

---

# Sistema para el Despacho de Vehículos de Emergencia de una Empresa Eléctrica en Chile\*

---

**Andrés Weintraub**  
**Julio Aboud**  
**Claudio Fernández**

Departamento de Ingeniería Industrial,  
Universidad de Chile

**Gilbert Laporte**  
École des Hautes Études  
Commerciales de Montréal  
University of Montreal

**Enrique Ramírez**  
Chilectra Metropolitana

---

## Resumen

---

*Las empresas chilenas han empezado sólo recientemente a desarrollar e implementar sistemas computarizados en apoyo de la toma de decisiones relacionadas con la asignación de vehículos y sus itinerarios. Este trabajo presenta el problema de asignación e itinerario de los vehículos de reparación de la División de Servicios de Emergencia de Chilectra S.A. Se desarrolló un sistema computarizado basado en algoritmos heurísticos para el itinerario vehicular considerando las fallas de distintos tipos a las que debe responder Chilectra. Se usó un método de atenuación exponencial para pronosticar la ocurrencia de fallas y un método heurístico para el ruteo de vehículos. Una evaluación del desempeño del sistema indica una mejora de un 16% en la calidad del servicio, medido en términos del tiempo requerido para atender las fallas bajo condiciones normales, y una mejora de 53% en época de invierno.*

---

\* Este trabajo fue financiado en parte por Chilectra S.A. y Fondecyt, Proyecto 1960694 y por el Canadian Natural Sciences and Engineering Research Council, Proyecto OGP0039682.

---

## Introducción

---

A Chilectra le corresponde proporcionar energía eléctrica a la ciudad de Santiago. Su División de Servicios de Emergencia está a cargo de la atención de fallas eléctricas ocurridas en el Área Metropolitana. Existen Unidades de Emergencia separadas y autónomas que responden directamente a alguna de las sucursales de la empresa. El presente artículo se centra en la Unidad de Emergencia correspondiente a la Sucursal Cordillera de Chilectra, que atiende a las comunas de Providencia, Las Condes y Vitacura, tres de las dieciséis municipalidades de Santiago.

Actualmente, el proceso de despacho vehicular se efectúa en forma manual, es decir, existe un operador responsable de programar las actividades y las llamadas de servicio, basándose en su experiencia. Se han propuesto algoritmos heurísticos implementados mediante computadoras a fin de mejorar la tarea de despacho vehicular. La calidad del servicio, medida en términos de tiempo de respuesta, es la preocupación principal de la función de despacho.

A fin de representar todas las posibles demandas en una sola red, el área de la ciudad bajo estudio se representó en base a nodos que representan zonas que comprenden entre dos y cinco cuadras. Cada zona está representada por un nodo que agrupa la información sobre fallas y tiempos de traslado. Los tiempos de traslado entre diferentes nodos se calculan en base a modelos de tiempo de movilización urbana bajo diferentes escenarios de tráfico de acuerdo a la hora del día. Básicamente, una falla puede ocurrir en cualquier lugar, por ejemplo, en una casa o en una calle. Para incorporar esta información a la red definida, se desarrolló un sistema de codificación de direcciones geográficas relacionadas con los nodos de la red.

La construcción del sistema de toma decisiones requiere conocer la probabilidad de que una falla del sistema eléctrico que necesite servicio se produzca dentro de las próximas horas. Un modelo predictivo de demanda fue desarrollado utilizando un enfoque de atenuación exponencial basado en las estadísticas históricas sobre averías.

El método de solución desarrollado se basó en un algoritmo heurístico utilizado para generar ruteos de vehículos, incorporando el conocimiento de las eventuales demandas aleatorias y las prioridades de servicio según la urgencia de la falla, con el fin definir la asignación de tareas a los vehículos.

Por último, para evaluar el sistema propuesto, la calidad de los resultados fue estimada comparando dos enfoques: uno que utiliza el sistema de despacho propuesto, y el otro que utiliza el sistema operacional de la unidad de emergencia actual. Esta comparación se realizó mediante una evaluación de cada enfoque durante el período de una semana. Los resultados de las pruebas muestran una mejora en el tiempo de respuesta de alrededor de un 16% cuando se usa el sistema propuesto. La comparación fue realizada además para días lluviosos, cuando la frecuencia de averías aumenta en forma importante. En este caso el sistema computarizado logró mejorar el tiempo de respuesta en un 53%.

---

## Operación del Sistema de Emergencia de Chilectra S. A.

---

La tarea específica de la Sucursal Cordillera consiste en recibir y clasificar, de acuerdo a su grado de prioridad, las llamadas de servicio que hacen los usuarios del sistema eléctrico ubicados en tres comunas de la Región Metropolitana. Dichas llamadas se verifican posteriormente, en terreno, a fin de restablecer el servicio normal en lo posible. De no ser esto posible, se solicitan los recursos necesarios a la División de Servicios de Emergencia.

La sucursal trabaja en dos turnos de trabajo de ocho horas de duración cada uno, o sea, dieciséis horas por día. Las llamadas recibidas fuera de horas son atendidas por un departamento centralizado que cubre la ciudad completa. La central telefónica principal recibe las llamadas a medida que van llegando, las que son clasificadas según su grado de prioridad (se asigna un código de prioridad a cada una). Un operador telefónico recoge toda la información posible de cada llamada: ubicación geográfica, características de la avería incluyendo el grado de peligro que implica, el área afectada, etc. Se genera una solicitud de servicio que se ingresa en un terminal del sistema informático en línea de la sucursal. Dicha solicitud se envía a los despachadores. En el caso en que la falla es seria, el operador puede, además, llamar al despachador directamente para darle más detalles.

### **El Despachador**

El despachador asigna el trabajo a cada uno de los vehículos. Se utiliza un plano de las áreas asignadas para ubicar la avería. El criterio utilizado para asignar los trabajos consiste en cumplir con los requerimientos de prioridad y tiempo de espera, aprovechando tanto el conocimiento del despachador del área bajo su control, como su experiencia. En este proceso, el despachador hace uso de la siguiente información: la ubicación actual de cada uno de los vehículos, el tiempo necesario para completar todas las llamadas de servicio actualmente en proceso; el nivel de prioridad de los casos que se encuentran en la fila de espera y el tiempo que ha pasado desde que la llamada fue recibida. Toda esta información se encuentra disponible mediante consulta al terminal de computador, o bien, vía llamada radiofónica directa a los vehículos.

La asignación vehicular consiste en seleccionar y llamar por radio a cada vehículo para darle su próximo trabajo. El despachador toma su decisión de tal modo de obtener la mejor relación prioridad-tiempo de espera. Una vez asignada la llamada de servicio a un vehículo específico, la ruta de traslado es determinada por un inspector que acompaña el vehículo. Dicha decisión es tomada en base a su experiencia.

### **Vehículos de Servicio o Unidades de Servicio (US)**

Existen dos turnos de trabajo que funcionan desde las 07:00 hasta las 23:00 hrs. Cada turno funciona con aproximadamente cinco vehículos durante la temporada

baja (los meses de verano) y diez vehículos durante la temporada alta. Generalmente, el número de US se reduce a tres vehículos durante el turno nocturno, el que fundamentalmente atiende a los sectores con mayor número de averías. Los primeros treinta minutos de cada turno de las US se dedican a revisar la unidad, cargar materiales y equipo, etc. Las unidades de servicio deben llegar a la sede treinta minutos antes del fin de cada turno, con el objeto de desembarcar materiales de trabajo y entregar el vehículo al próximo turno. Cada turno dispone de un período de descanso de treinta minutos, el que puede tomarse en cualquier momento. Cuando no se encuentran respondiendo a llamadas, los vehículos de servicio trabajan en mantención preventiva dentro del sistema (Chilectra 1992, 1994).

---

## El Sistema propuesto

---

El siguiente enfoque fue desarrollado para apoyar el despacho de los vehículos de servicio de emergencia. Los siguientes elementos se definen como clave en el proceso de toma de decisiones:

### **Prioridad de Servicio**

Existen cinco niveles de prioridad. Las averías críticas, tales como un cable caído que presenta peligro, tiene Prioridad Uno. La pérdida de energía doméstica en hogares individuales tiene la prioridad mas baja. Las prioridades son de naturaleza dinámica debido a que ninguna solicitud de servicio puede postergarse indefinidamente, de tal modo que una falla de menor prioridad aumenta su prioridad mientras más tiempo esté en espera.

### **Tiempo de Traslado y Costos de Transporte**

Las solicitudes de servicio deben ser atendidas en el menor tiempo posible. Los costos globales de transporte, aún cuando son significativos, tienen menor importancia en este caso.

### **Probabilidad de Nuevas Solicitudes**

Es importante incluir información sobre posibles fallas en el futuro próximo, a fin de evitar la asignación de vehículos de manera tal que un área de probables fallas futuras pudiese quedar desprotegida.

### **Función Objetivo**

El sistema pretende optimizar la calidad de servicio medida en términos de tiempo de respuesta, tomando en cuenta los niveles de prioridad. Para la toma de decisiones

en tiempo real, hay que agregar un factor que considera la calidad de servicio esperada en el futuro. Este factor puede aproximarse considerando la distancia a que se encuentran los vehículos de una zona determinada, y el número de fallas esperadas para la misma.

En forma esquemática, hemos intentado minimizar la función de costos que refleja dichos factores para cada asignación vehicular. El costo se define como

$$\alpha \sum_{i \in I} P_i T_i + \beta \sum_t \sum_{j \in J} F_j K_{jt} \quad (1)$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  son parámetros por calcularse y que, respectivamente, ponderan la calidad de servicio para fallas conocidas versus la calidad de servicio esperada para las averías en el futuro. Si se desea, también puede agregarse una expresión que refleje el costo de traslado. La notación restante se define de la siguiente manera:

$I$  : Conjunto de fallas conocidas

$J$  : Conjunto de zonas

$P_i$  : Ponderación de factor prioridad para la falla  $i$

$T_i$  : Tiempo de servicio, incluyendo el tiempo de demora antes que un vehículo llegue al sitio de avería  $i$

$F_j$  : Demanda esperada (numero de averías) para zona  $j$

$K_{jt}$  : Factor de castigo que depende de la distancia de los vehículos de la zona  $j$  en el período  $t$

La siguiente sección describe cómo se determinaron estos valores. Algunos parámetros se determinaron mediante experimentación, mientras otros se obtuvieron a través de métodos algorítmicos que se detallan a continuación.

### **Ponderaciones en la Función Objetivo**

Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  ponderan la calidad de servicio para las fallas conocidas y el factor de castigo debido a la mala ubicación de los vehículos en relación a averías futuras. Éste es un problema de objetivos múltiples (en este caso son dos) que es bastante complejo y que ha sido discutido extensamente en la literatura. Existen dos enfoques: el primero considera que la ponderación de los objetivos se define *a priori*. Este enfoque tiene la ventaja de ser de fácil aplicación. Sin embargo, tiene la desventaja de no conducir a una representación precisa en términos metodológicos, dado que las curvas de utilidad de los usuarios son generalmente complejas y no-lineales. El segundo enfoque es interactivo, siendo el usuario quien califica sus opciones de acuerdo a sus preferencias, para llegar de esta manera a una solución. Este enfoque es correcto en términos metodológicos, pero es de difícil aplicación. Nosotros elegimos un sistema sencillo de ponderaciones lineales tales como en la expresión (1). En dicha ecuación, los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  se calibraron mediante un

proceso de simulación, con el fin de obtener soluciones apropiadas para cualquier evento probable, las cuales luego se validaron para alcanzar un nivel de calidad de servicio global alto (Fernández, 1995).

### **Ponderación de las Prioridades**

Los factores de ponderación  $P_i$  asociados a las diferentes fallas de acuerdo a sus prioridades, son definidos por la empresa y presentados en el Cuadro 1.

<b>PRIORIDAD</b>	<b>PONDERACIÓN <math>P_i</math></b>
1	10
2	5
3	3
4	2
5	1

Cuadro 1

### **Factores ponderados $P_i$ por prioridad de avería**

La no-linealidad de la relación demuestra que la característica crítica de las fallas crece con el nivel de prioridad. Las ponderaciones han sido determinadas de acuerdo a una calibración realizada por la Sucursal Cordillera de Chilectra S.A. Los niveles de prioridad también varían según el tiempo de espera. Por ejemplo, una falla de Prioridad 5 se convierte en una de Prioridad 4 después de treinta minutos. El Cuadro 2 presenta las variaciones de prioridad a través del tiempo:

<b>Prioridad inicial</b>	<b>Variación de la prioridad</b>	<b>Tiempo transcurrido después de ocurrida la falla (minutos)</b>
2	1	240
3	2	120
4	3	60
5	4	30

Cuadro 2  
Prioridad de avería a través del tiempo

## **Tiempo de Traslado**

El valor de  $T_i$  ha sido definido como el tiempo requerido para responder a una falla. Dicho tiempo depende de las decisiones de despacho. Para administrar estas decisiones se ha definido un proceso dinámico. En cualquier momento existe un conjunto de fallas conocidas, a las cuales se debe asignar los vehículos. A medida que las averías van siendo atendidas, se las elimina del sistema, incorporándose nuevas fallas a medida que aparecen.

Se desarrollaron dos instrumentos para determinar el despacho de los vehículos: un algoritmo heurístico de despacho vehicular, y un diseño que representa la red de viajes y los tiempos de viaje.

---

## **Algoritmo heurístico para el despacho vehicular**

El primer método construye itinerarios de servicio para cada vehículo a fin de minimizar el tiempo total ponderado (costo) de los traslados. El servicio de las fallas de mayor prioridad se considera en primer lugar ya que las ponderaciones se asignan a las fallas de acuerdo a sus niveles de prioridad. El algoritmo de despacho contempla dos etapas.

### **Construcción de la Solución Inicial**

Para hallar una solución inicial, empleamos un enfoque de agrupar primero las fallas que se asignan a cada vehículo y luego rutear la secuencia en que cada vehículo visita las fallas. Este método tiene la ventaja de ir agrupando las solicitudes de acuerdo al sector geográfico en las zonas asignadas, lo que permite la construcción de itinerarios en el cual cada uno de los vehículos circula dentro de una área limitada, para que los vehículos no tengan que hacer traslados largos entre fallas muy distantes entre sí. Una vez asignados los puntos de demanda que cada vehículo debe atender, se construye un itinerario para cada vehículo. Para definir el itinerario de cada vehículo, se desarrolló un enfoque tipo "GENI" (Gendreau, et al 1992). Este método fue modificado para construir el itinerario tomando en cuenta que las solicitudes de servicio se relacionan con diferentes niveles de prioridad según el grado de peligrosidad y urgencia informados. Cabe notar que también se han propuesto algoritmos heurísticos alternativos para el problema de construir itinerarios dinámicos de vehículos (Powell, 1988). También Le Clerc y Potvin (1997) proponen un algoritmo de tipo heurístico basado en el enfoque genético para un problema dinámico de recoger y entregar material para cada cliente. Para nuestro problema, dado que la calidad de servicio es de naturaleza multi-atributo, se derivaron relaciones ponderadas aditivas, lineales y no-lineales, como funciones objetivo.

El método GENI se basa en la siguiente idea: una ruta se construye gradualmente, agregando un nodo (una falla) a la vez, el cual se selecciona de entre

un conjunto de nodos predefinidos como vecinos de los ya existentes en la ruta. Se inserta cada nodo adicional, probándose todas las combinaciones posibles de secuencias para encontrar la de menor costo. El algoritmo sólo inserta nodos entre los  $p$  vecinos más cercanos en la ruta itinerario parcialmente construida. Si el valor elegido para  $p$  crece, la solución obtenida tiende a ser mejor; sin embargo, el algoritmo requiere de un aumento importante de tiempo computacional.

En los Gráficos 1 y 2 se presentan dos formas de agregar un nodo  $v$  a un itinerario ya existente. Las dos formas involucran una re-optimización local del itinerario actual en torno a la posición donde se inserta el vértice  $v$ . En las inserciones Tipo I, se eliminan los arcos  $(V_i, V_{i+1})$ ,  $(V_j, V_{j+1})$  y  $(V_k, V_{k+1})$  se insertan los arcos  $(V_i, V)$ ,  $(V, V_j)$ ,  $(V_{i+1}, V_k)$ , y  $(V_{j+1}, V_k)$ . Esto significa que las trayectorias  $(V_{i+1}, \dots, V_j)$  y  $(V_{j+1}, \dots, V_k)$  se invierten. Se considera hasta  $p$  vecinos de cada  $v_i, v_j$  y  $v_k$  en la vecindad de  $v$  y se elige la selección que da la ruta de menor costo. Las inserciones Tipo II son algo más complejas. Resulta de la eliminación de los arcos  $(V_i, V_{i+1})$ ,  $(V_{l-1}, V_l)$ ,  $(V_j, V_{j+1})$  y  $(V_{k-1}, V_k)$  y su reemplazo por  $(V_i, V)$ ,  $(V, V_j)$ ,  $(V_l, V_{j+1})$ ,  $(V_{k-1}, V_{l-1})$  y  $(V_{i+1}, V_k)$ . Los caminos  $(V_{i+1}, \dots, V_{l-1})$  y  $(V_j, \dots, V_k)$  se invierten. Aquí se consideran  $O(p^4)$  casos en vez de  $O(p^3)$  como en el primer caso.

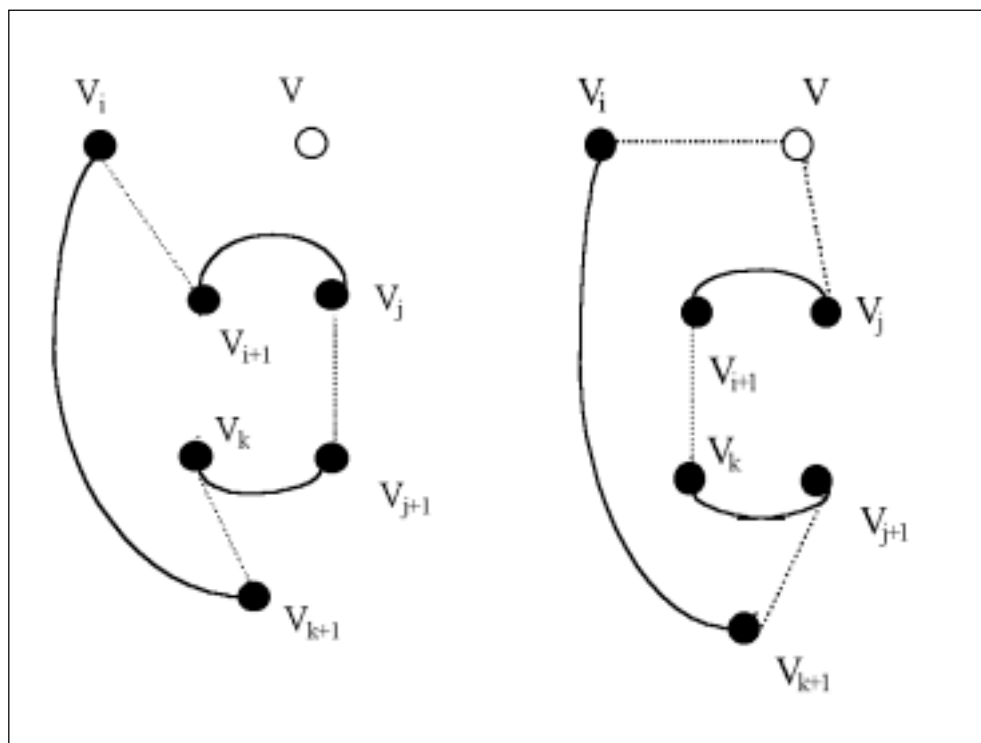


Gráfico 1  
Inserción Tipo I



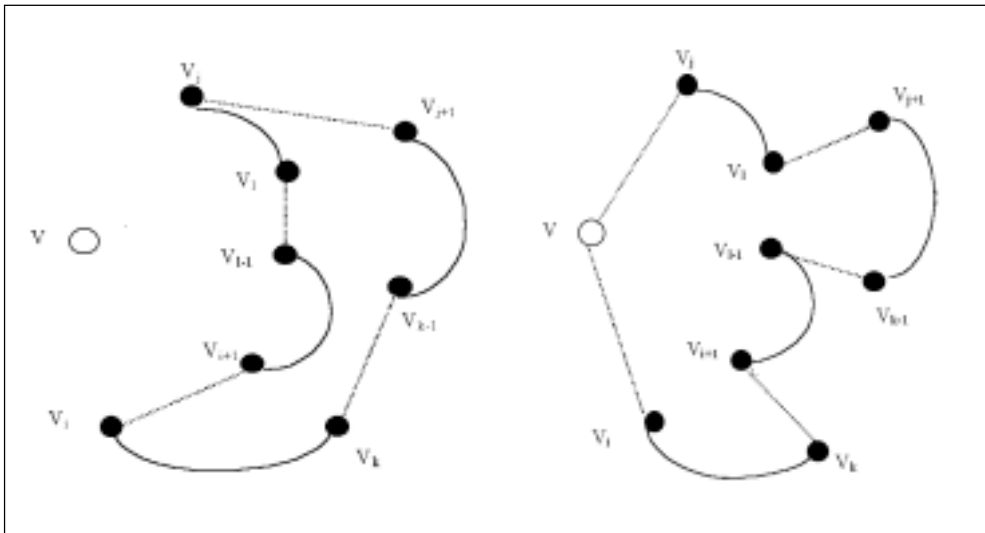


Gráfico 2  
Inserción Tipo II

**El algoritmo puede describirse de la siguiente manera:**

1. Crear un itinerario inicial con tres nodos seleccionados arbitrariamente. Definir una vecindad  $p$  para cada vértice, es decir el conjunto de sus  $p$  vecinos más cercanos.
2. Seleccionar un nodo  $v$  de costo mínimo que todavía no esté dentro del itinerario, considerando las dos direcciones posibles del mismo y los dos tipos de inserción. Actualizar la vecindad  $p$  de cada nodo.
3. Si cada uno de los nodos se encuentra en el itinerario, parar. Si no, volver al Paso 2.

Este algoritmo produce buenos resultados, ocupando poco tiempo computacional y ofreciendo una calidad de solución aceptable en comparación con los otros enfoques. El método se adapta especialmente a situaciones donde las nuevas demandas o vértices aparecen en forma dinámica y deben ser incorporadas a medida que se reciben, lo cual ocurre en el caso descrito pues las nuevas fallas van presentándose una a una en el transcurso del día.

Para este caso específico, se eligió valor de  $p$  de 4 para lograr un equilibrio entre la calidad de solución y el tiempo necesario para su ejecución. Además de la selección de un nodo de costo mínimo (ponderado), se efectuó un cambio para asegurar que todos los nodos (fallas) de mayor prioridad fueran insertados para ser visitados antes de los otros nodos en la ruta construida.

De este modo, el algoritmo considera la prioridad de los nodos así como el tiempo involucrado en atender cada solicitud. Adicionalmente, la función objetivo utilizada, descrita anteriormente, combina la minimización del tiempo de atención a las fallas (modificado de acuerdo a las prioridades) y la minimización del riesgo de dejar sin cobertura a zonas con niveles altos de solicitud de servicio de emergencia.

## **Obtención de la solución definitiva**

Una vez construidas las rutas iniciales, se busca mejorar la solución mediante un enfoque de equilibrio de carga. Este algoritmo de post-optimización empieza a operar una vez terminado el proceso de optimización GENI. La idea es evaluar la carga de cada vehículo y realizar una redistribución de la carga de trabajo entre los diversos vehículos. La carga de trabajo se mide en términos de la cantidad de solicitudes de servicio, así como los tiempos de traslado y de servicio del vehículo. Una vez traspasado el orden de servicio, la función objetivo se evalúa comparándose la solución antigua con la nueva. Este proceso se realiza en forma aleatoria para diferentes transferencias entre las cargas más pesadas y las más livianas. El proceso de post-optimización se realiza para un número determinado de iteraciones, o bien hasta que no se detecte mejora adicional. A fin de estimar la duración de las llamadas de servicio, es decir el tiempo que el vehículo ocupa en cada falla, se utilizaron los tiempos promedio de la empresa correspondientes a diferentes fallas. La llamada promedio dura alrededor de 30 minutos.

---

## Modelación de la red de transporte

---

El Servicio de Emergencia de la Sucursal Cordillera provee cobertura geográfica para tres comunas del área Metropolitana. Se construyó una red para el sector, representando el transporte urbano dentro del sector, de tal manera que los costos (tiempos) relacionados con los arcos de la red permitan una simulación aproximada de los tiempos de viaje entre cualquier par de puntos dentro de las zonas mencionadas.

Para la red se utilizó información proveniente del Modelo ESTRAUS (Sigdo-Coppers y CIS, 1989). Este modelo fue diseñado por la Subsecretaría de Transportes para representar las pautas de tráfico urbano en Santiago. El modelo estima los tiempos de viaje entre diferentes puntos de la ciudad, utilizando una representación de la ciudad compacta y aproximada. Se definen nodos o centroides como puntos que representan las zonas, y que generan o atraen viajes. Las intersecciones de las calles más importantes también se representan mediante nodos. Los arcos de la red conectan estos nodos entre sí, representando los corredores principales o uniones virtuales entre los centroides. La red que representa las tres comunas de este estudio contienen 370 nodos y 1200 arcos.

Se han efectuado estudios de simulación basados en modelos matemáticos dirigidos a evaluar los equilibrios de tráfico bajo diferentes escenarios. Los escenarios corresponden a diferentes situaciones de congestión, horas punta en la mañana y en la tarde, días laborales cuando hay mayor congestión y cuando los tiempos de viaje son más largos, y horas bajas y días festivos en que se contempla un menor grado de congestión. Dado que los datos ESTRAUS son estimaciones, se les considera adecuados como una primera aproximación de los tiempos de viaje. Los tiempos estimados pueden ser corregidos con tiempos reales medidos por los traslados efectuados en forma diaria. Para determinar el tiempo de viaje entre cada par de nodos dentro de la red, se empleó un algoritmo de camino más corto. Este algoritmo

se corre sólo una vez para cada escenario, almacenándose los tiempos de viaje para cada par de nodos. Estos tiempos se cambian únicamente en el caso de alteraciones en tiempo de traslado.

## Factor de castigo debido a ubicación de vehículos

Tal como se mencionó anteriormente, uno de los factores importantes en la toma de decisiones es la ubicación adecuada de los vehículos, dada la posibilidad de que se produzcan llamadas de servicio en el transcurso del día. A fin de determinar este factor, se requiere de algún tipo de conocimiento predictivo sobre cuándo y dónde ocurrirían las eventuales fallas. Existen estadísticas mensuales de las llamadas de servicio efectivamente atendidas en el Área Metropolitana para las diecinueve subzonas definidas en el presente estudio —un total del 14% de la ciudad de Santiago. En el Gráfico 3 se muestran las solicitudes mensuales correspondientes al período entre los años 1991 y 1994 inclusive. Nótese el efecto estacional que produce un aumento de las fallas durante el invierno debido a factores climáticos: la lluvia y el viento tienden a causar mayores fallas. Por otra parte, la baja producida durante los meses de verano se relaciona también con la reducción de la población de la ciudad. Una tendencia posible ascendente de fallas entre 1991 y 1993 relacionada con el crecimiento demográfico y la densidad habitacional se contrapone a mejoras efectuadas en la red eléctrica. Estos dos factores fluctúan en forma paulatina en los pronósticos diarios. Al examinar un mes típico, no se detectaron ciclos importantes relacionados con variaciones especiales de acuerdo al día o a la semana del mes. A nivel diario se nota una disminución de la demanda de servicio entre las 23:00 y las 07:00 horas, y un aumento entre las 21:00 y las 23:00 durante un día promedio en verano, tal como se muestra en el Gráfico 4.

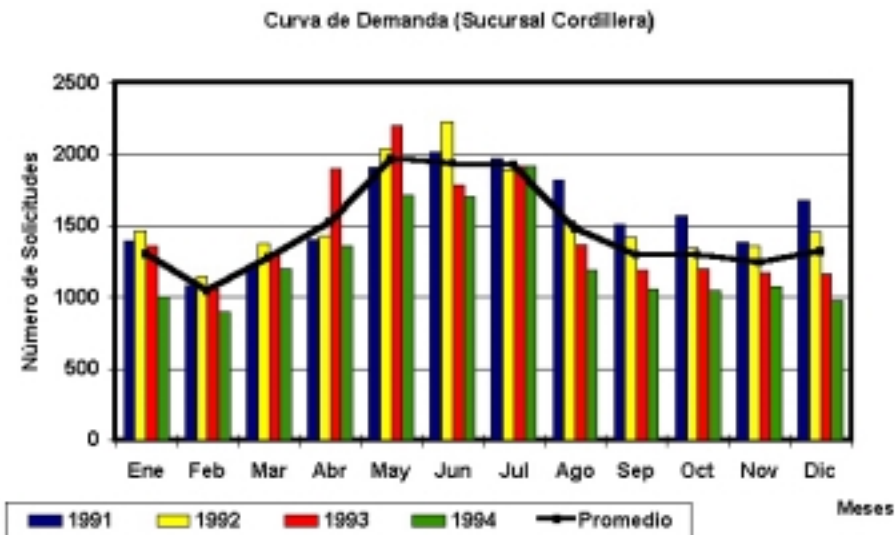


Gráfico 3. Solicitud mensual años 1991-1994

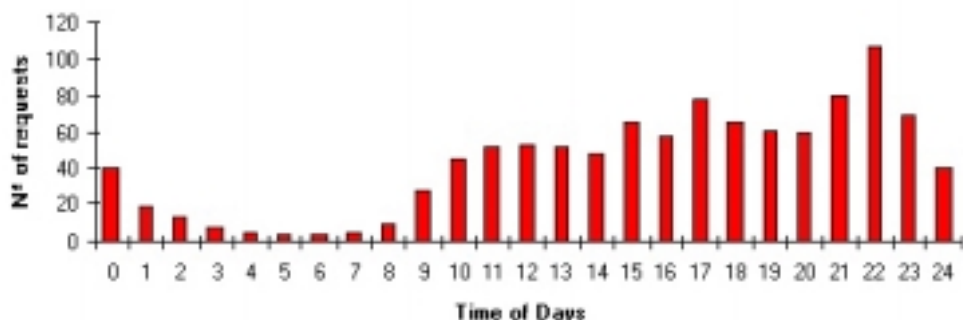


Gráfico 4: Número de solicitudes de emergencia en el transcurso del día

### Modelo de Atenuación Exponencial

Se desarrolló un modelo de atenuación exponencial para pronosticar las demandas diarias en cada zona. Este tipo de modelo supone que la demanda futura se puede predecir sobre la base de información anterior o histórica (Schroeder, 1994). De esta manera, la estimación de demanda para el día  $t$  se mediría como una combinación de la demanda prevista del día anterior ( $t-1$ ), que mide la historia de la demanda anterior y la demanda medida para el día  $t$ . Estos parámetros se ponderan por  $(1-\alpha)$  y  $\alpha$ , respectivamente, dependiendo de la importancia relativa otorgada a la historia pasada en relación al día  $t$ . Adicionalmente, se agregaron parámetros que incorporan los efectos de estacionalidad y tendencia.

Basándonos en los datos, hemos supuesto que las diecinueve sub-zonas son homogéneas con respecto a las funciones de estimación de la demanda. Para cada sub-zona  $j$ , la demanda diaria para el día  $t$  se estimó o según a las expresiones presentadas en el Apéndice.

Este modelo de pronóstico de demanda se corre diariamente para cada sub-zona, utilizando la información existente respecto de las fallas ocurridas.

---

## Implementación del modelo

---

El modelo está diseñado para ser implementado frecuentemente, cada vez que aparece una nueva solicitud de alta prioridad, o bien cuando aparecen varias solicitudes de baja prioridad. Esto correr el sistema aproximadamente cada quince minutos. Los pasos básicos del sistema son los siguientes:

### **1. Leer y preparar los datos al comienzo del día o al iniciarse el turno.**

En este paso se leen los archivos para recoger todos los datos necesarios para la operación del modelo. Estos datos incluyen todas las llamadas en la cola de espera esperando ser atendidos, junto con su ubicación y prioridad, además de la ubicación y las características de cada vehículo. Se efectúa una estimación de la demanda de cada zona basada en el proceso de atenuación exponencial ya descrito.

### **2. Incorporación de nuevas llamadas.**

Cuando se incorporan nuevas llamadas, el sistema requiere de información relacionada con las mismas, tales como ubicación, prioridad, etc. Una vez ingresada al sistema toda la información correspondiente a las nuevas llamadas, el sistema incorpora las nuevas solicitudes y las agrega a aquéllas ya existentes en la cola. Nótese que las prioridades pueden traspasar las llamadas que vienen llegando al primer lugar de la cola. Al comienzo del día o del turno, las llamadas pendientes del día o del turno anterior son atendidas primero. Durante la operación diaria, las nuevas llamadas se incorporan para actualizar la base de datos que se utilizará en los pasos siguientes. Por otra parte, la tarea de actualizar la base de datos incluye además la eliminación de las tareas ya completadas.

### **3. Asignación preliminar de llamadas a los vehículos.**

En este paso todas las llamadas del sistema se agrupan geográficamente de acuerdo a su proximidad, asignándoseles al vehículo más cercano, tomando en cuenta el número de vehículos disponibles y la cantidad de llamadas, de modo que la asignación se equilibra con respecto al número de llamadas por vehículo. En la primera asignación, hay que asegurarse que cada una de las llamadas sea asignada de acuerdo a su prioridad.

### **4. Construcción de rutas iniciales.**

La solución inicial al problema se construye en esta etapa, comenzando con la construcción de rutas iniciales para cada vehículo mediante el método GENI descrito anteriormente.

### **5. Solución final.**

La asignación final se obtiene en esta etapa, la que distribuye la carga uniformemente entre cada vehículo utilizando el enfoque de “equilibrio de carga” descrito anteriormente.

## **Programación de Itinerarios**

El sistema toma en cuenta todas las demandas conocidas en cada momento. Esto normalmente significa definir un horizonte de planificación de varias horas. Sin embargo, en un enfoque de horizonte movable, se actúa únicamente sobre las primeras decisiones. La consideración de todas las demandas conocidas ayuda a evitar una toma de decisiones de carácter miope.

## **Implementación del sistema**

Para evaluar el posible impacto de la instalación de este sistema en Chilectra, la empresa accedió a su implementación durante un corto período en Noviembre de 1994. La prueba se llevó a cabo durante dos semanas consecutivas con patrones de demanda similares. Durante la primera semana se utilizó el sistema tradicional manual. Durante la segunda semana, el sistema de despacho descrito arriba fue utilizado para asignar los vehículos en ambos turnos de unidades de emergencia. Hubo algunas dificultades en la implementación del sistema, ya que ésta coincidió con un cambio en el modo de funcionamiento del sistema de datos en línea para las llamadas recibidas referentes a fallas. Esta fue una de las razones por las que se empleó un período de prueba relativamente corto. En el Cuadro 3 se compara la duración promedio ponderado de las llamadas de servicio utilizando ambos métodos operacionales.

	<b>Operación manual (minutos)</b>	<b>Sistema propuesto (minutos)</b>
<b>Tiempo de servicio promedio ponderado</b>	31,2	27,0
<b>Desviación estándar</b>	18,0	13,2

**Cuadro 3**

**Tiempo de servicio promedio ponderado por prioridad del sistema manual y del sistema propuesto**

Se produjo una mejora de un 16% en el tiempo promedio ponderado. La desviación estándar de la simulación fue de aproximadamente el 50% de los valores medios. Los datos del Cuadro 3 se refieren a un día normal. Adicionalmente, se realizó una simulación para un día de alta frecuencia de falla, lo que es típico en días de mal tiempo en invierno (Junio-Agosto). La carga de un día normal constituye alrededor de 60 llamadas por día, incluyendo cinco llamadas de Prioridad 1. Durante un día de alto volumen, el número de llamadas supera las 150, de las cuales 15 son de Prioridad 1. La simulación (Villena, 1996) compara los resultados de la programación manual con el sistema descrito en el Cuadro 4 correspondiente a días lluviosos.

Indicador	Tiempo de (minutos)	
	Operación manual	Sistema propuesto
Duración promedio de trabajo	135	50
Tiempo promedio de traslado	13	19
Tiempo promedio total	148	69
Desviación estándar	144	30

Cuadro 4

#### Comparación de Tiempo de Servicio para Días de Emergencia (Días Lluviosos)

Tal como se observa en el Cuadro 4, el tiempo real ocupado en desplazarse es menor en el caso del sistema de asignación manual; sin embargo, la duración total de trabajo es menor en el caso del sistema computarizado, ya que el tiempo ocupado en busca de un vehículo disponible se ve reducido en forma importante. Esto puede explicarse por el hecho de que el sistema computarizado propuesto asigna los itinerarios considerando los tiempos globales y considerando posibles fallas futuras.

---

## Conclusión

---

Tal como se resume en la sección anterior, el nuevo sistema desarrollado muestra ser capaz de mejorar significativamente el tiempo de respuesta a las fallas, especialmente en situaciones de alta demanda, típicos de días lluviosos. Esta ventaja podría mejorarse aún más en vista de los problemas con la implementación del sistema computarizado enfrentados durante la primera semana de su operación. Dichos problemas estarían solucionados una vez instalado el sistema en forma permanente.

Por otra parte, puede mejorarse el sistema de información. Actualmente la información se ingresa al sistema manualmente. La información era manejada por tres personas antes de llegar a los vehículos de emergencia: del Cliente al Operador de la Central, del Operador de la Central al Despachador, del Despachador al Vehículo de Emergencia y del Vehículo de Emergencia al Cliente. El tiempo total de servicio dedicado al cliente involucra las siguientes tareas: asignación de tarea, traslado y reparación. El mejoramiento del proceso de información se refiere a la fase de asignación. El ingreso manual de la información frena el proceso notablemente. La asignación de ubicaciones geográficas a los nodos de la red también es un paso manual que produce una demora de aproximadamente cinco minutos en cada operación.

Eventuales mejoras en los procedimientos de recaudación de datos reducirían estos tiempos. El ingreso directo de datos, con el apoyo de un Sistema de Información Geográfica (SIG) permitiría el procesamiento automático de información, la que se alimentaría en forma directa al Sistema de Despacho, llevando así a una disminución importante del tiempo de cada etapa. En la actualidad, Chilectra ya ha construido una primera etapa de SIG para apoyar el proceso. La automatización del sistema de despacho permitiría que las órdenes de despacho pasen de los operadores de la central a un sistema automático, el cual generaría órdenes de despacho a los vehículos en forma continua y en línea.

El uso de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) instalados en cada vehículo, que indican su posición en todo momento, también aumentarían la automatización del proceso. De esta forma el contar con apoyos de información y comunicación en línea, junto con el sistema de asignación de itinerario computarizado descrito anteriormente, mejoraría notablemente la calidad de los sistemas de despacho de emergencia.

---

## Referencias Bibliográficas

---

- Chilectra S.A., 1992. «Informes de Gestión y Mantenimiento Correctiva», Gerencia de Explotación, Departamento de Servicios de Emergencia.
- Chilectra S.A., 1994. «Solicitudes de atención por fallas, provocadas en la red eléctrica para las áreas 5 y 6», Subdivisión Sistemas de Telecomunicaciones.
- Fernández, C., 1995 Desarrollo e implementación de un sistema de apoyo para el despacho de vehículos de emergencia en Chilectra S.A. basado en algoritmos heurísticos. Tesis de Grado de Magister en Ingeniería Industrial, Universidad de Chile.
- Gendreau, M., A. Hertz y G. Laporte 1992. New Insertion and Postoptimization Procedures for the Traveling Salesman Problem. *Operations Research*, 40, 1086-1094.
- Powell, W.B. 1988 A Comparative Review of Alternative Algorithms for the Dynamic Vehicle Allocation Problem. En *Vehicle Routing: Methods and Studies*, Golden and Assad eds, pp. 249-291. North Holland. Amsterdam.
- Le Clerc F. y J.Y. Potvin, 1997. Genetic Algorithms for Vehicle Dispatching. *International Transactions in Operations Research*, 5/6 pp. 391-400.
- Consortio Sigdo-Koppers Y Cis Ingenieros Consultores, 1989. Estudio de Evaluación y Desarrollo del Sistema de Transporte Urbano de la Ciudad de Santiago, Informe final.
- Schroeder, R., 1994. *Operations Management*. McGraw-Hill.
- Villena, O. 1996 Evaluación de Alternativas para el problema de Asignación en los Servicios de Emergencia y Mantenimiento. Memoria del Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile.



## Apéndice:

---

La demanda diaria proyectada para el día t en una sub-zona dada se calcula mediante las siguientes expresiones:

$$A_t = \alpha D_t + (1 - \alpha) (A_{t-1} + T_{t-1})$$

donde

$D_t$  = Demanda real observada del día t

$\alpha$  = Factor de ajuste (*smoothing*)

$A_{t-1}$  = Demanda histórica proyectada a t-1

$T_{t-1}$  = Tendencia del día anterior

Para actualizar la tendencia definimos:

$$T_t = \beta (A_t - A_{t-1}) + (1 - \beta) T_{t-1}$$

donde

$\beta$  = Factor de ajuste (*smoothing*)

Para actualizar el coeficiente de estacionalidad, definimos:

$$R_t = \gamma (D_t / A_t) + (1 - \gamma) R_{t-L}$$

donde

$D_t$  = Demanda real observada del mes t

$A_t$  = Demanda histórica promedio del mes t

$R_t$  = Factor de estacionalidad (L, largo del ciclo, típicamente un año)

$\gamma$  = Factor de ajuste (*smoothing*)

Por último, la demanda proyectada de averías para cada periodo por zona se define como:

$$F_t = (A_t + T_t) R_t$$

donde

$A_t$  = Promedio estimado por t (definido por (2))

$T_t$  = Tendencia durante periodo t (definido por (3))

$R_t$  = Factor de estacionalidad para el mes t (definido por (4))

Los factores de ajuste (*smoothing*) fueron  $\alpha = 0,3$ , correspondiente a la demanda promedio,  $\beta = 0,2$  a la tendencia y  $\gamma = 0,1$  a la estacionalidad. Estos coeficientes demuestran que los eventos recientes tienen un impacto fuerte sobre las predicciones.

