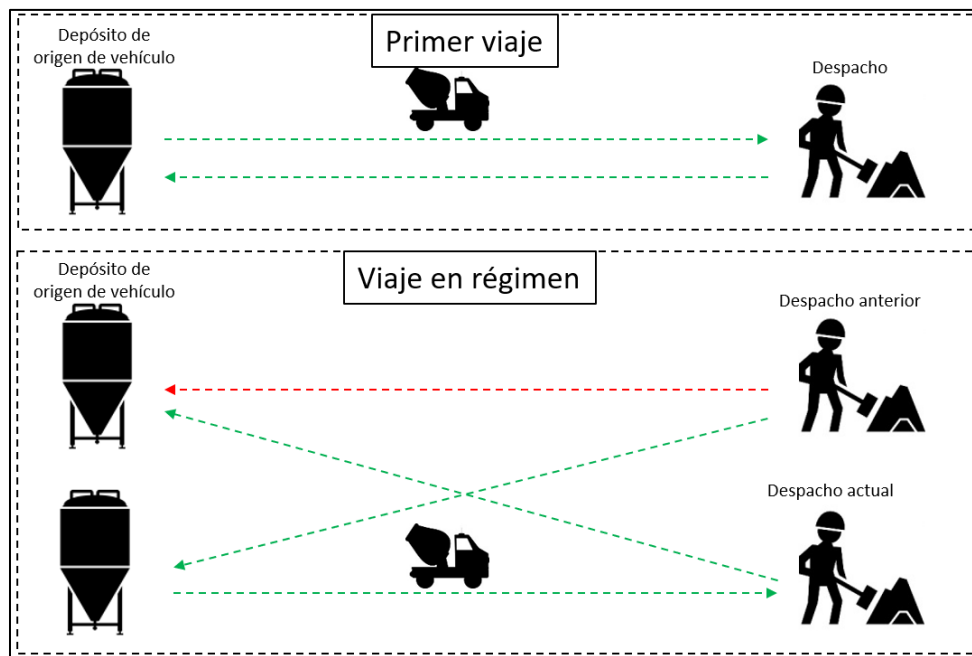


Figura 6.2: Formato de costeo de transporte

Se seleccionan las k mejores duplas según la función 6.1, luego se sortea cuál de ellas es la escogida. Se debe considerar que solo es posible escoger vehículos que estén en jornada laboral.

Es importante mencionar que ADH utiliza la citación de los vehículos mezcladores ingresada como parámetro. Esta citación de turnos define la disponibilidad de vehículos y ello incluye las ventanas de tiempo en que los vehículos no están disponibles porque sus conductores están almorzando. El algoritmo recibe como dato la mínima hora en que un vehículo se ausentará para que su conductor almuerce.

Un ejemplo para este caso, es el siguiente::

- Un vehículo tiene indicado que su almuerzo es a partir de la hora X .

- Si el conductor no ha realizado ningún despacho, no podrá deberá almorzar.
- Si el conductor vuelve de un despacho, pero ya ha almorzado anteriormente, deberá cargar el vehículo para un siguiente despacho, a menos que no tenga suficiente tiempo el conductor para realizar ese despacho antes de acabar su jornada laboral.
- Si el conductor no ha almorzado, vuelve de un despacho, puede realizar el despacho antes de acabar su jornada laboral e iniciar la carga del vehículo antes de la hora X , no podrá almorzar.
- Si el conductor no ha almorzado, vuelve de un despacho, puede realizar el despacho antes de acabar su jornada laboral, pero no iniciar la carga del vehículo antes de la hora X , debe almorzar.
- Si el operador no alcanza a realizar ningún despacho antes de acabar su jornada laboral, termina su turno.

Continuando con el sorteo, éste consiste en una función que disminuye su probabilidad inversamente al aumento de costo de la función 6.1. Sea DK_i el conjunto de las k mejores duplas para el despacho i , la probabilidad de escoger el depósito d y el vehículo v está dada por la función:

$$P(d, v)_i = \frac{C_{dupla}(Depósito_d, Vehículo_v)^{-1}}{\sum_{(i,j) \in DK_i} C_{dupla}(Depósito_i, Vehículo_j)^{-1}} \quad (6.2)$$

Con la asignación lograda en el paso anterior, se define no sólo el costo de producción, sino también el tiempo de inicio de carga. Con el tiempo de inicio de carga es necesario verificar si es posible hacerlo en su hora ideal, es decir aquella que se estima necesaria para llegar a atender al cliente en la ventana inferior de su solicitud.

Si un despacho no puede cargarse en su hora ideal e inicia su carga más tarde, debe considerar que el espaciamiento con respecto al despacho siguiente del tren se ha modificado. En primera instancia se calcula si el nuevo espaciamiento entre el despacho actual y el posterior a éste, en el tren, es menor al espaciamiento mínimo, en caso de serlo se debe corregir la hora de carga ideal del despacho posterior de forma tal de cumplir con el espaciamiento mínimo. Es posible notar que una vez corregido el segundo despacho, pudiera éste tener un espaciamiento menor al mínimo con respecto al tercer despacho, en cuyo caso se debe aplicar el procedimiento anterior y así para cada despacho siguiente en el tren. Al redefinir los horarios ideales de inicio de carga, se debe actualizar la lista ordenada de despacho a asignar, debido a que esta lista ordena los despachos según hora de carga.

Una vez asignado un despacho y actualizada la lista, se considera el siguiente despacho, y así hasta asignarlos todos. Una vez asignados todos, se da por finalizada una iteración de ADH. Se repite ADH y se escoge aquella solución que genere mejores resultados en términos de disminuir el costo total de la operación.

6.2 Pseudocódigo

A continuación se presenta el pseudocódigo del algoritmo:

ADH Algorithm

1 Object

2 $Dispatches = \emptyset$, $Trains = \emptyset$, $Depots = \emptyset$, $Branch\ offices = \emptyset$, $Orderlist = \emptyset$, $Mixers = \emptyset$

3 Calculated Load Start

4 For $i \in Dispatch$

5 $Dispatches_i.LoadStart =$

$Dispatches.hour - time\{Depots_j \rightarrow Depots.location\}\{Dispatches_i.Depots\}$

6 $Dispatches_i.LoadStart -= (Coneadjust + Depots.m3formin \cdot Dispatches.m3)$

Se inician los vectores de despachos, trenes, depósitos, sucursales, lista ordenada y vehículos mezcladores como vacíos. Luego se calcula la hora de carga en la sucursal más cercana, para cada despacho.

ADH Algorithm

7 Dispatches Order

8 For $i \in Dispatch$

9 $J = 0$

10 While $Dispatches_{Orderlist_{i-j}.LoadStart > Dispatches_i.LoadStart$

11 $J ++$

12 $Orderlist_{i-j}.insert = i$

Se ordenan los despachos según hora de inicio de carga en sucursal más cercana. El método consiste en tomar secuencialmente los despachos en el orden inicial que sean procesados y evaluar si inicia antes de despacho de inicio más tardío en lista ordenada, si se es mayor, se agrega el despacho al final de la lista, en caso contrario, avanza en la lista, insertándose en la posición que corresponda, y así iterativamente hasta acabar de ordenar los despachos.

ADH Algorithm

13 Depots and Mixers Allocations

```
14 For i ∈ Dispatch
15   For j ∈ Dispatchesi.Depots
16     C = DepotsDispatchesi.depot.idle * DelayCost + ProductionCostj
17     For k ∈ Mixers
18       C += CostMixersk.dispatch-Dispatchesi.depotDispatchesi.depotsj + CostDispatchesi.depot-i +
           Costi-Mixersk.depotsj - CostMixersk.dispatch-Mixersk.depotsj
19     Tuple(i, j, k) = C
20     Select depots random with probability function inverse: Tuple(i, j, k)
```

Se debe calcular el costo de producción de un despacho en cada depósito y el costo de transporte incurrido por mixers. En principio el algoritmo está preparado para que los vehículos mezcladores puedan cambiar de sucursal entre despachos, pero las pruebas de aplicación fueron realizadas sin considerar los cambios de sucursal. Finalmente, considerando el costo de todos los pares depósito - vehículo mezclador para cada despacho, se escoge un depósito y un vehículo mezclador según una función 6.2.

ADH Algorithm

21 Propagation

```
22 For j ∈ Dispatchesi → train.dispatches
23   If Dispatchesj-1.hour < Dispatchesj.hour + min_spacing
24     Dispatchesj.hour += min_spacing
25   Function Dispatches Order run
```

Si un despacho se atrasa, a tal punto de que no se respeta el espaciamiento mínimo con su predecesor en el tren de despachos, se debe atrasar. Se repite el procedimiento hasta acabar de recorrer el tren. Luego se debe actualizar la lista ordenada de despachos.

ADH Algorithm

26 Total Cost

```
27 For i ∈ Dispatch
28   CT1 += Dispatchesi.ProdCost
29   CT1 += Dispatchesi.delay * Dispatchesi.Costformindelay
30   CT1 += Dispatchesi.mixerscostDispatchesi.mix
31   CT2 = CT1
32   For i ∈ Mixers
33     CT2 += Mixersi.cost
```

Finalmente se calculan los costos de la operación. Con esto finaliza una iteración del algoritmo.

El algoritmo presenta una estructura constructiva, en la cual se toman decisiones de asignación de despachos dado que ya se realizaron todas las asignaciones aguas arriba, de forma tal de que el impacto de una decisión solo podría afectar a los despachos no asignados aún, lo que simplifica el cálculo. Si bien la estructura podría tomar decisiones miope, debido a que no rectifica decisiones aguas arriba, al tener un enfoque GRASP realiza búsquedas más amplias de soluciones y así reduce la posibilidad de caer en soluciones óptimas locales.

7. Resultados

En este capítulo se presentan las instancias y resultados del esquema desarrollado en el capítulo anterior. Se presenta a su vez la ejecución actual desarrollada por Melón Hormigones a modo de contraste del esquema y las decisiones de expertos.

Se utiliza como instancia de aplicación el mes de Marzo de 2018 en la empresa Melón Hormigones, sobre el cual se ejecuta el esquema de toma de decisiones generado en el capítulo anterior.

7.1 Descripción de la instancia

Es importante, previamente a presentar los resultados obtenidos por el esquema, que se entienda el contexto que presenta la instancia. El mes utilizado es marzo de 2018, que es de alta demanda, promediando 511 despachos diarios, 203 trenes y 171 vehículos disponibles. El día de mayor demanda consistió en 621 despachos, repartidos en 240 trenes, y para ello se contó con 178 vehículos.

	Despacho/día	Trenes/día	Vehículos disponibles
Promedio	511	203	171
Mínimo	401	160	165
Máximo	621	240	178

Tabla 7.1: Descripción de la instancia de prueba

Anteriormente se utilizó el año 2016, debido a la disponibilidad de la información, pero para las pruebas de aplicación de la heurística, se utilizó el mes de marzo de 2018, ya que es el mes en que se realizó el estudio. Diariamente, al acabar el día, se ejecutó la heurística y se contrastó con los resultados obtenidos por los expertos. A diferencia de 2016, que se contaba con 6 sucursales, para la fecha de aplicación solo se contaba con 5 sucursales, ya que la sucursal 5 fue cerrada en 2017.

La distribución de carga de trabajo programada, por los expertos, se muestra en la figura 7.1.

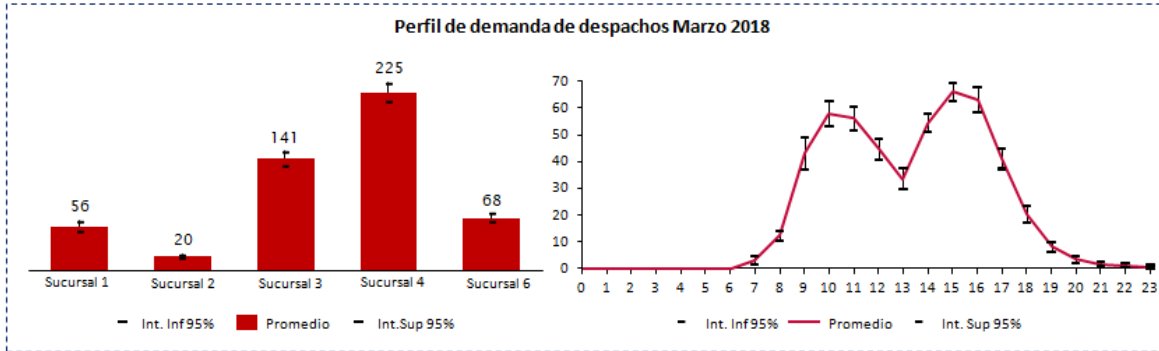


Figura 7.1: Distribución de la carga de trabajo por sucursal y horas del día

La carga laboral se muestra estable a nivel de sucursales, las cuales reciben una cantidad de despachos diariamente que no difiere demasiado. Tampoco se presentan grandes diferencias en la cantidad de demanda por tramo horario del día, es decir, diariamente, a cada hora del día, la cantidad de despachos no varió de forma significativa y la curva de carga laboral mantiene un perfil estable.

En este mes, los expertos promediaron 70% de puntualidad, la cual se calcula como el número de despachos que llegaron antes de acabar la hora solicitada por el cliente o hasta 15 minutos después, con respecto al total de despachos.

7.2 Calibración del esquema

Dentro del esquema es necesario definir parámetros que logren resultados eficientes en términos de costos y puntualidad. Gracias a un proceso de calibración, se determinó que el rango de valorizaciones para un minuto de atraso debe estar entre \$500 y \$5.000 pesos, ya que bajo esta cota el esquema se vuelve insensible a los atrasos y sobre ella se vuelven insensibles al costo, para esta instancia en particular. Este proceso resultó a partir de la iteración con valores que van desde \$0 a \$100.000 pesos por minuto de atraso, considerando esta penalización por cada minuto adicional a los 15 minutos después de la hora solicitada por los clientes.

En la figura 7.2 se presenta un gráfico de puntualidad y costos totales ante 4 diferentes escenarios de valorizaciones de un minuto de atraso. En la figura se utilizan los valores \$500, \$1.000, \$2.000 y \$5.000 pesos como valores de un minuto de atraso. En el eje vertical se indica la puntualidad, mientras que en el eje horizontal se presentan los costos, a los cuales se les ha restado una constante arbitraria, para mantener los costos reales de la empresa en reserva. La figura busca clarificar el impacto de la valorización del minuto de atraso, con respecto a los dos indicadores fundamentales: la puntualidad y los costos de producción.

Como era posible de esperar, la puntualidad y los costos aumentan a mayor valor de un minuto de atraso y decrecen a menor valorización.

Existe una gran diferencia en términos de puntualidad si se calibra el esquema en \$500 o \$5.000 pesos. Cuando la valorización de un minuto es \$500 pesos, se consigue una puntualidad de de 74%, la cual es cercana a la obtenida por los expertos, en la operación real. Si la valorización de un minuto de atraso es \$1.000 pesos, se obtiene una puntualidad de 92%, mejorando con ello 18 puntos con respecto a la puntualidad cuando el minuto de atraso se valoriza en \$0 pesos, aunque por otra parte aumenta \$23.000 pesos por punto de puntualidad ganado, totalizando \$414.000 de costo adicional. Cuando la valorización de un minuto de atraso es \$2.000, se obtiene una puntualidad de 97%, es decir, aumenta 5 puntos respectos de la puntualidad obtenida con una valorización de \$1.000, pero aumentan los costos en \$134.000 pesos por punto de puntualidad, totalizando \$670.000 pesos de aumento de costo. Finalmente cuando la valorización de un minuto de atraso es \$10.000, se obtiene una puntualidad de 98%, con un valor de \$906.000 pesos por el punto adicional de puntualidad.

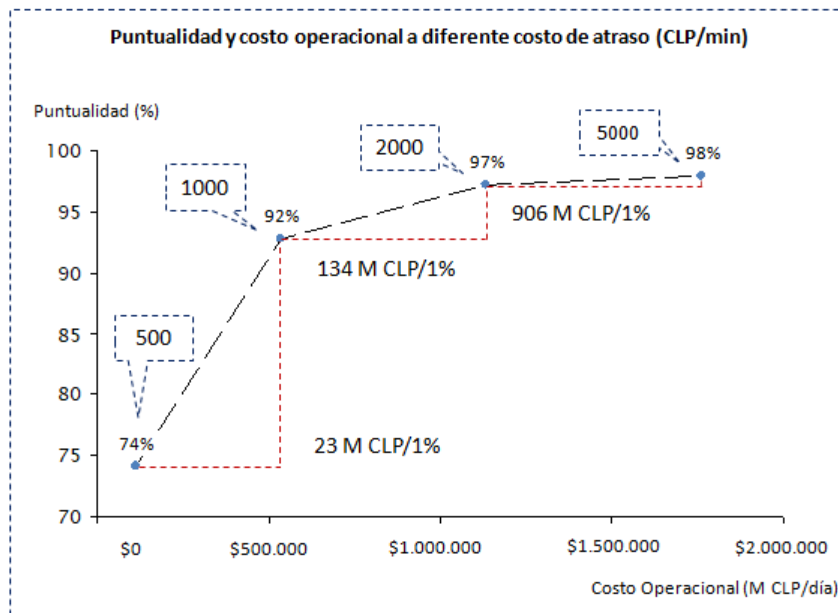


Figura 7.2: Puntualidad y costo de operación según valorización de un minuto de atraso

Por opinión de los expertos de la empresa, el valor ideal del minuto de atraso es \$1.000, ya que se obtiene una puntualidad superior al 90%, a un costo que se está dispuesto a asumir, con respecto al obtenido con una valorización de \$500 pesos por minuto de atraso, mientras que con una valorización de \$2.000 pesos por minuto de atraso aumentan fuertemente los costos y no se está dispuesto a asumir esta diferencia.

Para efectos de estudio, se continuará presentando los indicadores para los caso de \$1.000 y \$5.000 por minuto de atraso. Este último, el que valoriza un minuto de atraso en \$5.000, se considera igualmente, dado que presenta niveles de puntualidad cercanos al 100%.

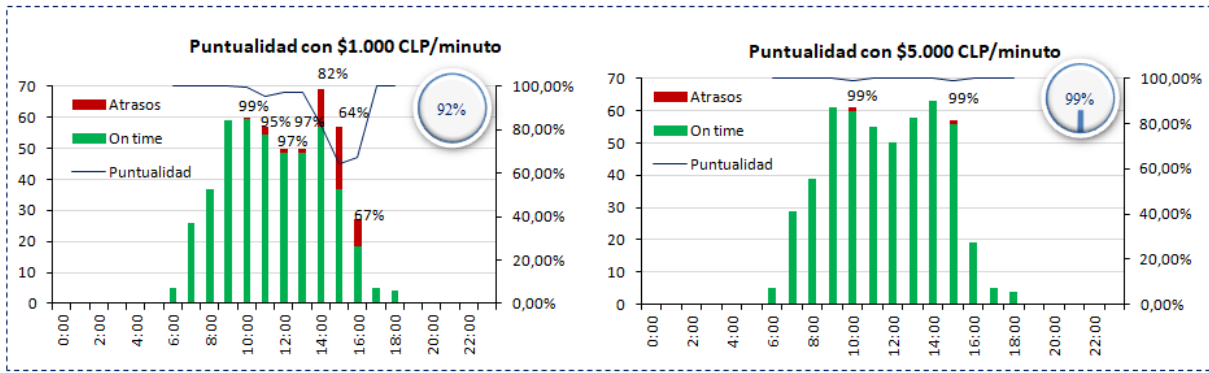


Figura 7.3: Perfil de puntualidad según tramos horarios

Es interesante analizar en que horario principalmente se presentan las grandes diferencias de puntualidad. Como indica la figura 7.3, cuando el minuto de atraso se valoriza en \$1.000, los atrasos están presentes entre las 10 a las 18 hrs. Sin embargo, la mayor parte de los atrasos, se concentran entre las 14 y 16 hrs, lo que se explica porque es en este horario donde se concentra la mayor parte de la demanda. Si bien, entre las 9 y 11 hrs se presenta una demanda similar a la que existe entre las 14 y 16 hrs, se explica la diferencia porque en el primer caso, gran cantidad de los vehículos inician su jornada y no están sujetos a la espera propia de acabar un despacho anterior, mientras que en el segundo caso se está en régimen de operación.

Notar que la puntualidad permanece cercana al 100% el resto del día. Cuando el minuto se valoriza en \$5.000, la puntualidad permanece cercana al 100% a lo largo de todo el día, salvo una baja cantidad de despachos a las 10 y 15 hrs.

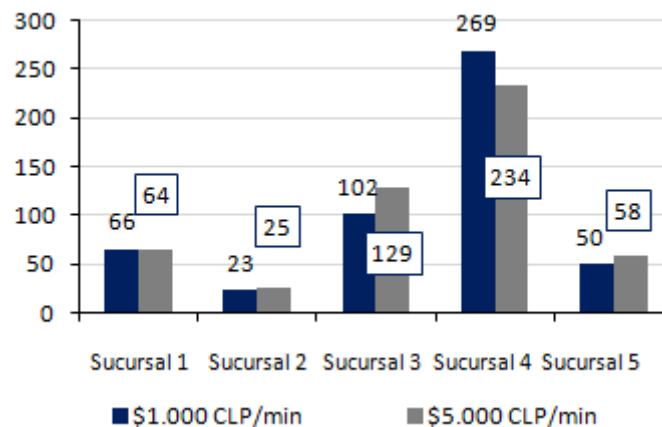


Figura 7.4: Número de despachos asignados en ADH según el valor dado a un minuto de atraso

Respecto de la distribución de despachos, cuando la valorización de un minuto de atraso es \$1.000 pesos, ADH concentra los despachos en las sucursales que presentan menor costo de operación, en particular la sucursal 4 es quien se ve mayormente sobrecargada, ya que ésta realiza 269 despachos promedio diario, correspondiente al 53% de los despachos, seguida de la sucursal 3, que realiza el 20%. Mientras que si la valorización de un minuto de atraso es \$5.000, ADH presenta una mayor disposición a utilizar otras sucursales, ya que prioriza el llegar menos cantidad de minutos atrasado. La sucursal 4 es quien se ve mayormente descongestiona, dado disminuye de 269 a 234 despachos promedio diario, aunque esto sigue significando una gran parte de los despachos, en concreto el 46%. Sin embargo, la sucursal la sucursal 3, que permanece como la segunda sucursal con mayor cantidad de despachos, realiza el 25%, lo que acerca un poco las cifras. Como es posible observar en la figura 7.4, no solo la sucursal 3 aumenta la cantidad de despachos que realiza, sino que lo hacen también la sucursal 2 y 6, mientras que la sucursal 1 disminuye sus despachos, al igual que la sucursal 4, como se mencionó anteriormente.

Finalmente, los expertos de la Empresa Melón Hormigones, considerando los análisis expuestos en esta investigación, recomiendan utilizar el costo de un minuto de atraso en \$1.000.

7.3 Diferencias respecto de los resultados de la operación real

En la instancia presentada, el esquema logra 92% de puntualidad promedio, con una valorización del minuto de atraso de \$1.000, mientras que los expertos lograron 70% promedio, lo que a juicio de ellos se debe a la incapacidad de procesar todas las variables de forma instantánea. El esquema a su vez logra disminuir \$984.000 en promedio de costo de producción y \$182.000 en costos de transporte, lo que totaliza \$1.166.000 de disminución de costos operacionales diarios.

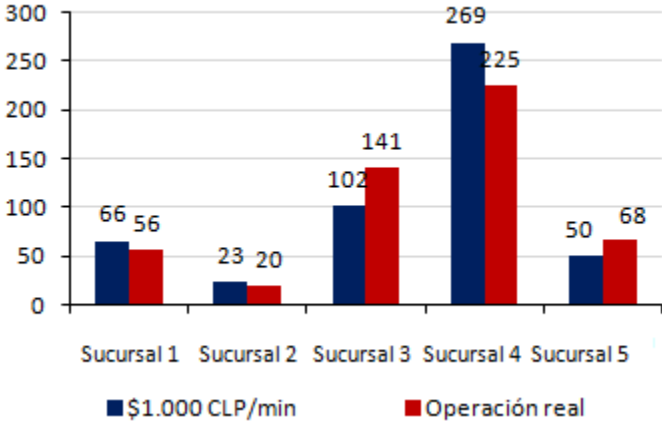


Figura 7.5: Número de despachos asignados en la operación real y en ADH a sucursales

Como se muestra en la figura 7.5, la distribución de despachos en las sucursales por parte de ADH, si bien no es igual a la real, no difiere mayormente, en términos de que el orden de las sucursales con mayor cantidad de despachos asignados se mantiene. Respecto de la operación real, realizada por los expertos, en la sucursal 1 ADH aumenta 10 despachos, pasando de 56 a 66 despachos, lo que a su vez implica un aumento de un 18% de carga laboral para esa sucursal. En el caso de las sucursal 2, también aumenta la cantidad de despachos asignados por ADH, pasando de 20 a 23 despachos, correspondiente a un 15% de aumento. La sucursal 4 es en la que más despachos agrega ADH, pasando de 225 a 269, lo que por otra parte significa un aumento relativo menor respecto de la sucursal 1 y 2, ya que es un 6% de aumento. Por otra parte, las sucursales 3 y 6 disminuyen con ADH su cantidad de despachos, pasando de 141 a 102 despachos y de 68 a 50 despachos, disminuyendo 28 y 26%, respectivamente.

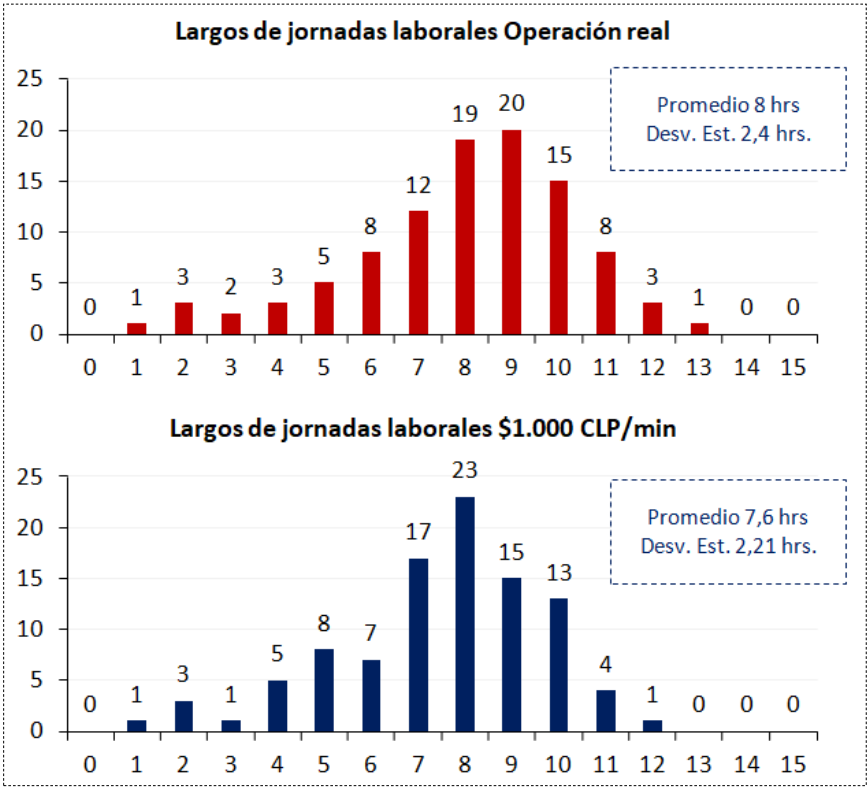


Figura 7.6: Distribución de largos de jornadas laborales reales y de ADH medido en horas

En la instancia, los turnos de entrada de los vehículos mezcladores, tanto para el caso de la operación real como para ADH, fueron definidos por Melón Hormigones. Por política interna y contractual de la empresa, no se cita a los conductores, sino que a los vehículos, por lo que para efectos prácticos no tienen una jornada máxima de trabajo. Si bien lo anterior, espontáneamente ninguna jornada supera las 13 horas de trabajo continuo en promedio, tanto en la operación real como en ADH.

La jornada laboral más corta, en promedio, en la operación real y ADH, es una hora. Mientras que la más larga es 13 horas en la operación real y 12 horas en ADH. En promedio se tiene que las jornadas laborales reales en la operación duran 8 horas, mientras que las jornadas laborales en ADH duran 7,6 horas, lo que implica en promedio un 5% menos de jornada laboral. Por otra parte, la desviación estándar también disminuye en ADH con respecto a la operación, de 2,40 a 2,21 horas promedio diario. Se puede determinar que ADH logra jornadas laborales de los vehículos más cortas en promedio y equipara un poco más el largo de las éstas.

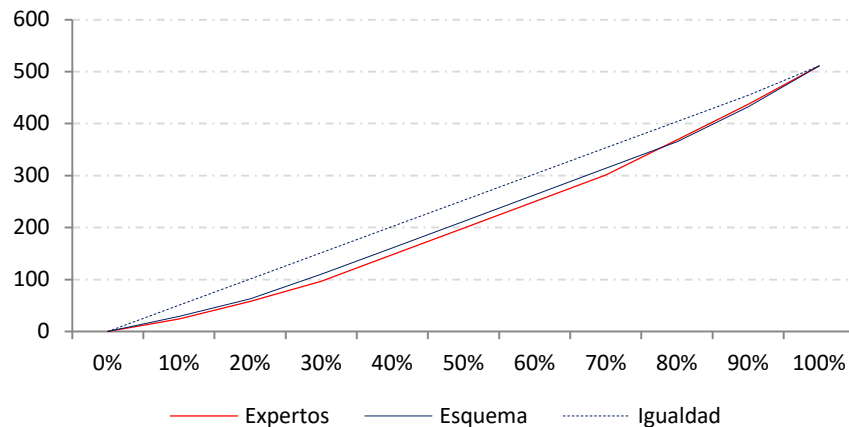


Figura 7.7: Curva de Lorenz de la distribución de carga laboral entre operadores de vehículos

Como se mencionó anteriormente, el esquema presenta una disminución de costos de operación, aumento de puntualidad y disminución de jornadas laborales de los vehículos. Adicional a ello, el esquema presenta otro indicador favorable: mejora la distribución de carga laboral entre vehículos mezcladores. Una mejoría en términos de distribución de carga significa que el número de despachos asignados a cada vehículo, presenta menor variabilidad entre vehículos. Las asignaciones de despachos a vehículos mezcladores en la operación diaria están sujetas al criterio de los expertos y debido a la gran cantidad de decisiones en paralelo no se incorporan criterios de equidad.

En la figura 7.5 se presenta la Curva de Lorenz para la distribución de carga laboral entre operadores de vehículos mezcladores. La Curva de Lorenz es una representación gráfica comúnmente utilizada para plasmar la igualdad entre distintos elementos en estudio. Un caso particular es el uso de la Curva de Lorenz para calcular el índice Gini, que es la métrica internacional para el cálculo de la equidad en la distribución de ingresos en un país. En el eje horizontal se encuentra la distribución acumulada del número de vehículos mezcladores considerados en cada punto de la muestra, ordenados de menor número de despachos promedio a mayor. En el eje vertical, se presenta la suma de despachos de todos los vehículos mezcladores considerados. En caso de existir igual cantidad de despachos entre los vehículos mezcladores se dibujaría una recta. Como indica la figura, el esquema

heurístico entrega un mayor nivel de igualdad de despachos asignados por vehículo que la operación de los expertos, dado que su curva se acerca más a la curva de igualdad.

7.4 Utilización de los recursos

Con ADH, considerando que se valoriza un minuto de atraso en \$1.0000, en la instancia presentada, se logra un alto nivel de puntualidad, en concreto 92%. La puntualidad permanece cercana al 100% a lo largo de gran parte de la jornada laboral y solo ve una gran merma entre las 14 y 16 hrs. Es en ese horario justamente donde los dos recursos críticos de la operación encuentran sus niveles máximos de utilización promedio, como muestra la figura 7.8.

El principal recurso escaso en la instancia son los vehículos mezcladores, lo que se alinea con el análisis de la operación real, desarrollada en el capítulo 4.

La jornada inicia a las 6:00 hrs, en la cual se tiene bajo nivel de demanda y los depósitos no se presentan como un recurso escaso, no así los vehículos mezcladores que si son escasos, debido a que la citación está adecuada a las primeras solicitudes del día.

Entre las 7:00 y 9:00 hrs se mantiene la tónica de baja utilización de depósitos y alta utilización de vehículos, principalmente debido a la citación.

Desde las 9:00 hasta las 11:00 se mantienen altos niveles de utilización de vehículos y la utilización más alta de depósitos durante el día. Esto se debe a que la operación se encuentra en régimen, gran parte de los vehículos están en su primer despacho y aún no comienza la vuelta masiva de vehículos de su primer despacho.

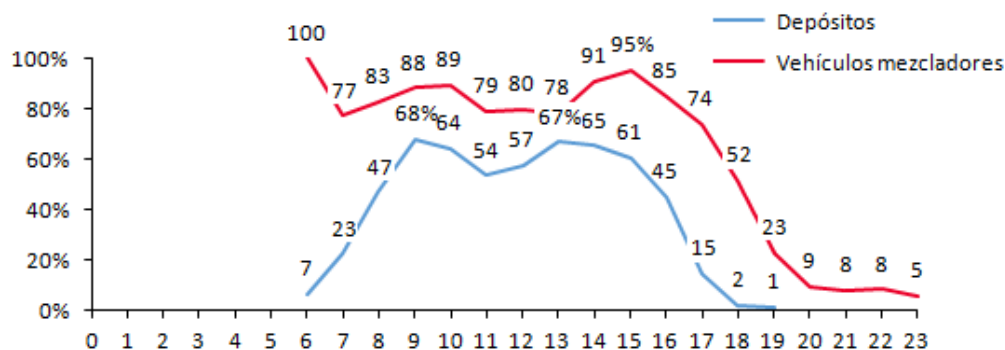


Figura 7.8: Utilización de recursos en ADH

Entre las 11:00 y 14:00 horas disminuye la utilización de ambos recursos, debido a que se dispone de todos los vehículos citados y gran parte de ellos han regresado del primer despacho e inician el segundo o están en él. Además que disminuye la demanda de

despachos, debido a la hora de almuerzo de las obras. La hora de almuerzo de la industria de la construcción es a partir de las 13:00 hrs, por tanto Melón Hormigones lo hace a partir de las 12:00 hrs, debido a que se desfasa en una hora, aproximadamente, un despacho desde su producción hasta su entrega.

En el intervalo de las 14:00 y 16:00 hrs, es cuando mayor utilización tiene los vehículos y justamente es cuando existe mayor cantidad de despachos con entregas impuntuales. Después de las 16:00 los recursos disminuyen gradualmente su utilización, hasta finalmente entregar todos los despachos.

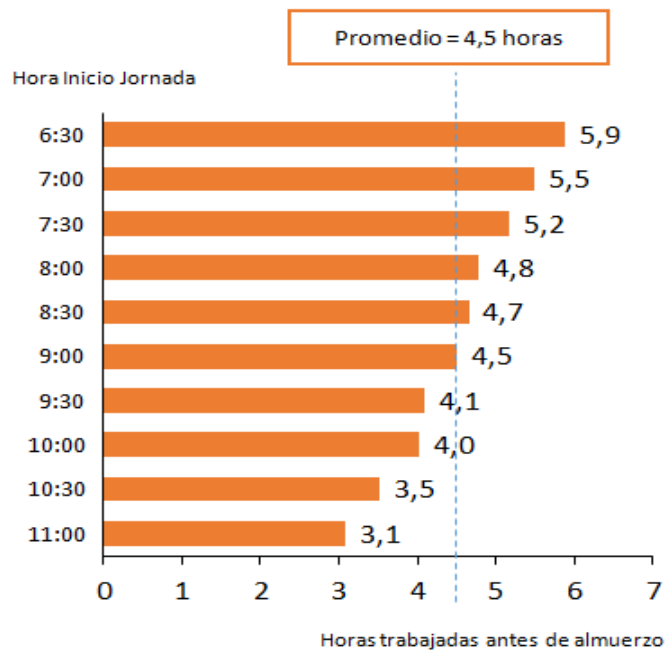


Figura 7.9: Horas de trabajo antes de hora de almuerzo en ADH

Como se mencionó anteriormente, ADH utiliza la citación de los vehículos mezcladores, definida por la empresa Melón Hormigones. En la empresa no existe un control exhaustivo de la hora en que los conductores almuerzan ni la duración de su almuerzo, pero si se sabe que espontáneamente estos lo hacen en los momentos en que baja la demanda, para no afectar la operación, es decir entre las 12 y 14 hrs. Por su parte ADH exige un orden mejor definido para este proceso. Se consideró en las instancias, que la citación era igual a la definida por los expertos de Melón Hormigones en la realidad. Para el caso de la hora de almuerzo, se separó en 3 grupos a los conductores, según su hora de entrada, el primer grupo almuerza a las 12:00, el segundo a las 12:40 y el tercero a las 13:20 hrs. Los almuerzos de AHD fueron considerados con largo de 50 minutos. Luego, para cada conductor que llegaba de un despacho después de las 12:00 y pertenecía al primer grupo, se le enviaba a almorzar durante 50 minutos.

Los resultados, en figura 7.9, indican que en promedio los conductores trabajan 4,5 horas antes de ir a almorzar. Los conductores que más horas trabajan antes de almorzar son aquellos que entran más temprano, con una espera promedio de 5,9 horas. Por contraparte, los conductores que menos horas trabajan, antes de almorzar, son los que entran más tarde, con 3,1 horas promedio. El análisis nos indica que los primeros conductores almorzando, lo hacen a partir de las 12:30 horas, mientras que los últimos lo hacen a partir de las 14:10 hrs, lo que mantiene la distribución de horarios con respecto a la operación real, pero con un mayor nivel de planificación.

7.4 Resumen de hallazgos

Como se presentó en este capítulo, los despachos durante el mes de la operación utilizado como instancia, fue de alta demanda, con más de 500 despachos en promedio. Por otra parte, la concentración de despachos en horarios del día, distribuye similar a lo largo de los días, dado que los horarios de alta y baja demanda durante el día son claramente identificables, ya que el intervalo de confianza con respecto a su promedio no es muy grande.

Se lograron resultados positivos respecto del desempeño de ADH, ya que obtiene mejoras importantes respecto de los costos de operación, puntualidad y equidad. Se obtuvo un valor para la valorización de un minuto de atraso, y este es \$1.000 pesos, ya que logra equilibrio entre mejorías de costo y puntualidad.

Por otra parte, ADH aumenta la carga laboral de las sucursales que actualmente reciben mayor cantidad despachos y disminuye la carga laboral de las sucursales a los que los expertos ya asignaban menor cantidad de despachos. Esto se puede explicar por un uso más inteligente de la red, lo que permite un mayor uso de las sucursales más eficientes. Como último punto, se tiene una distribución de carga laboral más equitativa entre vehículos, con largos de jornada más cortos y parecidos, además de una distribución de horarios de almuerzo planificados, pero similares a los surgidos espontáneamente en la operación. A todo lo anterior, se adiciona que debido a la automatización del proceso de asignación de despachos a depósitos y vehículos mezcladores, se produce un menor desgaste para los tomadores de decisión, en la operación diaria.

8. Conclusión

En este capítulo se presentan las principales conclusiones a partir de los resultados y el aprendizaje obtenido en la investigación. Además, se identifican futuras líneas de estudio que surgen de esta investigación a nivel académico y aplicado.

En esta tesis se trató el problema de asignación y despacho de hormigón con ventanas de tiempo. Como criterio de optimización se consideró el costo de producción y transporte y se incluyó una penalización por el tiempo total de atraso. El objetivo principal era responder para cada despacho, en qué depósito producirlo y despacharlo y con cuál vehículo transportarlo, considerando la restricción del secuenciamiento de vehículos en un tren de despachos.

Esta investigación tiene un enfoque aplicado, en la que se aporta una nueva formulación del problema y se plantea una forma de solución que no existía en la literatura. El algoritmo es aplicado a un caso real, obteniéndose buenos resultados y demostrando que es un enfoque que puede ser utilizado en la práctica.

Se implementó un esquema heurístico de construcción, al que se introdujo un enfoque GRASP en la elección de vehículo y depósito de producción, lo que permitió buscar en profundidad y amplitud una solución. El enfoque fue validado utilizando instancias con más de 500 despachos y 170 vehículos mezcladores en promedio, construidos a partir de operación de la empresa durante marzo de 2018.

Se puede establecer que es posible realizar una asignación de manera eficiente a través de una heurística de construcción GRASP, que satisfaga instancias reales de gran tamaño. Los resultados obtenidos indican que la asignación mediante la heurística no solo mejora los resultados obtenidos por expertos en términos de costos de producción y despacho, sino que mejoran la puntualidad en la entrega de productos y equilibran la carga laboral entre los vehículos.

8.2 Trabajos futuros

A partir del trabajo expuesto es posible identificar las siguientes líneas de investigación futura:

- Inclusión de la incertidumbre en la demanda: se plantea que la demanda de pedidos y/o despachos puede ser considerada estocástica, de forma que se ajuste de mejor forma a los dinamismos de la industria, dada la alta tasa de cancelación y de solicitudes de despachos de último momento. Es posible en una línea similar, considerar el ausentismo de los operadores de vehículos mezcladores como una variable aleatoria. También, el tiempo que pasa un camión mezclador en una obra, para así adicionar la sobreestadía como una potencial variable de impacto.

- Modelar de forma dinámica el problema: en la práctica, los tiempos de transporte en una red congestionada como la de Santiago son inciertos. Más aún, ocasionalmente ocurren incidentes que modifican notablemente las condiciones de tránsito. Se visualizan oportunidades a través de un modelamiento similar pero que incluya un sistema de recalcular ante contingencias.
- Rearmado de trenes: en esta investigación en particular se consideró que si bien los despachos de un tren tenían conexiones entre ellos, la cantidad de m^3 en cada uno es un dato ya definido en el problema que se estudió. Considerar también como parte de las decisiones las cargas de los camiones del tren, ofrece potencialidades de optimización para un armado inteligente de despachos, considerando que los m^3 influyen en los tiempos de carga de los despachos.
- Flota no homogénea: se plantea una línea de investigación en que los vehículos mezcladores pudieran ser de diversas capacidades en m^3 .
- Turnos de citación de vehículos: los horarios de citación de los vehículos son parte importante de cómo finalmente se estructuran las distribuciones de despacho.
- Ruteo de vehículos: los últimos desarrollos en la industria de los vehículos mezcladores han permitido que no solo existan despachos de un depósito a una obra, sino que puedan existir rutas de reparto con más de un destino, lo que involucra una nueva línea de investigación. En Chile, actualmente, solo unas pocas hormigoneras utilizan este tipo de tecnología y no representan una gran cantidad dentro de su flota.

BIBLIOGRAFIA

Dantzig, G., Fulkerson, D., Johnson, S. (1954). Solution of a large traveling salesman problem, *Journal Operations Research*, 2, pp. 393–410.

Smith, W. (1956), Various optimizer for single stage production. *Naval Research Logistic Quarterly*, 3 (1-2), pp. 59-66.

Balinski, M.L., Quandt, R.E. (1964). On an integer program for a delivery problem, *Operation Research*, 12 (2), pp. 300-304.

Gillet, B., Johnson, G. (1976). Multi-terminal vehicle dispatch algorithm. *Omega*, 4, pp. 711–718.

Graham, R., Lawler, E., Lenstra, J., Rinnooy Kay, A. (1979). Deterministic sequencing and scheduling: A survey, *Annals of Discrete Mathematics*, 5, 287–326.

Solomon, M. (1987), Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, 35, pp. 254-265.

Feo, T., Resende, M. (1995). Greedy Randomized Adaptive Search Procedures, *Journal Global Optimization*, 6, pp. 109-134.

Tommelein, I.D., Li, A.E.Y., (1999). Just-in-time concrete delivery: mapping alternative for vertical supply chain integration. *Proceedings of the Seventh Annual Conference of the International Group for Lean Construction IGLC-7*, pp. 97-108.

Feng, C.-W., Wu, H.-T., (2000). Using genetic algorithms to optimize the dispatching schedule of RMC cars. *Proceedings of the 17th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, pp. 927-932.

Durbin, M.T. (2003). *The Dance of the Thirty-Ton Trucks: Demand Dispatching in a Dynamic Environment*. Rep. Tesis PhD. George Mason University.

Feng, C.W., Cheng, T.M., Wu, H.T. (2004). Optimizing the schedule of dispatching RMC trucks through genetic algorithms. *Automation in Construction*, 13 (3), pp. 327-340.

Matsinis, N.F. (2004). Towards a decision support system for the ready concrete distribution system: A case of a greek company. *European Journal of Operational Research*, 152, pp. 487-499.

Ortegón, E., Pacheco, J.F., Prieto, A. (2005). Metodología del marco lógico para la planificación, seguimiento y la evaluación de proyectos y programas. CEPAL.

Feng, C.W., Wu, H.T. (2006). Integration fm GA and CYCLONE to optimize the schedule of dispatching RMC trucks. *Automation in Construction*, 15, pp. 186-199.

Naso, D., Surico, M., Turchiano, B., Kaymak, U. (2007). Genetic algorithms for supply-chain scheduling: a case study in the distribution of ready-mixed concrete, *European Journal Operation Research*, 177, pp. 2069–2099.

- Yan, S., Lai, W. (2007). An optimal scheduling model for ready mixed concrete supply with overtime considerations, *Automation in Construction*, 16, pp. 734–744.
- Yan, S., Lai, W., Chen, M. (2008). Production scheduling and truck dispatching of ready mixed concrete. *Transportation Research*, E44, pp. 164-179.
- Asbach, L., Dorndorf, U., Pesch, E. (2009). Analysis, modeling and solution of the concrete delivery problem”. *European Journal of Operation Research*, 193, pp. 820-835.
- Ebensperger, M., Giesen, R., Fernández, J. (2009). Una formulación para el problema de ruteo de vehículos con tiempo de viaje dependientes del tiempo para la actualización de rutas con información en tiempo real, *Repositorio de Tesis Mg. Cs. Ingeniería U. Católica de Chile*.
- Schmid, V., Doemer, K.F., Hartl, R.F., Savelsbergh, M.W.P., Stoecher, W. (2009). A hybrid solution approach for ready-mixed concrete delivery. *Transportation Science*.
- Schmid, V., Doemer, K.F., Hartl, R.F., Savelsbergh, M.W.P., Salazar-González, J.J. (2010). Hybridization of very large neighborhood search for ready-mixed concrete delivery problems. *Computers & Operations Research*, vol. 37, no. 3, pp. 559-574.
- Hertz, A. (2011). Integer linear programming models for a cement delivery problem. *Decision Support & Operational Research*.
- Misir, M., Vancroonenburg, W., Verbeeck, K. (2011). A selection hyper-heuristic for scheduling deliveries of ready-mixed concrete. *The IX Metaheuristic International Conference S1-30-1*.
- Park, M., Kim, W.Y., Lee, H.S., Han, S. (2011). Supply chain model for ready mixed concrete. *Automation in Construction*, vol. 20, pp. 44-55.
- Yan, S., Lin, H.C., Jiang, X.Y. (2012). A planning model with a solution algorithm for ready mixed concrete production and truck dispatching under stochastic travel times. *Engineering Optimization*, vol. 44, pp. 427-447.
- Kinable, J., Wauters, T., Berghe, G. V. (2014). The concrete delivery problem, *Computers & Operations Research*, 48, pp. 53-68.
- Maghrebi, M., Rey, D., Waller, S.T., Sammut, C. (2014). Reducing the number of decision variables in ready mixed concrete for optimally solving small instances in a practical time. *Proceedings of the CSCE 2014 General Conference, Halifax*.
- Biruk, S. (2015), Dispatching concrete trucks using simulation method. *Budowlanych I Architektura*, 14 (2), pp. 5-10.
- Maghrebi, M., Waller, S.T., Sammut, C. (2015). Optimality gap of expert’s decisions in concrete delivery dispatching. *Journal of Building Engineering*, 12, pp. 17-23.

Banco Central (2018)

[Link:https://si3.bcentral.cl/estadisticas/Principal1/Informes/anuarioCCNN/index_anuario_CCNN_2017.html?chapterIdx=-1&curSubCat=-1](https://si3.bcentral.cl/estadisticas/Principal1/Informes/anuarioCCNN/index_anuario_CCNN_2017.html?chapterIdx=-1&curSubCat=-1)