



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

**VALORIZACIÓN MONETARIA DEL MANEJO DE LAS VENTANAS DE TIEMPO EN
UN PROBLEMA DE ATENCIÓN DE REQUERIMIENTOS.**

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN GESTIÓN DE OPERACIONES
MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

JOSÉ IGNACIO PÉREZ PAREDES

PROFESOR GUÍA:
ANDRÉS WEINTRAUB POHORILLE

PROFESOR COGUÍA
CRISTIÁN CORTÉS CARILLO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
EDUARDO MORENO ARAYA
FERNANDO ORDOÑEZ PIZARRO

SANTIAGO DE CHILE
2017

VALORIZACIÓN MONETARIA DEL MANEJO DE LAS VENTANAS DE TIEMPO EN UN PROBLEMA DE ATENCIÓN DE REQUERIMIENTOS.

Las empresas que deben trasladar su flota de un lugar a otro para atender los requerimientos de sus clientes, ya sea de bienes o servicios, buscan desarrollar una logística orientada a entregar una buena calidad de servicio de la forma más eficiente posible. De esta manera deben responder la pregunta de qué recursos usar y cómo utilizarlos. Es por lo anterior que se ha buscado dar respuesta a estas preguntas planteando diferentes modelos de ruteo y utilizándolos para definir el tamaño óptimo de una determinada flota. Considerando siempre, parámetros invariantes, tales como la distancia entre los clientes o la amplitud de las ventanas de tiempo para atenderlos.

La orientación de este trabajo es analizar cómo se modifican los resultados de ruteo óptimo y diseño de flota al tener la posibilidad de variar la amplitud de las ventanas de tiempo de determinados clientes en un problema de atención de requerimiento con una flota de técnicos. De esta forma, el objetivo general de la investigación consiste en comparar los costos de diferentes configuraciones de operación, una con un número de técnicos y magnitud de ventanas de tiempo determinados y otras con una menor flota pero con ventanas de tiempo más amplias para algunos clientes. De esta forma, si el costo de una configuración con un menor número de técnicos es menor y alcanza la misma calidad de servicio, es posible entonces generar un mecanismo de compensaciones para aquellos clientes que aceptaron relajar sus ventanas de tiempo.

Para poder desarrollar el objetivo de la investigación se analiza un problema de atención de requerimiento dentro de la ciudad de Santiago de Chile. En la determinación del ruteo, se utiliza un modelo estático, es decir, donde se conocen todos los requerimientos al comienzo de cada día, y donde se utiliza la técnica de generación de columnas *branch and price*, para llegar al resultado óptimo. Por otro lado, para realizar la comparación de costos de las diferentes configuraciones y escenarios se utiliza la simulación como herramienta.

Los resultados muestran que al relajar las ventanas de tiempo a un determinado número de clientes, es posible lograr la misma calidad de servicio que con un aumento marginal de la flota (8%), logrando ahorrar entre un 2,5% y 5% de los costos operativos. Este ahorro representa los recursos disponibles para entregar incentivos, descuentos, a los clientes para que acepten ser atendidos con menor urgencia. En este caso el descuento que se puede ofrecer es de hasta \$2.500 por servicio, que puede representar hasta el 15% del costo unitario del servicio.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar agradezco a CONICYT y al Instituto de Sistemas Complejos por su apoyo durante todo este trabajo investigativo.

Agradezco también a mis padres, Ramón y Patricia, por su apoyo y confianza incondicional y por mostrarme siempre los caminos dejándome en claro que estarían siempre conmigo, independiente del que decidiera recorrer.

Agradezco a mi hermana y mejor amiga Patricia, por estar siempre a mi lado, en las buenas y las malas. A mis abuelos, Orlando y Julia, por el amor puro que siempre me han entregado.

Agradezco a Manuela, mi compañera de vida, mi motor, mi fan, mi soporte, mi todo. Sin duda todo es más fácil y bello cuando transitamos juntos por los senderos de esta vida. Gracias por levantarme siempre, por darme confianza y fuerzas en todo momento. Gracias por impulsarme a ser mejor.

Agradezco a los Márquez Dogliotti, familia que gané mientras desarrollaba este trabajo y que siempre me impulsaron a cerrar esta maravillosa etapa.

Agradezco a todos mis amigos, los de la vida, los del básquet, los del fútbol, por las miles de alegrías que compartimos. A todos mis profesores, entrenadores, por guiarme siempre y mostrarme que las cosas se logran con esfuerzo.

Finalmente agradezco a mis profesores guía, por su paciencia y orientación durante el desarrollo de esta Tesis.

GRACIAS.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	OBJETIVOS	2
1.1.1	Objetivo General	2
1.1.2	Objetivos Específicos	2
1.2	ESTRUCTURA DEL TRABAJO	4
1.3	APOYOS INSTITUCIONALES	4
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	RUTEO DE VEHÍCULOS	5
2.2	DISEÑO DE FLOTA	9
3	PROBLEMA A RESOLVER	10
3.1	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA	10
3.2	CARACTERÍSTICAS DEL PROBLEMA Y ESTADÍSTICAS	11
3.2.1	Zona geográfica	11
3.2.2	Caracterización de la demanda	15
3.2.3	Costos	20
3.3	DEFINICIÓN DEL MECANISMO DE OBTENCIÓN DE RESULTADOS	21
3.4	ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN	23
3.4.1	Construcción de un prototipo	23
3.4.2	Análisis del prototipo	23
3.4.3	Desarrollo problema real	23
3.4.4	Obtención y análisis de resultados	24
4	RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA, CASO REAL	25
4.1	CASO DEMANDA PROMEDIO	25
4.1.1	Características	25
4.1.2	Instancias	29
4.1.4	Resultados	31
4.1.5	Análisis de Resultados	35
4.1.6	Generación de un mecanismo de compensaciones	41
4.2	ANÁLISIS DE OTRAS SEMANAS PARA CASOS EXITOSOS	48
4.2.1	Semana baja demanda	48
4.2.2	Semana alta demanda	52
4.2.3	Resumen resultados	56
4.2.4	Estrategia de compensación anual	60
5	CONCLUSIONES	62
6	BIBLIOGRAFÍA	68
7	ANEXOS	70
7.1	ANEXO A: PROTOTIPO 1.0	70
7.1.1	Características	70
7.1.2	Resultados	75
7.1.3	Análisis de resultados	76
7.2	ANEXO B: PROTOTIPO 2.0	80
7.2.1	Modificaciones al Prototipo 1.0	80
7.2.2	Resultados	82
7.2.3	Conclusiones prototipos	88
7.3	ANEXO C: RESULTADOS CASO REAL DEMANDA PROMEDIO	90
7.3.1	Análisis de otros factores	90

7.3.2	Análisis considerando sólo el tiempo de servicio para la calidad de servicio.....	92
7.3.3	Tomando en cuenta un polinomio entre a y b.....	93
7.3.4	Análisis de rutas.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Zonas de estudio	13
Tabla 2 Centroides Zona de Estudio.....	14
Tabla 3 Demanda diaria promedio	17
Tabla 4 Distribución diaria de la demanda.....	25
Tabla 5 Distribución de la demanda por hora.....	26
Tabla 6 Demanda por cliente/zona	27
Tabla 7 Llamados por tipo de servicio	27
Tabla 8 Instancias estudiadas caso demanda promedio.....	30
Tabla 9 Resultados Caso Real, demanda media	31
Tabla 10 Ahorro semanal vs instancia de 26 técnicos con demanda media.....	35
Tabla 11 Ahorro semanal vs instancia con 27 técnicos y demanda media.....	36
Tabla 12 Resultados casos exitosos comparando con 26 técnicos, demanda media.....	38
Tabla 13 Resultados casos exitosos comparando con 27 técnicos y demanda media.....	40
Tabla 14 Ahorro y cantidad de clientes y ventanas relajadas para cada instancia, demanda media	43
Tabla 15 Resultados caso exitoso comparando con 26 técnicos y relajando a 400 minutos.....	45
Tabla 16 Clientes con mayor número de llamados caso demanda media	46
Tabla 17 Comparación estrategias de compensación	46
Tabla 18 Distribución diaria de la demanda	48
Tabla 19 Top 10 de clientes con mayor número de llamados	49
Tabla 20 Resultados casos exitosos semana baja demanda.....	51
Tabla 21 Distribución diaria de la demanda	52
Tabla 22 Top 10 de clientes con mayor número de llamados	53
Tabla 23 Resultados casos exitosos semana alta demanda.....	54
Tabla 24 Resumen semanal de relajar las ventanas a 400 minutos v/s tener un técnico más.	56
Tabla 25 Resumen comparación de relajar las ventanas a 600 minutos v/s tener un técnico más.....	57
Tabla 26 Resumen comparación de relajar las ventanas a 400 minutos v/s tener dos técnico más.	57
Tabla 27 Resumen comparación de relajar las ventanas a 600 minutos v/s tener dos técnico más.	58
Tabla 28 Resumen estrategia planteadas	58
Tabla 29 Resumen comparación de relajar las ventanas a 600 minutos v/s tener un técnico más.....	60
Tabla 30 resultado mensual - 25 técnicos y 2 clientes con ventanas relajadas a 600 minutos.....	60
Tabla 31 Test Chi Squared para el nivel de demanda mensual	60
Tabla 32 Comportamiento anual del sistema	61
Tabla 33 Costos por llamado	61
Tabla 34 Distribución Diaria de la demanda	71
Tabla 35 Distribución de la demanda por hora.....	71
Tabla 36 Distribución de la demanda por cliente/comuna	72
Tabla 37 Llamados por tipo de cliente	73
Tabla 38 Llamados por tipo de máquina	73
Tabla 39 Matriz de distancias.....	74
Tabla 40 Resultados Prototipo 1.0.....	75
Tabla 41 Comparación de resultados.....	77
Tabla 42 Comparación Ejemplo.....	79

Tabla 43 Resultados Prototipo 2.0.....	82
Tabla 44 Costos Prototipo 2.0	83
Tabla 45 Resultados según polinomio de calidad de servicio Prototipo 2.0	86
Tabla 46 Resultados FO Prototipo 2.0 b.....	87
Tabla 47 Resultados Caso Real	91
Tabla 48 Resultados casos exitosos comparando con 26 técnicos	92
Tabla 49 Resultados para diferentes definiciones de calidad de servicio y 26 técnicos	94
Tabla 50 Resultados para diferentes definiciones de calidad de servicio y 27 técnicos	95
Tabla 51 Comparación de calidad de servicio de relajar las ventanas v/s aumentar un técnico. ..	96
Tabla 52 Comparación de calidad de servicio de relajar las ventanas v/s aumentar dos técnicos.	99
Tabla 53 Resultados casos exitosos.....	101
Tabla 54 Rutas Caso Base (25 técnicos)	102
Tabla 55 Rutas con relajación de ventanas a 400 minutos a clientes 1, 3, 4, y 2.	103
Tabla 56 Rutas con 26 técnicos y sin relajación de ventanas	104

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1 Gráfica de definición de tiempos	10
Figura 2 Histograma Demanda Mensual	16
Figura 3 Histograma Demanda Diaria.....	16
Figura 4 Comportamiento diario de la demanda	17
Figura 5 Distribución geográfica de la demanda.....	18
Figura 6 Ejemplo de definición de tiempo cuando se cumple la ventana de tiempo	29
Figura 7 Ejemplo de definición de tiempos cuando no se cumple la ventana de tiempo.....	29
Figura 8 Evolución violación de ventanas de tiempo para diferentes instancias	32
Figura 9 Costos semanales caso demanda media	33
Figura 10 Evolución Costos instancias demanda media	34
Figura 11 Ahorro semanal vs instancia de 26 técnicos y demanda media	37
Figura 12 Ahorro semanal vs instancia con 27 técnicos y demanda media	39
Figura 13 Ahorro por cliente de la relajación de ventanas v/s un número mayor de técnicos	43
Figura 14 Ahorro por servicio v/s un número mayor de técnicos	45
Figura 15 Distribución de la demanda por hora	49
Figura 16 Resultados violación de ventanas + costos para instancias demanda baja	50
Figura 17 Distribución de la demanda por hora	52
Figura 18 Resultados violación de ventanas + costos caso demanda alta.....	53
Figura 19 Mapa Zonas Prototipo 1.0.....	72
Figura 22 Calidad de Servicio de las diferentes instancias	85
Figura 23 Comparación Calidad de Servicio.....	88
Figura 24 Evolución tiempo de servicio para diferentes instancias	91
Figura 25 Evolución Over Time.....	92
Figura 26 Evolución diferencia de calidad de servicio con sistema de 26 técnicos.....	96
Figura 27 Evolución diferencia de calidad de servicio con sistema de 27 técnicos.....	99

1 INTRODUCCIÓN

Muchas empresas hoy en día deben atender los requerimientos de sus clientes directamente en el lugar que éstos lo solicitan. Lo anterior es producto de, ya sea la naturaleza del negocio al que pertenecen o debido a la continua sofisticación de las necesidades de los clientes, quienes valoran cada vez más su tiempo y no están dispuestos a trasladarse a otro lugar para recibir un determinado servicio o adquirir un bien. Este tipo de operación es propia de los servicios de *delivery*, a gran y pequeña escala; por ejemplo, reparación de artefactos difíciles de transportar, servicios de emergencia de salud, instalaciones y reparaciones eléctricas, telefónicas, de televisión por cable y digital, entre otros.

Este tipo de empresas tienen el desafío de desarrollar su logística de manera de entregar la mejor calidad de servicio posible a sus clientes y optimizar sus costos. De esta manera, en el diseño es clave la decisión de cuántos recursos disponer, puesto que subestimar los recursos necesarios implicaría entregar una calidad de servicio insuficiente y sobrestimarlos se traduciría en ineficiencia y por ende en mayores costos. Otra parte del desafío, que está ligada directamente a la cantidad de recursos, es decidir cómo optimizar la utilización de estos recursos. Es así por ejemplo, cómo deben decidir cuál será el orden en el cual serán atendidos los clientes y quiénes los atenderán, es decir planificar el ruteo.

Son muchos los factores que inciden en la planificación de las rutas. Dentro de estos se pueden mencionar la ubicación de los clientes, el tiempo estimado de servicio y las ventanas de tiempo de atención, puesto que la violación de ventanas es el principal indicador de una mala calidad de servicio. Estos aspectos son parámetros conocidos antes del comienzo de la operación diaria y en su mayoría son tomados como invariables. Por ejemplo, las empresas no tienen ningún control sobre la localización de los clientes, al menos en el corto plazo. En general tampoco pueden incidir en el tiempo de servicio. Sin embargo, las empresas podrían modificar la amplitud de las ventanas de tiempo de los clientes ofreciéndoles incentivos para aquello. Estas modificaciones generarían nuevas condiciones en el problema de ruteo, por lo que en el óptimo alterarían el orden de atención de los clientes y la asignación a los servidores o técnicos. Dado que al ampliar las ventanas de tiempo se obtiene un problema más relajado, existen mayores posibilidades al asignar las rutas por lo que el óptimo de este nuevo problema puede presentar una mejor calidad de servicio, e incluso que permitir generar un ahorro de recursos. Un ejemplo de esto es que dado las nuevas rutas, la espera de los clientes podría ser menor en promedio y/o la distancia de la ruta podría disminuir, disminuyendo también los costos. Dado lo anterior, se hace interesante estudiar la posibilidad de modificar las ventanas de tiempo de algunos clientes y calcular el ahorro generado por esta medida ya que será una cota superior de los incentivos mencionados.

1.1 OBJETIVOS

Esta tesis es parte de una nueva línea de investigación que se centra en la resolución de algunos problemas de transporte, donde se cuenta con una flota de técnicos que deben atender los requerimientos de clientes localizados en diferentes lugares y donde la demanda es conocida al comienzo de cada día, es decir, se trata de escenarios estáticos. En este tipo de problemas, se busca siempre entregar la mejor calidad de servicio posible, menores tiempos de atención y menores violaciones en las ventanas de tiempo, minimizando los costos. La nueva línea de investigación planteada consiste en el estudio de la posibilidad de manejar las ventanas de tiempo de atención de los clientes y observar las implicancias económicas y operativas que conlleva.

1.1.1 Objetivo General

El objetivo general de la tesis consiste en evaluar y cuantificar el ahorro que se obtiene al tener la posibilidad de ampliar las ventanas de tiempo en un problema de atención de requerimientos, optimizando la utilización de los recursos mediante un buen diseño de flota y un ruteo adecuado, para así poder establecer un mecanismo de compensaciones para aquellos clientes que acepten la extensión, manteniendo una calidad de servicio aceptable.

El ahorro obtenido está relacionado, en diferentes medidas, con una flota más pequeña, una disminución del *over time* o una disminución del camino total recorrido. Éste cálculo permite conocer cuánto está dispuesto el proveedor del servicio a reducir el precio a determinados clientes con la finalidad de que estos le otorguen una determinada flexibilidad en el tiempo de respuesta.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Comparar el impacto costo-eficiente que tiene la política de ampliar las ventanas de tiempo con respecto a aumentar el número de técnicos. Esto puede orientarse a encontrar la política que genera una mejor calidad de servicio con costos similares o que genera la misma calidad de servicio con costos más bajos.
- Determinar en qué factor, tiempo de atención o violación de las ventanas de tiempo, impactan mayormente ambas medidas estudiadas para mejorar la calidad de servicio.

- Generar un procedimiento estándar, que sirva para que una empresa de atención de requerimientos pueda encontrar su propia estrategia de promociones y compensaciones. Esto en base al procedimiento utilizado en esta investigación.
- Determinar la sensibilidad de los resultados ante las diferentes valoraciones que tienen las violaciones de las ventanas y el tiempo de servicio en la definición de calidad de servicio.
- Generar otra alternativa de solución al problema de transporte que permita optimizar el ruteo y diseño de la flota.

1.2 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

En el Capítulo 2 se hace una revisión bibliográfica del estado del arte en problemas de ruteo de vehículos y diseño de flota. La siguiente sección, el Capítulo 3, describe el problema estudiado, sus dimensiones y características. También, se describe la metodología de trabajo para obtener los resultados y el modelo de ruteo utilizado para realizar la tesis. El Capítulo 4 muestra el desarrollo de prototipos que tienen por finalidad permitir observar el comportamiento de la estrategia de relajación de ventanas de tiempo planteada. El Capítulo 4 muestra el comportamiento de la propuesta realizada para un caso real. Muestra las características del problema, los resultados y las conclusiones que se pueden extraer. En este mismo capítulo se analiza cómo se comportan estos resultados dependiendo de la demanda y se calcula el ahorro generado por las diferentes instancias. De esta manera se entrega una propuesta de estrategia y promoción para el caso en estudio. Finalmente el Capítulo 5 muestra las conclusiones finales del trabajo y busca que cualquier lector de esta investigación pueda desarrollar este estudio en cualquier empresa que presente características similares.

1.3 APOYOS INSTITUCIONALES

Esta Tesis fue apoyada por la Comisión Nacional de Ciencia y Tecnología, CONICYT, y por el Instituto de Sistemas Complejos de la Universidad de Chile.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El desarrollo de esta tesis tiene relación con dos problemas típicos de transporte como son el diseño de flota y el ruteo de vehículos. Muchos son los investigadores que han aportado en el estudio de este tipo de problemas, algunos orientados a encontrar mejores soluciones, otros, a encontrar algoritmos más eficientes, incorporando cada vez más factores que permitan modelar de mejor forma la realidad. De acá se desprenden un sinnúmero de problemas, desde la determinación del tamaño de una flota, hasta el ruteo dinámico, pasando por algoritmos de ruteo de flota naviera y utilización de heurísticas para la obtención ágil de resultados.

2.1 RUTEO DE VEHÍCULOS

Este problema, denominado VRP (Vehicle routing problem), consiste en encontrar la forma más eficiente de visitar, con una flota determinada, distintas localizaciones ubicadas a diferentes distancias unas con otras con propósitos que pueden ir desde visitar a un cliente para entregarle un servicio determinado, visitar una planta o bodega, o entregar un producto a domicilio. La eficiencia está sujeta al orden y distribución en que se visitan los diferentes puntos. Este problema pertenece a la clase NP-Completo, es decir, no existen algoritmos que puedan resolverlos en un tiempo polinomial. Esta característica representa una motivación para los investigadores para plantear soluciones eficientes.

El ruteo ha sido investigado en profundidad por el área de la Investigación de Operaciones. Son muchos los investigadores que han buscado analizar problemas cada vez más complejos de una forma cada vez más eficiente. Es así como en 1959 se modeló por primera vez un problema de estas características. Este trabajo fue desarrollado por Dantzig y Ramser (1959) [2] y se basa específicamente en la distribución de combustible utilizando una flota homogénea.

Existen múltiples variantes del problema VRP. Uno de los más conocidos y en el que está enfocado este trabajo de investigación es el *Vehicle routing problema with time windows* (VRPTW). Este problema tiene la característica que cada cliente debe ser atendido dentro de un tiempo determinado. Su complejidad es tal que Salvendy (1992) lo clasifica como NP-completo. Un problema de programación entera mixta es propuesto por Cordeau et al. (2002) y se muestra a continuación.

Variable	Descripción
N	Conjunto de Nodos
K	Conjunto de técnicos disponibles
A	Conjunto de arcos factibles
E	Tiempo de inicio de la jornada
L	Tiempo de término de la jornada
C	Capacidad de los Vehículos
c_{ij}	Costo de moverse del nodo i al j
x_{ijk}	Variable binaria que indica si el vehículo k se mueve de i a j
w_{ik}	Instante en que el técnico k comienza a atender a i
a_i	Cota inferior de ventana de tiempo para atender a i
b_i	Cota superior de ventana de tiempo para atender a i
s_i	Tiempo de Servicio asociado al cliente i
t_{ij}	Tiempo de viaje entre cliente i y el j
d_i	Demanda del cliente i

$$\text{F. O.} \quad \min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in K} c_{ij} x_{ijk} \quad (1)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{k \in K} \sum_{j: (i,j) \in K} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{(0,j) \in A} x_{ijk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j: (i,j) \in A} x_{ijk} - \sum_{j: (i,l) \in K} x_{jlk} = 0 \quad \forall k \in K, j \in N \quad (4)$$

$$\sum_{i: (i,n+1) \in A} x_{i,n+1,k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$x_{ijk} (w_{ik} + s_i + t_{ij} - w_{kj}) \leq 0 \quad \forall k \in K, (i,j) \in A \quad (6)$$

$$a_i \sum_{j: (i,j) \in A} x_{ijk} \leq 0 \leq b_i \sum_{j: (i,j) \in A} x_{ijk} \quad \forall k \in K, j \in N \quad (7)$$

$$E \leq w_{ik} \leq L \quad \forall k \in K, i \in (0, n+1) \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N} d_i \sum_{j: (i,j) \in A} x_{ijk} \leq C \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall k \in K, (i,j) \in A \quad (10)$$

La función objetivo (1) representa el costo total. La restricción (2) obliga a que cada cliente sea atendido solo por un vehículo. Restricciones (3) y (5) definen el trayecto de cada vehículo. (6), (8) y (9) imponen las restricciones de capacidad y ventanas de tiempo.

Existen dos metodologías para resolver este problema: en primer lugar se tienen los algoritmos de optimización que permiten encontrar soluciones exactas y por otro lado se tienen los algoritmos de aproximación o heurísticas que permiten encontrar buenas soluciones en un tiempo razonable. En Codeau, Desaulniers, Desrosiers, Solomn and Soumis (2002) es posible encontrar un completo listado de métodos de solución para resolver el VRPTW. También en Bräysy and Gendreau (2005) es posible encontrar diferentes soluciones pero en este caso enfocadas en modelos de aproximación.

Entre los métodos exactos aplicados al VRPTW se encuentra el método llamado Blanch and Bound, descrito en Nemhauser y Wolsey (1988), el que va separando las soluciones en subconjuntos generados por alguna definición o decisión (cada piso de la ramificación representa una decisión). De esta forma, cada ramificación es una alternativa y lo que hace especial al método, es que este puede distinguir las ramificaciones que, independiente de las decisiones que se tomen (subconjuntos que se analicen), ya no puede seguir mejorando para llegar al óptimo. De esta forma es posible dejar de explorar esa rama de soluciones y enfocarse sólo en las otras.

Otro método es el Branch and Cut, derivado del ya descrito Branch and Bound. Éste, se utiliza cuando se tiene un problema con muchas variables, pero algunas son enteras y otras continuas, es decir un problema de programación mixta. La metodología de este algoritmo consiste en formular una relajación del problema de carácter lineal, sacando aquellas desigualdades que usualmente no son activas en el óptimo. El subproblema permite encontrar aquellas que se activan en el problema maestro y que hacen que sea infactible. Estas desigualdades se van incorporando al problema real hasta que se consigue llegar al óptimo. Branch and Cut fue desarrollado por Padberg and Rinaldi (1989). Otros métodos exacto son Branch and Price, desarrollado por Jarpa et al. (2010) y en Cortés et al. (2014), y el paralelismo desarrollado por Lau et al. (1997).

Un método de resolución que ha marcado el estudio de los problemas de ruteo es la generación de columnas que fue introducido por Dantzig and Wolfe (1960). También se describe en los trabajos de Desrocher, Desrosiers y Solomon (1992) y en Desaulniers et al. (2005). Este método consiste en dividir el problema en dos etapas, un problema maestro y un sub problema. El problema maestro es una relajación lineal del problema original que incluye sólo un número limitado de variables, que sean suficientes como para encontrar una solución factible de forma simple. El sub problema, tiene como objetivo identificar variables que no han sido incorporadas al problema maestro y que permiten mejorar la función objetivo. De esta forma se descartan todas aquellas variables que no permitan esta mejora. Algunos desarrollos recientes de generación de columnas son por ejemplos los de Desaulniers, Lessard, & Hadjar (2008) y baldacci, Mingozzi and Roberti (2012). Este último ocupa generación de columnas sin la necesidad de Branch and Price.

Por otro lado se encuentran los métodos de aproximación. Entre ellos están la Relajación Lagrangeana, heurísticas y meta heurísticas que, si bien no siempre logran llegar al óptimo, buscan encontrar resultados aproximados en poco tiempo, inclinándose por la eficiencia en el *trade off* con la exactitud. Una aplicación de Relajación Lagrangeana fue propuesta en Fisher (2004) mientras que el desarrollo de heurísticas de construcción, por ejemplo, es posible encontrarlas en Bräysy and Gendreau (2005). Heurísticas de búsqueda local fueron revisadas por Groër et l. (2010). Por otro lado Bräysy and Gendreau (2002) también muestran aplicación de búsqueda tabú desarrollada por Glover (1986).

La idea básica de las heurísticas es primero encontrar una buena solución factible. Luego de esto, moverse a las soluciones factibles vecinas y adoptarlas si representan una mejora. Algoritmos de mejora conocidos son, por ejemplo, el operador de intercambio, que consiste en eliminar algunos arcos de la última solución y conectarlos nuevamente con otros nodos explorando soluciones vecinas.

Aplicaciones reales del VRPTW son las expuestas, por ejemplo, por Weintraub, Abud, Fernandez, Laporte % Ramirez (1999), Codeau, Laporte Pasin and Ropke (2010). También se encuentra el trabajo de Xu and Chiu (2001) para una empresa de telecomunicaciones. Una solución exacta es presentada por Liberatore, Righini and Salani (2011), que propone un algoritmo de generación de columnas con una heurística especial que se basa en la programación dinámica para generar nuevas columnas. Por otro lado Souyris, Cortés, Ordoñez and Weintraub (2013) resuelven un problema de atención de requerimientos (*technician dispatch problema*) usando generación de columnas.

2.2 DISEÑO DE FLOTA

Uno de los parámetros necesarios para cualquier modelo de ruteo, es la definición del tamaño de la flota. El número de técnicos que atenderá a determinados clientes, o el número de ambulancias para un servicio de urgencia, tiene directa relación con la calidad de servicio entregada y por supuesto, con la definición de las rutas del problema. De esta forma, determinar cuál es tamaño óptimo para una determinada flota se ha vuelto un problema interesante y tremendamente útil. Como ya fue mencionado, sobreestimar los recursos generaría una pérdida de eficiencia, directamente sobre costos, mientras que subestimarlos no permitiría entregar la calidad de servicio deseada.

De todos los estudios realizados, uno de los últimos, y el cual es considerado de forma importante para la construcción de esta tesis, es el de Cortés, Geandreau, Leng y Weintraub [30]. Éste utiliza el método de la simulación de instancias semanales para determinar políticas que permitan definir el tamaño óptimo de una flota para el problema de despacho de técnicos con una demanda estocástica. La metodología de resolución que utiliza comienza con determinar la homogeneidad de la demanda para los diferentes meses y diferentes días de la semana. Para esto utiliza es test χ^2 . También determina la distribución de los llamados de los clientes dentro de cada día y la de la duración del tiempo de servicio, completando así la información para realizar las simulaciones. De esta forma se generan las instancias semanales. Los resultados de las simulaciones, para los diferentes grupos de meses, indican una curva de rendimiento, considerando costos y calidad de servicio, definida básicamente por la violación de las ventanas de tiempo. De esta forma es posible determinar cuál es el número óptimo de técnicos para cada escenario dado del problema en cuestión.

Para lograr desarrollar esta investigación, los autores utilizaron un modelo de ruteo específico. Este algoritmo es expuesto por Cortés et al (2013) [31] y deriva de los trabajos de Weintraub et al (2004) y Cortés et al (2010), quienes ya habían desarrollado un modelo de Branch and Price, descrito anteriormente de forma general, para resolver el ruteo del mismo problema. Los parámetros dentro de este modelo, propios de la mayoría de estos problemas, son la matriz de distancias entre los clientes, ventanas de tiempo de atención y tiempo de servicio. Este es el mismo ruteo que se utiliza para el desarrollo de esta tesis tomando en consideración que las ventanas de tiempo ya no son fijas si no que pueden ampliarse con la finalidad de observar qué beneficios se pueden obtener del ruteo. Dichos beneficios también son determinados mediante una simulación.

3 PROBLEMA A RESOLVER

Con la finalidad de cuantificar el impacto de poder ampliar las ventanas de tiempo, en cuanto a costos y calidad de servicio entregada, se evalúa esta política en un problema real y específico de atención de requerimientos.

3.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA

El problema que se aborda se contextualiza en la atención de requerimientos de reparación de maquinaria por parte de una empresa en la ciudad de Santiago. Su labor consiste en atender a sus clientes bajo condiciones que le permitan entregar una calidad de servicio adecuada minimizando la totalidad de los costos involucrados.

Los clientes están ubicados en diferentes lugares de la ciudad por lo que los tiempos de desplazamiento son relevantes para un diseño óptimo de atención. Una vez que el cliente realiza un llamado solicitando el servicio de reparación, la empresa tiene una ventana de tiempo definida para atenderlo. Esta ventana de tiempo no es restrictiva por lo que puede ser violada, lo que es muestra de una mala calidad de servicio. El tiempo que transcurre desde que el cliente realiza el llamado hasta que el técnico llega a atenderlo es denominado tiempo de servicio. El objetivo del ruteo diario es minimizar este tiempo de servicio y así minimizar también las violaciones de las ventanas de tiempo. También, y mediante simulaciones, se busca definir el tamaño óptimo de flota, que permita entregar una calidad de servicio aceptable.

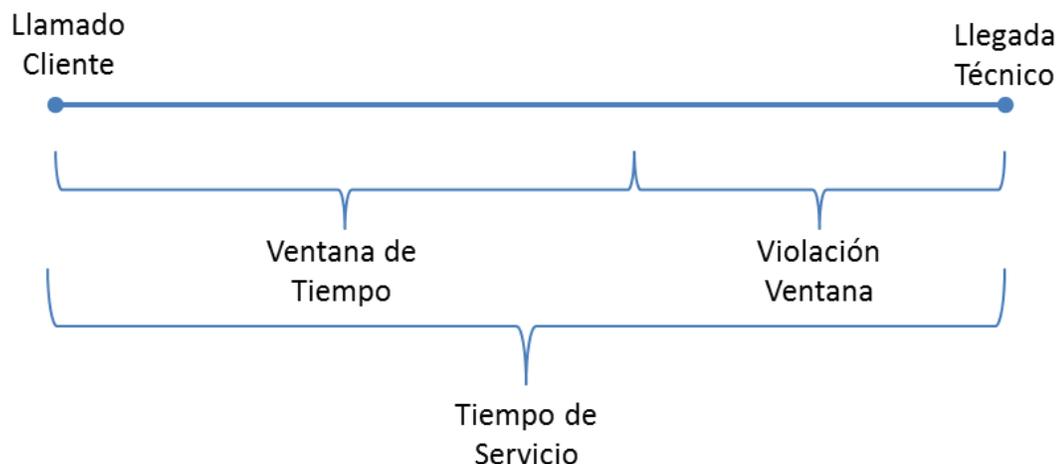


Figura 1 Gráfica de definición de tiempos

La calidad de servicio, como ya fue mencionado, es medida en términos de la espera de los clientes para ser atendidos y por ende, de la sumatoria de las violaciones a las ventanas de tiempo incurridas. Por otro lado, los costos principales se enfocan en el tamaño de la flota (salarios técnicos más equipo de transporte), el pago de *overtime* y otros insumos esenciales para el traslado de los técnicos, como la gasolina, entre otros. Para poder mejorar la calidad de servicio entregada, una alternativa -la más directa- es aumentar el número de técnicos. Esto sin duda genera un aumento significativo de los costos¹, que se explican mayoritariamente por esta variable. Otra alternativa, que es el objetivo de estudio de esta tesis, es ampliar las ventanas de tiempo a determinados clientes a cambio de una compensación económica. Esta ampliación relaja el problema, lo que permite un ruteo más eficiente, con nuevas condiciones. Por último, la magnitud de la compensación económica está limitada por el ahorro que genera esta medida en comparación con aumentar el tamaño de la flota, llegando a niveles de calidad de servicio similares.

Finalmente, las características del problema están dadas por la distribución temporal y territorial de la demanda, por las ventanas de tiempo de respuesta permitidas, los costos involucrados y por los tiempos de servicio que demoran los técnicos en atender los diferentes tipos de solicitudes. Dadas estas condiciones, se calcula el impacto de tener la posibilidad de relajar las ventanas de tiempo para determinados clientes.

3.2 CARACTERÍSTICAS DEL PROBLEMA Y ESTADÍSTICAS

3.2.1 Zona geográfica

El estudio se contextualiza dentro de la Región Metropolitana de Chile. Específicamente se incorporan al estudio sólo algunas comunas, que se muestran dentro de la línea poligonal que se resalta en la siguiente figura.

¹ Calculado en el Capítulo 6.

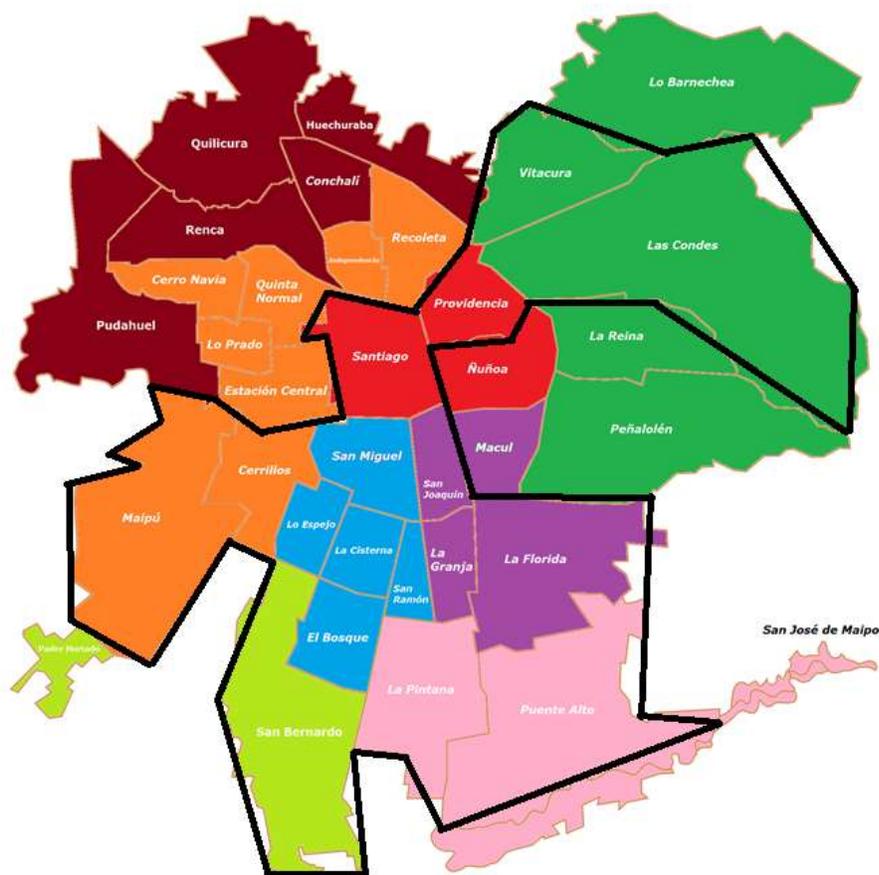


Figura 2 Mapa Santiago

Las comunas escogidas son subdivididas en 49 pequeñas zonas que pretenden abarcar áreas similares. Esto con la finalidad de tener resultados más exactos a la hora de simular la distancia entre un lugar y otro, medida en unidades de tiempo. Es importante destacar, que para simplificar el análisis, todas las llamadas realizadas dentro de una zona se representarán geográficamente por un punto, el centro geométrico del área abarcada por dicha zona. La siguiente tabla muestra el detalle de las zonas mencionadas:

ID	Zonas	Llamadas anuales	Llamadas diarias	Dist Interna	Lat	Long
1	La Pintana	157	0,63	5	-33,5929	-70,6282
2	Puente Alto - Centro	611	2,43	2	-33,6101	-70,5758
3	Puente Alto - Este	120	0,48	3	-33,6016	-70,5324
4	Puente Alto - Norte	272	1,08	2,5	-33,5730	-70,5711
5	La Florida - Sur	150	0,60	2,5	-33,5503	-70,5959
6	La Florida - SurPoniente	111	0,44	2	-33,5400	-70,5656
7	La Florida - Poniente	221	0,88	2,5	-33,5104	-70,5802
8	La Florida - Vespucio	1096	4,37	2	-33,5186	-70,6002

9	San Joaquín - Sur	1023	4,08	1,5	-33,4993	-70,6157
10	San Joaquín - Norte	831	3,31	2	-33,4762	-70,6314
11	San Miguel - Norte	663	2,64	1,5	-33,4889	-70,6511
12	San Miguel - Sur	475	1,89	1,2	-33,5086	-70,6565
13	P.A. Cerda	140	0,56	1,6	-33,4937	-70,6768
14	La Granja	108	0,43	2	-33,5318	-70,6202
15	San Ramón	119	0,47	2	-33,5374	-70,6397
16	La Cisterna	297	1,18	2	-33,5264	-70,6614
17	El Bosque	384	1,53	2,5	-33,5549	-70,6755
18	San Bernardo - Norte	533	2,12	2,5	-33,5558	-70,7170
19	Lo Espejo	173	0,69	3	-33,5263	-70,6941
20	Cerrillos - Norte	532	2,12	1,5	-33,4831	-70,6955
21	Cerrillos - Centro	342	1,36	1	-33,4909	-70,7101
22	Maipu-Pajaritos	278	1,11	3,5	-33,4743	-70,7485
23	Cerrillos - Sur	552	2,20	2,5	-33,5123	-70,7282
24	Maipu-Industrial	406	1,62	4	-33,5357	-70,7493
25	Maipu-Centro	601	2,39	1,5	-33,5107	-70,7594
26	Maipu-Rinconada	112	0,45	1,7	-33,5165	-70,7855
27	Padre Hurtado	292	1,16	2,5	-33,5697	-70,8068
28	San Bernardo - Sur	204	0,81	6	-33,6386	-70,7081
29	San Bernardo - Centro	815	3,25	2,5	-33,5916	-70,6957
30	La Reina	870	3,47	2,1	-33,4445	-70,5522
31	Las Condes - Alto	1295	5,16	1,5	-33,3922	-70,5324
32	Las Condes - Apumanque	926	3,69	1	-33,4121	-70,5660
33	Las Condes - El Golf	2301	9,17	0,5	-33,4192	-70,5946
34	Las Condes - Escuela	2516	10,02	1,5	-33,4155	-70,5836
35	Las Condes - Isidora	3190	12,71	0,5	-33,4145	-70,5979
36	Las Condes - Kennedy	680	2,71	1,4	-33,3968	-70,5677
37	Las Condes - Poniente	441	1,76	1,2	-33,4169	-70,5386
38	Las Condes - Sur	334	1,33	0,9	-33,4253	-70,5638
39	Lo Barnechea	591	2,35	2	-33,3535	-70,5219
40	Macul - Norte	623	2,48	1,5	-33,4775	-70,5986
41	Macul - Sur	857	3,41	1,2	-33,4953	-70,6018
42	Ñuñoa - NorEste	597	2,38	1	-33,4479	-70,5846
43	Ñuñoa - NorOeste	1069	4,26	1,2	-33,4491	-70,6145
44	Ñuñoa - SurEste	362	1,44	1,2	-33,4650	-70,5870
45	Ñuñoa - SurOeste	1787	7,12	1	-33,4649	-70,6149
46	Peñalolen	391	1,56	3	-33,4832	-70,5652
47	Vitacura - Centro	975	3,88	1,1	-33,3858	-70,5598
48	Vitacura - Este	353	1,41	1	-33,3817	-70,5360
49	Vitacura - Oeste	1583	6,31	0,5	-33,3993	-70,5928

Tabla 1 Zonas de estudio

El tiempo que demora un técnico en desplazarse desde una zona a otra es uno de los factores principales que condicionan el ruteo. El tiempo de viaje entre un cliente “a” y otro cliente “b” es el cálculo del tiempo que demora ir desde el centroide de la zona del cliente “a” hasta el centroide de la zona del cliente “b”. El cálculo de este tiempo considera la distancia geométrica, las condiciones del camino y el tráfico promedio. Para lograrlo se utilizó la herramienta Google Maps. La siguiente tabla muestra los centroides de cada zona y en los anexos se muestra la matriz de tiempo de viaje entre ellas.

ID	Centroide	ID	Centroide
1	La pintana - LAUTARO 2785	26	Maipu - AV las naciones
2	Puente Alto - AV CONCHA Y TORO 171	27	Padre hurtado - EL MANZANO 567
3	Puente alto - EYZAGUIRRE 01098	28	San Bernardo - AV DIEGO PORTALES 3804
4	Puente alto - AV GABRIELA ORIENTE 01091	29	San Bernardo - Av colon norte 100
5	La Florida - RAMON FREIRE	30	VICENTE PEREZ ROSALES 828
6	La florida - ENRIQUE OLIVARES 1700	31	AV CHARLES HAMILTON 9798
7	La Florida - AV DEPARTAMENTAL 2567	32	AV MANQUEHUE SUR 520
8	La Florida - Vicuña Mackenna Oriente 7110	33	SAN CRESCENTE 280
9	San Joaquín - AV VICUÑA MACKENNA 4860	34	AV A VESPUCIO SUR 100
10	San Joaquin - Lira con Pintor Cicarelli	35	AV ISIDORA GOYENECHEA 3120
11	San Miguel - LLANO SUBERCASEAUX 3915	36	AV PRESIDENTE KENNEDY 6000
12	San Miguel - QUINTA AVENIDA 1159	37	AV PADRE HURTADO SUR 1121
13	Pedro Aguirre Cerda - Departamental con Cardenal Caro	38	AV ISABEL LA CATOLICA 6000
14	La Granja - AV PARRAL 8754	39	AV JOSE ALCALDE DELANO 12432
15	San Ramon - DOÑIHUE 1887	40	Macul - EXEQUIEL FERNANDEZ 2406
16	La Cisterna - GRAN AVENIDA 4364	41	Macul -EXEQUIEL FERNANDEZ 4535
17	El Bosque - GRAN AVENIDA 10500	42	ÑUÑO A - MONTENEGRO 850
18	San Bernardo - AV DE CHENA 11001	43	ÑUÑO A - AV SUCRE 1622
19	Lo Espejo - A VESPUCIO 2085	44	Ñuñoa - Alberto Ried
20	Cerrillos - P AGUIRRE CERDA 7784	45	ÑUÑO A - AV MARATHON 1315
21	Cerrillos - AV LAS AMERICAS 472	46	Peñalolen - Rio Baker
22	Maipu - Pasaje Las Aguilas 585	47	VITACURA - AV VITACURA 7721
23	Cerrillos - CAMINO A MELIPILLA 1680	48	VITACURA - TABANCURA 1356
24	Maipu - CAMINO STA MARTA 1000	49	VITACURA - CANDELARIA GOYENECHEA 3894
25	Maipu - AVENIDA 5 DE ABRIL 176		

Tabla 2 Centroides Zona de Estudio

3.2.2 Caracterización de la demanda

Se dispone de 1 año de información histórica del caso real, con un total de 33.359 llamados. Es esta misma información la que se ocupa para el desarrollo de la investigación de esta tesis. La primera definición en este ámbito es que se considera un problema estático, y no dinámico, donde se conoce la demanda a comienzos de cada jornada. Esto permite que el ruteo se defina una sola vez cada día. Otra definición es que se estudian días típicos, con una jornada laboral de 12 horas, desde las 7:00 a las 19:00 aunque se permite trabajar a los técnicos hasta 2 horas extras. En la investigación se utiliza el horizonte de tiempo de una semana (lunes a viernes) para analizar el comportamiento de la relajación de las ventanas de tiempo.

La demanda tiene varias componentes interesantes de analizar. Se puede caracterizar o definir cada solicitud mediante los siguientes parámetros:

3.2.2.1 Tiempo de la llamada

Se refiere a la fecha y la hora en la cual se realiza la solicitud. En base a este dato es posible mostrar la distribución temporal de la demanda del caso real en diferentes horizontes de tiempo.

La distribución anual de la demanda, que se muestra en la siguiente figura, denota que en los meses de verano (enero, febrero y marzo) junto con el mes de septiembre, son los con menor demanda. Por el contrario, Los meses de octubre, julio y mayo, son los que presentan una mayor demanda, representado cada uno casi el 10 % del total.

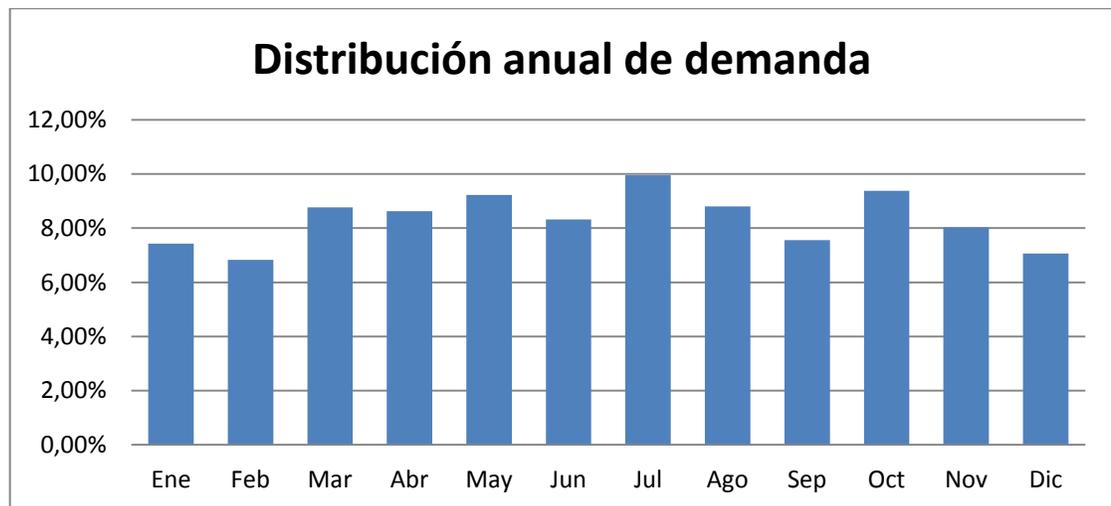


Figura 2 Histograma Demanda Mensual²

La distribución semanal de la demanda, que se muestra en la siguiente figura, muestra claramente que en promedio, los días lunes tienen una demanda más alta que el resto de los días de la semana; y los días viernes, por el contrario, tiene en promedio una demanda más baja. Los martes, miércoles y jueves tienen una demanda similar. Lo anterior es congruente con el análisis realizado por Cortés et al (2011) [30].

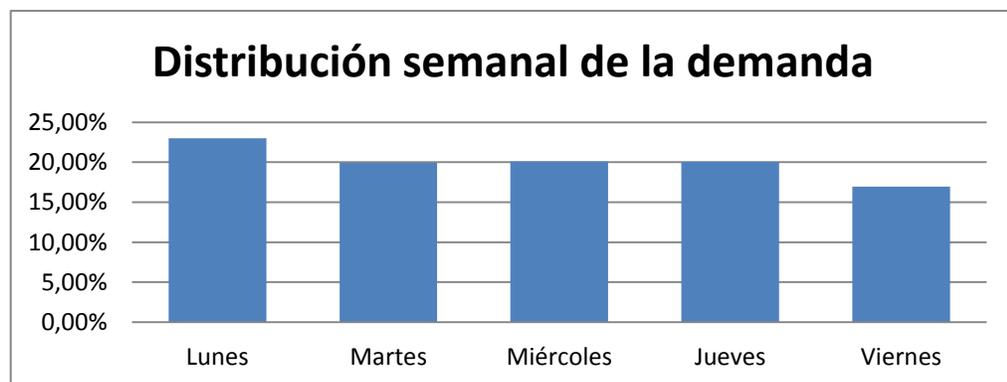


Figura 3 Histograma Demanda Diaria³

La distribución porcentual de la demanda, por día de la semana, es similar para todos los meses y días del año. La demanda diaria promedio en cambio, varía entre los meses con mayor y

² Extraído de Daniel Leng et al (2011) [30]: “A simulation-based approach for fleet design in a technician dispatch problema with stochastic demand”.

³ Extraído de Daniel Leng et al (2011) [30]: “A simulation-based approach for fleet design in a technician dispatch problema with stochastic demand”.

menor demanda. La demanda diaria promedio, del año completo, se muestra en la siguiente tabla:

Día	% Llamadas	Promedio Llamadas
Lunes	23,00%	147,56
Martes	19,92%	127,79
Miércoles	20,10%	128,96
Jueves	20,04%	128,58
Viernes	16,93%	108,63
TOTAL	100%	641,52

Tabla 3 Demanda diaria promedio

Finalmente, el comportamiento de la demanda dentro del día es similar para todos los días y grupos de meses. El siguiente gráfico muestra que gran parte de la demanda se concentra entre las 9:00 y las 12:00.

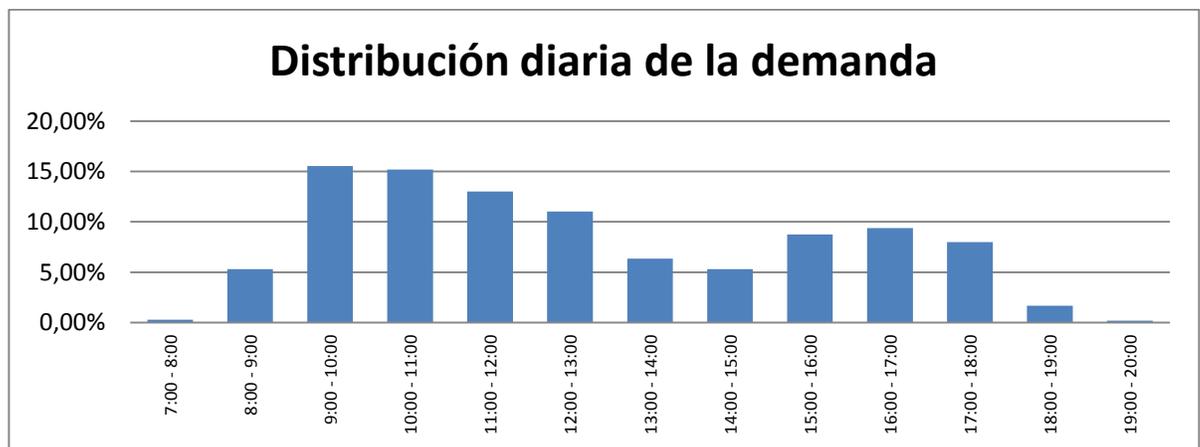


Figura 4 Comportamiento diario de la demanda

3.2.2.2 Localización Geográfica de la llamada

Otra característica que define una solicitud es la zona de donde se realiza el llamado. La distribución de la demanda según localización geográfica es determinante para establecer las rutas que seguirán los diferentes técnicos ya que representa el tiempo de viaje que tendrán al ir a atender a un cliente. La distribución del problema real se muestra en el siguiente gráfico:

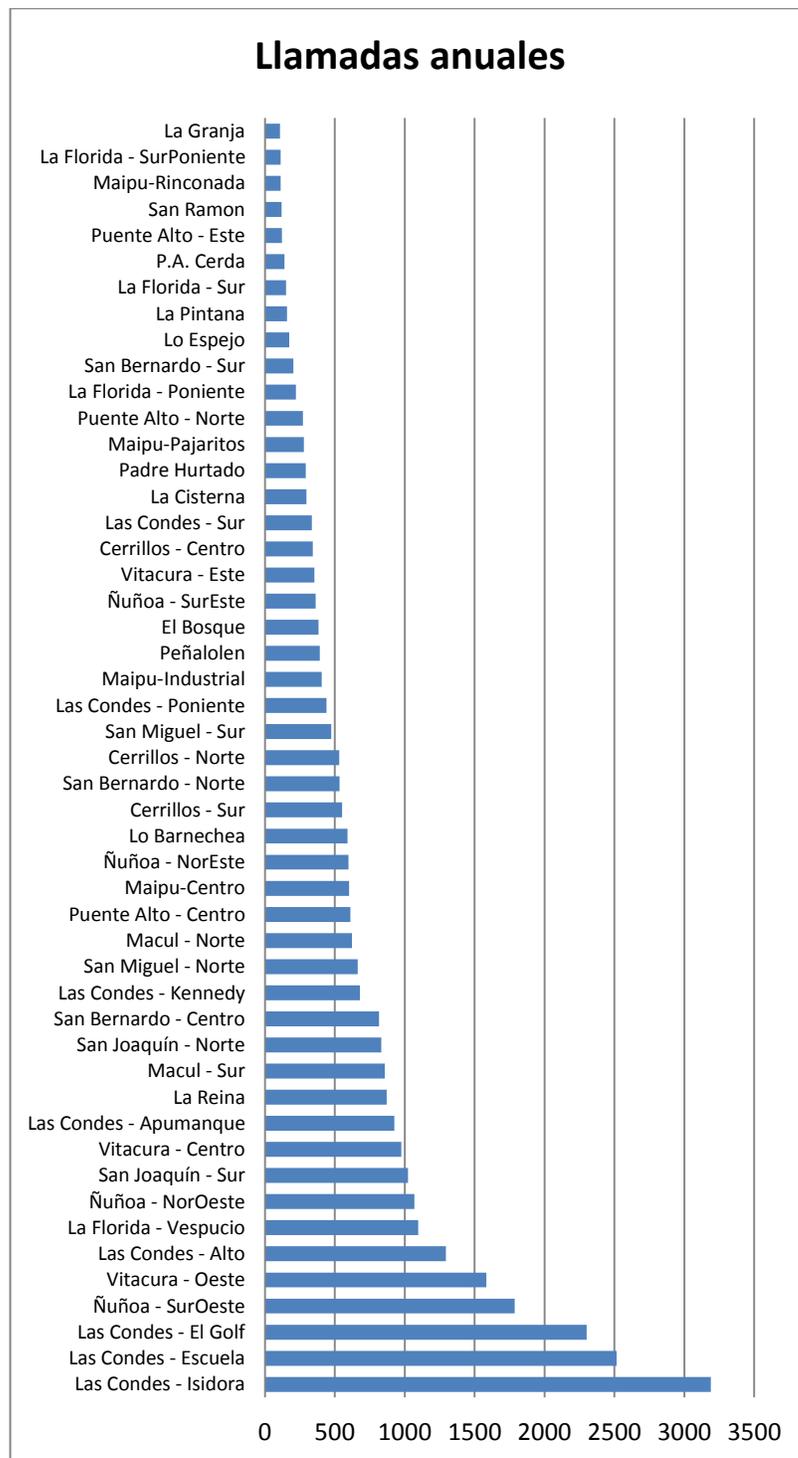


Figura 5 Distribución geográfica de la demanda

3.2.2.3 Ventanas de tiempo

Las ventanas se definen como el tiempo que tiene el proveedor del servicio para atender al cliente. El tiempo empieza a contar desde que el cliente realiza el llamado solicitando la reparación de un equipo. Como ya fue mencionado, para este caso se utilizan ventanas de tiempo suaves o no restrictivas.

Es posible clasificar a los clientes y generar diferentes *clusters* asociados a diferentes criterios. Cada uno de estos tipos de clientes puede tener una ventana de tiempo diferente para ser atendido. En el caso real en estudio se clasifican clientes por la frecuencia con la que realizan solicitudes. Un cliente es más importante si llama un mayor número de veces al año y por lo tanto tendrá una ventana de tiempo más pequeña. Es importante mencionar que puede haber múltiples criterios de cómo clasificar a los clientes y esto será muy importante en la extensión de la aplicabilidad de la investigación. Para el desarrollo de esta investigación se establece la misma ventana de tiempo para todos los clientes, independiente de su importancia. Si bien esto no es lo que ocurre en la realidad esto se realiza para simplificar el problema y observar de forma más simple como influye el hecho de poder manejar esta restricción.

Por último, se plantea que existe la posibilidad de atender clientes al día siguiente al que llamaron, con una alta penalidad en la calidad de servicio. Esto se permite para los días entre lunes y jueves, incluidos, y está sujeto a las características del caso en estudio.

3.2.2.4 Tiempo de Atención

Existen diferentes tipos de maquinarias y diferentes tipos de problemas por lo que la reparación de cada uno de ellos toma tiempos diferentes. El tiempo de atención refleja exactamente el tiempo que toma el técnico en reparar el objeto que se solicita y está comprendido entre la llegada del técnico al lugar del cliente y su partida. El caso real tiene un gran número de posibilidad de tiempos de atención que van desde 20 a 240 minutos. Esta distribución no será utilizada en esta investigación ya que se acotarán las posibilidades para simplificar el análisis.

3.2.3 Costos

Como ya se ha señalado, en este tipo de problemas los principales tipos de costos operativos están asociados a las remuneraciones de los técnicos y a la distancia recorrida para atender a los clientes, lo que se relaciona con el combustible y deterioro del vehículo. De esta forma se definen los siguientes costos:

- Sueldo por técnico: \$ 600.000 mensuales.
- Costo por distancia recorrida: \$ 3.333 por hora.
- Costo por *Over Time*: \$ 4.000 por hora.
- Costo por tiempo desocupado: \$ 3.333 por hora.
- Costo Automóvil \$ 150.000 por semana.

3.3 DEFINICIÓN DEL MECANISMO DE OBTENCIÓN DE RESULTADOS

Para poder definir este mecanismo, es necesario recordar que lo que se busca es calcular el impacto económico de poder manejar las ventanas de tiempo de determinados clientes y así poder generar una política de compensaciones para quienes acepten la promoción. Para poder calcular este impacto económico, se comparan los costos que tiene relajar las ventanas de tiempo a determinados clientes (tantos como sea necesario) con los generados al aumentar el número de técnicos, llegando a los mismos niveles de calidad de servicio. Se espera que los costos asociados a la medida de relajar las ventanas sean menores que los de ampliar la flota por lo que el ahorro obtenido será lo disponible para realizar las compensaciones a aquellos clientes que acepten ser atendidos con ventanas de tiempo más extensas.

Para realizar la comparación se establece, en primer lugar, un caso base de estudio. Este tiene como característica que todos los clientes poseen ventanas de tiempo de igual duración y que el tamaño de la flota es tal que representa un problema interesante de analizar, es decir, genera que las violaciones de las ventanas de tiempo sean considerables dentro del problema. La finalidad de lo anterior es que la calidad de servicio entregada sea regular o deficiente y así, cuando se aumente el número de técnicos o se amplíen las ventanas de tiempo, la mejora sea significativa.

Una vez definido el caso base, que básicamente define la cantidad de técnicos, se observa cómo varía la calidad de servicio al variar el número de técnicos. Estos resultados se comparan con los obtenidos al relajar las ventanas de tiempo a diferentes cantidades de clientes en diferentes magnitudes. El objetivo es encontrar una estrategia en donde se logre una calidad de servicio similar al caso base pero con un menor número de técnicos, sólo relajando las ventanas de tiempo.

Es importante mencionar que el concepto de relajar las ventanas de tiempo a un cliente determinado implica que para todos los servicios que este requiera, la ventana de tiempo de atención será más amplia. Otro aspecto relevante es el criterio con el que se ordenan los clientes para determinar a quien se le ofrece primero relajar las ventanas de tiempo. Este criterio lo define el proveedor del servicio y en el caso particular de esta investigación hace referencia a la cantidad de solicitudes realizadas puesto que, dada la definición de relajación, relajar las ventanas de tiempo a un cliente con un mayor número de llamadas genera un impacto mayor en la solución del problema.

Es necesario conocer la sensibilidad de los costos y la calidad de servicio ante el tamaño de la flota y ante el número de clientes que aceptan los diferentes tipos de promociones. La variación de estos factores modifican las soluciones del problema por lo que el desafío es encontrar aquella configuración de relajación de ventanas que permita lograr al menos la misma calidad de servicio que aumentando el número de técnicos, minimizando los costos incurridos. De esa forma es posible incrementar el dinero disponible para armar una política de compensaciones más atractiva.

En el estudio planteado en esta tesis se utiliza la simulación como método para encontrar la combinación óptima mencionada. Esta alternativa consiste en ir probando una a una las combinaciones del tamaño de flota y tipos de promociones, dadas por la magnitud del crecimiento de las ventanas de tiempo y la cantidad de clientes a los cuales se les hace efectiva la promoción. Tiene como ventaja ser más simple pero a la vez más lenta ya que existen muchas combinaciones que hay que simular para lograr llegar al resultado.

Es importante mencionar que el ruteo utilizado para resolver el problema se realiza mediante Branch & Price.

3.4 ETAPAS DE LA INVESTIGACIÓN

3.4.1 Construcción de un prototipo

Esto tiene como finalidad observar cómo se comporta la diferencia de costos entre aumentar el número de técnicos y ampliar las ventanas de tiempo en un problema mucho más pequeño y así poder generar mejoras sin tener que ocupar tanto tiempo analizando el problema completo. De esta manera, y tal como se ha señalado, se generó una instancia semanal con un número reducido de clientes (10 aprox.), los cuales son ordenados según la frecuencia con la que realizan solicitudes. Se toman sólo algunas zonas y se considera un número limitado de llamadas diarias. Esta semana es analizada de la misma forma que el caso real por lo que es sometida al mismo proceso de obtención de resultados ya mencionado.

3.4.2 Análisis del prototipo

En primer lugar se analiza el funcionamiento del modelo. Esto tiene que ver con la integridad de los resultados que entrega, con el tiempo de compilación y con la adecuación a las condiciones del problema real. De esta forma y a través de este método se realizan las modificaciones necesarias.

Por otro lado, se realiza un análisis sobre las diferentes alternativas de resultados que entrega el prototipo en cuanto a la cantidad de técnicos y relajación de las ventanas de tiempo. De esta forma se pretende descubrir patrones, medir la sensibilidad de los diferentes tipos de costos ante las diferentes alternativas de mejora de la calidad de servicio y, de esta manera, poder acotar las combinaciones a estudiar para el caso real. Esto genera una optimización del tiempo utilizado para encontrar los resultados buscados.

3.4.3 Desarrollo problema real

Tal como se señaló en la descripción del problema, se cuenta con un año de información del caso real. Como a través del prototipo ya se establecieron las mejoras necesarias, el siguiente paso es utilizar esta información para observar el comportamiento de la política de relajación de ventanas de tiempo.

En primer lugar, de estas 52 semanas de información, se selecciona una que logre reflejar el comportamiento de una semana promedio para observar cómo se comportan los resultados con este nivel de demanda. Luego, para completar el estudio y poder obtener conclusiones generales, se toman dos semanas más, una con alta demanda y otra con baja demanda. Para todos los casos es importante primero determinar los escenarios a evaluar, es decir, desde y hasta cuántos técnicos se utilizarán en la simulación, a cuántos clientes se les relajarán la ventanas de tiempo y cuánto será la magnitud de la relajación.

3.4.4 Obtención y análisis de resultados.

Como último paso se plantea el manejo del caso real definido en el punto anterior. Al obtener los resultados de las instancias, se tabulan y se consolidan para analizar cómo influye la demanda en las diferentes políticas. Observando lo anterior, es posible determinar una política única que sea factible durante todos los periodos del año.

Al igual que con el prototipo, se pretenden descubrir patrones en los resultados y medir la sensibilidad de los diferentes tipos de costos y factores de la calidad de servicio ante las diferentes alternativas para mejorarla. De esta forma se determinan los tipos de promociones que vale la pena considerar y el número de clientes a los cuales se les ofrece la promoción.

Se espera poder concluir sobre la magnitud de los efectos que puede generar el manejo de las ventanas de tiempo en los problemas de este tipo y entregar políticas sobre su utilización. Así también, se pretende generar una metodología, que si bien es específica para el caso den estudio, pueda ser usada como base para otros casos, señalando los factores críticos del procedimiento.

Como resultado final se entrega la evaluación de costos asociada a la relajación de ventanas de tiempo, es decir, el ahorro que se produce al relajar las ventanas de tiempo de ciertos clientes en vez de aumentar el tamaño de mi flota, para lograr el mismo mejoramiento en la calidad de servicio.

4 RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA, CASO REAL.

De los resultados obtenidos del estudio de los prototipos planteados se desprende que la estrategia de ampliar las ventanas de tiempo efectivamente logra un impacto en la calidad de servicio similar al crecimiento marginal de la flota.

Tomando en cuenta que relajando las ventanas de tiempo es posible alcanzar la misma calidad de servicio que aumentando el número de técnicos, y considerando que el relajar las ventanas de tiempo es una medida mucho más económica, del prototipo se concluye que es completamente posible establecer una estrategia de compensaciones para aquellos clientes que aceptan ampliar sus ventanas de tiempo. Sin embargo, se observa que la mejora en la calidad de servicio generada por las relajaciones propuestas sólo es comparable con un aumento marginal del tamaño de la flota por lo que no se esperan grandes compensaciones.

4.1 CASO DEMANDA PROMEDIO.

Dados los antecedentes de éxito de la estrategia de relajación de las ventanas de tiempo, se decide ponerla a prueba en un caso real. Con la idea de lograr algún grado de generalidad se escoge primeramente una semana cuya frecuencia de llamados y distribución se asemeje a la del promedio semanal de los datos con los que se cuenta. La semana escogida tiene las características que se describen a continuación.

4.1.1 Características

Duración: una semana con 5 días laborales, del lunes 22 de Julio del 2002 al viernes 26 de Julio del 2002. Tomar en cuenta que cada instancia que se corre corresponde a un día laboral.

Día	Llamados
Lunes	145
Martes	141
Miércoles	143
Jueves	141
Viernes	124
Total general	694

Tabla 4 Distribución diaria de la demanda

- **Duración Jornada laboral:** 12 horas ó 720 minutos, entre 7:00 y 19:00 hrs.

Intervalo de tiempo	Llamadas
8:00 - 9:00	39
9:00 - 10:00	106
10:00 - 11:00	112
11:00 - 12:00	92
12:00 - 13:00	82
13:00 - 14:00	43
14:00 - 15:00	30
15:00 - 16:00	72
16:00 - 17:00	61
17:00 - 18:00	48
18:00 - 19:00	9
Total general	694

Tabla 5 Distribución de la demanda por hora

- **Total de clientes:** 49 clientes ubicados en zonas diferentes.

Zona	Cantidad de llamados	Zona	Cantidad de llamados
1	69	25	10
2	45	26	9
3	60	27	5
4	47	28	12
5	35	29	9
6	32	30	11
7	19	31	3
8	10	32	6
9	18	33	13
10	13	34	6
11	15	35	7
12	19	36	6
13	13	37	5
14	18	38	8
15	23	39	9
16	11	40	6
17	17	41	3
18	9	42	2
19	6	43	2
20	13	45	4
21	13	46	3
22	11	47	4
23	14	48	3
24	13	49	5

Total general	694
----------------------	------------

Tabla 6 Demanda por cliente/zona

– **Tipos de Cliente:**

Todos los clientes tienen la misma prioridad en un comienzo por lo que tienen ventanas de tiempo similares y equivalentes a 200 minutos. Para simplicidad de problema, sin pérdida de generalidad, se toma un cliente por cada zona.

– **Tipos de Servicio:**

Existen diferentes tipos de servicios que implican diferentes tiempos de reparación. Esto está dado por la existencia de diferentes tipos de máquinas y por problemas de diferentes magnitudes.

Tipo De Servicio	Tiempo Prom (min)	Cantidad de Llamados
Tipo A	30	132
Tipo B	60	218
Tipo C	90	132
Tipo D	120	112
Tipo E	150	39
Tipo F	180	25
Tipo G	210	9
Tipo H	240	27
Total general		694

Tabla 7 Llamados por tipo de servicio

- **Distancia entre zonas:** La matriz de distancias fue descrita en el punto 3.2.1.
- **Número de técnicos:** se corre el modelo con 25, 26, 27 y 28 técnicos. El caso base considera 25 técnicos. Luego, se relajan las ventanas de tiempo para este caso para diferentes grupos de clientes y en diferentes magnitudes. Finalmente se comparan estos resultados con los obtenidos aumentando el número de técnicos (a 26, 27 ó 28) pero sin relajar las ventanas de tiempo.
- **Características relajación ventanas de tiempo:** para el caso en que se busque mejorar la calidad de servicio relajando las ventanas de tiempo, se hace un ranking de los clientes en orden decreciente según el número de llamadas realizadas. Una vez definido el orden de

los clientes se les va incluyendo uno a uno en el grupo de clientes a los cuales se les relajan las ventanas de tiempo. En primer lugar al primer cliente del ranking, luego al primero y al segundo y así hasta incluir a los 10 primeros clientes con mayor número de llamadas. Es importante destacar que cuando se incluye a un cliente, la relajación de las ventanas de tiempo se hace efectiva para todos los llamados de este cliente durante la semana. Se realizan permutaciones en el orden de los clientes con el objetivo de estudiar la robustez del resultado.

– **Datos de medición⁴:**

- **K:** conjunto de técnicos.
- **C:** conjunto de clientes.
- **Grafo G:** representa el conjunto todos los pares ordenados que son parte de las rutas escogidas
- **Tiempo de viaje:** es el tiempo que demora un técnico en ir desde un lugar a otro para atender a un cliente. Está representado por t_{ij} donde i y j son clientes.
- **Violación ventana de tiempo:** es el tiempo extra que demora un técnico en atender un requerimiento de un cliente i , más allá de la ventana de tiempo permitida. Está definido por v_i
- **Tiempo de servicio:** es el tiempo comprendido entre la llamada de un cliente i y el momento en el que es atendido por un técnico. Se representa por s_i .
- **Función Objetivo (FO):**

$$FO = 0.25 * \sum_{i \in C} s_i + 0.5 * \sum_{(i,j) \in G} t_{ij} + \sum_{i \in C} v_i$$

La función objetivo del ruteo es definida por el equipo de la investigación y busca asignar pesos a las diferentes variables del problema. Se considera como facto más relevante las violaciones de las ventanas de tiempo pues determinar la calidad de servicio. El tiempo de viaje cobra relevancia pues determina los costos del sistema. Se considera el Tiempo de Servicio dado que es la única forma de diferenciar qué atención es mejor que otra cuando no hay violación de las ventanas de tiempo. Claramente el cliente que es atendido primero percibirá una mejor calidad de servicio independiente si esta atención está dentro de la ventana de tiempo pactada. El caso se muestra en la siguiente figura.

⁴ Todas las mediciones son realizadas en minutos.



Figura 6 Ejemplo de definición de tiempo cuando se cumple la ventana de tiempo

Para los otros casos, cuando sí existe violación de las ventanas de tiempo, la mejor atención será en la que esta violación es menor. La siguiente figura ilustra esta situación.

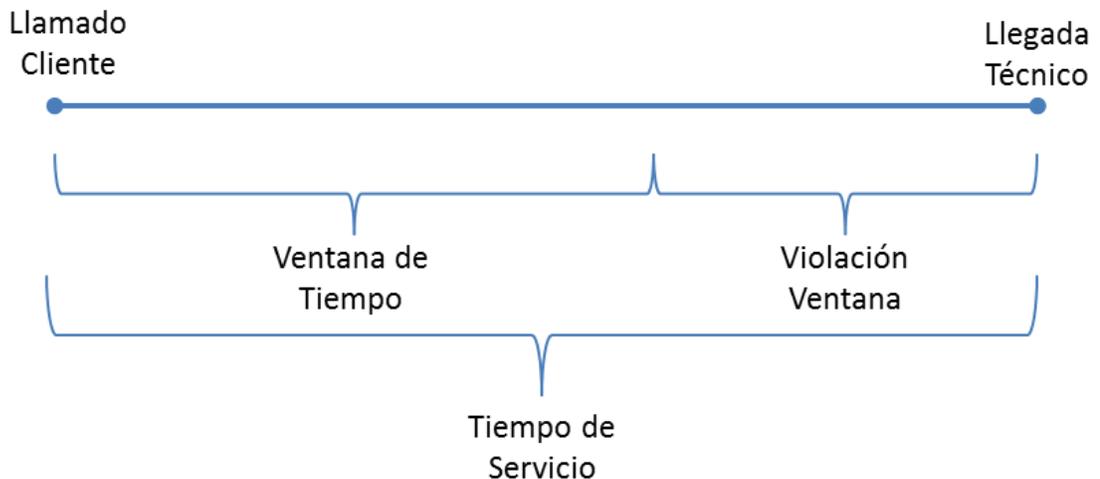


Figura 7 Ejemplo de definición de tiempos cuando no se cumple la ventana de tiempo

4.1.2 Instancias

El caso base en estudio considera 25 técnicos y ninguna relajación de ventanas de tiempo. Las otras instancias se construyen de dos maneras. En primer lugar se aumenta uno a uno el número de técnicos hasta llegar a 28. De esta manera se puede observar cómo se comportan los resultados con una flota más numerosa. Por otro lado, se mantiene el número de técnicos en 25 pero se relajan las ventanas de tiempo a diferentes grupos de clientes en diferentes magnitudes.

De esta forma es posible observar cómo afecta en los resultados la relajación compararla con el incremento de la flota. La siguiente tabla muestra las 32 instancias estudiadas.

Instancia	N° de Técnicos	Se relajan Ventanas	Magnitud de ventanas de tiempo relajadas	Cantidad de clientes con ventanas relajadas
25_200_0	25	No	NA	0
26_200_0	26	No	NA	0
27_200_0	27	No	NA	0
28_200_0	28	No	NA	0
25_400_1	25	Si	400	1
25_400_2	25	Si	400	2
25_400_3	25	Si	400	3
25_400_4a	25	Si	400	4
25_400_4b	25	Si	400	4
25_400_4c	25	Si	400	4
25_400_5	25	Si	400	5
25_400_6	25	Si	400	6
25_400_7a	25	Si	400	7
25_400_7b	25	Si	400	7
25_400_7c	25	Si	400	7
25_400_8	25	Si	400	8
25_400_9	25	Si	400	9
25_400_10	25	Si	400	10
25_600_1	25	Si	600	1
25_600_2a	25	Si	600	2
25_600_2b	25	Si	600	2
25_600_2c	25	Si	600	2
25_600_3	25	Si	600	3
25_600_4	25	Si	600	4
25_600_5	25	Si	600	5
25_600_6	25	Si	600	6
25_600_7a	25	Si	600	7
25_600_7b	25	Si	600	7
25_600_7c	25	Si	600	7
25_600_8	25	Si	600	8
25_600_9	25	Si	600	9
25_600_10	25	Si	600	10

Tabla 8 Instancias estudiadas caso demanda promedio

4.1.4 Resultados

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos. En esta es posible observar cómo se comporta cada factor ante el aumento del número de técnicos y ante la ampliación de las ventanas de tiempo en diferentes magnitudes y para diferentes números de clientes.

NºTécnicos	Instancia ⁵	Dist Recorrida	Violación Ventana	Tiempo de Servicio	Over Time	% OT
25	200_0	7.754	6.585	52.406	1.372	1,59%
26	200_0	7.731	2.746	44.778	1.084	1,25%
27	200_0	7.336	695	33.603	585	0,68%
28	200_0	6.645	49	27.508	324	0,38%
25	400_1	7.740	3.688	51.334	1.521	1,76%
25	400_2	7.696	3.206	49.925	1.989	2,30%
25	400_3	7.658	2.930	49.312	2.083	2,41%
25	400_4a	7.543	2.628	48.097	1.818	2,10%
25	400_4b	7.522	2.692	48.203	1.902	2,20%
25	400_4c	7.539	2.714	48.378	1.931	2,23%
25	400_5	7.480	2.193	47.566	1.598	1,85%
25	400_6	7.570	1.744	45.328	1.775	2,05%
25	400_7a	7.740	1.326	44.512	1.713	1,98%
25	400_7b	7.824	1.366	44.619	1.730	2,00%
25	400_7c	7.812	1.412	44.644	1.813	2,10%
25	400_8	7.592	1.024	44.168	1.300	1,50%
25	400_9	7.479	619	43.891	1.776	2,06%
25	400_10	7.629	488	43.563	2.150	2,49%
25	600_1	7.980	3.429	49.881	1.776	2,06%
25	600_2a	7.682	2.751	48.702	1.221	1,41%
25	600_2b	7.651	2.769	48.764	1.291	1,49%
25	600_2c	7.781	2.803	48.799	1.189	1,38%
25	600_3	7.828	2.188	47.855	1.566	1,81%
25	600_4	7.853	1.723	46.994	1.631	1,89%
25	600_5	7.655	1.392	46.187	1.618	1,87%
25	600_6	7.839	803	45.215	1.620	1,88%
25	600_7a	7.732	607	44.392	2.052	2,38%
25	600_7b	7.761	631	44.438	1.904	2,20%
25	600_7c	7786	655	44472	1987	2,30%
25	600_8	7416	582	44592	2288	2,65%
25	600_9	7600	439	44018	1535	1,78%
25	600_10	7820	299	43663	1583	1,83%

Tabla 9 Resultados Caso Real, demanda media

⁵ XXX_Y: esta nomenclatura indica que las ventanas de tiempo se amplían a XXX minutos a una cantidad de Y clientes. Cuando aparece un a, b o c se trata de una composición distinta de clientes, pero la misma cantidad.

Sin duda es importante analizar cada uno de los resultados obtenidos pero para este trabajo de investigación los factores más relevantes son la calidad de servicio y los costos incurridos en cada una de las instancias. El resto del análisis, over time, distancia recorrida, etc., se encuentra en los anexos de este informe.

Para definir la calidad de servicio es posible considerar sólo las violaciones de las ventanas de tiempo, sólo el tiempo que debe esperar cada cliente para ser atendido o una combinación de ambos factores. Para el desarrollo de esta tesis se utilizan las violaciones de ventanas de tiempo como único factor para definir la calidad de servicio. Los otros dos análisis, el que considera sólo el tiempo de servicio y el que considera una ponderación de ambos factores, se encuentran en el anexo de este informe (capítulo 7.3).

La siguiente figura, muestra cómo varía la violación de las ventanas de tiempo y se muestra gráficamente la comparación con el resultado obtenido aumentando el tamaño de la flota.

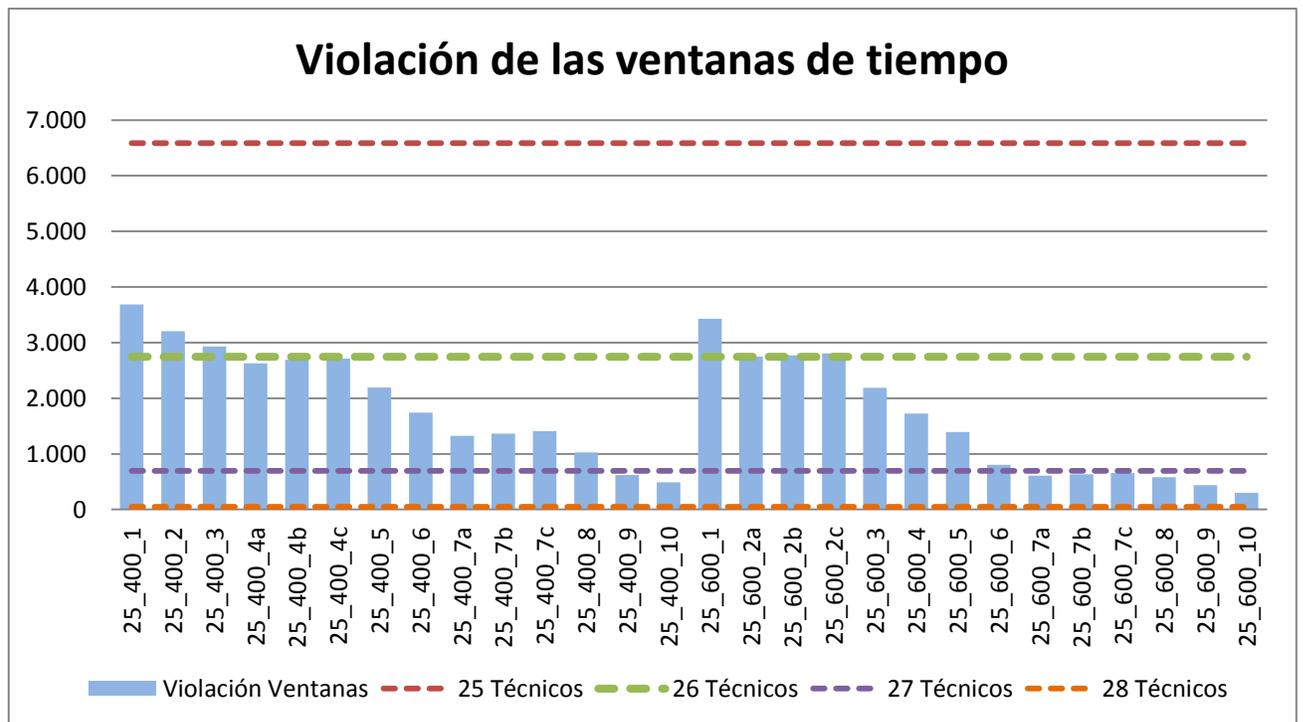


Figura 8 Evolución violación de ventanas de tiempo para diferentes instancias

Una observación importante es que el gráfico muestra que se puede llegar al mismo resultado a través de ambas estrategias, aumento de flota y relajación de las ventanas. Se observa, por ejemplo, que existen muchas instancias que permiten obtener la misma calidad de servicio que

aumentando un técnico. También es posible encontrar algunas instancias con las que se obtiene una mejor calidad de servicio que con dos técnicos más. Finalmente, se observa que aunque relajando las ventanas de tiempo a 10 clientes, no se logra llegar a la calidad de servicio obtenida con 28 técnicos, tres más que en caso base. Este resultado es positivo para la investigación ya que la diferencia de costos entre las instancias que llegan a la misma calidad de servicio pero a través de diferentes estrategias es lo que se busca obtener. Este será el monto disponible para establecer un mecanismo de compensaciones.

Tal como fue señalado en el análisis de las figuras anteriores, es posible encontrar pares de instancias (asociadas a diferentes estrategias) que logren calidades de servicio similares. Para poder comparar dichas instancias es necesario conocer los costos involucrados. La siguiente tabla muestra dichos costos:

N° Técnicos	Instancia	Costo	N° Técnicos	Instancia	Costo
25	200_0	12.390.987	25	400_9	12.417.920
26	200_0	12.671.787	25	400_10	12.442.853
27	200_0	12.938.520	25	600_1	12.417.920
28	200_0	13.221.120	25	600_2a	12.380.920
25	400_1	12.400.920	25	600_2b	12.385.587
25	400_2	12.432.120	25	600_2c	12.378.787
25	400_3	12.438.387	25	600_3	12.403.920
25	400_4a	12.420.720	25	600_4	12.408.253
25	400_4b	12.426.320	25	600_5	12.407.387
25	400_4c	12.428.253	25	600_6	12.407.520
25	400_5	12.406.053	25	600_7a	12.436.320
25	400_6	12.417.853	25	600_7b	12.426.453
25	400_7a	12.413.720	25	600_7c	12.431.987
25	400_7b	12.414.853	25	600_8	12.452.053
25	400_7c	12.420.387	25	600_9	12.401.853
25	400_8	12.386.187	25	600_10	12.405.053

Figura 9 Costos semanales caso demanda media

En el siguiente gráfico se muestra más claro cómo se comportan los costos para las diferentes instancias. Se confirma que el costo variable más relevante está asociado al número de técnicos ya que estos sólo varían significativamente cuando la flota crece. En el resto de los casos los costos se mantienen cercanos a los \$ 12.420.000.

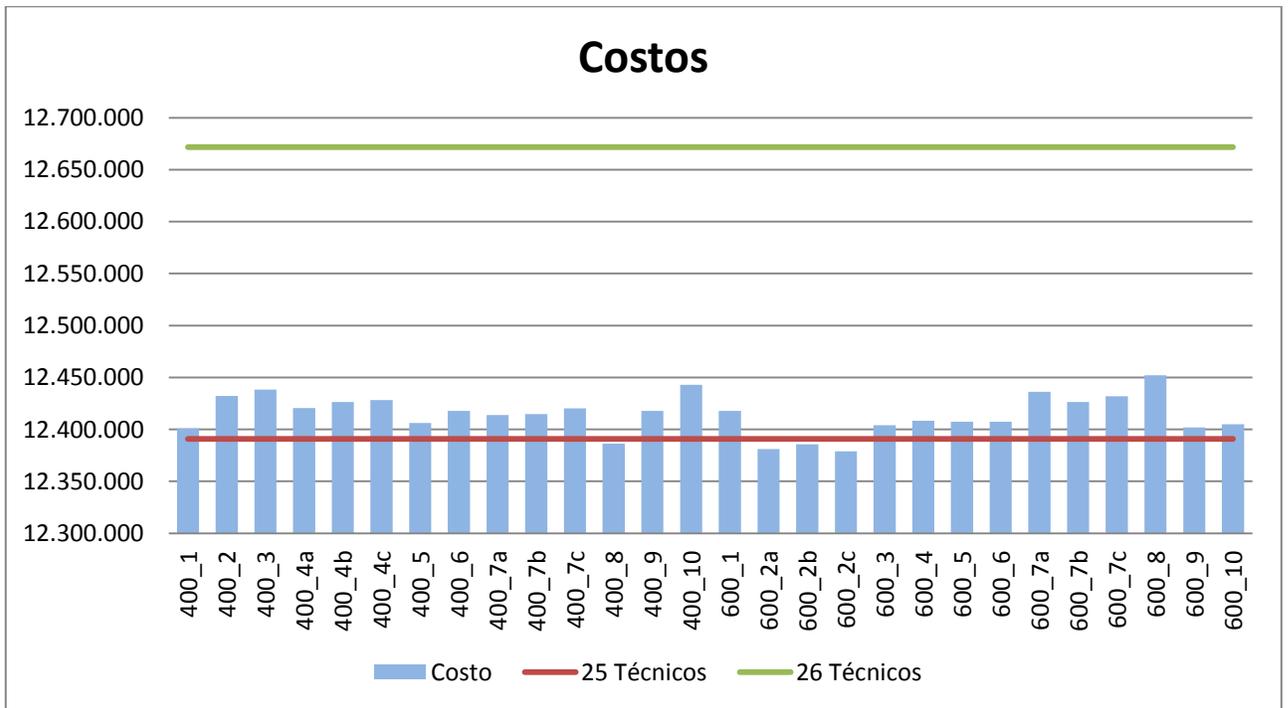


Figura 10 Evolución Costos instancias demanda media

Se observa que todas las instancias con 25 técnicos tienen un costo considerablemente menor que las con 26 técnicos. Esto es muy importante para el objetivo de esta investigación pues se demuestra que es posible lograr la misma calidad de servicio con una configuración de servicio más económica.

4.1.5 Análisis de Resultados

Dado que el análisis se centra en la comparación entre la relajación de las ventanas de tiempo con el aumento del número de técnicos, el análisis se divide en dos partes. En primer lugar se comparan los costos de relajar las ventanas de tiempo con aumentar la flota en un técnico. Luego se realiza el mismo análisis pero ahora comparando los resultados con lo obtenidos con una flota de dos técnicos más. El caso de tres técnicos más no es analizado dado que no existe ninguna instancia de relajación de las ventanas de tiempo que permita obtener el mismo nivel de servicio.

La siguiente tabla muestra el ahorro de las instancias en las que se relajan las ventanas de tiempo con respecto a aumentar un técnico, es decir, llegar a 26 técnicos. Se observa que siempre es más económico relajar las ventanas lo que se explica dado que los costos principales de este problema son el sueldo de los técnicos y el costo de adquirir una camioneta. El ahorro generado fluctúa entre \$220.000 y \$293.000 semanales y no tiene un comportamiento regular ya que depende de las rutas óptimas encontradas. De esta manera se podría esperar que un problema menos relajado fuese menos costoso pero esto, por ejemplo, genera en varios casos un aumento del *over time* que genera mayores costos.

Instancia	Ahorro CLP	Instancia	Ahorro CLP
400_1	270.867	600_1	253.867
400_2	239.667	600_2a	290.867
400_3	233.400	600_2b	286.200
400_4a	251.067	600_2c	293.000
400_4b	245.467	600_3	267.867
400_4c	243.533	600_4	263.533
400_5	265.733	600_5	264.400
400_6	253.933	600_6	264.267
400_7a	258.067	600_7a	235.467
400_7b	256.933	600_7b	245.333
400_7c	251.400	600_7c	239.800
400_8	285.600	600_8	219.733
400_9	253.867	600_1	269.933
400_10	228.933	600_2a	266.733

Tabla 10 Ahorro semanal vs instancia de 26 técnicos con demanda media

En la tabla también se muestra que no hay tendencias claras. Si bien se observa que relajar las ventanas de tiempo siempre es más económico que aumentar la flota en un técnico y que el ahorro es siempre mayor a \$ 200.000 semanales, no es posible distinguir tendencias. Esto se explica mayoritariamente dado que al considerar un tamaño de flota constante (25 técnicos para este caso) el extra tiempo pasa a ser el siguiente costo más relevante y este depende de la configuración de las rutas.

Conclusiones similares se obtienen cuando se compara la relajación de las ventanas de tiempo con una composición de 27 técnicos, ya que si bien el ahorro ahora es mayor, entre \$485.000 y \$560.000 como se muestra en la siguiente tabla, este tampoco tiene una tendencia determinada.

Instancia	Ahorro CLP	Instancia	Ahorro CLP
400_1	537.600	600_1	520.600
400_2	506.400	600_2a	557.600
400_3	500.133	600_2b	552.933
400_4a	517.800	600_2c	559.733
400_4b	512.200	600_3	534.600
400_4c	510.267	600_4	530.267
400_5	532.467	600_5	531.133
400_6	520.667	600_6	531.000
400_7a	524.800	600_7a	502.200
400_7b	523.667	600_7b	512.067
400_7c	518.133	600_7c	506.533
400_8	552.333	600_8	486.467
400_9	520.600	600_1	536.667
400_10	495.667	600_2a	533.467

Tabla 11 Ahorro semanal vs instancia con 27 técnicos y demanda media

Si bien el ahorro es mayor, sigue un comportamiento similar en relación a un sistema con 26 técnicos. Es así entonces como bajo el mismo argumento del extra tiempo se justifica la inexistencia de una tendencia definida para las diferentes instancias.

Teniendo en cuenta los ahorros generados por cada instancia, el siguiente paso es analizar aquellas que logran alcanzar una calidad de servicio similar que con el aumento de técnicos. Es importante destacar que si comparamos dos instancias diferentes, que generan la misma calidad de servicio y el mismo nivel de ahorro, la más eficiente será aquella que contempla relajación de

las ventanas a un menor número de clientes ya que esto implica que el descuento promedio por cliente asociado a la promoción será mayor.

En la siguiente figura se destacan en rojo aquellas instancias con las que se logra obtener la misma calidad de servicio relajando las ventanas de tiempo que aumentando la flota en un técnico. También se muestra el ahorro obtenido al relajar las ventanas en relación a contar con 26 técnicos.

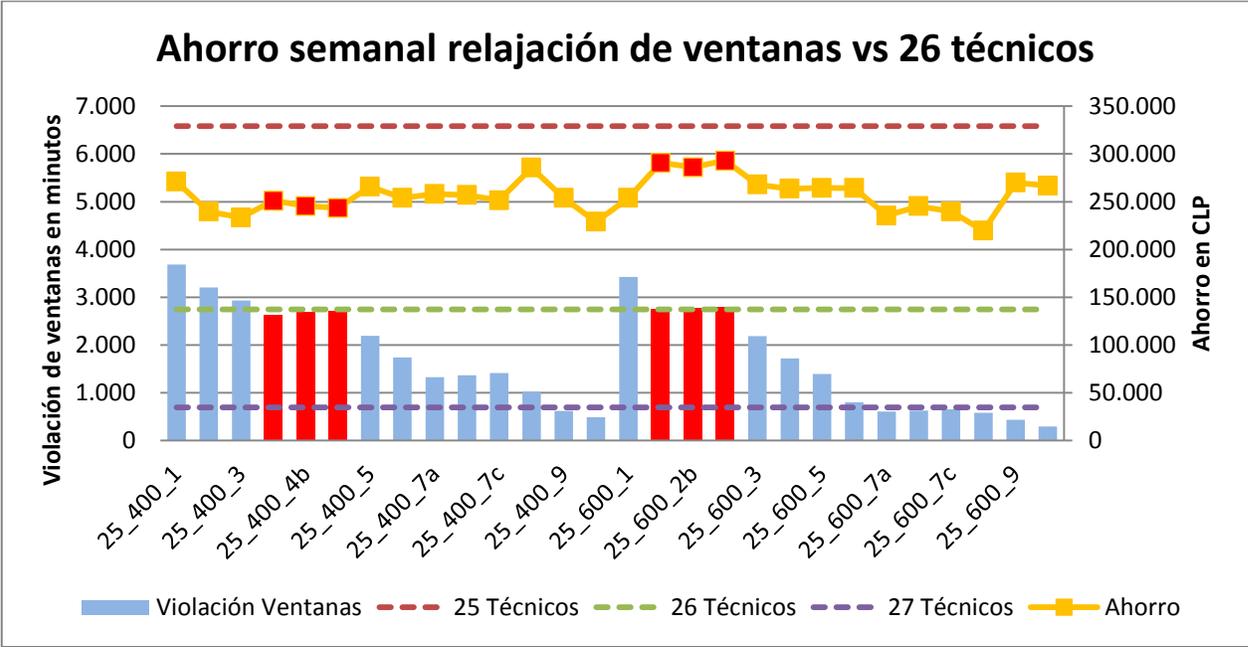


Figura 11 Ahorro semanal vs instancia de 26 técnicos y demanda media

Se observa entonces que relajando las ventanas a 400 minutos a 4 de los clientes con una mayor frecuencia de llamados es posible obtener la misma calidad de servicio que con 26 técnicos. Para el caso que la relajación es a 600 minutos sólo es necesario relajar las ventanas a 2 clientes. La siguiente tabla resume los casos exitosos destacados en la figura anterior.

N°Técnicos	Instancia	Violación Ventanas	Ahorro
25	200	6.585	NA
26	200	2.746	NA
25	400_4a	2.628	251.067
25	400_4b	2.692	245.467
25	400_4c	2.714	243.533
25	600_2a	2.751	290.867
25	600_2b	2.769	286.200
25	600_2c	2.803	293.000

Tabla 12 Resultados casos exitosos comparando con 26 técnicos, demanda media

De la tabla es posible extraer que pasando de 25 a 26 técnicos, y con ventanas de tiempo de 200 minutos para todos los clientes, la violación de estas disminuye de 6.585 a 2.746 minutos para la semana completa. Para lograr el mismo efecto pero manteniendo el número de técnicos en 25, es necesario relajar las ventanas de tiempo a al menos 4 de los clientes con mayor número de solicitudes. Es posible observar que para 3 combinaciones diferentes de estos 4 clientes la violación de las ventanas de tiempo fluctúa entre 2.628 y 2.714 minutos, es decir, una diferencia de 86 minutos (3%). El peor de estos resultados, sigue siendo mejor que los 2.746 minutos que se obtienen con 26 técnicos y demuestra la robustez del resultado. Esto permite que, si un cliente no acepta la promoción del descuento asociado a una mayor ventana de tiempo para ser atendido, perfectamente sea posible pasar al siguiente cliente con mayor número de llamadas y el resultado no cambia sustancialmente.

Al analizar los costos se observa que relajar las ventanas de tiempo a 4 clientes es aproximadamente \$250.000 más económico que aumentar a 26 técnicos. Este es un valor semanal por lo que mensualmente se tendría un ahorro superior a \$1.000.000. Esto representa el monto máximo que dispone la empresa de servicios para realizar promociones. Dependerá de dicha empresa la forma en como estime realizar los descuentos, pudiendo ser parejo de \$250.000 mensuales a cada uno de los 4 clientes o realizar un descuento proporcional al número de servicios que requiere cada uno, entre otras opciones.

Por otro lado, si se toman en cuenta relajaciones de las ventanas de tiempo a 600 minutos, sólo es necesario relajar la restricción a 2 de los clientes con mayor número de llamados para lograr un efecto similar a la inclusión de un técnico. Al igual que en caso anterior, se demuestra que es un resultado robusto ya que el resultado no varía en demasía al permutar los técnicos a los cuales se les ofrece la promoción (2 de los 3 con mayor número de llamadas). Esto nos indica que si uno de los 2 clientes con mayor demanda no acepta el descuento, es posible incorporar en la oferta al siguiente cliente de la lista y obtener el mismo resultado, que varía desde 2.751 a 2.803 minutos (diferencia de 52 minutos equivalente al 1,8%).

Para el caso de la relajación a 600 minutos, el ahorro de esta medida es de aproximadamente \$290.000 semanales. Mensualmente el proveedor del servicio técnico dispondría de un poco más \$1.3000.000 para realizar promociones a los 2 clientes que aceptan el descuento.

A continuación se realiza el mismo ejercicio anterior pero ahora comparando la relajación de las ventanas con el aumento de dos técnicos. En la siguiente figura se destacan en rojo aquellas instancias con las que se logra obtener la misma calidad de servicio con ambas estrategias.

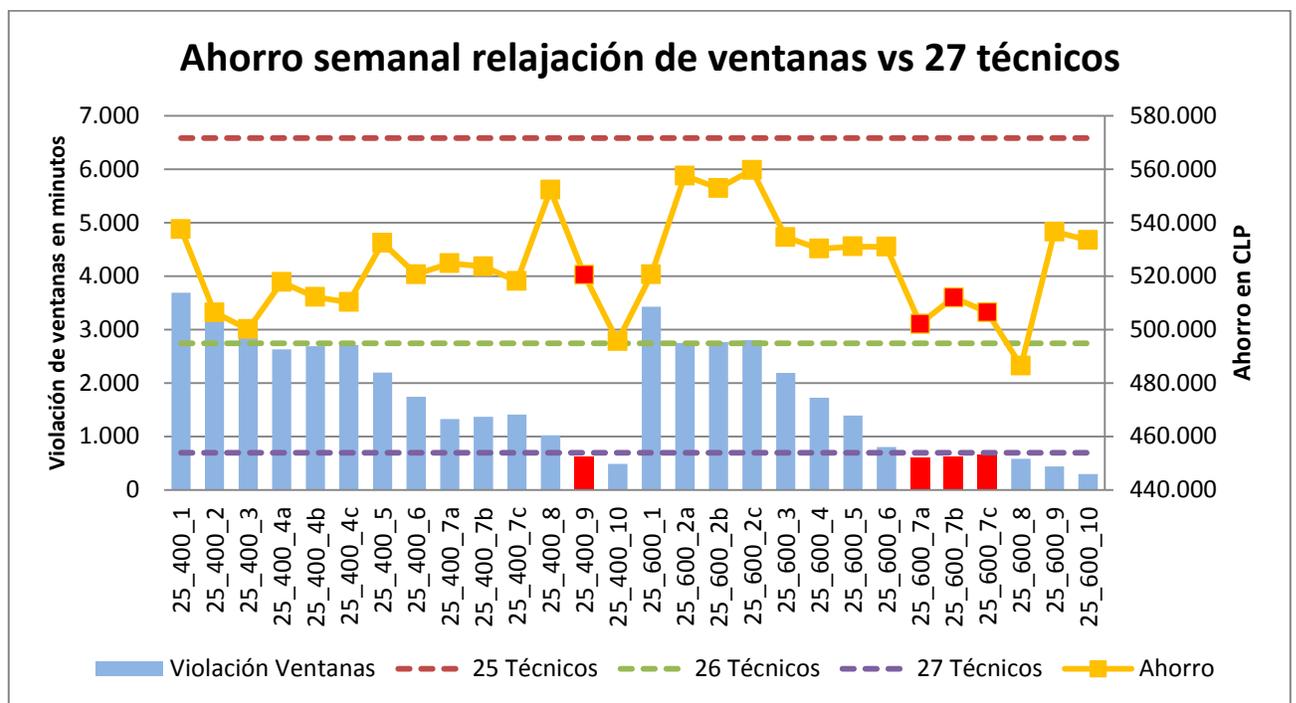


Figura 12 Ahorro semanal vs instancia con 27 técnicos y demanda media

Se observa que relajando las ventanas de tiempo a 400 minutos a 9 de clientes con mayor número de llamados se obtiene la misma calidad de servicio que con 27 técnicos. Si la relajación es a 600 minutos es necesario que 7 clientes acepten la ampliación de sus ventanas de tiempo. La siguiente tabla resume los casos exitosos destacados en la figura anterior.

N°Técnicos	Instancia	Violación Ventanas	Ahorro
25	200	6585	NA
27	200	695	NA
25	400_9	619	520.600
25	600_7a	607	502.200
25	600_7b	631	512.067
25	600_7c	655	506.533

Tabla 13 Resultados casos exitosos comparando con 27 técnicos y demanda media

Tomando los datos de la tabla anterior es posible observar que aumentando el número de técnicos a 27 la violación de las ventanas de tiempo disminuye de 6.585 a 695 minutos, es decir una mejora de 5.890 minutos, equivalentes al 89,5%. Para lograr una mejora similar sin tener la necesidad de aumentar el número de técnicos, es necesario relajar las ventanas de tiempo a 400 minutos a al menos 9 clientes con las mayores frecuencias de llamados. Esta medida genera una disminución de la violación de la restricción de 5.966 minutos (90,5%) llegando a un resultado final de 619 minutos, 76 minutos menos que la alternativa con más técnicos.

El ahorro asociado a la relajación de las ventanas de tiempo, en comparación con el aumento de 2 técnicos, es de aproximadamente \$520.00 semanales, lo que equivale a más de \$2.100.000 al mes. El proveedor del servicio tiene este monto a disposición para realizar promociones a los clientes que aceptan la ampliación de las ventanas de tiempo.

Realizando la misma comparación, pero relajando las ventanas de tiempo a 600 minutos, se observa que es necesario que al menos 7 clientes acepten la promoción para obtener resultados similares al que se logra con 2 técnicos más. Estos resultados varían entre 607 y 655 minutos dependiendo del conjunto de 7 clientes que acepte la promoción (en todo los casos son 7 de los 8 clientes con mayor número de llamados) lo que muestra una vez más la robustez del resultado.

El ahorro al implementar la última medida es de aproximadamente \$510.000 mensuales. Estos más de \$2.000.000 mensuales pueden ser repartidos de diferentes formas en promociones para los 7 clientes con ventanas de tiempo más amplias.

4.1.6 Generación de un mecanismo de compensaciones

Tomando en cuenta los casos exitosos expuestos en la sección anterior, es posible realizar algunas recomendaciones de cómo generar un mecanismo de compensaciones. Estas recomendaciones se basan en el comportamiento y características de este problema en específico lo que no significa que no puedan extrapolarse a otros problemas de esta misma índole tomando las consideraciones necesarias.

Existen dos estrategias de compensación posible. La primera es entregar una compensación por cliente, independiente del número de llamados que haga. Esto significa ofrecerles a los clientes un descuento fijo, suma alzada, si es que acepta ampliar sus ventanas de tiempo de atención. La otra estrategia es realizar un descuento por servicio, es decir, ofrecerle al cliente que si acepta ampliar sus ventanas de tiempo recibirá un descuento fijo por cada llamada que haga. El objetivo de esta sección es encontrar las ventajas y desventajas de cada una de estas estrategias y escoger la mejor para este caso.

Para el desarrollo de esta sección se utiliza el supuesto ya mencionado que un descuento mayor genera un mayor incentivo para los clientes a tomar la acción por la cual se le está entregando el descuento y que, por consiguiente, un descuento menor incentiva de menor manera al cliente a seguir esa acción.

Tal como ha sido mencionado en otros capítulos de este informe, y como fue comprobado mediante los resultados obtenidos durante esta investigación, el factor más relevantes en los costos que tienen las empresas del rubro analizado es el número de técnicos que componen la flota que atiende a los diferentes clientes y por consecuencia, el número de vehículos que deben utilizar. De esta forma, pasan a segundo plano diferencias de costos relacionadas con el tiempo de traslado u *over time*, que se generan por diferentes ruteos que puedan existir. Este es un punto clave a la hora de desarrollar un mecanismo de compensaciones dado que implica que las diferencias de costos generadas sólo por relajar las ventanas de tiempo son marginales. Por consiguiente, todas las instancias que tienen una misma cantidad de técnicos, tienen costos similares y representan un ahorro similar con respecto a otra instancia con un número mayor de técnicos.

De esta manera, como el ahorro generado ampliando las ventanas de tiempo de algunos clientes para obtener la misma calidad de servicio es similar, independiente de la cantidad de técnicos que aceptan la promoción y de la cantidad de ventanas que son relajadas, y, basado en el

supuesto ya mencionado en el párrafo anterior, que un mayor descuento es un mayor incentivo, siempre la mejor configuración será aquella que logre igualar la calidad de servicio que se obtiene con uno o más técnicos ejerciendo la relajación al menor número de clientes o a la menor cantidad de ventanas. Esto se explica dado que el ahorro generado es el monto disponible para repartir entre aquellos clientes que estarían dispuestos a aceptar la promoción, si el incentivo es suficiente. Si se reparte este monto entre menos clientes o se divide en un menor número de llamados, el descuento por cliente o por llamado será mayor y por consiguiente también el incentivo para aceptar la ampliación de las ventanas.

En la siguiente tabla se muestra el ahorro generado para cada instancia en comparación a cuando se tiene uno y dos técnicos más. También se muestra la cantidad de clientes a los que se les hace efectiva la relajación y la cantidad de servicios con ventanas de tiempo ampliadas.

NºTécnicos	Instancia	Ahorro vs 26 Técnicos	Ahorro vs 27 Técnicos	Cantidad de Clientes	Cantidad de ventanas relajadas
25	400_1	\$ 270.867	\$ 537.600	1	69
25	400_2	\$ 239.667	\$ 506.400	2	129
25	400_3	\$ 233.400	\$ 500.133	3	176
25	400_4a	\$ 251.067	\$ 517.800	4	221
25	400_4b	\$ 245.467	\$ 512.200	4	211
25	400_4c	\$ 243.533	\$ 510.267	4	209
25	400_5	\$ 265.733	\$ 532.467	5	256
25	400_6	\$ 253.933	\$ 520.667	6	288
25	400_7a	\$ 258.067	\$ 524.800	7	311
25	400_7b	\$ 256.933	\$ 523.667	7	307
25	400_7c	\$ 251.400	\$ 518.133	7	298
25	400_8	\$ 285.600	\$ 552.333	8	330
25	400_9	\$ 253.867	\$ 520.600	9	349
25	400_10	\$ 228.933	\$ 495.667	10	367
25	600_1	\$ 253.867	\$ 520.600	1	69
25	600_2a	\$ 290.867	\$ 557.600	2	129
25	600_2b	\$ 286.200	\$ 552.933	2	116
25	600_2c	\$ 293.000	\$ 559.733	2	107
25	600_3	\$ 267.867	\$ 534.600	3	176
25	600_4	\$ 263.533	\$ 530.267	4	221
25	600_5	\$ 264.400	\$ 531.133	5	256
25	600_6	\$ 264.267	\$ 531.000	6	288
25	600_7a	\$ 235.467	\$ 502.200	7	311
25	600_7b	\$ 245.333	\$ 512.067	7	307
25	600_7c	\$ 239.800	\$ 506.533	7	298

25	600_8	\$ 219.733	\$ 486.467	8	330
25	600_9	\$ 269.933	\$ 536.667	9	349
25	600_10	\$ 266.733	\$ 533.467	10	367

Tabla 14 Ahorro y cantidad de clientes y ventanas relajadas para cada instancia, demanda media

En base a la información de la tabla anterior, se reafirma lo planteado previamente y se muestra cómo a medida que aumenta el número de clientes que se acogen a la promoción, el ahorro se mantiene casi constante generando que el incentivo por cliente disminuya. Lo mismo ocurre con el número de servicios con ventanas de tiempo relajadas, que al aumentar (manteniendo constante el número de técnicos) no generan un aumento del ahorro significativo, incluso en algunos casos disminuye,

En la siguiente figura es posible observar gráficamente lo descrito anteriormente. Se muestra cómo al aumentar el número de clientes a los cuales se les relajan las ventanas de tiempo, y con ello el número de servicios acogidos a la relajación, disminuye el incentivo entregado por cliente. Se observa también que la gráfica del ahorro generado en comparación a un sistema con 26 técnicos tiene el mismo comportamiento que la gráfica de comparación con un sistema de 27 técnicos pero alcanza valores cercanos al 50% de esta última. Esto indica que en el análisis marginal, el ahorro generado por un técnico menos es casi constante y se muestra nuevamente que la mayor parte del ahorro está explicado por los costos variables asociados al tamaño de la flota (sueldo y vehículo).

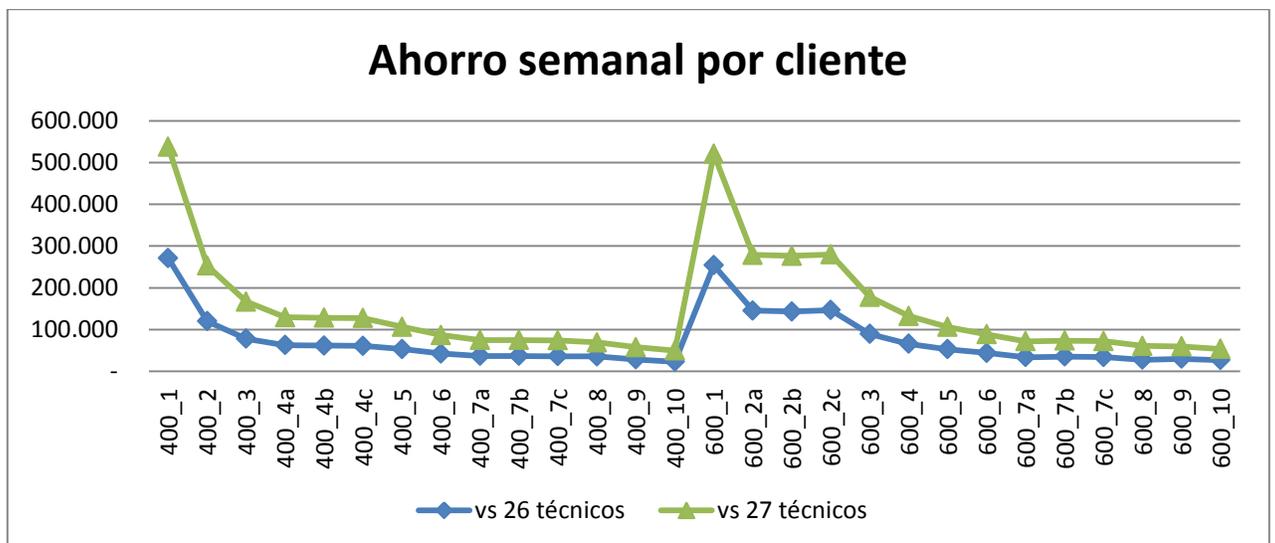


Figura 13 Ahorro por cliente de la relajación de ventanas v/s un número mayor de técnicos

Como mencionado anteriormente se observa cómo las curvas son decrecientes al aumentar al número de técnicos a los cuales se les relajan las ventanas de tiempo. En los únicos casos en donde la curva tiene valores constantes es cuando se trata de instancias con la misma magnitud de relajación, mismo número de beneficiados pero diferentes clientes. Esto se explica ya que al ser constante el ahorro para las diferentes instancias, el ahorro por cliente es el mismo cuando se comparan instancias con la misma cantidad de clientes favorecidos por la medida.

Lo anterior tiene más sentido aun cuando se toman instancias donde los clientes que se permutan, para el estudio de la robustez de la medida, tienen una cantidad similar de solicitudes. Por otro lado, observando el mismo efecto en el gráfico a continuación, se observa que en algunos segmentos, cuando se trata de instancias con el mismo número de clientes acogidos a la relajación, la curva incluso es creciente.

Esto es notorio para las instancias con 4 clientes con ventanas relajadas a 400 minutos y también para las instancias con 2 clientes y ventanas de tiempo de 600 minutos. Lo anterior ocurre dado que en esos segmentos, al permutar los clientes que forman parte del grupo que acepta la promoción, clientes con un mayor número de llamados son reemplazados por unos de menor número. Esto hace que el número total de llamados sea menor al caso original (con los clientes de mayor cantidad de servicios requeridos) y, como el ahorro es prácticamente el mismo, el ahorro por llamado aumenta.

Analizando la estrategia de descuento por servicio, la siguiente figura muestra cómo al aumentar el número de clientes en la promoción, aumentando así el número de servicios con ventanas relajadas, el descuento por servicio disminuye. Es importante destacar que a medida que van ingresando nuevos clientes a la promoción esta disminución es mucho menor llegando a ser prácticamente constante cuando se tienen entre 6 y 10 clientes con las ventanas relajadas. Esto se debe a que los últimos clientes que ingresan tienen un menor número de llamados que su impacto en el ahorro por servicio es menor.

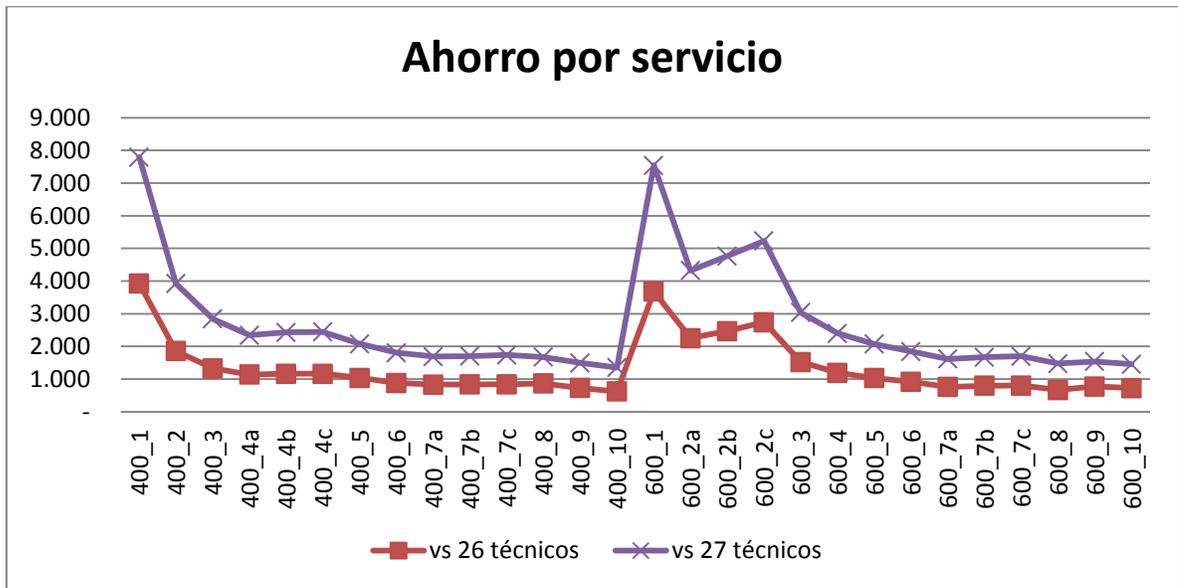


Figura 14 Ahorro por servicio v/s un número mayor de técnicos

La información entregada detalla el incentivo monetario acorde a dos posibilidades de mecanismos de compensación, el de establecer un descuento fijo para cada cliente que decida aceptar la promoción y el de establecer un descuento por llamado. Para ambos casos los resultados demuestran lo planteado en los primeros párrafos de este capítulo, donde se señala que siempre se debe optar por la instancia que iguala la calidad de servicio que la instancia con mayor cantidad de técnicos y que implica la relajación de las ventanas de un menor número de clientes y un menor número de servicios. Esto dado que las curvas son decrecientes y de esta manera es posible maximizar el incentivo para los clientes y el mecanismo tiene más posibilidades de ser exitoso.

Para facilitar la determinación de qué mecanismo es mejor para aplicar como criterio de compensación se toma el caso en que se compara la relajación de las ventanas de tiempo a 400 minutos con el aumento de un técnico. La siguiente tabla muestra el caso exitoso que requiere la relajación al menor número de clientes para llegar al mismo nivel de servicio que con 26 técnicos.

N°Técnicos	Instancia	Violación Ventanas	Ahorro
26	200	2.746	NA
25	400_4a	2.628	251.067

Tabla 15 Resultados caso exitoso comparando con 26 técnicos y relajando a 400 minutos

En esta instancia es necesario relajar las ventanas de tiempo a 4 clientes. La siguiente tabla muestra estos 4 clientes y el número de llamados que realizan a la semana:

Cliente	Cantidad de llamados
1	69
3	60
4	47
2	45

Tabla 16 Clientes con mayor número de llamados caso demanda media

Para escoger una estrategia es necesario conocer sus resultados. La siguiente tabla muestra la compensación que recibiría cada uno de estos clientes siguiendo ambas estrategias.

Cliente	Cantidad de llamados	Beneficio estrategia por cliente	Beneficio estrategia por servicio
1	69	\$62.767	\$78.387
3	60	\$62.767	\$68.163
4	47	\$62.767	\$53.394
2	45	\$62.767	\$51.122

Tabla 17 Comparación estrategias de compensación

Es claro que si se opta por una estrategia de descuento por cliente todos los que acepten relajar sus ventanas recibirán la misma compensación. El máximo de este descuento es el ahorro, \$251.067, dividido en cuatro clientes, es decir \$62,767 a la semana. Por otro lado si se opta por una estrategia por servicio, aquellos clientes que realicen un mayor número de llamados, al sumar los descuentos de la semana recibirán una compensación mayor que el resto. Esto implica entregarles un mayor incentivo a los clientes que hacen un mayor número de llamados y por ende tienen un mayor impacto en el nuevo ruteo si sus ventanas son ampliadas.

Al comparar los dos mecanismos planteados es posible aseverar que entregar un descuento fijo por cada cliente que acepta la promoción presenta varias desventajas frente a entregar un descuento por servicio. En primer lugar, genera que se haga el mismo descuento a clientes que solicitan muchos servicios y otro que no. Esto implica que el descuento no tenga una relación directa con el dinero gastado por el cliente (proporcional al número de requerimientos) por lo que se estaría sub incentivando a aceptar la promoción a aquellos clientes que más llaman y que son los que tienen una mayor incidencia en la calidad de servicio. La sub incentivo subyace en

que se está entregando el mismo incentivo para ejecutar una acción a dos clientes que tienen un efecto diferente en los resultados cuando lo correcto sería entregar una compensación mayor a aquel cliente que genera un mayor beneficio. De la misma forma, se estaría sobre incentivando a aquellos clientes que realizan menos requerimientos. El nivel de la distorsión de los incentivos estaría dado por la diferencia entre el número de llamados entre los clientes que aceptan la promoción. Mientras mayor sea la diferencia, mayor será la distorsión planteada, disminuyendo fuertemente el incentivo a los clientes con mayor número de solicitudes cada vez que se incorpora a la promoción a un cliente con una cantidad reducida de llamados.

La flexibilidad de qué clientes incluir en la promoción es otro aspecto que se pierde al optar por descuentos por cliente por sobre descuentos por servicio. Esto dado que, por ejemplo, en una situación en la que algunos clientes ya han aceptado la promoción pero aún no se logra alcanzar la misma calidad de servicio que se obtiene con un mayor número de clientes. Si los clientes que siguen en el ranking (ordenado por la cantidad de solicitudes) no aceptan la promoción es necesario que varios clientes con un menor número de llamado si la acepten. Si se utiliza una promoción por cliente, incluir a muchos clientes más pequeños puede ser muy costoso si el descuento de la promoción ya está establecido, o puede generar que el incentivo para el primer cliente se reduzca en demasía. Por otro lado, si el descuento es por servicio, es posible elegir libremente a los clientes que hacen que el sistema logre la calidad de servicio esperadas sin distorsionar los incentivos.

Finalmente, es posible plantear que tener descuentos por servicio es una alternativa mejor que entregar descuentos por cliente dado que da como resultado incentivos más relacionados con el nivel de gastos de los clientes, es decir mayores descuentos a los clientes con más llamados. Por otro lado entrega una mayor libertad para elegir a los clientes que se desea participen en la promoción. Esto se da básicamente porque es la cantidad de ventanas relajadas lo que tiene una relación directa con la mejoría en la calidad de servicio y no la cantidad de clientes a los que se les relajan las ventanas de tiempo.

De esta forma se propone la instauración de un mecanismo que elija a los clientes para entregarles la promoción de tal manera que se minimice el número de servicios afectos a la relajación de ventanas de tiempo. Esto implica que se maximiza el incentivo por llamado. Esta es la estrategia utilizada para el resto de la investigación.

4.2 ANÁLISIS DE OTRAS SEMANAS PARA CASOS EXITOSOS.

Con la finalidad de poder generalizar los resultados obtenidos y analizar la sensibilidad que estos tienen con respecto a la demanda se analizan otras dos semanas, una con una demanda baja respecto al promedio y otro con una demanda alta.

4.2.1 Semana baja demanda

En primer lugar se analiza la semana (lunes a viernes) comprendida entre el 6 y el 10 de Enero del 2003. Durante esta semana se reciben 583 llamados, un 16% menos que en la semana promedio analizada. La distribución diaria y semanal siguen los mismos patrones que el resto de las semanas del año.

Día	Llamados
Lunes	140
Martes	114
Miércoles	118
Jueves	111
Viernes	100
Total general	583

Tabla 18 Distribución diaria de la demanda

En la tabla anterior se muestra que el día de mayor demanda es el lunes, luego martes, miércoles y jueves tienen una demanda similar e inferior al día lunes. Finalmente el viernes es el día con menor demanda. De esta misma forma, en el siguiente gráfico se muestra que los intervalos del día donde se concentra la demanda son entre las 9:00 y 13:00 hrs y entre las 15:00 y las 18:00 hrs.

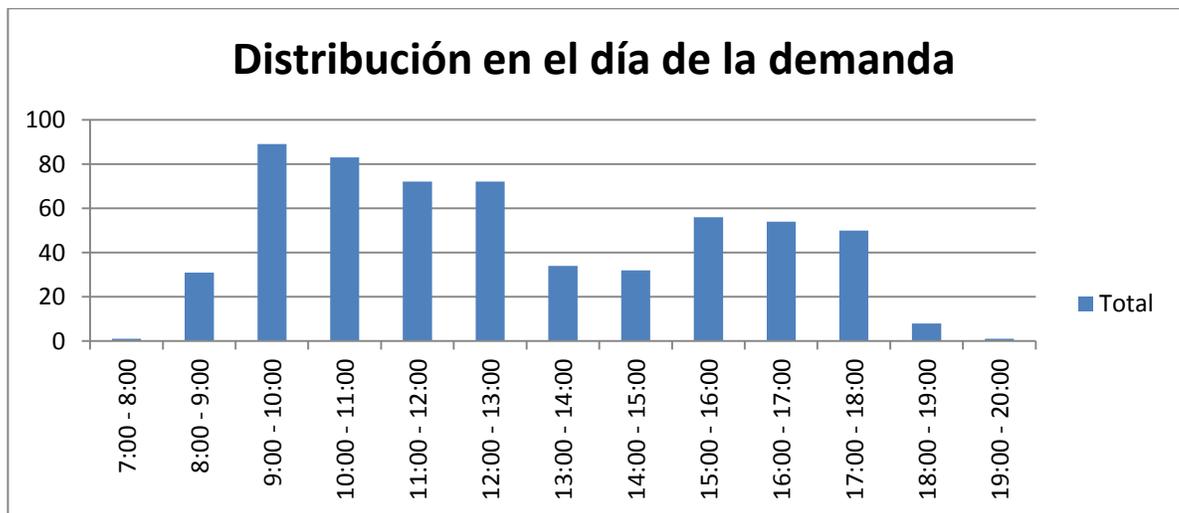


Figura 15 Distribución de la demanda por hora

Al igual que con la semana promedio, en este caso se busca el ahorro generado mediante la relajación de las ventanas de tiempo a algunos de los clientes con mayor número de llamados en comparación con un sistema compuesto por un mayor número de técnicos y logrando una calidad de servicio similar. En la siguiente tabla se muestra a los 10 clientes que llaman con mayor frecuencia y que son los principales candidatos para ofrecer la promoción.

Cliente	Llamados
3	52
1	47
2	45
5	39
4	29
7	24
9	24
6	19
19	17
15	17

Tabla 19 Top 10 de clientes con mayor número de llamados

Con la finalidad de simplificar el estudio y tomando en cuenta lo establecido en el capítulo 4.1.6. Generación de un mecanismo de compensaciones, para el análisis sólo se consideran aquellas instancias exitosas, es decir, que logran el mismo nivel de servicio que aumentando el número de técnicos y que minimizan el número de clientes a los cuales se les relajan las ventanas de tiempo.

A continuación se muestran gráficamente los resultados obtenidos para este nuevo escenario de menor demanda destacando con rojo aquellos casos exitosos, es decir, que logran el mismo nivel de servicio que con un mayor número de técnicos relajando las ventanas de tiempo al menor número de clientes posible.

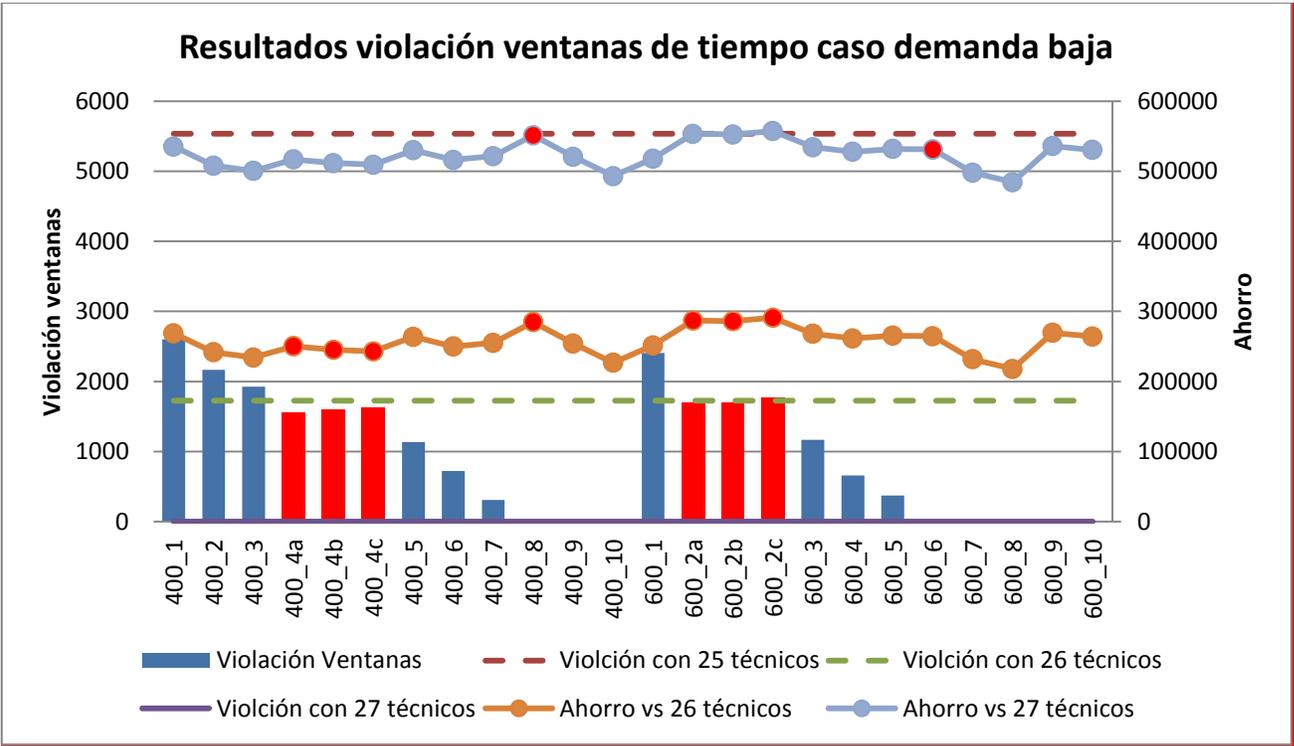


Figura 16 Resultados violación de ventanas + costos para instancias demanda baja

Analizando la calidad de servicio a través de las violaciones de las ventanas de tiempo, se observa que con una flota de 25 técnicos es necesario relajar a 4 clientes las ventanas de tiempo a 400 minutos para llegar al mismo nivel que con una flota de 26 técnicos. Así también se observa que es necesario relajar las ventanas a 600 minutos a al menos 2 clientes para lograr el mismo efecto. Por otro lado, si lo que se quiere es conseguir el mismo nivel de servicio que con 27 técnicos entonces es necesario relajar las ventanas de tiempo a 8 y 6 clientes, cuando las magnitudes de la relajación son 400 y 600 minutos respectivamente. Por último, se mantiene la robustez de estos resultados ya que variando los clientes que son elegidos para la promoción, los resultados son similares.

En la siguiente tabla se muestran los resultados exactos para los casos exitosos destacados en la figura anterior y los costos de cada instancia.

N° Tec	Instancia	Violación Ventanas	Costo	Ahorro vs 26 técnicos	Ahorro vs 27 técnicos
25	25	5.537	12.359.787	NA	NA
26	26	1.727	12.640.720	NA	NA
27	27	0	12.907.187	NA	NA
25	400_4a	1.556	12.390.253	250.467	516.934
25	400_4b	1.597	12.395.387	245.333	511.800
25	400_4c	1.623	12.397.653	243.067	509.534
25	400_8	0	12.355.787	284.933	551.400
25	600_2a	1.690	12.353.653	287.067	553.534
25	600_2b	1.699	12.354.453	286.267	552.734
25	600_2c	1.773	12.349.720	291.000	557.467
25	600_6	0	12.375.987	264.733	531.200

Tabla 20 Resultados casos exitosos semana baja demanda

El siguiente paso es comparar los costos de las diferentes alternativas para mejorar la calidad de servicio y así poder estimar el ahorro que implica poder relajar las ventanas de tiempo a los clientes en comparación con tener una flota más numerosa. A continuación se muestra una tabla con los costos semanales de las instancias estudiadas.

Como ya fue señalado, para lograr una calidad de servicio similar a la entregada con 26 técnicos, es necesario relajar las ventanas de tiempo a 400 minutos al menos a 4 clientes. La instancia que representa aquello es la 400_4a, que tiene un costo semanal de \$12.390.253, lo que comparado con los \$12.640.720 que cuesta la instancia con 26 técnicos, representa un ahorro de aproximadamente \$250.000, es decir, más de \$1.000.0000 al mes. Si la relajación es a 600 minutos, sólo es necesario relajar las ventanas a 2 clientes. Este sistema tiene un costo de \$12.353.653, lo que significa un ahorro de aproximadamente \$1.200.000 mensuales.

Por otro lado, si se desea lograr la misma calidad de servicio que la instancia con 27 técnicos, es necesario relajar las ventanas de tiempo a al menos 8 clientes, cuando las ventanas pasan a ser de 400 minutos, y 6 clientes, cuando las ventanas pasan a ser de 600 minutos. El primer caso, que está representado por la instancia 400_8 tiene un costo de \$12.355.787, lo que comparado con el costo de tener 27 técnicos, \$12.907.187, representa un ahorro de aproximadamente \$2.300.000 mensuales. El segundo caso, donde las ventanas son relajadas a 600 minutos, está representado por la instancia 600_6 y tiene un costo de \$12.375.987 por lo que representa un ahorro de aproximadamente \$2.200.000 mensuales.

4.2.2 Semana alta demanda

En segundo lugar se analiza la semana (lunes a viernes) comprendida entre el 10 y el 14 de Junio del 2002. Durante esta semana se reciben 741 llamados, un 7% más que en la semana promedio analizada. Una vez más, la distribución diaria y semanal siguen los mismos patrones que el resto de las semanas del año.

Día	Llamados
Lunes	185
Martes	150
Miércoles	145
Jueves	142
Viernes	119
Total general	741

Tabla 21 Distribución diaria de la demanda

En la tabla anterior se muestra nuevamente que la demanda se concentra mayoritariamente el día lunes, seguido por tres días de demanda similar y un poco inferior para terminar la semana con una demanda más reducida. Por otro lado, en el siguiente gráfico se muestra que la distribución de los llamados dentro del día es similar a la de las otras dos semanas estudiadas, concentrándose entre las 9:00 y 13:00 hrs y entre las 15:00 y las 18:00 hrs.

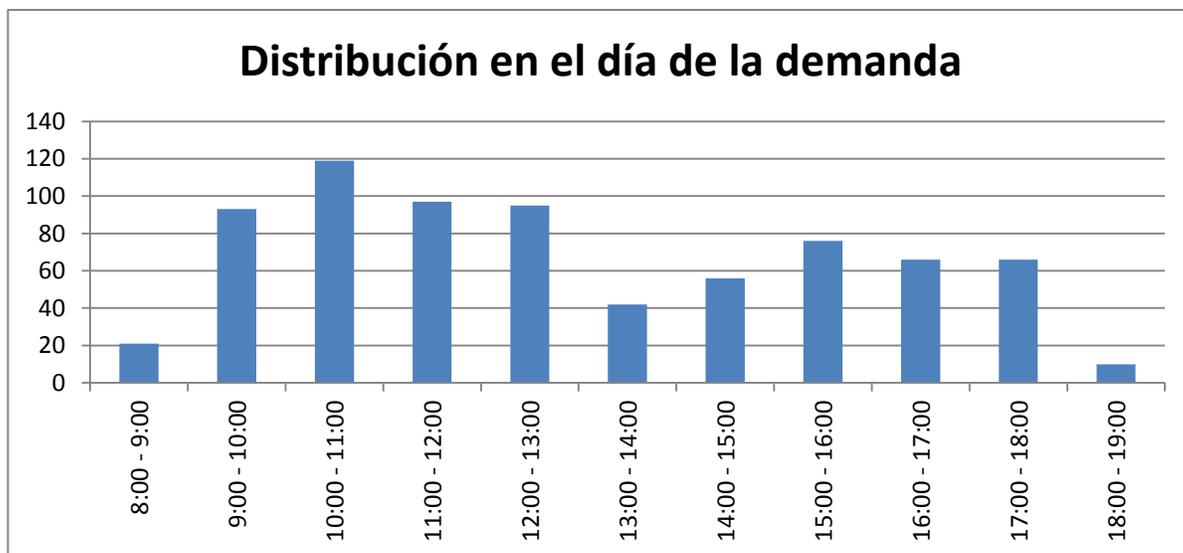


Figura 17 Distribución de la demanda por hora

Para este nuevo caso, los 10 clientes con un mayor número de llamados y que serán los candidatos para ofrecerles la promoción de relajar sus ventanas de tiempo a cambio de un descuento, son los siguientes.

Ciente	Llamados
1	57
3	53
2	40
5	38
6	36
4	30
8	25
10	25
13	23
20	22

Tabla 22 Top 10 de clientes con mayor número de llamados

Los resultados obtenidos para esta semana de alta demanda se muestran en la siguiente figura destacándose en rojo los casos exitosos.

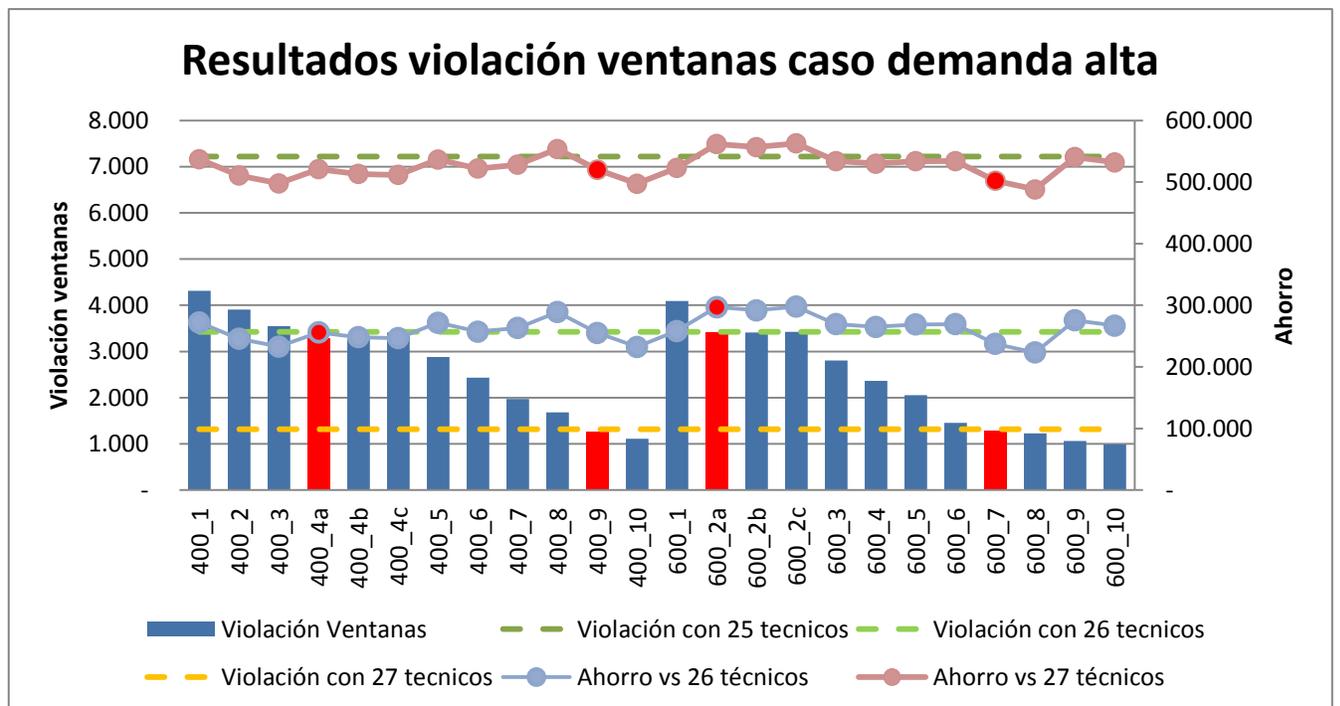


Figura 18 Resultados violación de ventanas + costos caso demanda alta

Es posible observar que con una flota de 25 técnicos es necesario relajar las ventanas de tiempo a 400 minutos a al menos 4 clientes para llegar al mismo nivel que con un técnico más. Del mismo modo, si la relajación de las ventanas es a 600 minutos sólo es necesario hacerla efectiva a 2 clientes para lograr el mismo resultado que con 26 técnicos. Por otro lado, para conseguir el mismo nivel de servicio que con 27 técnicos, se deben relajar las ventanas a 9 y 7 clientes, cuando las magnitudes de la relajación son 400 y 600 minutos respectivamente. Finalmente, una vez más se comprueba la robustez de los resultados permutando los 4 clientes a los que se les relajan las ventanas a 400 minutos en el primer caso exitoso y obteniendo resultados similares.

En la siguiente tabla se muestran los resultados exactos para los casos exitosos destacados en la figura anterior y los costos de cada instancia.

NºT	Instancia	Violación Ventanas	Se pasan de día	Costos	Ahorro vs 26 técnicos	Ahorro vs 27 técnicos
26	26	3.425	0	12.697.920	NA	NA
27	27	1.320	0	12.962.787	NA	NA
25	400_4a	3.278	4	12.441.853	256.067	520.934
25	400_4b	3.301	4	12.449.653	248.267	513.134
25	400_4c	3.412	4	12.451.253	246.667	511.534
25	400_9	1.263	4	12.442.720	255.200	520.067
25	600_2a	3.417	4	12.400.987	296.933	561.800
25	600_2b	3.408	4	12.406.053	291.867	556.734
25	600_2c	3.424	4	12.400.120	297.800	562.667
25	600_7	1.283	4	12.460.453	237.467	502.334

Tabla 23 Resultados casos exitosos semana alta demanda

La tabla muestra que relajando las ventanas de tiempo de 4 clientes a 400 minutos, lo necesario para lograr la mismas calidad de servicio que con 26 técnicos, existe un ahorro de aproximadamente \$1.100.0000, lo que se obtiene comparando los \$12.441.853 semanales de la instancia 400_4a por sobre los \$12.697.920 de la instancia con 26 técnicos. Por otro lado, relajando las ventanas de tiempo a 600 minutos, es necesario que dos clientes acepten la promoción por lo que está representado por la instancia 600_2a. Esta instancia tiene un costo de \$12.400.987 por lo que representa un ahorro de aproximadamente \$1.300.000 mensuales.

Si la comparación se realiza con una configuración que considera 2 técnicos más, es decir, 27 técnicos, para lograr la misma calidad de servicio relajando las ventanas a 400 minutos se necesita que la menos 9 clientes acepten la promoción. Esta figura está representada por la instancia 400_9 y tiene un costo de \$12.442.720 semanales. Tomando en cuenta que la instancia con 27 técnicos tiene un costos de \$12.962.787, representaría un ahorro de aproximadamente \$2.200.000. Por otro lado, para lograr el mismo objetivo pero ahora relajando las ventanas de tiempo a 600 minutos, es necesario que al menos 7 clientes acepten la oferta. Esta instancia es la 600_7 y tiene un costo de \$12.460.453 por lo que generaría un ahorro de \$2.100.000 aproximadamente.

4.2.3 Resumen resultados

Con el análisis de los tres escenarios estudiados y tomando en cuenta que en un año existen periodos de demanda baja, normal y alta, es importante comparar los resultados obtenidos y así poder fijar una política o estrategia de relajación de ventanas y compensaciones única para todo el periodo. Como fue definido anteriormente, la calidad de servicio es definida sólo mediante las violaciones a las ventanas de tiempo y las compensaciones se realizarán por servicio y no por cliente.

En primer lugar, se analiza el caso donde se comparan los costos de la relajación de las ventanas de tiempo con el aumento de un técnico en la composición de la flota, 26 en total. En este caso, se obtuvo como resultado que, si la relajación de las ventanas es a 400 minutos, para todas las magnitudes de demanda el número de clientes a los que era necesario aplicar la relajación era igual a 4. Como se puede observar en la tabla a continuación, el ahorro total obtenido fluctúa entre 250 y 256 mil pesos, reflejando un ahorro por servicio (ventana relajada) entre \$1.136 y \$1.369. El ahorro para el caso de una demanda promedio o normal es menor, \$1.136, dado que en este caso el número de llamados está más concentrado en un grupo de clientes que en los otros escenarios. Sin embargo, observando los resultados es posible aseverar que es factible establecer esta estrategia por un año completo ya que, independiente de la demanda, los incentivos para que los clientes acepten la promoción existen y son más o menos constantes, cercanos a los \$1.100 por servicio. La posibilidad de entregar un descuento fijo por cliente se descarta por lo argumentado en el punto 4.1.6 Generación de un mecanismo de compensaciones. Para implementar esta estrategia se propone que se fije una compensación de \$1.100 por servicio y así no perder dinero en ninguna etapa del año. El ahorro por servicio que está por sobre los \$1.100 queda como ahorro para la empresa de servicios.

	N° total de llamados	N° clientes relajados	N° Servicios	Ahorro Total	Ahorro promedio por cliente	Ahorro por servicio
Baja	583	4	183	250.467	\$62.617	\$1.369
Normal	694	4	221	251.067	\$62.767	\$1.136
Alta	741	4	188	256.067	\$64.017	\$1.362

Tabla 24 Resumen semanal de relajar las ventanas a 400 minutos v/s tener un técnico más.

Por otro lado, si la relajación de las ventanas es a 600 minutos, se requiere que al menos 2 clientes acepten la promoción. El ahorro generado está entre 287 y 297 mil pesos y el ahorro por servicio está entre \$2.200 y \$2.900. Al igual que en el caso anterior, se concluye que es factible implementar esta estrategia ya que existe un incentivo durante todo el año para que el cliente

accepte relajar las ventanas de tiempo. La diferencia con el caso anterior, es que al lograr un ahorro total similar relajando las ventanas a un menor número de clientes, el ahorro por servicio es mucho mayor, aproximadamente el doble. Es por esto que el incentivo para que el cliente acepte la promoción es mucho mayor en lo económico pero a cambio de menor urgencia en la respuesta a su requerimiento, es decir, la magnitud de la ampliación de la ventana es mayor.

Demanda	N° total de llamados	N° clientes relajados	N° Servicios	Ahorro Total Semanal	Ahorro promedio por cliente	Ahorro por servicio
Baja	583	2	99	287.067	\$143.534	\$2.900
Normal	694	2	129	290.867	\$145.434	\$2.255
Alta	741	2	110	296.933	\$148.467	\$2.699

Tabla 25 Resumen comparación de relajar las ventanas a 600 minutos v/s tener un técnico más.

Si lo que se busca es prescindir de al menos dos técnicos o dimensionar el ahorro que genera esta alternativa, es necesario comparar los resultados de la relajación de las ventanas con los de un escenario con 27 técnicos. De esta manera la siguiente tabla muestra cómo se comporta el ahorro generado para los periodos de diferente demanda. Se observa que cuando la relajación de las ventanas es a 400 minutos y la demanda es baja, sólo se requiere que 8 clientes acepten la promoción. En cambio, cuando la demanda es normal o alta, se requiere que al menos 9 clientes acepten la promoción. El ahorro total fluctúa entre los 485 y 520 mil pesos semanales y el ahorro por servicio entre \$1.390 y \$1.980.

Demanda	N° total de llamados	N° clientes relajados	N° Servicios	Ahorro Total	Ahorro promedio por cliente	Ahorro por servicio
Baja	583	8	279	551.400	\$68.925	\$1.976
Normal	694	9	349	486.467	\$54.052	\$1.394
Alta	741	9	327	520.067	\$57.785	\$1.590

Tabla 26 Resumen comparación de relajar las ventanas a 400 minutos v/s tener dos técnico más.

Para establecer una estrategia única para todo el año, es necesario cubrir el mínimo de clientes para los diferentes tipos de demanda. De esta forma, en este caso la estrategia correcta es relajar las ventanas de tiempo a 9 clientes. Para el escenario de baja demanda, si se relajan las ventanas de tiempo a 9 clientes el ahorro total disminuye a 520 pesos y el número de servicios aumenta a 296 por lo que el ahorro por servicio se reduce a \$1.757. Esta cifra es mayor a los \$1.394 de ahorro por servicio que se logra con una demanda normal. Este último monto, al ser el menor ahorro por servicio de todos los escenarios, es el que se toma como límite superior para la

compensación. De esta forma, se plantea que para este caso, la estrategia a seguir es relajar las ventanas de tiempo a 9 clientes y ofrecerles un incentivo no mayor a los \$1.390 por servicio.

Por último, si la relajación de las ventanas de tiempo es a 600 minutos y la demanda es baja, sólo se necesita que 6 clientes acepten la promoción para lograr la misma calidad de servicio que con 27 técnicos. Por otro lado, si la demanda es normal o alta, es necesario que al menos 7 técnicos la acepten. El ahorro que se obtiene fluctúa entre los 500 y 530 mil pesos a la semana y entre \$1.600 y \$2.250 por servicio. Si en el caso de una demanda baja, se decide relajar las ventanas a 7 clientes, el ahorro por servicio baja de \$2.251 a \$1.778. Independiente de aquello, el ahorro menor por servicio se da para el caso de la demanda normal y es el valor que se fija como cota superior para la compensación. De esta forma, se plantea como estrategia permanente para todo el año el relajar las ventanas de tiempo a 7 clientes y no entregar una compensación por servicio mayor a \$1.600. Esta estrategia se considera factible pues entrega incentivos a los clientes para aceptar ampliar sus ventanas de tiempo.

Demanda	N° total de llamados	N° clientes relajados	N° Servicios	Ahorro Total	Ahorro promedio por cliente	Ahorro por servicio
Baja	583	6	236	531.200	\$88.533	\$2.251
Normal	694	7	311	502.200	\$71.743	\$1.615
Alta	741	7	279	502.334	\$71.762	\$1.800

Tabla 27 Resumen comparación de relajar las ventanas a 600 minutos v/s tener dos técnico más.

En el cuadro a continuación se resume cada una de las 4 estrategias planteadas manteniendo el número de técnicos en 25 y mejorando la calidad de servicio mediante la relajación de las ventanas de tiempo.

Comparación N° Técnicos	Relajación Ventanas	N° Clientes Relajados	Ahorro Mensual Promedio	Compensación por servicio
26	400	4	\$1.035.000	\$1.100
26	600	2	\$1.267.000	\$2.200
27	400	9	\$2.135.000	\$1.390
27	600	7	\$2.135.000	\$1.600

Tabla 28 Resumen estrategia planteadas

Con respecto a las alternativas es posible plantear como supuestos lo siguiente:

- Mientras menor sea la magnitud de la relajación de las ventanas de tiempo más fácil será conseguir la aceptación del cliente.

- Mientras menor sea el número de clientes a los cuales sea necesario relajar las ventanas de tiempo, más fácil será tener éxito en la estrategia planteada.
- Mientras mayor sea la compensación por servicio mayor incentivo tendrán los clientes para aceptar la promoción.
- La relevancia que tiene cada uno de estos factores sobre la decisión final de la estrategia depende exclusivamente de la valoración de los clientes.

La recomendación para el caso en particular en estudio es tomar la opción de relajar las ventanas de tiempo y lograr una calidad de servicio similar a 26 técnicos relajando las ventanas de tiempo a 600 minutos. Esto dado que el incentivo por servicio para aceptar la promoción es casi el doble que para los otros casos y sólo es necesario convencer a dos clientes de relajar sus ventanas de tiempo. Se considera que el factor de que la magnitud de la ampliación de las ventanas sea mayor, 200 minutos más, podría no ser tan relevante ya que si el cliente está dispuesto a relajar sus ventanas a 400 minutos, probablemente pueda estarlo también a relajarlas a 600 minutos. Esto sin duda es un supuesto que debe ser demostrado con un estudio de mercado pero que no corresponde al alcance de esta tesis.

Elegir la estrategia de relajar las ventanas de tiempo a 600 minutos a 2 clientes implica que durante todo el año el servicio será atendido por 25 técnicos y que los dos clientes con un mayor número de llamados tendrán un descuento en su servicio a cambio de permitir un mayor tiempo de respuesta. Esta configuración logra una calidad de servicio similar que una con 26 técnicos pero tiene costos menores.

4.2.4 Estrategia de compensación anual

Habiendo definido ya una compensación por servicio y habiendo elegido la estrategia de ofrecer un descuento por servicio a dos clientes por permitir ampliar sus ventanas de tiempo a 600 minutos se procede a analizar el impacto económico de esta alternativa para un año completo.

Demanda	N° total de llamados	N° clientes relajados	Costo Semanal	N° Servicios relajados	Ahorro Total Semanal	Ahorro por servicio
Baja	583	2	12.380.920	99	287.067	\$2.900
Normal	694	2	12.353.653	129	290.867	\$2.255
Alta	741	2	12.400.987	110	296.933	\$2.699

Tabla 29 Resumen comparación de relajar las ventanas a 600 minutos v/s tener un técnico más.

Teniendo el ahorro semanal para cada nivel de demanda es posible calcular el ahorro mensual. De esta manera, y tomando que cada mes contiene 4 semanas, se tiene que

Demanda	N° Servicios Relajados al mes	Ahorro Total Mensual
Baja	396	\$1.148.268
Normal	516	\$1.163.468
Alta	440	\$1.187.732

Tabla 30 resultado mensual - 25 técnicos y 2 clientes con ventanas relajadas a 600 minutos

El siguiente paso es identificar qué meses del año presentan niveles de demanda altos, medios o bajos. Esta segmentación se obtiene de la realización de un test *Chi-squared* presentado en Leng et al (2011). Los tres clúster resultantes y sus parámetros se muestran en la siguiente tabla.

Grupo	Meses	Chi Squared	Freedom Degrees	Demanda	Asymptotic Significance
Grupo 1	Enero, Marzo, Mayo, Junio, Agosto, Noviembre	6,844	5	Media	0,233
Grupo 2	Octubre, Abril, Julio	5,226	2	Alta	0,73
Grupo 3	Febrero, Septiembre, Diciembre	3,113	2	Baja	0,211

Tabla 31 Test Chi Squared para el nivel de demanda mensual

Los resultados del test señalan que existen 3 meses de demanda alta, 6 de demanda media y 3 de baja demanda. La siguiente tabla muestra como es el comportamiento anual del sistema.

Demanda	N° Meses	Total Servicios relajados	Ahorro
Baja	3	1.188	3.444.804
Normal	6	3.096	6.980.808
Alta	3	1.320	3.563.196
Total Anual	12	5.604	13.988.808

Tabla 32 Comportamiento anual del sistema

La tabla anterior muestra que bajo la política escogida se relajan 5.604 ventanas de tiempo a 600 minutos. Esto genera un ahorro de casi 14 millones de pesos lo que resulta un ahorro por servicio de \$2.496,2. Este es el descuento máximo para la promoción. Cualquier valor por sobre este descuento genera pérdidas para la empresa de servicios y al contrario, cualquier descuento menor a este número le genera ingresos. Sólo como ejercicio, si se aplicase un descuento de \$2.000 por servicio la ganancia para la empresa sería de 2,8 millones de pesos. Es importante señalar que este resultado se obtiene tomando un descuento parejo para todos los periodos de demanda.

Demanda	N° total de llamados a la semana	Costo Semanal	Costo por servicio
Baja	583	12.380.920	21.236
Normal	694	12.353.653	17.800
Alta	741	12.400.987	16.735

Tabla 33 Costos por llamado

La tabla anterior muestra cuáles serían los costos por llamado para los diferentes tipos de demanda. Se observa que los \$2.496 de ahorro que se obtiene por cada servicio con las ventanas relajadas representan entre un 11,7% y 15% de los costos de esos servicios por lo que se espera puedan reflejar un ahorro relevante.

5 CONCLUSIONES

El objetivo general de la tesis consiste en evaluar y cuantificar el ahorro que se obtiene al tener la posibilidad de ampliar las ventanas de tiempo y establecer un mecanismo de compensaciones para aquellos clientes que acepten la extensión, manteniendo una calidad de servicio aceptable.

La conclusión primordial de este trabajo de investigación es que, dados los resultados obtenidos, se demuestra que sí es posible obtener la misma calidad de servicio relajando las ventanas de tiempo a un número limitado de clientes que aumentando marginalmente el tamaño de la flota. A lo anterior se suma que seguir la estrategia de relajación de ventanas tiene un costo menor que la de aumentar el número de técnicos generando un ahorro disponible para establecer un mecanismo de compensaciones, descuentos, que incentiven a los clientes a aceptar ser atendidos con menor urgencia. El ahorro generado se basa en que para este tipo de problemas los costos más relevantes tienen que ver directamente con el tamaño de la flota, sueldo de los técnicos y el costo que implican sus vehículos. De esta forma, una composición con un menor número de técnicos tiene por lo general un menor costo de operación y también una menor calidad de servicio (*trade off*).

Se hace referencia a un aumento marginal del número de técnicos dado que los resultados muestran que relajar las ventanas de tiempo sólo compensa la mejora en la calidad de servicio generada por el aumento de 1 ó 2 técnicos para un caso base de 25 en total. Esto está dado básicamente porque, tal como muestran los resultados, el incrementar el tamaño de la flota genera un mejoramiento directo de la calidad de servicio ya que con un mayor número de técnicos cada uno debe visitar un menor número de clientes. A esto se suma, que los resultados muestran que aumentar el número de clientes tiene una incidencia significativa tanto en la disminución de la violación de las ventanas de tiempo como en el tiempo de servicio; es decir, en general los clientes son atendidos con mayor prontitud, exista o no una violación de ventanas. Esto ocurre en menor medida con la relajación de las ventanas cuyo impacto se enfoca en reducir las violaciones de las ventanas de tiempo por lo que cuando los clientes valoran mucho este factor (ventanas de tiempo) la estrategia de relajación de ventanas tiene un mayor impacto. El mecanismo por el cual la estrategia de relajación de ventanas genera una mejor calidad de servicio es el reordenamiento del ruteo diario relajando algunas restricciones. Si el ruteo original presenta holguras en su composición, el efecto de la relajación es mínimo pues el ruteo casi no se modifica. Esto ocurre cuando se van incorporando uno a uno los clientes a la estrategia de relajación ya que los últimos, junto con representar un menor volumen de llamados, se enfrentan a un ruteo menos restringido que los primeros por lo que cada vez el impacto es menor.

Es posible aseverar que el ahorro en costos operativos generado por aquellas instancias que siguen la estrategia de relajación de ventanas es bastante significativo pues fluctúa entre 2% y 2,5% (\$1.100.000 mensuales aprox.) cuando se comparan con aquellas que tienen un técnico más y entre un 4% y 5% (\$2.150.000) cuando se comparan con una instancia con 2 técnicos más. Como ya fue señalado, este ahorro es el monto disponible para generar un mecanismo de compensaciones que busca incentivar la aceptación de la promoción. A través de este trabajo no es posible determinar que el ahorro obtenido es suficiente para desarrollar una estrategia de compensación exitosa y el único mecanismo para averiguarlo es realizar un estudio de mercado, que esta fuera del alcance de este trabajo.

Para el caso en estudio, y para el cual se puede ver el Resumen de Resultados en el punto 5.4.3, se aconseja la estrategia de relajar el 18% (2 clientes) de las ventanas a 600 minutos. Con esta estrategia, se tiene un límite de compensación por servicio de \$2.500 (app.). Esto representa entre un 11,7% y un 15% de los costos relacionados esos servicios por lo que se espera que representen un ahorro considerable en el precio del servicio, lo que haría factible la estrategia de compensaciones.

Otro atributo, que mejora la aplicabilidad de la relajación de las ventanas de tiempo, es que se trata de una estrategia en la cual es posible permutar los clientes que se incorporan a la promoción y los resultados no varían significativamente. Esto entrega flexibilidad a la empresa que aplica la política ya que si un cliente no acepta la promoción, puede intentarlo con los clientes que siguen en la lista. Lo que importa es el porcentaje de los servicios totales que se relajan y no a qué clientes en específico.

Por otro lado, es importante destacar que el caso en estudio fue analizado para diferentes tipos de demanda. Los resultados obtenidos muestran que si bien la estrategia de relajar las ventanas tiene un impacto levemente mayor cuando la demanda crece, pues el problema está más restringido y al relajarlo es posible reordenar el ruteo, los resultados son bastante similares para todos los escenarios. Por ejemplo, para el caso de menor demanda se obtuvo que era necesario relajar las ventanas de tiempo a un cliente menos que para el resto de los escenarios. Sin embargo, la totalidad de servicios relajados para ese escenario representaba una proporción similar que en el resto de los casos. Es decir, independiente de la demanda, era necesario duplicar la amplitud de las ventanas de tiempo a aproximadamente un 30% de los servicios para lograr una calidad de servicio similar que la ofrecida con un técnico más. Esa cifra disminuía a un 18% cuando la amplitud de las ventanas se triplicaba. Por último, si la comparación era con respecto a la incorporación de dos técnicos, el porcentaje de servicios necesario para lograr la misma calidad de servicio era un 50% cuando se duplicaba la amplitud de las ventanas y un 40% cuando se triplicaba. Independiente de lo anterior, dado que el volumen de llamados varía para

los diferentes escenarios de demanda y no así el ahorro generado, el descuento por servicio posible de entregar también varía, resultando mayor cuando el número de llamados disminuye. Tomando en cuenta lo anterior, para generar un mecanismo que sea rentable en cualquier periodo del año, se podría establecer como descuento máximo el mínimo de los ahorros por servicio calculado para los diferentes escenarios. De esta manera no habrá utilidad para dicho periodo pero sí para el resto con un menor número de servicios relajados. Otra forma de calcular el descuento máximo es observar la configuración anual completa. De esta forma, calculando el ahorro total anual y dividiéndolo por el número total anual de llamados, a los que se les relajan las ventanas, es posible obtener el ahorro promedio por llamado. Dicho número representa el descuento máximo posible, pues les entrega a los clientes el 100% del ahorro.

Una vez calculado el ahorro generado por la estrategia de ampliación de ventanas de tiempo, es importante definir cómo utilizarlo para incentivar a los clientes para que permitan ser atendidos con menor urgencia. Una de las principales definiciones en este sentido es si el descuento se realiza por cliente o por servicio. Los resultados muestran que un descuento por cliente genera una distorsión de los incentivos ya que se está entregando el mismo descuento a clientes de llaman muchas veces y a aquellos que no llaman muy a menudo. Sin duda esto es contraproducente ya que de los resultados obtenidos se desprende que el impacto de relajar las ventanas de tiempo a un cliente con más llamadas es mayor a aplicarlo a uno con menor número de llamados. Los incentivos deben ser consistentes con lo anterior por lo que se deben destinar mayores recursos a convencer a los clientes con un mayor número de llamados.

Por otro lado, ya que se necesita que varios clientes acepten la promoción para que la estrategia logre tener éxito, fijar un descuento por cliente limita la libertad de incorporar clientes a la promoción ya que independiente de lo poco significativo que pueda ser ese cliente el costo es el mismo. Esto se exagera cuando son pocos los clientes necesarios para lograr éxito en la promoción ya que incorporar a un nuevo cliente significa disminuir el descuento considerablemente para el resto de los clientes o, en su defecto, mantener el descuento fijo y perder dinero. De esta forma se define que el mejor mecanismo es entregar una compensación por servicio pues permite manejar e incentivar directamente el número de servicios a relajar, que es lo que finalmente incite en la política de ampliación de ventanas y no la cantidad de clientes.

Otra definición con respecto al mecanismo de compensación es saber a qué y cuántos clientes ofrecer la promoción. El qué clientes ya fue descrito en el párrafo anterior donde se señala que aplicar la relajación a clientes con más servicios tiene un mayor impacto. Esto implica que los esfuerzos deben orientarse a convencer a aquellos clientes más frecuentes de aceptar el descuento. Ahora bien, a cuántos clientes es una pregunta que no se responde directamente pues está relacionado con la magnitud de la relajación. Si bien está definido el porcentaje de servicios

que deben ver sus ventanas relajadas para que la estrategia tenga éxito, este porcentaje puede cambiar si se modifica la magnitud de la ampliación. Los resultados muestran que mientras mayor es la amplitud de la relajación se necesita un menor número de servicios con ventanas relajadas. Otro factor relevante para tomar esta decisión es que cuando se logra llegar al número deseado de ventanas relajadas con un menor número de clientes, el descuento total que recibe cada cliente es mayor por lo que hay un mayor incentivo para aceptar la promoción.

También es importante destacar que siempre es más fácil convencer a un menor número de personas de seguir una medida que a un gran número de personas, sobre todo cuando el incentivo es mayor. De esta manera la decisión está entre entregar un mayor descuento a un menor número de personas para que permitan relajar sus ventanas de tiempo en una mayor proporción o entregar un menor descuento a un número mayor de personas para que permitan una menor relajación de las ventanas de tiempo. La propuesta que se entrega en esta tesis es que se siga la primera opción, es decir, ofrecer un mayor incentivo a cambio de una mayor ampliación de las ventanas. Esto debido a que, como ya fue mencionado, es más fácil convencer a un menor número de clientes, sobre todo si el incentivo es mayor y también puesto que se considera que si un cliente está dispuesto a ampliar sus ventanas de tiempo en alguna proporción es porque la solicitud no tiene un alto grado de urgencia y podría esperar entonces algo más de tiempo a cambio de un mayor descuento.

Resumiendo, la conclusión final de esta tesis es que la estrategia planteada de relajar las ventanas de tiempo es completamente factible ya que permite alcanzar la misma calidad de servicio que aumentando el número de técnicos, pero ahorrando hasta un 5% de los costos operativos totales. Esto implica que la promoción que se les puede ofrecer a los clientes resulte bastante atractiva ya que incluso podría representar el 15% de los costos operativos del servicio.

Sin duda el siguiente paso de esta línea de investigativa es estudiar la valorización que le otorgan los clientes a los descuentos propuestos y así determinar cuál es el mecanismo de compensaciones óptimo. Esto se plantea para futuras investigaciones y pueden ser abordadas desde el área del marketing y la teoría de juegos. Por otro lado, también es posible dar otros pasos en esta investigación implementando otros métodos de resolución. Existen dos opciones adicionales para realizar este estudio, que se plantean fuera del alcance de esta tesis, pero que vale la pena mencionar, pues pueden ser desarrollados en investigaciones futuras:

1. Realizar el análisis del tamaño de la flota mediante simulación e incluir endógenamente la decisión de número de clientes a los cuales se les hace efectiva cada tipo de promoción dentro del modelo.

2. Incluir ambos análisis como variables de decisión dentro del problema de forma de determinar endógenamente el óptimo.

Por último, como parte de las conclusiones de este trabajo se entrega una metodología base a seguir para aquellos que quieran calcular el impacto de la medida propuesta en esta tesis en sus empresas.

- **Recopilación de la información:** el primer paso, esencial para poder realizar cualquier modelación de diferentes escenarios, es la medición de los datos relevantes del problema por un periodo de tiempo lo suficientemente extenso como para tener una buena representación de todos los ciclos por los que pasa el mercado al que se pertenece. Los datos fundamentales que se deben recopilar tienen que ver con la demanda, estos son: día y hora de la llamada, localización geográfica, cliente y tipo de solicitud, que está relacionado directamente con el tiempo de atención.
- **Análisis estadístico de los datos y generación de semanas tipo:** luego de recopilados los datos, es necesario analizarlos para generar información útil a través de ellos. De esta forma, el análisis estadístico busca determinar la distribución y composición de la demanda, diaria, semanal y mensual, y sus variaciones durante el año. Como resultado de este análisis se obtienen semanas tipo que representan los diferentes comportamientos de la demanda. Estas semanas son las utilizadas para ver cómo se comportan las diferentes estrategias estudiadas.
- **Generar ranking de clientes según criterio propio:** para poder estudiar cómo se comporta la estrategia de relajar las ventanas de tiempo a los clientes y observar la sensibilidad que tiene la medida al número de clientes a los cuales se les hace efectiva la relajación, es necesario establecer un orden a través del cual se irán incorporando los clientes uno a uno. Este orden puede tener diferentes criterios pero a su vez retornará diferentes resultados. El criterio que tiene un impacto directo en el resultado es el de frecuencia de llamados puesto que si se relajan las ventanas a un cliente que llama muchas veces a la semana, las condiciones del problema cambiarán mucho más que si se hace lo mismo con un cliente que realiza sólo un llamado. Es por lo anterior que se aconseja tomar este criterio para construir el ranking, el no hacerlo, implicará que se necesite un mayor número de clientes aceptando la promoción para lograr la misma mejora en la calidad de servicio.
- **Definición caso base:** Para poder realizar una comparación en cuanto a mejoramiento de la calidad de servicio entre el aumento del número de técnicos y la ampliación de las ventanas de tiempo es necesario definir un caso base. Esta definición está dada por el número de técnicos y las dimensiones de las ventanas de tiempo. En este punto es posible tomar la composición actual de la empresa o analizar algún otro caso de interés. A partir de esta instancia se irán realizando

modificaciones para observar cómo cambian los resultados, midiendo así el impacto de cada medida.

- **Obtención de resultados para instancias en las cuales sólo se modifica el número de técnicos:** una vez establecido el caso base y tomando el supuesto que el modelo de ruteo está definido, se debe aumentar uno a uno el número de técnicos hasta que se estime conveniente. Es necesario considerar que durante el desarrollo de esta investigación se determinó que el efecto de relajar las ventanas es comparable con el aumento marginal del número de técnicos por lo que no es necesario analizar casos con muchos de ellos. Para cada una de estas diferentes instancias se deben tabular los resultados obtenidos asociados a la calidad de servicio, es decir, el tiempo de servicio y la violación de las ventanas de tiempo. Junto con lo anterior, también se debe recoger la información relevante para calcular los costos, tales como el tiempo de viaje y el over time.
- **Obtención de resultados para instancias en las cuales sólo se modifican las ventanas de tiempo:** al igual que en el caso anterior se parte desde el caso base para comenzar a realizar las modificaciones y construir los diferentes escenarios. Sin embargo, en este caso se mantiene el número de técnicos del caso base y se van relajando las ventanas de tiempo a un conjunto de clientes. Este conjunto primeramente tiene sólo a un cliente, el primero del ranking ya establecido, y luego se van agregando uno a uno más clientes, en el orden que este mismo ranking lo indica. Al igual que en caso anterior, para cada instancia se deben tabular los resultados referentes a la calidad de servicio y los referentes a los costos.
- **Comparación costo-eficiente de las medidas:** con la obtención de todos los resultados, el siguiente paso es establecer qué instancias de la relajación de ventanas de tiempo logran el mismo impacto en la calidad de servicio que el aumento de técnicos. Una vez detectadas estas instancias se calculan las diferencias de costos involucradas que a su vez indican los montos disponibles para establecer una estrategia de compensaciones a aquellos clientes que aceptes ser atendidos con ventanas de tiempo más amplias.
- **Generación de un mecanismo de compensaciones:** al conocer cómo se comportan los resultados de las diferentes instancias generadas y para las diferentes semanas tipo es posible encontrar patrones de comportamiento y a través de estos dar origen a la generación de un mecanismo de compensaciones. Este puede ser único para todos los periodos o establecerse un mecanismo, o precios de descuento, diferente para cada etapa del año en donde la demanda se comporta de forma diferente. El mecanismo de compensaciones tiene como objetivo definir el nivel de descuento que se le otorgará a aquellos clientes que decidan aceptar ampliar sus ventanas de tiempo. Este descuento puede ser igual para cada cliente, independiente del número de solicitudes, o puede estimarse por llamado. De esta forma el cliente que realice llamados con mayor frecuencia tendrá un descuento mayor. Todas las etapas anteriormente planteadas generan una cota superior para las compensaciones pues delimitan el monto disponible. La definición de cómo se destinarán estos recursos, tal como ya fue mencionado, es decisión de cada empresa.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Toth, P., Vigo, D. (2000): “An Overview of Vehicle Routing Problems. Monographs on Discrete Mathematics and Applications”. In: The Vehicle Routing Problem. SIAM 1–26
- [2] G.B. Dantzig and R.H. Ramser (1959): “The Truck Dispatching Problem”. *Management Science* 6, 80–91.
- [3] Clarke, G., Wright, W. (1964): “Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points”. *Operations Research* 12, 568–581.
- [4] Cordeau, F., Desaulniers, G., Desrosiers, J., Solomon and M., Soumis, F. (1999): “The VRP with time windows”. Technical Report Cahiers du GERAD G-99-13, École des Hautes Études Commerciales de Montreal
- [5] Golden, B., Assad, A., Levy, L. and Gheysens, F. (1984): “The fleet size and mix vehicle routing problem”. *Computers & Operations Research* 11, 49–66
- [6] Solomon, M., and Desrosiers, J. (1988): “Time Window Constrained Routing and Scheduling Problems”. *Transportation Science*, Volume 22, 1-13
- [7] Pullen, H. and Webb, M. (1967): “A Computer Application to a Transport Scheduling Problem”. *Computation Journal*, Volume 10, 10-13
- [8] Knight, K. and Hofer, J. (1968): “Vehicle Scheduling with Timed and Connected Calls: A Case Study”. *Operations Research. Quart.* 19, 299-310
- [9] Laporte, G. and Nobert, Y. (1987): “Exact algorithms for the vehicle routing problem”. *Annals of Discrete Mathematics* 31, 147–184
- [10] Laporte, G. (1992): “The vehicle routing problem: an overview of exact and approximate algorithms”. *European Journal of Operational Research* 59, 345–358
- [11] Toth, P.,Vigo, D. (2002): *The vehicle Routing Problem, III. Siam, Monographs on Discrete Mathematics and Applications, Philadelphia*
- [12] Nemhauser, G., and Wolsey, L. (1988): “Integer and Combinatorial Optimization”. John Wiley & Sons, New York.113
- [13] Clarke, G. and Wriqth, W. (1964): “Scheduling of Vehicles from a central Depot to a number of Delivery Points”. *Operation Research* 12, 568-581.
- [14] Yellow, P. (1970): A computational modification to the savings method of vehicle scheduling. *Operational Research Quarterly* 21, 281–283
- [15] Golden, B., Magnanti, T., Nguyen, H. (1977): “Implementing vehicle routing algorithms”. *Networks* 7 113–148
- [16] Gaskell, T. (1967): “Bases for vehicle fleet scheduling”. *Operational Research Quarterly* 18, 281–295
- [17] Gabow, H. (1976): “An efficient implementation of Edmonds algorithm for maximum matching on graphs”. *Journal of the ACM* 23, 221–234
- [18] Desrochers, M., Verhoog, T. (1989): “A matching based savings algorithm for the vehicle routing problem”. Technical Report Cahiers du GERAD G-89-04, École des Hautes Études Commerciales de Montreal
- [19] Altinkemer, K., and Gavish, B. (1991): “Parallel savings based heuristics for the delivery problem”. *Operations Research* 39, 456–469
- [20] Bodin, L., Golden, B., Assad, A., and Ball, M. (1983): “Routing and

- scheduling of vehicles and crews – the state of the art”. *Computers & Operations Research* 10, 63–211
- [21] Potvin, J.Y., Rousseau, J.M. (1993): A parallel route building algorithm for the vehicle routing and scheduling problem with time windows. *European Journal of Operational Research* 66, 331–340
- [22] Mole, R.H., Jameson, S.R. (1976): A sequential route-building algorithm employing a generalized savings criterion. *Operational Research Quarterly* 27, 503–511
- [23] Christofides, N., Mingozzi, A., Toth, P. (1979): “The Vehicle Routing Problem”. In: *Combinatorial Optimization*. Wiley, Chichester 315–338
- [24] Wren, A. (1971): *Computers in transport planning and operation*. Ian Allan, Londres.114
- [25] Wren, A., Holliday, A. (1972): Computer scheduling of vehicles form one or more depots to a number of delivery points. *Operational Research Quarterly* 23, 333–344
- [26] Beasley, J. (1983): Route first – cluster second methods for vehicle routing. *Omega* 11, 403–408
- [27] Renaud, J., Boctor, F., Laporte, G. (1996): A fast composite heuristic for the symmetric traveling salesman problem. *INFORMS Journal on Computing* 8, 134–143
- [28] Glover, F. (1991): Multilevel tabu search and embedded search neighborhoods for the traveling salesman problem. Technical report, Graduate School of Business and Administration, University of Colorado
- [29] Desrochers, M., Desrosiers, J., and Solomon, M. (1992): A New Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Operations Research*, 342-354,.
- [30] Cortés, M Gendreau, Daniel Leng, Andrés Weintraub (2011). A simulation-based approach for fleet desing in a technician dispatch problem with atochastic demand.
- [31] Cortés, M Gendreau, Louis Martin Rousseau, Sebastina Saurys and Andrés Weintraub (2013).

7 ANEXOS

7.1 ANEXO A: PROTOTIPO 1.0

El prototipo creado busca entregar escenarios de prueba más simples que el caso real. A través de este escenario es posible observar patrones o tendencias en los resultados, que luego permiten que el manejo del caso real sea más simple y acotado.

El prototipo es construido de forma aleatoria pero bajo la misma estructura que el caso real; es decir, se trata de 5 instancias diarias, de lunes a viernes, que en su conjunto constituyen una semana, la que se analiza como un todo. Sin embargo, la demanda no refleja la realidad, ni en su volumen, puesto que por el objetivo de su génesis es mucho menor, ni en su distribución dentro de la semana y de cada día. A pesar de lo anterior, el prototipo no pierde validez ante su objetivo de observar cómo se comportan los resultados en un problema de menor magnitud, puesto que, al ser instancias diarias, es posible cambiar el orden de los días sin cambiar el resultado semanal, asemejándose mucho más a la distribución promedio del caso real.

Por último, a diferencia de lo planteado en los capítulos anteriores, el primer prototipo creado tiene, en el caso base, dos tipos de clientes, VIP y normales, con diferentes magnitudes de ventanas de tiempo. El análisis se basa en la comparación del caso base ya planteado con el caso en que todos los clientes tienen ventanas de tiempo similares; es decir, se amplían las ventanas de los clientes VIP. A continuación se muestran las características del prototipo en estudio.

7.1.1 Características

- **Cantidad de llamados:** el prototipo se construye con 60 llamados dentro de la semana mientras que una semana del caso real tiene en promedio más de 600 llamados.
- **Duración Prototipo:** una semana con 5 días laborales, de lunes a viernes. Tomar en cuenta que cada instancia que se corre corresponde a un día laboral.

Día	Llamados
Lunes	10
Martes	12
Miércoles	16
Jueves	14
Viernes	8
Total general	60

Tabla 34 Distribución Diaria de la demanda

- **Duración Jornada laboral:** 12 horas ó 720 minutos, entre 7:00 y 19:00 hrs.

Intervalo de tiempo	Llamadas
8:00 - 9:00	6
9:00 - 10:00	4
10:00 - 11:00	2
11:00 - 12:00	4
12:00 - 13:00	5
13:00 - 14:00	5
14:00 - 15:00	2
15:00 - 16:00	4
16:00 - 17:00	6
17:00 - 18:00	6
18:00 - 19:00	16
Total general	60

Tabla 35 Distribución de la demanda por hora

- **Total de clientes:** 10 clientes ubicados en la zona sur oriente de Santiago, en las comunas que se muestran en la siguiente figura.

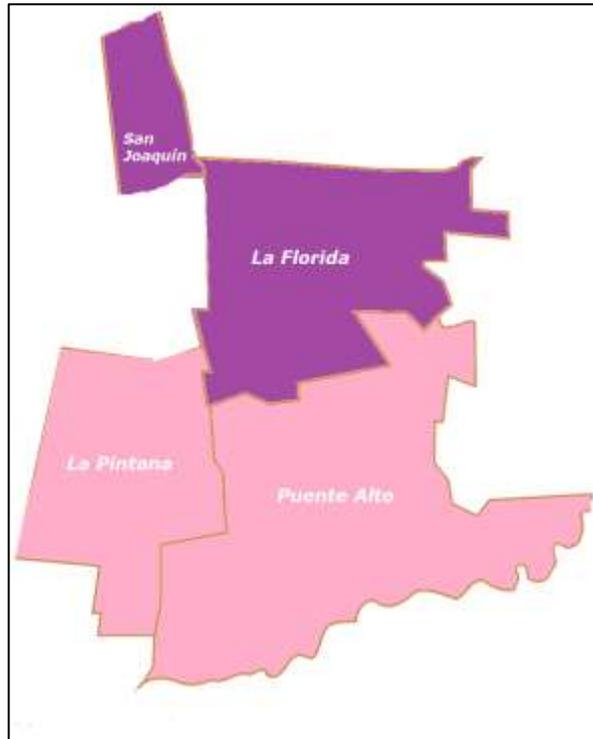


Figura 19 Mapa Zonas Prototipo 1.0

Para simplificación del problema, como cada zona se caracteriza en un solo punto, este será representado por un solo cliente, es decir, cada zona tiene un único cliente.

Cliente/Zona	Zona	Llamadas
1	La Pintana	5
2	Puente Alto - Centro	4
3	Puente Alto - Este	4
4	Puente Alto - Norte	7
5	La Florida - Sur	3
6	La Florida - SurPoniente	9
7	La Florida - Poniente	9
8	La Florida - Vespucio	11
9	San Joaquín - Sur	5
10	San Joaquín - Norte	3
Total general		60

Tabla 36 Distribución de la demanda por cliente/comuna

- **Tipos de Cliente:** Existen dos tipos de clientes:

- **Tipo A:** son los clientes más importantes, llamados VIP, por lo que tienen ventanas de tiempo más acotadas, 50 minutos. Representan el 30% de las llamadas.
- **Tipo B:** son el resto de los clientes, cuyas ventanas de tiempo son de 200 minutos. Representan el 70% de las llamadas.

Tipo de Cliente	Ventana de Tiempo	Llamadas
Tipo A	50	18
Tipo B	200	42
Total general		60

Tabla 37 Llamados por tipo de cliente

- **Tipos de Máquinas:** en el caso real existen diversos tipos de máquinas y, para simplificar el problema, en el prototipo sólo se consideran dos.

- **Tipo C:** son máquinas simples cuyo tiempo promedio de atención es de 70 minutos. Representan el 65% de las llamadas.
- **Tipo D:** son máquinas simples cuyo tiempo promedio de atención son 120 minutos. Representan el 35% de las llamadas.

Tipo de Máquina	Tiempo de atención	Llamadas
Tipo C	70	38
Tipo D	120	22
Total general		60

Tabla 38 Llamados por tipo de máquina

- **Tiempo de viaje:** Se establece la siguiente matriz de tiempos de viaje, en minutos.

NODOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	11	16	18	14	17	21	22	23	21	25
2	16	7	11	11	15	19	22	20	23	28
3	17	6	8	12	19	17	26	24	27	32
4	15	12	17	8	11	13	22	17	20	24
5	16	16	20	11	8	10	14	12	15	20
6	21	19	25	13	10	7	13	12	15	20
7	22	25	26	19	14	11	8	8	10	15
8	19	20	24	15	11	12	9	7	10	14
9	23	24	27	20	15	16	11	9	6	9
10	25	28	29	24	19	19	15	13	9	7

Tabla 39 Matriz de distancias

- **Número de técnicos:** se corre el modelo con 2, 3, 4 y 5 técnicos. Se escogen estos tamaños de flota dado que para el caso de 2 técnicos se cumple con la condición de que existan violaciones considerables a las ventanas de tiempo. Luego, se necesita estudiar como varía la calidad de servicio al ir aumentando el número de técnicos. Se observa también que con 5 técnicos ya no existe violación a las ventanas por lo que seguir aumentando el número de técnicos no genera valor agregado a la investigación.
- **Características relajación ventanas de tiempo:** para el caso en que se busque mejorar la calidad de servicio relajando las ventanas de tiempo, se tendrá que todos los clientes VIP pasarán a ser clientes normales o Tipo B. Todos tendrán ventanas de tiempo de 200 minutos, es decir, se relajarán sus ventanas de tiempo.

7.1.2 Resultados

Luego de ejecutar el modelo de ruteo para todos los días de la semana, para ambos casos, base y relajado, se obtienen los siguientes resultados totales semanales. Tomar en cuenta que “Total Base” representa los resultados semanales para el caso base y “Total Relajado” para el caso en donde las ventanas de tiempo aumentan.

	Tiempo de Viaje (minutos)			
N° Técnicos	2	3	4	5
Total Base	660	551	493	451
Total Relajado	608	513	429	405
Diferencia	52	38	64	46
	Violación Ventana de Tiempo (minutos)			
N° Técnicos	2	3	4	5
Total Base	845	300	87	10
Total Relajado	127	40	-	-
Diferencia	718	260	87	10
	Tiempo de Servicio (minutos)			
N° Técnicos	2	3	4	5
Total Base	2.711	1.465	1.210	1.217
Total Relajado	2.480	1.245	1.089	944
Diferencia	231	220	121	273
	Over time (minutos)			
N° Técnicos	2	3	4	5
Total Base	433	146	73	64
Total Relajado	375	149	70	50
Diferencia	58	-3	3	14
	Función Objetivo (minutos)			
N° Técnicos	2	3	4	5
Total Base	1.853	942	636	540
Total Relajado	1.051	608	487	439
Diferencia	802	334	149	101

Tabla 40 Resultados Prototipo 1.0

7.1.3 Análisis de resultados

De los resultados obtenidos es posible extraer las siguientes conclusiones asociadas a la correlación entre los efectos de la relajación de las ventanas y las características de las instancias.

En primer lugar, se observa que para cada uno de los parámetros medidos, tanto para el caso base como para el caso relajado, al aumentar el número de técnicos los resultados obtenidos (tiempo de servicio, violaciones de las ventanas de tiempo, distancia recorrida) disminuyen considerablemente mejorando la calidad de servicio entregada. El único caso donde esto no sucede es para el tiempo de servicio, cuando se pasa de 4 a 5 técnicos para el caso base. En esta instancia, se aumenta de 1.210 minutos con 4 técnicos a 1.217 con 5 técnicos. Si bien es un aumento marginal del 0,6% que contradice la tendencia, se explica porque la función objetivo es un polinomio que no considera sólo el tiempo de servicio. En este caso, este aumento se contrarresta con la disminución significativa de la violación de las ventanas de tiempo, que es mucho más relevante para la calidad de servicio, que pasa de 87 minutos para 4 técnicos a 10 minutos para 5 técnicos. De esta forma, la función objetivo mejora al pasar de 4 a 5 técnicos.

El parámetro que tiene una menor disminución porcentual (30% aprox.) al pasar de 2 a 5 técnicos es el tiempo de viaje. Esto se justifica dado que independiente del ruteo, todos los clientes deben ser atendidos dentro de la semana por lo que es necesario visitarlos a todos. Por último, el parámetro que tiene una mayor disminución porcentual (99%) es la violación de las ventanas de tiempo, que se entiende pues tiene una relación directa con la relajación de estas.

En segundo lugar, se observa que para todos los parámetros estudiados, independiente del número de técnicos, los resultados obtenidos para el caso donde se relajan las ventanas de tiempo son menores que los obtenidos para el caso base, lo que implica una mejor calidad de servicio. El único caso para el cual esto no ocurre es cuando se relajan las ventanas de tiempo y se atiende con una flota de 3 técnicos. En este caso, el *over time* aumenta un 2%, desde 146 minutos a 149 minutos. Este aumento se justifica dado que el tiempo extra no está considerado dentro de la función objetivo, por lo que el modelo sacrifica horas extras para poder mejorar la calidad de servicio. En este caso, la función objetivo disminuye de 942 a 608 al relajar las ventanas, lo que es una mejora del 35,5%. Si se observa sólo el tiempo de viaje, la disminución al relajar las ventanas es mínima, entre un 6% y un 13%. Esto se explica, al igual que en el análisis anterior, porque todos los clientes deben ser visitados, independiente del ruteo. Una vez más, donde más impacta la medida es en las violaciones de las ventanas de tiempo. Éstas, en el caso relajado, disminuyen más de un 85%.

El hecho que al relajar las ventanas de tiempo se mejore siempre la calidad de servicio, permite suponer que mientras mayor sea el número de clientes tipo A (VIP) que llamen, aumentará la magnitud de los efectos asociados a la relajación de las ventanas de tiempo. Lo anterior se justifica por el hecho de que habrá un mayor número de relajación de ventanas por lo que se supone un mayor impacto.

Tomando en cuenta que el objetivo es valorizar la relajación de las ventanas de tiempo, es importante comparar los casos con ventanas sin relajar con los casos con ventanas relajadas pero con un menor número de técnicos. La siguiente figura sintetiza dicha comparación, mostrando la disminución de los tiempos en cada caso (minutos).

	5 a 4 relajado		5 a 3 relajado		5 a 2 relajado	
Tiempo de Viaje	22	4,9%	-62	-13,7%	-157	-34,8%
Violación Ventanas	10	100,0%	-30	-300,0%	-117	-1170,0%
Tiempo de Servicio	128	10,5%	-28	-2,3%	-1263	-103,8%
Over Time	-6	-9,4%	-85	-132,8%	-311	-485,9%
Función Objetivo	53	9,8%	-68	-12,6%	-511,25	-94,7%
	4 a 3 relajado		4 a 2 relajado			
Tiempo de Viaje	-20	-4,1%	-115	-23,3%		
Violación Ventanas	47	54,0%	-40	-46,0%		
Tiempo de Servicio	-35	-2,9%	-1270	-105,0%		
Over Time	-76	-104,1%	-302	-413,7%		
Función Objetivo	28,25	4,4%	-415	-65,3%		
	3 a 2 relajado					
Tiempo de Viaje	-57	-10,3%				
Violación Ventanas	173	57,7%				
Tiempo de Servicio	-1015	-69,3%				
Over Time	-229	-156,8%				
Función Objetivo	-109,25	-11,6%				

Tabla 41 Comparación de resultados

De la tabla, es posible observar que sólo para dos casos la relajación de las ventanas de tiempo logra la misma o mejor calidad de servicio que el aumento de técnicos. Estos casos se reflejan en que al pasar de 5 técnicos con las ventanas sin relajar a 4 técnicos con las ventanas relajadas, la calidad de servicio mejora en un 9,8%. Por otro lado, al pasar de 4 a 3 técnicos, relajando las ventanas de tiempo, la calidad de servicio mejora un 4,4%. En todos los otros escenarios la calidad de servicio (representada en gran medida por las violaciones de las

ventanas) empeora al disminuir la cantidad de técnicos y relajar las ventanas, lo que denota que esta medida tiene una efectividad que sólo supera aumentos marginales en el tamaño de la flota. En este caso en específico, ese aumento marginal es de un técnico y sólo cuando se baja de 3 a 2 técnicos, la medida no es efectiva. Esto se justifica dado que en este escenario un técnico tiene mayor relevancia, pues representa un mayor porcentaje de la flota total. De esta manera, se podría esperar que a medida que aumenta el número de técnicos, el prescindir de unos de ellos, es menos impactante en la calidad de servicio por lo que la relajación de las ventanas de tiempo tiene un efecto relativo mayor, e incluso podría llegar compararse con el aumento de un mayor número de técnicos.

Tomando en cuenta los costos descritos en el punto 3.2.3, es posible calcular los ahorros generados por la relajación de ventanas de tiempo en desmedro del aumento del número de técnicos. Como modo de ejemplificar la evaluación económica que se realizará con el caso real, a continuación se describen estos ahorros para el primer caso presentado en la figura, donde se pasa de 5 a 4 técnicos:

Ahorros:

- Valor semanal de un técnico que equivale a \$150.000
- Valor semanal de una camioneta que equivale a \$150.000.
- Valor de costos de transporte equivalentes a 22 minutos, \$1.122

Aumentos de Costos:

- Valor de Over time equivalente a 6 minutos, \$400.

Calidad de Servicio:

- Violación de ventanas de tiempo disminuye un 100% (10 minutos).
- Tiempo de servicio disminuye 128 minutos

	5 a 4 relajado	
Tiempo de Viaje	22	4,9%
Violación Ventanas	10	100,0%
Tiempo de Servicio	128	10,5%
Over Time	-6	-9,4%
Función Objetivo	53	9,8%

Tabla 42 Comparación Ejemplo

La situación final refleja un ahorro de \$300.722 y una mejora en la calidad de servicio del 10% aprox. La disminución de costos, como era de esperarse, se explica mayoritariamente por el técnico y la camioneta que se ahorra el proveedor al relajar las ventanas de tiempo, logrando una mejora en el servicio.

Este ahorro es el que tiene disponible el proveedor del servicio para diseñar una estrategia de compensación para aquellos clientes que aceptaron tener ventanas de tiempo de atención más amplias.

7.2 ANEXO B: PROTOTIPO 2.0

7.2.1 Modificaciones al Prototipo 1.0

Tomando en cuenta los resultados preliminares obtenidos a partir de la construcción de un prototipo, se toman determinaciones que guían el trabajo futuro de esta investigación. Es así como se opta por mantener la función objetivo para la construcción óptima del ruteo. Sin embargo, no se define estrictamente la calidad de servicio con la finalidad de estudiar cómo varían los resultados ante las diferentes valoraciones de los factores que influyen en ella.

$$\text{Calida de Servicio} = a * W + b * D$$

a, b son factores tales que $a + b = 1$
W: violación a las ventanas de tiempo.
D: tiempo de servicio total

Tomando lo anterior en consideración, se realiza el siguiente paso a paso como continuidad de la investigación, con la finalidad de mejorar el primer prototipo estudiado y generar un prototipo 2.0:

- Redefinición de las características del caso base:
 - Se mantienen la mayoría de las características del Prototipo 1.0 tales como cantidad de clientes, zonas geográficas, distribución de la demanda, etc. Sólo se modifican algunas definiciones, que se señalan en los siguientes puntos.
 - Todos los clientes deben tener ventanas de tiempo de igual dimensión. Esta debe ser acotada en un principio con la finalidad de obtener una mala calidad de servicio, es decir que existan violaciones en las ventanas de tiempo y tiempos de servicio excesivos. Se establece un valor preliminar para las ventanas de tiempo del caso base de 1 y 2 horas.
 - Se define sólo un caso base, en donde el número de técnicos debe ser acotado para obtener resultados adecuados para el estudio, es decir, que puedan ser notoriamente mejorados ya sea aumentando el número de técnicos o relajando las

ventanas de tiempo a algunos clientes. Se establece un número preliminar de 2 ó 3 técnicos.

- Correr el modelo para el caso base (semana completa) y tabular los resultados obtenidos. Esto se hace con ventanas de 1 y 2 horas.
- Aumentar el número de técnicos uno a uno hasta llegar a 6 técnicos, partiendo desde 2 (o 3), y correr el modelo en cada uno de los casos par así observar cómo se comportan los resultados.
- Partiendo nuevamente del caso base, relajar las ventanas de tiempo (originalmente de 2 horas) a los diferentes clientes, uno a uno, y observar los resultados en cada caso. Primero se relajan las ventanas a 4 horas y luego a 6 horas.⁶
- Al igual que en el caso anterior se relajan las ventanas de tiempo pero esta vez a conjuntos de clientes. La cardinalidad de estos conjuntos irá entre 2 y 6 clientes y las relajaciones serán de la siguiente forma:
 - Todas las ventanas (del conjunto de clientes escogidos) relajadas a 4 horas.
 - Todas las ventanas relajadas a 6 horas.
- Tabular y graficar todos los resultados.
- Realizar un análisis económico de los resultados. Esta parte consiste en observar cómo se obtiene la misma calidad de servicio aumentando el número de técnicos y por otro lado, relajando de alguna forma las ventanas de tiempo de un cierto número de clientes. Luego se calculan los costos de ambas alternativas. Como se espera que el costo de la primera medida sea mayor, la diferencia de costos será lo que se dispone para realizar las promociones de descuento a aquellos clientes que permitan relajar sus ventanas de tiempo.

⁶ Tomar en cuenta que existen dos formas de mejorar la calidad de servicio. La primera es aumentar el número de técnicos y la otra es relajar el problema, en este caso, las ventanas de tiempo.

7.2.2 Resultados

Realizando los cambios y pasos establecidos en la sección anterior se obtuvieron los siguientes resultados:

Condiciones de Simulación		T. de Viaje	Violación Ventanas (W)	Tiempo de Servicio (D)	Over Time
1 hora	Todos 1 hora 2 servidores	640	975	2.451	358
	Todos 1 hora 3 servidores	538	360	1.622	146
	Todos 1 hora 4 servidores	473	51	1.422	68
	Todos 1 hora 5 servidores	443	14	1.279	60
	Todos 1 hora 6 servidores	417	-	1.245	60
2 horas	Todos 2 horas 2 servidores	673	460	2.595	361
	Todos 2 horas 3 servidores	527	100	1.606	149
	Todos 2 horas 4 servidores	442	-	1.200	62
	Todos 2 horas 5 servidores	418	-	1.125	42
	Todos 2 horas 6 servidores	391	-	1.090	38
2 servidores	Cliente 8 a 4 horas	608	421	2.480	375
	Clientes 8 y 7 a 4 horas	608	421	2.480	375
	Clientes 8 y 6 a 4 horas	608	421	2.480	375
	Clientes 8, 7 y 6 a 4 horas	642	301	2.461	367
	Clientes 8, 7, 6 y 4 a 4 horas	622	267	2.568	378
	Clientes 8, 7, 6, 4, 9 y 1 a 4 horas ⁷	630	120	2.649	366
	Clientes 8, 7, 6, 4, 9 y 1 a 6 horas	630	60	2.647	366
3 servidores	Clientes 8, 7, 6, 4, 9 y 1 a 6 horas	521	60	1.243	155

Tabla 43 Resultados Prototipo 2.0

En la tabla anterior se observa, como era de esperarse, que a medida que aumenta el número de técnicos las violaciones de ventanas y el tiempo de servicio disminuyen, lo que refleja un mejoramiento de la calidad de servicio. Se observa, por ejemplo, que para cuando las ventanas de tiempo son de una hora, el tiempo de viaje disminuye aproximadamente en un 35% cuando se pasa de 2 a 6 técnicos, pasando de 640 a 417. Así también, el tiempo de servicio disminuye un 49% con la misma medida, pasando de 2.451 a 1.245. Por otro lado, las violaciones de las ventanas de tiempo, que para 2 técnicos suman 975 minutos, con 6 técnicos desaparecen por completo. Cuando las ventanas de tiempo son parejas para todos y tienen una amplitud de 2 horas, al pasar de 2 a 6 técnicos el tiempo de viaje disminuye un 42%, pasando de 673 a 391, el

⁷ Se relajan las ventanas de tiempo para los clientes 8, 7, 6, 4, 9 y 1 a 4 horas. El resto de clientes mantiene sus ventanas de tiempo en 2 horas.

tiempo de servicio un 58%, de 2.595 a 1.090, y las violaciones de tiempo pasan de sumar 460 a 0 minutos.

Por otro lado, al analizar la ampliación de las ventanas de tiempo, en la parte inferior de la tabla, se observa que al aumentar el número de clientes, si bien en algunos casos el tiempo de servicio aumenta, la violación de las ventanas disminuye considerablemente. Se observa también que el tiempo de viaje no tiene un comportamiento regular. Ambos comportamientos se explican porque en la función objetivo la componente que tiene mayor importancia es la violación de las ventanas de tiempo. Esto explica que, aunque el tiempo de viaje y el tiempo de servicio aumenten, la función objetivo puede disminuir si es que la disminución de las ventanas de tiempo es suficiente como para contrarrestar los otros dos efectos. Esto es exactamente lo que ocurre en este caso, donde los cambios de mayor magnitud efectivamente están dados en la disminución de las violaciones de las ventanas de tiempo, llegando incluso a una disminución de un 86%, pasando de 421 a 60.

Con la finalidad de poder realizar un análisis económico de ambas medidas, y tomando en cuenta los costos descritos en el punto 3.2.3, en la siguiente tabla se muestran los costos totales de operación asociados a cada escenario:

Condiciones de Simulación		Costos
Ventanas de 1 hora	Todos 1 hora 2 servidores	\$ 5.423.387
	Todos 1 hora 3 servidores	\$ 5.709.253
	Todos 1 hora 4 servidores	\$ 6.004.053
	Todos 1 hora 5 servidores	\$ 6.303.520
	Todos 1 hora 6 servidores	\$ 6.603.520
Ventanas de 2 horas	Todos 2 horas 2 servidores	\$ 5.423.587
	Todos 2 horas 3 servidores	\$ 5.709.453
	Todos 2 horas 4 servidores	\$ 6.003.653
	Todos 2 horas 5 servidores	\$ 6.302.320
	Todos 2 horas 6 servidores	\$ 6.602.053
Ventanas de 2 horas + 2 servidores	Cliente 8 a 4 horas ⁸	\$ 5.424.520
	Clientes 8 y 7 a 4 horas	\$ 5.424.520
	Clientes 8 y 6 a 4 horas	\$ 5.424.520
	Clientes 8, 7 y 6 a 4 horas	\$ 5.423.987
	Clientes 8, 7, 6 y 4 a 4 horas	\$ 5.424.720
	Clientes 8, 7, 6, 4, 9 y 1 a 4 horas ⁹	\$ 5.423.920
	Clientes 8, 7, 6, 4, 9 y 1 a 6 horas	\$ 5.423.920
Ventanas de 2 horas + 3 servidores	Clientes 8, 7, 6, 4, 9 y 1 a 6 horas	\$ 5.709.853

Tabla 44 Costos Prototipo 2.0

⁹ Se relajan las ventanas de tiempo para los clientes 8, 7, 6, 4, 9 y 1 a 4 horas. El resto de clientes mantiene sus ventanas de tiempo en 2 horas.

Tomando en consideración los costos de la tabla anterior, es posible comparar ambas medidas para mejorar la calidad de servicio. El resultado se obtiene observando cuál es el escenario de relajación de ventanas de tiempo que logra la misma calidad de servicio que se logra al aumentar el número de técnicos. En esta ocasión se considera como caso base aquel en que la flota está compuesta por 2 técnicos y todos los clientes tienen ventanas de tiempo de 2 horas.

Si sólo se considera el tiempo de servicio para definir la calidad de servicio, tenemos que, en comparación con el caso base, el hecho de aumentar la flota en un técnico, genera una mejora del 38%, pasando de 2.595 a 1.606 minutos. Es posible observar, que independiente del número de clientes a los cuales se les relaje las ventanas de tiempo, e independiente de la magnitud de dicha relajación, el tiempo de servicio jamás disminuirá tanto como cuando se aumenta un técnico.

Si, a diferencia del caso anterior, sólo se considera la violación de las ventanas de tiempo, se observa que al agregar un técnico, para un total de 3, la calidad de servicio mejora en un 78%, bajando de 460 a 100 minutos. Un resultado similar, 120 minutos (representa una disminución del 74%), se logra a través de la relajación de las ventanas de tiempo a 6 de los clientes a una amplitud de 4 horas. Esta medida tiene un costo de \$ 5.423.920 lo que, comparándola con el escenario de 3 técnicos que tiene un costo de \$ 5.709.453, representa un ahorro de \$ 285.533 a la semana. Esto implica que el proveedor del servicio dispondrá de aproximadamente \$1.150.000 al mes para compensar a aquellos clientes que acepten relajar sus ventanas de tiempo. Es posible diseñar diferentes estrategias de compensación; por ejemplo, se puede entregar a todos el mismo descuento o entregar una promoción de acuerdo a la cantidad de solicitudes por clientes.

Para poder realizar un análisis similar con el tiempo de servicio, se toma como caso base el escenario en que todos los clientes tienen ventanas de tiempo de 2 horas y la flota está compuesta por 3 técnicos. En este caso se tiene que el tiempo de servicio (sumatoria de todos los clientes) es de 1.606 minutos. Esta cifra se reduce en un 25%, llegando a 1.200 minutos, cuando se pasa de 3 a 4 técnicos. Resultado similar se obtiene, manteniendo una flota de 3 técnicos pero relajando las ventanas de tiempo a 6 de los clientes. En este caso se llega a un tiempo de servicio de 1.243 minutos con un costo de \$ 5.709.853, lo que representa un ahorro de \$ 293.800 con respecto al aumento de la flota a 4 técnicos, que tiene un costo de \$ 6.003.653. Este ahorro, al igual que el caso anterior, es el monto semanal que dispone el proveedor para desarrollar una estrategia de compensaciones a los 6 clientes que aceptaron la promoción. Mensualmente serían aproximadamente \$ 1.200.000.

Ya fueron analizados los casos donde sólo se consideraba un factor para definir la calidad de servicio, ya sean las violaciones a las ventanas de tiempo o el tiempo de servicio. A continuación se analizan los mismos escenarios pero esta vez definiendo la calidad de servicio como un polinomio entre ambos factores. De esta forma, en el siguiente gráfico se observa cómo se comportan los resultados para las diferentes definiciones de calidad de servicio y para los diferentes escenarios. La calidad de servicio en este caso se muestra como un polinomio entre la violación de las ventanas de tiempo (w) y tiempo de servicio (d) de la forma $\alpha*w + (1-\alpha)*d$.

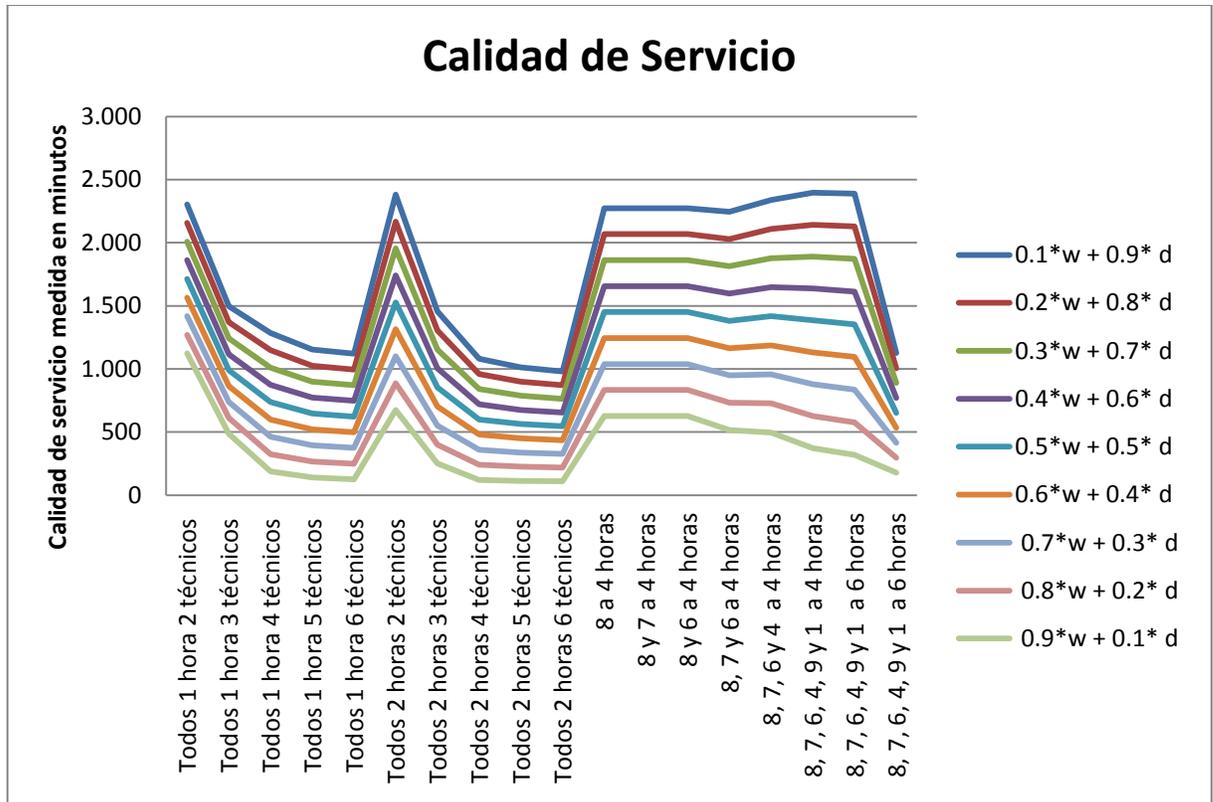


Figura 20 Calidad de Servicio de las diferentes instancias

A través del gráfico anterior se observa que el aumentar el tamaño de la flota tiene un impacto positivo importante en la calidad de servicio, independiente de la amplitud de las ventanas de tiempo. También se observa que el impacto de esta medida es mucho mayor porcentualmente cuando al definir la calidad de servicio se valoran más las violaciones de las ventanas de tiempo que el tiempo de servicio. Por otro lado, al analizar la relajación de las ventanas de tiempo, se observa que esta medida sólo mejora la calidad de servicio cuando esta es definida mayoritariamente por las violaciones de las mismas ventanas. Ambos resultados muestran que las medidas impactan mayormente a este factor de la calidad de servicio.

Con la finalidad de realizar un análisis de costo – impacto se estudian por separado aquellos casos donde para definir la calidad de servicio se valora más uno u otro factor que la define. En la siguiente tabla se muestra cómo varían los resultados cuando se valoran más los tiempos de servicio que las violaciones de las ventanas de tiempo.

Características de la Simulación		CALIDAD DE SERVICIO			
		$0.1*w + 0.9*d$	$0.2*w + 0.8*d$	$0.3*w + 0.7*d$	$0.4*w + 0.6*d$
Ventanas de 1 hora	Todos 1 hora 2 servidores	2.303	2.156	2.008	1.861
	Todos 1 hora 3 servidores	1.496	1.370	1.243	1.117
	Todos 1 hora 4 servidores	1.285	1.148	1.011	874
	Todos 1 hora 5 servidores	1.153	1.026	900	773
	Todos 1 hora 6 servidores	1.121	996	872	747
Ventanas de 2 horas	Todos 2 horas 2 servidores	2.382	2.168	1.955	1.741
	Todos 2 horas 3 servidores	1.455	1.305	1.154	1.004
	Todos 2 horas 4 servidores	1.080	960	840	720
	Todos 2 horas 5 servidores	1.013	900	788	675
	Todos 2 horas 6 servidores	981	872	763	654
Ventanas de 2 horas + 2 servidores	Clientes 8 a 4 horas	2.274	2.068	1.862	1.656
	Clientes 8 y 7 a 4 horas	2.274	2.068	1.862	1.656
	Clientes 8 y 6 a 4 horas	2.274	2.068	1.862	1.656
	Clientes 8, 7 y 6 a 4 horas	2.245	2.029	1.813	1.597
	Clientes 8, 7, 6 y 4 a 4 horas	2.338	2.108	1.878	1.648
	Clientes 8, 7, 6, 4, 9 y 1 a 4 horas ¹⁰	2.396	2.143	1.890	1.637
	Clientes 8, 7, 6, 4, 9 y 1 a 6 horas	2.388	2.130	1.871	1.612
Ventanas de 2 horas + 3 servidores	Clientes 8, 7, 6, 4, 9 y 1 a 6 horas	1.125	1.006	888	770

Tabla 45 Resultados según polinomio de calidad de servicio Prototipo 2.0

Al igual que en el análisis anterior, se considera el escenario en donde la flota está compuesta por 2 técnicos y los clientes tienen ventanas de tiempo de 2 horas como caso base. En la tabla se observa que al sumarle un nuevo técnico a este escenario (para un total de 3) la calidad de servicio mejora aproximadamente un 40%, de 2.382 a 1.455 por ejemplo cuando $\alpha = 0,1$. También se observa que, independiente del número de clientes a los cuales se les relajan las ventanas de tiempo, no se alcanza una mejora en la calidad de servicio mayor a 7,5% (en donde a 6 clientes se les relajan las ventanas a 6 horas llegando a un resultado de 1.612 minutos). Lo anterior indica que cuando el tiempo de servicio tiene un mayor peso en la calidad de servicio la medida no tiene éxito. Esto se explica a que su impacto se concentra en disminuir las violaciones de las ventanas de tiempo.

¹⁰ Se relajan las ventanas de tiempo a 4 horas a los clientes 8, 7, 6, 4, 9 y 1.

A diferencia de la tabla anterior, a continuación se muestra cómo varían los resultados cuando en el polinomio de definición de calidad de servicio, el factor más relevante son las violaciones de las ventanas de tiempo en desmedro del tiempo de servicio

Características Simulación		CALIDAD DE SERVICIO				
		0.5*w + 0.5* d	0.6*w + 0.4* d	0.7*w + 0.3* d	0.8*w + 0.2* d	0.9*w + 0.1* d
Ventanas de 1 hora	Todos 1 hora 2 servidores	1.713	1.565	1.418	1.270	1.123
	Todos 1 hora 3 servidores	991	865	739	612	486
	Todos 1 hora 4 servidores	737	599	462	325	188
	Todos 1 hora 5 servidores	647	520	394	267	141
	Todos 1 hora 6 servidores	623	498	374	249	125
Ventanas de 2 horas	Todos 2 horas 2 servidores	1.528	1.314	1.101	887	674
	Todos 2 horas 3 servidores	853	702	552	401	251
	Todos 2 horas 4 servidores	600	480	360	240	120
	Todos 2 horas 5 servidores	563	450	338	225	113
	Todos 2 horas 6 servidores	545	436	327	218	109
Ventanas de 2 horas + 2 servidores	Clientes 8 a 4 horas	1.451	1.245	1.039	833	627
	Clientes 8 y 7 a 4 horas	1.451	1.245	1.039	833	627
	Clientes 8 y 6 a 4 horas	1.451	1.245	1.039	833	627
	Clientes 8, 7 y 6 a 4 horas	1.381	1.165	949	733	517
	Clientes 8, 7, 6 y 4 a 4 horas	1.418	1.187	957	727	497
	Clientes 8, 7, 6, 4, 9 y 1 a 4 horas	1.385	1.132	879	626	373
	Clientes 8, 7, 6, 4, 9 y 1 a 6 horas	1.354	1.095	836	577	319
Ventanas de 2 horas + 3 servidores	Clientes 8, 7, 6, 4, 9 y 1 a 6 horas	652	533	415	297	178

Tabla 46 Resultados FO Prototipo 2.0 b

Para este análisis se utiliza nuevamente el mismo caso base. Se observa en la tabla que al aumentar en un técnico, a tres, la calidad de servicio mejora considerablemente, mayor a un 40%, pasando de 1.528 a 545 cuando $\alpha = 0,5$ por ejemplo. También, como ya fue mencionado, al incrementar la relevancia que se le otorga en la definición de calidad de servicio a las violaciones de las ventanas de tiempo, el impacto de ambas medidas aumenta. Es así como la mejora llega a un 62,7% cuando se aumenta un técnico y el factor que acompaña a la violación de las ventanas en la definición de las ventanas de tiempo es 0,9, en donde se pasa de 674 a 251. La figura siguiente muestra gráficamente lo comentado.

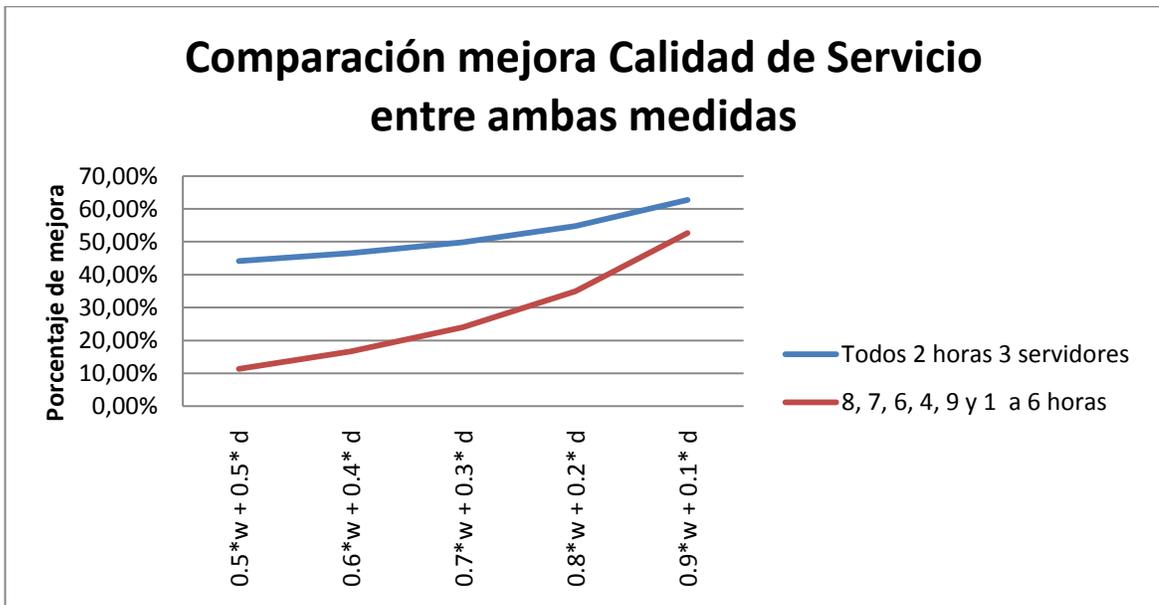


Figura 21 Comparación Calidad de Servicio

Con esta misma definición pero para el escenario en donde se hace efectiva la relajación a 6 de los clientes y a una amplitud de 6 horas se logra una mejora de hasta un 52,7%. Es en este punto en donde ambos impactos tienen la diferencia más estrecha en cuanto a calidad de servicio resultante. El costo involucrado es \$ 285.533 mayor para el caso en donde se aumenta un técnico (\$ 5.709.453 por sobre \$ 5.423.920) y representa el monto semanal disponible para que el proveedor del servicio entregue compensaciones a los 6 clientes que aceptaron ampliar sus ventanas de tiempo de atención.

7.2.3 Conclusiones prototipos

De los resultados obtenidos del estudio del prototipo planteado se desprende que la estrategia de ampliar las ventanas de tiempo efectivamente logra un impacto en la calidad de servicio similar al crecimiento marginal de la flota. Esto sucede de mayor manera cuando en la definición de calidad de servicio tienen mayor valoración las violaciones de las ventanas de tiempo que el tiempo de servicio. Esto ayuda a concluir que éste es el aspecto en donde la estrategia planteada genera un mayor impacto.

Tomando en cuenta que es posible alcanzar la misma calidad de servicio que aumentando el número de técnicos, y considerando que el relajar las ventanas de tiempo es una medida mucho más económica, se concluye que es completamente posible establecer una estrategia de compensaciones para aquellos clientes que aceptan ampliar sus ventanas de tiempo. Sin

embargo, se observa que la mejora en la calidad de servicio generada por las relajaciones propuestas sólo es comparable con el aumento marginal del tamaño de la flota por lo que no se esperan grandes compensaciones.

Es preciso destacar que para el análisis del prototipo se utilizó un polinomio que define la calidad de servicio. Este polinomio le otorga diferentes pesos a la sumatoria de las violaciones de las ventanas de tiempo y a la sumatoria de los tiempos de servicio y se suman directamente para conformar la calidad de servicio. Esto le entrega intrínsecamente un mayor peso al tiempo de servicio puesto que la magnitud de los resultados obtenidos es varias veces mayor que los de las violaciones de las ventanas de tiempo. De esta forma se define que para el análisis del caso real los valores se dejarán en la misma escala y así poder compararlos sin problemas.

7.3 ANEXO C: RESULTADOS CASO REAL DEMANDA PROMEDIO

7.3.1 Análisis de otros factores

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos. Es posible observar cómo se comporta cada factor ante el aumento del número de técnicos y ante la ampliación de las ventanas de tiempo en diferentes magnitudes y para diferentes números de clientes.

NºTécnicos	Instancia ¹¹	Dist Recorrida	Violación Ventanas (a)	Tiempo de Servicio (b)	Over Time	% OT
25	200_0	7.754	6.585	52.406	1.372	1,59%
26	200_0	7.731	2.746	44.778	1.084	1,25%
27	200_0	7.336	695	33.603	585	0,68%
28	200_0	6.645	49	27.508	324	0,38%
25	400_1	7.740	3.688	51.334	1.521	1,76%
25	400_2	7.696	3.206	49.925	1.989	2,30%
25	400_3	7.658	2.930	49.312	2.083	2,41%
25	400_4a	7.543	2.628	48.097	1.818	2,10%
25	400_4b	7.522	2.692	48.203	1.902	2,20%
25	400_4c	7.539	2.714	48.378	1.931	2,23%
25	400_5	7.480	2.193	47.566	1.598	1,85%
25	400_6	7.570	1.744	45.328	1.775	2,05%
25	400_7a	7.740	1.326	44.512	1.713	1,98%
25	400_7b	7.824	1.366	44.619	1.730	2,00%
25	400_7c	7.812	1.412	44.644	1.813	2,10%
25	400_8	7.592	1.024	44.168	1.300	1,50%
25	400_9	7.479	619	43.891	1.776	2,06%
25	400_10	7.629	488	43.563	2.150	2,49%
25	600_1	7.980	3.429	49.881	1.776	2,06%
25	600_2a	7.682	2.751	48.702	1.221	1,41%
25	600_2b	7.651	2.769	48.764	1.291	1,49%
25	600_2c	7.781	2.803	48.799	1.189	1,38%
25	600_3	7.828	2.188	47.855	1.566	1,81%
25	600_4	7.853	1.723	46.994	1.631	1,89%
25	600_5	7.655	1.392	46.187	1.618	1,87%
25	600_6	7.839	803	45.215	1.620	1,88%
25	600_7a	7.732	607	44.392	2.052	2,38%
25	600_7b	7.761	631	44.438	1.904	2,20%
25	600_7c	7786	655	44472	1987	2,30%
25	600_8	7416	582	44592	2288	2,65%
25	600_9	7600	439	44018	1535	1,78%
25	600_10	7820	299	43663	1583	1,83%

¹¹ XXX_Y: esta nomenclatura indica que las ventanas de tiempo se amplían a XXX minutos a una cantidad de Y clientes. Cuando aparece un a, b o c se trata de una composición distinta de clientes, pero la misma cantidad.

Tabla 47 Resultados Caso Real

Se observa que la distancia recorrida es bastante regular para todas las instancias lo que puede estar dado porque, independiente del orden en que se hagan las visitas, se debe visitar a todos los clientes que lo requieran. En cambio, con las violaciones de las ventanas de tiempo y con el tiempo de servicio ocurre un efecto diferente. Ambos factores disminuyen a medida que se aumenta el número de técnicos o se relajan las ventanas de tiempo.

En los siguientes gráficos es posible distinguir más fácilmente el comportamiento de los resultados para las diferentes estrategias y escenarios. En primer lugar, es posible observar que el tiempo de servicio disminuye con el aumento del número de técnicos y de menor manera con la relajación de las ventanas de tiempo. En la primera parte de la curva se observa cómo al aumentar de 25 a 28 técnicos, el tiempo de servicio disminuye de 52.000 a 27.000 minutos aproximadamente. Luego de esta fuerte disminución, la curva vuelve a valores cercanos 50.000. Esta se debe a que las instancias analizadas, al igual que el caso base, tienen una flota de 25 técnicos. La curva es estrictamente decreciente desde la instancia 400_1 hasta la 600_1 en donde vuelve a tener un valor más elevado. Esta reducción se debe a que cada instancia tiene un mayor número de clientes a los cuales se les relajan las ventanas de tiempo. Cuando la curva llega a la instancia 600_1 vuelve a tener un crecimiento dado que en esta sólo se le relajan las ventanas al cliente número 1. Sin embargo, el resultado para esta instancia es menor que para la 400_1 dado que, aunque se le relajan las ventanas al mismo número de clientes, la amplitud de la relajación es mayor, 600 versus 400 minutos. Desde este punto hasta el final, al igual que en el segmento anterior de la curva, y por el mismo motivo, hay una reducción del tiempo de servicio.

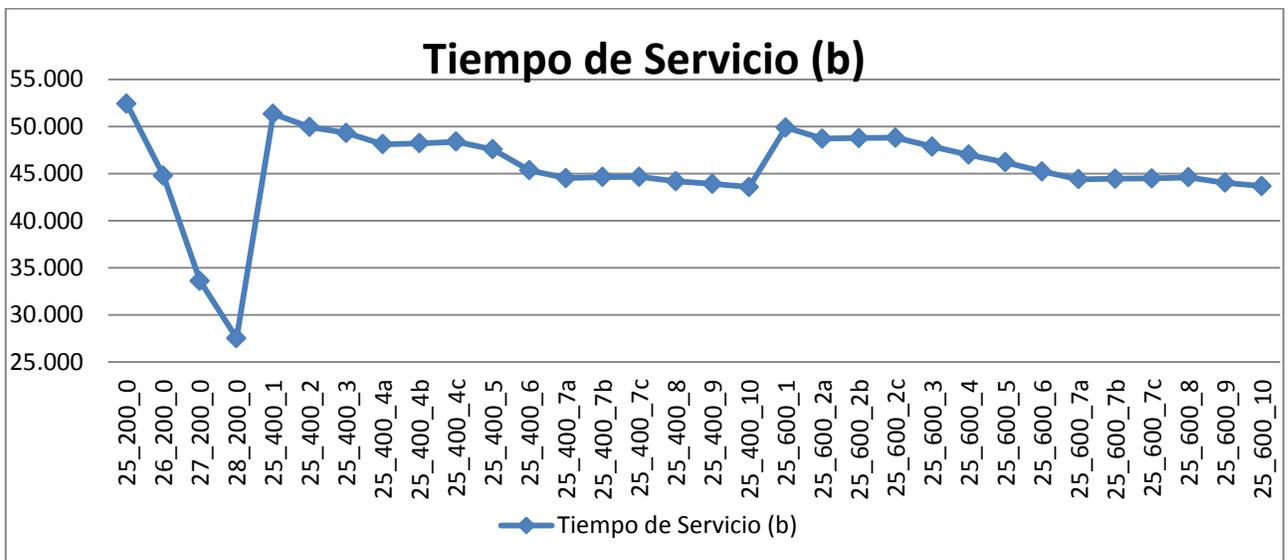


Figura 22 Evolución tiempo de servicio para diferentes instancias

El extra tiempo que deben trabajar los técnicos para alcanzar la calidad de servicio descrita, disminuye drásticamente al aumentar el número de técnicos. Sin embargo, no tiene un comportamiento regular cuando se relajan las ventanas de tiempo, es más, tiende a aumentar, lo que puede estar dado por lo menos restrictivo que se hace el problema.

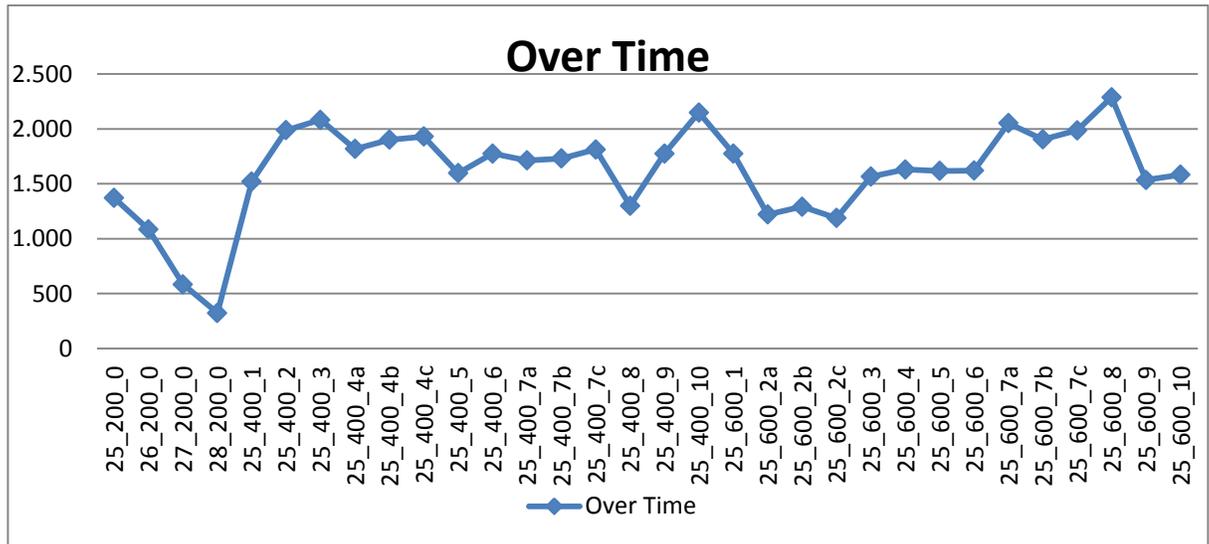


Figura 23 Evolución Over Time

7.3.2 Análisis considerando sólo el tiempo de servicio para la calidad de servicio.

NºTécnicos	Instancia	Dist Recorrida	Violación Ventanas (a)	Tiempo de Servicio (b)	Over Time	% OT
25	200	7754	6585	52406	1372	1,59%
26	200	7731	2746	44778	1084	1,25%
25	400_7a	7740	1326	44512	1713	1,98%
25	400_7b	7824	1366	44619	1730	2,00%
25	400_7c	7812	1412	44644	1813	2,10%
25	600_7a	7732	607	44392	2052	2,38%
25	600_7b	7761	631	44438	1904	2,20%
25	600_7c	7786	655	44472	1987	2,30%

Tabla 48 Resultados casos exitosos comparando con 26 técnicos

El objetivo de esta sección es encontrar el número de clientes a los cuales es necesario relajar las ventanas de tiempo para lograr una disminución en el tiempo de servicio de igual

magnitud que al aumentar el número de técnicos de 25 a 26 y así calcular el ahorro asociado a la medida. El efecto alcanzado con un técnico más es la disminución de 7.628 minutos en el tiempo de servicio, lo que equivale al 14,5%.

De la tabla anterior se extrae que independiente de la magnitud de la relajación, a 400 ó 600 minutos, es necesario relajar las ventanas de tiempo al menos a 7 de los clientes con un mayor número de llamados. La robustez del resultado se demuestra a través de las permutaciones de clientes realizadas y que se muestran en la tabla. Aquí se observa que para ventanas de tiempo de 400 minutos, el tiempo de servicio varía entre 44.512 y 44.619 minutos (variación de 0,2%) para las composiciones estudiadas lo que sin duda es inferior a los 44.778 minutos alcanzados con 26 técnicos. Cuando la relajación de las ventanas se extiende a 600 minutos el tiempo de servicio varía entre 44.392 y 44.472 minutos (variación de 0,18%) para las diferentes composiciones estudiadas (con 7 clientes involucrados).

El ahorro observado cuando la relajación es a 400 minutos es de \$255.000 semanales y cuando las ventanas se relajan a 600 minutos es de aproximadamente \$240.000. Lo anterior indica que en ambos casos el proveedor del servicio logístico dispone de más de \$1.000.000 para repartir entre las promociones que ofrezca a los 7 clientes. El proveedor puede elegir entregar en un descuento a todos por igual de aproximadamente \$140.000 o entregarlo de forma proporcional al número de servicios requeridos.

No es posible realizar el análisis comparando la relajación de las ventanas con el aumento de dos técnicos, a 27, ya que aunque se relajan las ventanas de tiempo a los 10 clientes con mayor número de llamados, no es suficiente para obtener un nivel de servicio similar (en cuanto a tiempo de servicio).

7.3.3 Tomando en cuenta un polinomio entre a^{12} y b^{13} .

A diferencia de las secciones anteriores, en donde se analiza el comportamiento del problema sólo considerando una variable de la calidad de servicio, sólo las violaciones a las ventanas de tiempo o sólo el tiempo de servicio, esta sección muestra el impacto de la medida de relajar las ventanas de tiempo a diferentes composiciones de clientes tomando en cuenta ambos factores. Junto con lo anterior se muestra cómo varía el resultado entregándole pesos diferentes a cada uno de ellos, considerando la siguiente definición de calidad de servicio:

¹² a: Violación de ventana de tiempo.

¹³ b: Tiempo de Servicio

$$CS = \alpha * a + (1 - \alpha) * c$$

donde “a” representa las violaciones a las ventanas de tiempo y “c” representa la décima parte del tiempo de servicio (b). Se utiliza la décima parte dado para que las magnitudes de ambos factores sean similares y poder compararlas.

El valor de α va desde 0,1 hasta 0,9 e indica el peso que se le da a cada factor. Mientras menor sea α , más importancia se le da al tiempo de servicio, es más, si se considera un $\alpha=0$, se representa el caso en que sólo se considera el tiempo de servicio (ya analizado). Por otro lado, mientras mayor sea α , más importancia se le otorga a las violaciones de las ventanas de tiempo, es más, con un $\alpha=1$ se vuelve al caso en que sólo se considera ese factor.

El siguiente cuadro muestra cómo se comporta el problema cuando se aumenta un técnico. En este caso es posible observar que a medida que α aumenta, el impacto es mayor en cuanto a magnitud y en cuanto a %. Esto se debe a que con 26 técnicos se disminuye considerablemente la violación a las ventanas de tiempo, entre 1.000 y 3.500 (entre el 20% y el 55%). Esta medida representa un aumento de costo mensual superior a \$1.100.000.

Pasarse a 26 Técnicos						
Aumento de costo	280.800 Semanales					
CS	Delta CS	% Delta CS	D CS / D Cost	D Cost / D CS	D CS % / D Cost	D Cost / D CS%
0.1*a + 0.9* c	1070,42	19,9%	0,0038	262,3	0,00007%	1.410.018
0.2*a + 0.8* c	1378,04	25,0%	0,0049	203,8	0,00009%	1.122.654
0.3*a + 0.7* c	1685,66	29,9%	0,0060	166,6	0,00011%	940.173
0.4*a + 0.6* c	1993,28	34,5%	0,0071	140,9	0,00012%	814.017
0.5*a + 0.5* c	2300,90	38,9%	0,0082	122,0	0,00014%	721.593
0.6*a + 0.4* c	2608,52	43,1%	0,0093	107,6	0,00015%	650.969
0.7*a + 0.3* c	2916,14	47,2%	0,0104	96,3	0,00017%	595.244
0.8*a + 0.2* c	3223,76	51,0%	0,0115	87,1	0,00018%	550.155
0.9*a + 0.1* c	3531,38	54,7%	0,0126	79,5	0,00019%	512.921

Tabla 49 Resultados para diferentes definiciones de calidad de servicio y 26 técnicos

A diferencia del caso anterior, el siguiente cuadro muestra los resultados del problema cuando se decide aumentar el número de técnicos a 27, es decir, agregar 2 técnicos a la composición original. Se puede observar que el costo mensual de esta alternativa supera los \$2.300.000 y genera una mejora en la función objetivo entre 2.200 y 5.500 (entre el 42% y el 85%). La medida impacta fuertemente en la disminución de las violaciones de las ventanas de

tiempo por lo que, al igual que en el caso anterior, la magnitud de la diferencia en la CS es mayor cuando α es mayor.

Pasas a 27 Técnicos						
Costos	547.533 semanales					
CS	Delta CS	% Delta CS	D CS / D Cost	D Cost / D CS	D CS % / D Cost	D Cost / D CS%
0.1*a + 0.9* c	2281,27	42,4%	0,0042	240,0	0,00015%	661.610
0.2*a + 0.8* c	2682,24	48,7%	0,0049	204,1	0,00017%	576.780
0.3*a + 0.7* c	3083,21	54,6%	0,0056	177,6	0,00019%	514.014
0.4*a + 0.6* c	3484,18	60,3%	0,0064	157,1	0,00021%	465.695
0.5*a + 0.5* c	3885,15	65,7%	0,0071	140,9	0,00023%	427.349
0.6*a + 0.4* c	4286,12	70,9%	0,0078	127,7	0,00025%	396.178
0.7*a + 0.3* c	4687,09	75,8%	0,0086	116,8	0,00027%	370.340
0.8*a + 0.2* c	5088,06	80,6%	0,0093	107,6	0,00029%	348.574
0.9*a + 0.1* c	5489,03	85,1%	0,0100	99,8	0,00030%	329.989

Tabla 50 Resultados para diferentes definiciones de calidad de servicio y 27 técnicos

Ya se conoce el comportamiento del problema al aumentar la cantidad de técnicos. Ahora se busca comparar estos resultados con la relajación de las ventanas de tiempo. La siguiente tabla muestra cómo disminuye la calidad de servicio al relajar estas ventanas en comparación con el aumento de un técnico. Esto ya que tal como se concluyó en el análisis del prototipo y se pudo corroborar en la sección anterior, la relajación de las ventanas de tiempo sólo puede suplir el efecto en la calidad de servicio de un aumento marginal del número de técnicos. En este caso en particular, el aumento de uno o dos funcionarios. De esta forma, cuando la tabla muestra un número positivo significa que esa composición de relajación de ventanas de tiempo genera un mejoramiento en la calidad de servicio mayor que al aumentar el número de técnicos a 26.

Instancia	0.1*a + 0.9*c	0.2*a + 0.8*c	0.3*a + 0.7*c	0.4*a + 0.6*c	0.5*a + 0.5*c	0.6*a + 0.4*c	0.7*a + 0.3*c	0.8*a + 0.2*c	0.9*a + 0.1*c
400_1	-684,2	-712,9	-741,5	-770,2	-798,8	-827,4	-856,1	-884,7	-913,4
400_2	-509,2	-503,8	-498,3	-492,8	-487,4	-481,9	-476,4	-470,9	-465,5
400_3	-426,5	-399,5	-372,6	-345,6	-318,7	-291,8	-264,8	-237,9	-210,9
400_4a	-286,9	-241,9	-196,9	-151,9	-107,0	-62,0	-17,0	28,0	73,0
400_4b	-302,8	-263,2	-223,6	-183,9	-144,3	-104,6	-64,9	-25,3	14,3
400_4c	-320,8	-281,6	-242,4	-203,2	-164,0	-124,8	-85,6	-46,4	-7,2
400_5	-195,6	-112,4	-29,3	53,9	137,1	220,3	303,5	386,6	469,8
400_6	50,7	156,4	262,1	367,8	473,5	579,2	684,9	790,6	896,3
400_7a	165,9	305,3	444,6	584,0	723,3	862,6	1002,0	1141,3	1280,7
400_7b	152,3	288,7	425,1	561,5	698,0	834,4	970,8	1107,2	1243,6
400_7c	145,5	277,5	409,6	541,6	673,7	805,8	937,8	1069,9	1201,9
400_8	227,1	393,2	559,3	725,4	891,5	1057,6	1223,7	1389,8	1555,9
400_9	292,5	496,4	700,2	904,0	1107,9	1311,7	1515,5	1719,3	1923,2
400_10	335,2	548,8	762,5	976,1	1189,8	1403,4	1617,1	1830,7	2044,4

600_1	-527,6	-544,8	-562,1	-579,4	-596,7	-613,9	-631,2	-648,5	-665,7
600_2a	-353,7	-314,9	-276,2	-237,4	-198,7	-160,0	-121,2	-82,5	-43,7
600_2b	-361,0	-323,5	-285,9	-248,4	-210,8	-173,2	-135,7	-98,1	-60,6
600_2c	-367,6	-333,1	-298,6	-264,1	-229,6	-195,0	-160,5	-126,0	-91,5
600_3	-221,1	-134,6	-48,0	38,6	125,2	211,7	298,3	384,9	471,4
600_4	-97,1	27,3	151,8	276,2	400,7	525,2	649,6	774,1	898,5
600_5	8,6	158,1	307,6	457,1	606,6	756,0	905,5	1055,0	1204,5
600_6	155,0	353,6	552,3	751,0	949,7	1148,3	1347,0	1545,7	1744,3
600_7a	248,6	458,7	668,7	878,8	1088,8	1298,8	1508,9	1718,9	1929,0
600_7b	242,1	450,2	658,3	866,4	1074,5	1282,6	1490,7	1698,8	1906,9
600_7c	236,6	442,7	648,7	854,8	1060,8	1266,8	1472,9	1678,9	1885,0
600_8	233,1	447,7	662,2	876,8	1091,3	1305,8	1520,4	1734,9	1949,5
600_9	299,1	522,2	745,3	968,4	1191,5	1414,6	1637,7	1860,8	2083,9
600_10	345,1	578,6	812,2	1045,7	1279,3	1512,8	1746,4	1979,9	2213,5

Tabla 51 Comparación de calidad de servicio de relajar las ventanas v/s aumentar un técnico.

La tabla anterior se ve muestra gráficamente en la siguiente figura.

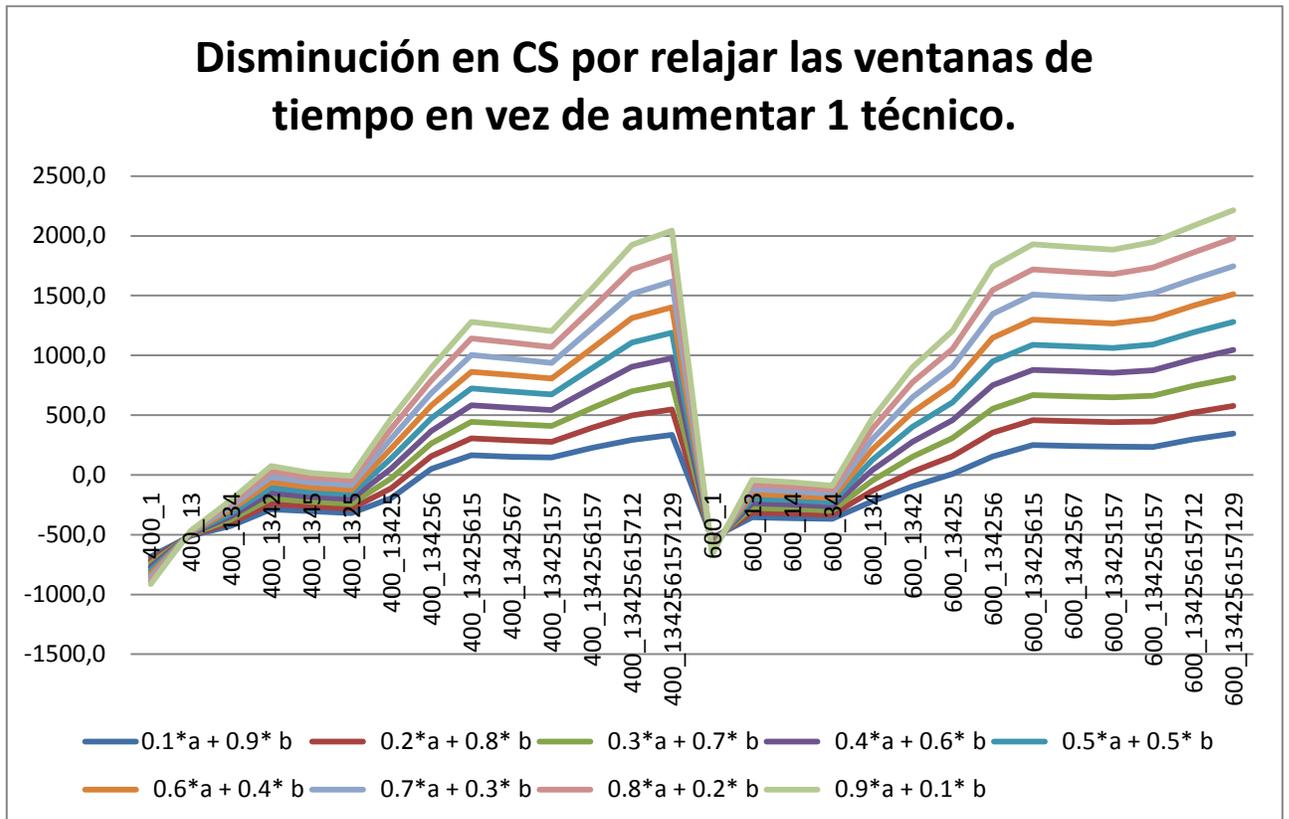


Figura 24 Evolución diferencia de calidad de servicio con sistema de 26 técnicos

Del cuadro se observa que es más fácil lograr resultados positivos cuando el peso que se otorga a la violación de las ventanas de tiempo es mayor que para el tiempo de servicio. Lo anterior indica que la medida de relajar las ventanas tiene un mayor efecto en la disminución de la violación de estas que en una atención más temprana de los clientes.

Del cuadro también se desprende que es necesario relajar las ventanas de tiempo a 400 minutos al menos a 4 clientes para lograr un mejor resultado con esta medida que con el aumento de un técnico. Esto implica un ahorro de aproximadamente \$250.000 semanales. Si se elige la opción de 600 minutos, para lograr el mismo efecto es necesario entregar la promoción al menos a 3 clientes. Esto genera un ahorro de \$268.000 semanales aproximadamente. Estos casos funcionan de buena manera cuando se le otorga un peso mayor a la violación de las ventanas de tiempo.

Si es necesario encontrar una configuración que permita mejorar la función objetivo independiente del peso que se le otorgue a cada factor, para el caso de la relajación a 400 minutos esta configuración constaría de 6 técnicos. Esto generaría un ahorro semanal aproximado de \$254.000. Por otro lado, con una relajación a 600 minutos, la configuración buscada constaría con 5 técnicos y el ahorro generado sería de aproximadamente \$265.000 semanales.

Para las configuraciones donde se relajan las ventanas de tiempo a un número mayor de clientes que los mencionados anteriormente, se logra un mejoramiento importante de la función objetivo. Esto quiere decir que no sólo se entrega una calidad de servicio similar a la con mayor número de técnicos si no que se mejora, ya sea disminuyendo las violaciones a las ventanas de tiempo (mayoritariamente) o disminuyendo el tiempo de servicio. Sin embargo, el ahorro generado no llega a ser mucho mayor y en algunos casos es incluso menor. Este es un tema importante dado que si el ahorro es el mismo, este tendrá que repartirse en un mayor número de clientes por lo que será menor la parte que se le ofrezca a cada uno. Habrá menos incentivos económicos para aceptar la promoción pero a la vez la calidad de servicio mejorará.

Para analizar estas alternativas es necesario conocer la valorización que tiene cada cliente por la mejora obtenida en cuanto a calidad de servicio. Si esta valorización es mayor a lo perdido por repartir la promoción en un mayor número de clientes, se trata de una buena medida que aumenta los incentivos para acceder a la promoción. Si no, es preferible ofertar la promoción a un menor número de clientes y que consiste en un mayor descuento. Este análisis está fuera del alcance de esta tesis dado que con los datos que se cuenta es imposible estimar la valorización que tiene cada cliente de la violación de las ventanas de tiempo o del tiempo de servicio.

Siguiendo el análisis, en el cuadro que se encuentra a continuación se compara el mejoramiento de la función objetivo observado con la ampliación de las ventanas de tiempo, con el aumento de la cantidad de técnicos a 27. En esta comparación es posible observar, al igual que en el caso anterior, que cuando se le otorga un mayor peso a la violación de las ventanas, el hecho de relajarlas tiene un mayor impacto que cuando se lo otorga mayor valor al tiempo de servicio, en comparación siempre con aumentar el número de técnicos.

En la tabla a continuación se muestra que para casi la totalidad de las instancias analizadas, la mejora en la calidad de servicio obtenida por agregar dos técnicos es mayor que al relajar las ventanas de tiempo. Cuando esta relajación es a 400 minutos, el resultado es positivo sólo cuando se entrega la promoción a los 10 clientes con mayor número de llamados, es decir, la relajación de las ventanas es más efectiva. Esto, sin embargo, ocurre sólo para los casos en donde se valora la violación de las ventanas con un $\alpha=0,9$. Algo similar ocurre cuando se analiza la relajación de las ventanas de tiempo a 600 minutos. En este caso, se obtienen valores positivos cuando 9 clientes aceptan la promoción y el $\alpha=0,9$, y cuando 10 diez clientes aceptan la promoción y α es mayor o igual a 0,8. Para todo el resto de los casos siempre el impacto de agregar técnicos es mayor.

Instancia	$0.1*a + 0.9*b$	$0.2*a + 0.8*b$	$0.3*a + 0.7*b$	$0.4*a + 0.6*b$	$0.5*a + 0.5*b$	$0.6*a + 0.4*b$	$0.7*a + 0.3*b$	$0.8*a + 0.2*b$	$0.9*a + 0.1*b$
400_1	-1895,1	-2017,1	-2139,1	-2261,1	-2383,1	-2505,0	-2627,0	-2749,0	-2871,0
400_2	-1720,1	-1808,0	-1895,8	-1983,7	-2071,6	-2159,5	-2247,4	-2335,2	-2423,1
400_3	-1637,3	-1703,7	-1770,1	-1836,5	-1903,0	-1969,4	-2035,8	-2102,2	-2168,6
400_4a	-1497,8	-1546,1	-1594,5	-1642,8	-1691,2	-1739,6	-1787,9	-1836,3	-1884,6
400_4b	-1513,7	-1567,4	-1621,1	-1674,8	-1728,5	-1782,2	-1835,9	-1889,6	-1943,3
400_4c	-1531,7	-1585,8	-1640,0	-1694,1	-1748,3	-1802,4	-1856,6	-1910,7	-1964,9
400_5	-1406,5	-1416,6	-1426,8	-1437,0	-1447,2	-1457,3	-1467,5	-1477,7	-1487,8
400_6	-1160,2	-1147,8	-1135,5	-1123,1	-1110,8	-1098,4	-1086,1	-1073,7	-1061,4
400_7a	-1044,9	-998,9	-952,9	-906,9	-861,0	-815,0	-769,0	-723,0	-677,0
400_7b	-1058,5	-1015,5	-972,4	-929,4	-886,3	-843,2	-800,2	-757,1	-714,1
400_7c	-1065,4	-1026,7	-988,0	-949,3	-910,6	-871,8	-833,1	-794,4	-755,7
400_8	-983,8	-911,0	-838,3	-765,5	-692,8	-620,0	-547,3	-474,5	-401,8
400_9	-918,3	-807,8	-697,4	-586,9	-476,4	-365,9	-255,4	-145,0	-34,5
400_10	-875,7	-755,4	-635,1	-514,8	-394,5	-274,2	-153,9	-33,6	86,7
600_1	-1738,4	-1849,0	-1959,7	-2070,3	-2180,9	-2291,5	-2402,1	-2512,8	-2623,4
600_2a	-1564,5	-1619,1	-1673,7	-1728,3	-1783,0	-1837,6	-1892,2	-1946,8	-2001,4
600_2b	-1571,9	-1627,7	-1683,5	-1739,3	-1795,1	-1850,8	-1906,6	-1962,4	-2018,2
600_2c	-1578,4	-1637,3	-1696,1	-1755,0	-1813,8	-1872,6	-1931,5	-1990,3	-2049,2
600_3	-1432,0	-1438,8	-1445,5	-1452,3	-1459,1	-1465,9	-1472,7	-1479,4	-1486,2

600_4	-1308,0	-1276,9	-1245,8	-1214,7	-1183,6	-1152,4	-1121,3	-1090,2	-1059,1
600_5	-1202,3	-1146,1	-1090,0	-1033,8	-977,7	-921,6	-865,4	-809,3	-753,1
600_6	-1055,9	-950,6	-845,2	-739,9	-634,6	-529,3	-424,0	-318,6	-213,3
600_7a	-962,2	-845,5	-728,8	-612,1	-495,5	-378,8	-262,1	-145,4	-28,7
600_7b	-968,8	-854,0	-739,3	-624,5	-509,8	-395,0	-280,3	-165,5	-50,8
600_7c	-974,2	-861,5	-748,8	-636,1	-523,5	-410,8	-298,1	-185,4	-72,7
600_8	-977,7	-856,5	-735,3	-614,1	-493,0	-371,8	-250,6	-129,4	-8,2
600_9	-911,8	-782,0	-652,3	-522,5	-392,8	-263,0	-133,3	-3,5	126,3
600_10	-865,8	-725,6	-585,4	-445,2	-305,0	-164,8	-24,6	115,6	255,8

Tabla 52 Comparación de calidad de servicio de relajar las ventanas v/s aumentar dos técnicos.

En la siguiente figura se muestran gráficamente los resultados de la tabla.

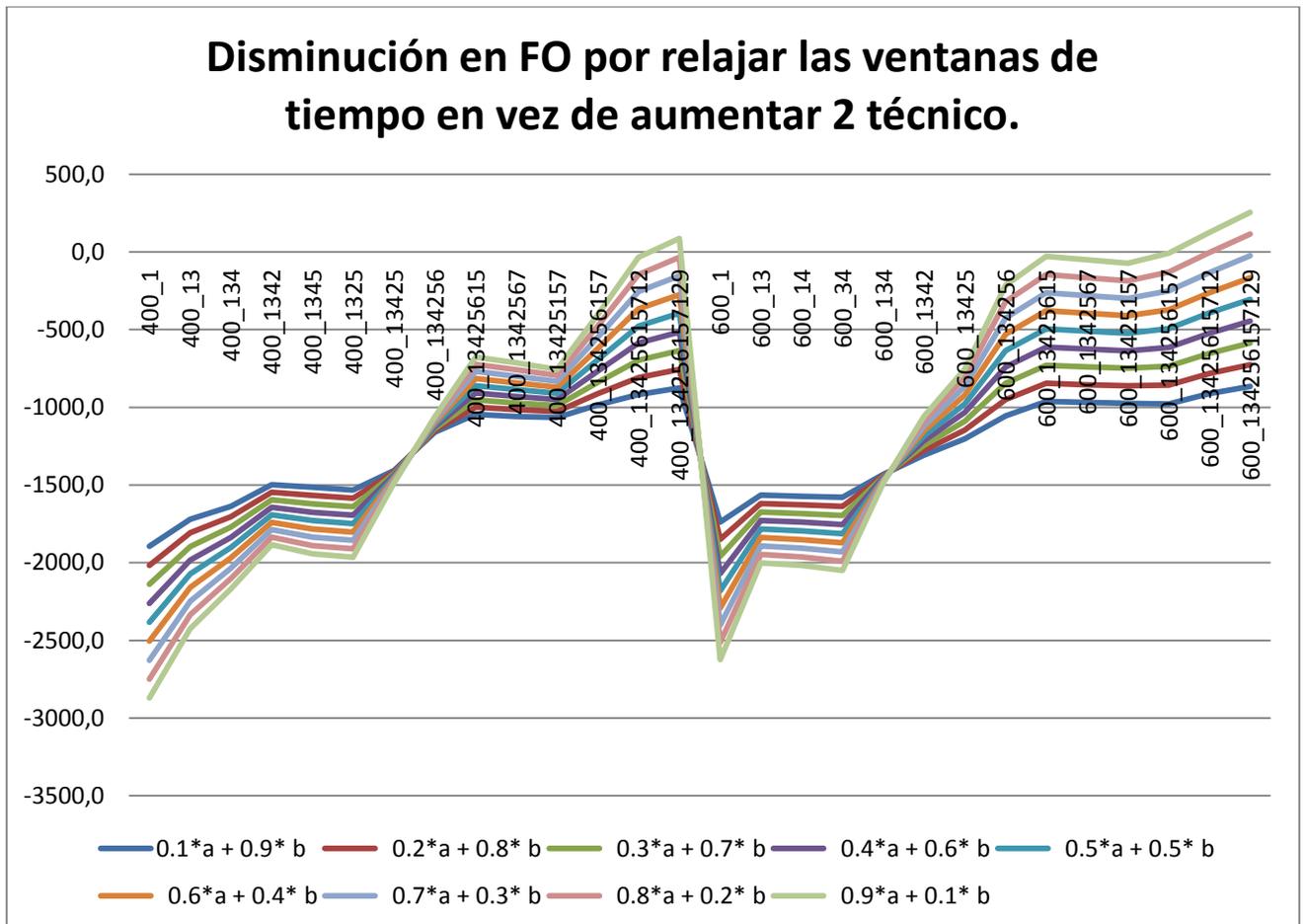


Figura 25 Evolución diferencia de calidad de servicio con sistema de 27 técnicos.

7.3.4 Análisis de rutas

Esta sección tiene como objetivo realizar una observación simple de las rutas que se generan para algunas instancias y así tener un acercamiento a su comportamiento ante las diferentes estrategias, aumento del número de técnicos y relajación de las ventanas de tiempo para un número determinado de clientes.

Se escogen las siguientes instancias con el objetivo de simplificar el estudio pues representan los casos exitosos en estudio:

NºTécnicos	Instancia	Tiempo de Viaje	Violación Ventanas (a)	Tiempo de Servicio (b)	Over Time	% OT
25	200	7754	6585	52406	1372	1,59%
26	200	7731	2746	44778	1084	1,25%
25	400_4a	7543	2628	48097	1818	2,10%

Tabla 53 Resultados casos exitosos

En la siguiente tabla¹⁴ se muestran las rutas diarias que siguen los diferentes técnicos para el caso base, donde todos los clientes tienen ventanas de tiempo de 200 minutos y la flota está compuesta por 25 técnicos. Los datos muestran, como se podía prever, que se busca agrupar dentro de la misma ruta a clientes de zonas cercanas. De esta forma aparecen casos como el técnico número 3, que el día lunes sólo atiende al cliente de la zona N°1. También se observa que la carga de trabajo está repartida equitativamente entre los técnicos ya que atienden a un número parecido de clientes. Esto no ocurre en escasas ocasiones en donde algunos técnicos sólo atienden a dos clientes.

Rutas Caso Base					
Téc.	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
1	Zona(13,13,13,12,15,3)	Zona(21,20,12,16,16,15)	Zona(15,6)	Zona(20,21,21,21,23,23,23,13)	Zona(3,1)
2	Zona(28,28,29,1,15,17)	Zona(1,1,1,1,1)	Zona(29,29,29,3,2,1)	Zona(8,7,7,7,12,14,1)	Zona(21,21,20,13)
3	Zona(1,1,1,1,1,1)	Zona(6,6,5,4,9,12)	Zona(40,45,41,40,7)	Zona(5,5,1,1,18)	Zona(1,1,15,1,2,4)
4	Zona(19,23,21,23,25,25)	Zona(2,2,2,3,3,4)	Zona(1,1,1,1,1,1)	Zona(25,26,24,23,12,11,14,3)	Zona(5,5,14,5,7,46)
5	Zona(7,8,14,5,6,3)	Zona(4,4,4,4,3,2)	Zona(19,19,18,29,17,23)	Zona(28,28,29,29,1,5,6)	Zona(6,6,5,6,5,14)
6	Zona(21,21,20,20,11,13)	Zona(13,21,21,21,23,25)	Zona(30,33,34,31,32,48)	Zona(4,4,4,4)	Zona(9,8,7,9,9,13)
7	Zona(4,5,5,3,4,6)	Zona(16,16,15)	Zona(49,42,7,6,6,5)	Zona(28,17,12,12,3,3,3)	Zona(17,17,17)

¹⁴ La nomenclatura zona(a, b, c) indica que ese técnico, en ese día en específico, visitó primero la zona a, luego la b y finalmente la zona c.

8	Zona(22,26,26,24,1)	Zona(47,47,34,30,37,38)	Zona(47,37,37,33,9,15)	Zona(15,5,5,6,2,3,1)	Zona(20,20,11,9,30,38)
9	Zona(2,2,2,2,2,3)	Zona(1,1,1,1,1,17)	Zona(3,2,2,2,4,4)	Zona(12,12,9,5,2)	Zona(4,4,4,4,4,5)
10	Zona(40,10,14,5,33,9)	Zona(1,1,1,1,3,38)	Zona(3,2,2,3,3,3)	Zona(33,33,32,32,34,43)	Zona(6,6,11,20,11,9)
11	Zona(4,5,5,5,10,49)	Zona(1,1,27,27,27,24)	Zona(20,20,13,11,11,14)	Zona(16,15,1,1,1,2)	Zona(16,16,15,15)
12	Zona(7,7,6,6,4)	Zona(37,32,35,35,48,30)	Zona(23,23,25,22,5,14)	Zona(2,2,2,4,5,3,3,28)	Zona(18,23,26,22,24,22)
13	Zona(4,5,6,6,6,6)	Zona(17,17,17,17,29,24)	Zona(39,36,35,34,33)	Zona(3,2,2,2)	Zona(3,2,2,14,3,3)
14	Zona(3,3,1,1,15,25)	Zona(7,8,4,3,3,7)	Zona(10,9,8,4,4,4)	Zona(3,6,5,5,6,45)	Zona(1,14,8,8)
15	Zona(4,3,3,3,3,3)	Zona(41,9,9,8,9,32)	Zona(25,24,24,24,20)	Zona(43,39,37)	Zona(4,2,2,3,3,1)
16	Zona(36,36,38,38,33,5)	Zona(16,12,10,10,12,40)	Zona(17,15,15,11,4,2)	Zona(33,33,11,3,3)	Zona(24,18,19,26)
17	Zona(49,30,12,12,12,7)	Zona(7,4,15,18,28,28)	Zona(45,10,10,16,16,24)	Zona(49,32,36,38)	Zona(26,23,1,1,22,25)
18	Zona(49,33,40,22,2)	Zona(3,18,22,22,8)	Zona(7,9,4,4,4,1)	Zona(19,10,11,13,24,27)	Zona(33,42,38,30,31)
19	Zona(4,33,33,34,36,38)	Zona(15,3,6,18,24,1)	Zona(10,10,46,6,5,2)	Zona(5,6,6,3,1,4)	Zona(7,40,14,30)
20	Zona(12,12,15,14,22,5)	Zona(17,6,45,39)	Zona(5,6,4,2,3,2)	Zona(18,3,3,1)	Zona(46,41,9,11)
21	Zona(15,16,10,9)	Zona(7,17,3,2,4,4)	Zona(3,28,27,25,9,6)	Zona(30,48,6,11,28)	Zona(5,1,14)
22	Zona(15,22,3,3,7,4)	Zona(12,8,30,2)	Zona(14,1,1,5,35,1)	Zona(34,35,30,30)	Zona(3,2,3,2,2,3)
23	Zona(12,17,17,15,15,20)	Zona(25,3,2,23,11,10)	Zona(13,15,26,28,2,22)	Zona(12,10,9)	Zona(28,3,1,14,19)
24	Zona(14,6,1,14,47,31)	Zona(26,26,23,20,1,2)	Zona(39,39,4,14,4,3)	Zona(29,4,4,2,3)	Zona(24,18,17,15,6)
25	Zona(21,5,1,3,4,1)	Zona(1,1,3,3,2,2)	Zona(4,5,1,1,1,13)	Zona(39,39,39,39,36,35,35)	Zona(13,11,1,1,1)

Tabla 54 Rutas Caso Base (25 técnicos)

Al analizar un caso exitoso de relajación de ventanas de tiempo, donde el tamaño de flota es de 25 técnicos y se le relajan las ventanas a 4 de los clientes con mayor frecuencia de llamados, es posible observar que la composición de las rutas es bastante diferente. Dado que es un problema más relajado, existen más libertades para el ruteo de cada técnico. De esta forma se observa que existe una tendencia más marcada de agrupar clientes de zonas cercanas en las mismas rutas. Esta es la principal explicación para que el tiempo de viaje sea menor en esta instancia que en la de 26 técnicos y ventanas sin relajar y que en el caso base.

Otra diferencia importante es el aumento del extra tiempo, lo que se explica por el nuevo ruteo, donde la relajación de las ventanas de tiempo permite retrasar la atención de esos clientes, los hace menos urgentes. Así, sin violar las ventanas de tiempo, se puede mejorar tanto el tiempo de servicio como el tiempo de viaje ya mencionado.

El atraso de estos servicios, reflejado en la tabla en donde los clientes 1, 2, 3 y 4 son atendidos en posiciones retrasadas con respecto al caso base, genera en este caso un mayor sobre tiempo. De todas formas, al no estar el *over time* en la función objetivo del ruteo, este no influye en el ordenamiento de las rutas por lo que puede variar sin patrones determinados como ya ha sido mencionado en capítulos anteriores. Finalmente, se concluye que tras relajar las ventanas surge otro ordenamiento, uno con más libertades donde las principales características son la

agrupación de zonas cercanas en las mismas rutas y el retraso de los clientes que aceptan la promoción y cuyas ventanas son relajadas.

Rutas 400_4					
Téc.	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
1	Zona(15,6)	Zona(7,7,8,8,9,10,40)	Zona(14,16)	Zona(27,29)	Zona(17,20)
2	Zona(13,13,13,9,5,6,4)	Zona(12,12,16,12,16,12,11)	Zona(40,41,9,7,5,6,13)	Zona(28,28,28,29,1,3,3)	Zona(5,5,6,5,5,5,4)
3	Zona(28,28,29,1,15,15,3)	Zona(1,1,1,4,1,15)	Zona(45,10,10,10,9,9,11)	Zona(8,7,7,7,12,1,14)	Zona(4,4,2,2)
4	Zona(22,22,22,21,23,12,17)	Zona(6,6,6,6,8,3,2)	Zona(47,36,48,31,37,37,4)	Zona(5,5,5,5,1)	Zona(1,1,1,1,1,15,19)
5	Zona(1,1,1,1,1,1,1)	Zona(2,2,2,3,4)	Zona(29,28,28,2,4,4)	Zona(12,12,12,12,11,23,23)	Zona(6,6,6,5,1,14)
6	Zona(19,23,26,26,25,25)	Zona(4,4,4,5,15,3,2)	Zona(1,1,1,1,1)	Zona(48,36,38,32,34,43,35)	Zona(9,41,9,9,9,11)
7	Zona(40,40,10,10,12,13,25)	Zona(3,3,3,3,3,37,38)	Zona(19,19,23,23,25,22)	Zona(25,26,24,23,3,3,3)	Zona(4,4,1,1)
8	Zona(21,21,20,20,38,38,31)	Zona(41,45,10,32)	Zona(2,2,2,2,2)	Zona(12,11,14,1,3,3)	Zona(6,8,38,30,38)
9	Zona(49,49,34,33,7,7,15)	Zona(1,1,1,1,29)	Zona(10,11,45,34,33,33)	Zona(21,12,11,6,6,35)	Zona(7,8,8,14,14,14,9)
10	Zona(2,2,2,3,3,4,1)	Zona(15,8,7,9)	Zona(3,3,3,2)	Zona(16,17,29,1)	Zona(16,15,15,1)
11	Zona(4,5,5,5,14,6)	Zona(13,20,21,21,24,27,38)	Zona(49,35,33,42,7,6,2)	Zona(4,6,5,6)	Zona(20,20,21,22,25,22)
12	Zona(3,2,5,3,5)	Zona(1,1,1,1,1,1,1)	Zona(13,20,18,29,29,17)	Zona(5,1,1,3,1)	Zona(26,23,20,11,11)
13	Zona(7,8,7,14,49,47)	Zona(3,2,4,4,1,17)	Zona(2,2,4,6,5,1,14)	Zona(3,2,5,5)	Zona(18,18,19,26)
14	Zona(4,1,1,5,5)	Zona(4,2,3,2,2,2)	Zona(30,46,8,5,4,2,3)	Zona(30,37,30,45,18)	Zona(21,23,26,22,13,13)
15	Zona(7,6,3,36,38,4)	Zona(21,23,22,27,27,24,24)	Zona(20,13,11,11,10,40,6)	Zona(20,15,15,30,36,24)	Zona(14,16,3,3,2,3,31)
16	Zona(4,3,5,17,5,6,33)	Zona(47,35,18,21,20,23,7)	Zona(5,15,1,1,1,1)	Zona(3,2,3,1,28,23,13)	Zona(2,2,17,18,24)
17	Zona(17,16,15,5,12,24)	Zona(17,17,18,18,28,3,1)	Zona(3,3,3,4,4,5,14)	Zona(39,39,39,49,2,3,2)	Zona(17,28,17,15,7)
18	Zona(15,14,15,14)	Zona(3,35,34,30,10,12)	Zona(25,24,24,14,20,24,2)	Zona(33,39,39,35,34,32)	Zona(2,3,1,14)
19	Zona(15,10,36,36,20,9,2)	Zona(30,47,9,28)	Zona(27,26,25,29,24,32)	Zona(33,33,6,4,21)	Zona(2,3,1)
20	Zona(30,33,33,33,4,3,3)	Zona(17,17,17,25)	Zona(39,39,35,34)	Zona(18,3,4,4,4)	Zona(24,24,1,1,2)
21	Zona(3,3,1,14,1)	Zona(16,22,17,9,4)	Zona(17,9,4,4,4)	Zona(6,5,2,2,3,1)	Zona(13,11,11,30)
22	Zona(12,21,22)	Zona(26,26,23,25)	Zona(39,5,1,15,23)	Zona(33,32,7,5,9)	Zona(42,40,30,46,6)
23	Zona(12,12,12,11)	Zona(37,39,32,48,30)	Zona(6,15,22,16,3,1)	Zona(43,10,10,4,2,2)	Zona(3,4,4,3)
24	Zona(6,6,6,6)	Zona(1,1,4)	Zona(7,15,3,4,4,1)	Zona(2,4,6,4,3,2)	Zona(33,46,14,3,3,3)
25	Zona(3,2,4,4,3,3)	Zona(1,16,15,16)	Zona(1,4,6,15)	Zona(19,21,11,9,13,28)	Zona(5,7,9)

Tabla 55 Rutas con relajación de ventanas a 400 minutos a clientes 1, 3, 4, y 2.

La última tabla (32), muestra las rutas obtenidas para la instancia donde la flota está compuesta por 26 técnicos y no hay relajación de las ventanas de tiempo. La composición de estas rutas es completamente diferente a las dos anteriores pero se rige bajo los mismos conceptos. Las rutas tratan de agrupar clientes ubicados en zonas cercanas para que el desplazamiento sea menor y así también los tiempos de viaje. Esto está limitado por la restricción de las ventanas de tiempo ya que, si bien es una restricción suave, tiene un valor importante en la función objetivo, lo que condiciona de forma importante el ruteo. Por otro lado, tener un técnico más, otorga más posibilidades de rutas y el trabajo simultáneo está más

repartido. Esto genera que tanto las violaciones de las ventanas de tiempo como el tiempo de servicio disminuyan considerablemente en relación al caso base. Por último, el no relajar las ventanas de tiempo a ningún cliente no genera libertades para una atención más tardía (como ocurría con los clientes 1, 2, 3 y 4 en el caso anterior). Esto explica también un menor sobre tiempo.

Rutas caso con 26 técnicos ventanas de 200 minutos					
Téc.	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
1	Zona(15,36)	Zona(7,7,7,8,9,40)	Zona(5,6,6,6)	Zona(6,2)	Zona(1,1,9,9,9)
2	Zona(13,13,13,13,12,12)	Zona(21,21,20,10,11,12)	Zona(40,45,9,41,40,7)	Zona(28,28,28,29,29,1,3,3)	Zona(6,6)
3	Zona(28,28,1,4,4,4)	Zona(12,12,16,12,16,12)	Zona(1,1,1,1,1,1)	Zona(3,3,3,2)	Zona(9,41,14,7,15,19)
4	Zona(49,49,34,38,38,6)	Zona(1,1,1,1)	Zona(29,29,17,5,6,6)	Zona(8,7,7,6,6,4)	Zona(6,6,5,5,1,1)
5	Zona(22,22,26,23,25)	Zona(3,2,2,3,1,1)	Zona(47,31,48,37,32,33)	Zona(16,11,13,11)	Zona(5,4,4,1,1)
6	Zona(33,33,33,49,38,5)	Zona(41,9,9,9,10,10)	Zona(45,10,10,9,11,13)	Zona(5,5,5,5,14,12,27)	Zona(20,23,26,22,24,22)
7	Zona(1,1,1,1,1,1)	Zona(1,1,1,1,1)	Zona(49,36,33,35,34,34)	Zona(4,4,4,4)	Zona(2,8,15,14,14)
8	Zona(19,16,15,15,3)	Zona(13,20,21,24,23,7)	Zona(19,16,15,23)	Zona(5,5,6,2,3,3,3)	Zona(16,16,14,15)
9	Zona(40,10,8,7,14,1)	Zona(4,4,4,2,3,3)	Zona(25,26,24,24,18,1)	Zona(4,4,5,5)	Zona(20,13,11,11,6)
10	Zona(2,2,2,2,3,6)	Zona(16,15,15,3,2,2)	Zona(4,4,4,2,4,4)	Zona(48,36,38,32,32,3,28,23)	Zona(2,2,2,4,1)
11	Zona(4,5,5,5,7,12)	Zona(47,37,16,3,2,38)	Zona(11,13,20,25,24,24)	Zona(25,26,24,29,1,1,2)	Zona(18,18,1,5,30,46)
12	Zona(21,21,21,26,24,17)	Zona(18,18,18,17,27,24)	Zona(3,2,2,3,3,2)	Zona(12,12,12,11,11,36,34,35)	Zona(4,2,2,6,30,38)
13	Zona(7,7,6,14,20,25)	Zona(1,1,16,23,24)	Zona(3,2,2,3,3,3)	Zona(21,23,19,23,23,43,35)	Zona(14,8,8,9,20,25)
14	Zona(4,4,6,6,6,5)	Zona(3,3,3,4,4)	Zona(2,3,3,2)	Zona(12,15,9,45)	Zona(17,11,42,38,31)
15	Zona(6,15,15,5,5,14)	Zona(1,1,1,27,15,4)	Zona(20,13,11,29,1,2)	Zona(33,33,33,5,1,1,3,1)	Zona(7,1,3,2)
16	Zona(3,1,17,23,40,6)	Zona(2,6,6,5,30)	Zona(2,4,4,5)	Zona(20,15,17,12,1,14)	Zona(26,23,20,11,13)
17	Zona(36,3,2,3,5,3)	Zona(17,17,17,17,23,25)	Zona(23,23,20,11,10,9)	Zona(39,39,35,12,21)	Zona(33,46,7,11,13)
18	Zona(4,3,15,17,22,21)	Zona(6,4,47,39,30,37)	Zona(17,29,28,28,1,16)	Zona(3,2,2,3,3)	Zona(3,3,3,3,2,3)
19	Zona(29,20,33,5,10,31)	Zona(22,26,26,27,21,32)	Zona(39,39,46,9,5,4)	Zona(21,3,2,30,30)	Zona(3,3,4,1,3,4)
20	Zona(1,4,5,9)	Zona(35,35,34,22,28)	Zona(10,14,15,10,35,33)	Zona(49,39,39,37)	Zona(5,5,14,9)
21	Zona(3,1,12,14,1,2)	Zona(30,8,8,1,3,1)	Zona(30,42,37,4,1,15)	Zona(3,6,7,28,24)	Zona(1,1,3)
22	Zona(12,10,3,3,5)	Zona(25,17,4,38)	Zona(27,25,22,22)	Zona(2,2,4,1)	Zona(28,17,17,1,5)
23	Zona(20,4,3,1,12,47)	Zona(8,6,45,32,48)	Zona(15,19,1,1)	Zona(33,43,10,9,18)	Zona(4,40,30)
24	Zona(12,7,6,11,15,25)	Zona(3,15,4,1)	Zona(5,5,7,14,4,1)	Zona(34,30,32,6)	Zona(21,21,22)
25	Zona(30,14,36,33,9)	Zona(1,28,2,29,17)	Zona(39,8,2,4,4,4)	Zona(18,10,39)	Zona(24,17,15,14)
26	Zona(3,3,22,15,3)	Zona(2,3,4,2)	Zona(15,6,7,14,14)	Zona(6,7,2,1,1,13)	Zona(24,18,19,26)

Tabla 56 Rutas con 26 técnicos y sin relajación de ventanas