



TESIS DE GRADO
EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

AUTOMATIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE
TAREAS OPERATIVAS EN TRANSPORTE PÚBLICO

Autor: Juan Sebastián Carrizo
Legajo: 46411

Tutor: Andrés Basilio Agres
Co-Tutor: Juan Pablo Rodríguez Varela

2011

A mis padres.

RESUMEN EJECUTIVO

Este trabajo tiene como objetivo la generación de una herramienta de automatización e integración en las tareas de planificación operativa. Para la evaluación de dicha herramienta se utilizará un caso de estudio real basado en una compañía de transporte público de la Argentina. Las tareas operativas que se evaluarán serán la asignación de tareas de mantenimiento y la asignación de días libres para los choferes.

Para comenzar con el desarrollo de esta herramienta se realizará un estudio detallado del tema de la planificación, comenzando por la evolución de la teoría (a nivel general y en el transporte público) y una explicación detallada de la técnica que será el centro del desarrollo de la herramienta, la simulación.

Tras este desarrollo teórico se procederá a relevar la situación actual de la compañía a asesorar a modo de generar una base de comparación que permita medir el éxito o no de la herramienta. En esta etapa también se delimitará el alcance del estudio al igual que las restricciones y simplificaciones que resulten más relevantes.

Se dedicará un capítulo entero al desarrollo y explicación de la solución, la cual generará diferentes módulos para resolver cada una de las tareas a planificar. Existirá un módulo final encargado de la integración de los módulos individuales.

Una vez descrita la solución y su generación, se evaluará y validará la misma mediante indicadores comparativos entre actual metodología y la desarrollada en este proyecto.

Finalmente, y a partir de todo el estudio realizado, se propondrán recomendaciones a la empresa asesorada, conclusiones y líneas de investigación para el futuro.

EXECUTIVE SUMMARY

This paper focuses on the development of a tool capable of automating and integrating the scheduling of different operational tasks, specifically in the context of bus transportation. A case study of the scheduling problems of a public transportation company in Argentina will be analyzed. The tasks focused on are the maintenance of the bus fleet and the days-off given to driving personnel.

As a starting point, this paper will present an in-depth analysis of the theoretical background regarding scheduling theory (both applied in general fields as well as the evolution in the field of public transportation). This analysis will conclude with an explanation of the central method applied in this paper, simulation.

To ensure a comparable base, we will analyze the current methodology being used as well as set the boundaries and restrictions of this project.

The development and explanation of the specific tool chosen will then be explained. Basically, the model consists of an individual module for each of the tasks to be scheduled. There will also be an integration module that will work as a link between the individual solutions previously described.

At this time, and through a series of indicators, the schedules generated by both methods (the proposed model and the current methodology) will be compared.

In the final chapter of this paper, specific recommendations to the company are made, as well as more general conclusions. To conclude, a series of future research topics will be proposed.

AGRADECIMIENTOS

En estas pocas líneas quiero tomarme el tiempo de agradecer a quienes formaron parte de este viaje y sin los cuales nunca hubiese podido llegar a donde estoy hoy.

En primer lugar quiero agradecerles a mis tutores Andrés Agres y Juan Pablo Rodríguez Varela por su apoyo y confianza durante la materialización de este proyecto.

A Brian Ovrum, Marina Pérez Gaido y Emanuel Alsina, amigos y compañeros que formaron parte del proyecto y cuyo aporte hizo este trabajo posible.

A mi familia por su apoyo incondicional y por haberme convertido en la persona que soy hoy.

Y finalmente a Kathrin por inspirarme a ser mejor todos los días.

A todos ustedes les estoy inmensamente agradecido.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN EJECUTIVO	v
EXECUTIVE SUMMARY	vi
AGRADECIMIENTOS.....	vii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1- Introducción al Proceso de Planeamiento en Transporte Urbano	1
1.2- Relevancia del Problema	2
1.3- Motivación para Abordar el Tema	3
1.4- Etapas del Proyecto	3
1.5- Criterio de Éxito del Proyecto	4
2 ESTADO DE LA CUESTIÓN.....	5
2.1- Evolución histórica de la planificación	5
Paradigmas Reinantes.....	5
2.2- Planificación en el transporte público	9
2.3- Una mirada al contexto.....	11
2.4- Análisis técnica en detalle	12
2.4.1 Simulación	13
2.5- Conclusiones Estado de la Cuestión.....	19
3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	21
3.1- Alcance del trabajo	21
3.2- Situación Actual	21
3.3- Definición del Problema.....	24
4 SOLUCIÓN PROPUESTA.....	27
4.1- Introducción.....	27
4.2- Módulo I: Planificación de tareas de mantenimiento.....	28
4.2.1 Introducción.....	28
4.2.2 Consideraciones Iniciales	28

4.2.3 Hipótesis del Problema	30
4.2.4 Objetivos	31
4.2.5 Marco Teórico	31
4.2.6 Modelo	33
4.2.7 Conclusiones	44
4.3- Módulo II: Asignación de francos	46
4.3.1 Introducción	46
4.3.2 Consideraciones Iniciales.....	46
4.3.3 Hipótesis del Problema	47
4.3.4 Objetivos	47
4.3.5 Marco Teórico	48
4.3.6 Modelo	49
4.3.7 Conclusiones	54
4.4- Módulo III: Integración e Iteración.....	55
4.4.1 Introducción	55
4.4.2 Objetivo.....	55
4.4.3 Modelo	56
4.4.4 Modificaciones	62
4.4.5 Condiciones de finalización del sistema	64
5 RESULTADOS.....	67
5.1- Definición de indicadores	67
5.2- Características de las líneas seleccionadas	69
5.3- Presentación de Resultados.....	70
Indicadores de mantenimiento	70
Indicadores de días libres	73
Sistema Integral.....	75
6 CONCLUSIONES.....	79
6.1- Recomendaciones del Proyecto	79

6.2- Evaluación de éxito del proyecto	81
6.3- Futuras líneas de investigación.....	82
7 BIBLIOGRAFIA	85
8 ANEXOS.....	87
8.1- Tabla de datos base.....	87
8.2- Composiciones de mantenimiento.....	88

1 INTRODUCCIÓN

1.1- INTRODUCCIÓN AL PROCESO DE PLANEAMIENTO EN TRANSPORTE URBANO

Las compañías de transporte urbano se ven hoy en día, como lo han sido en el pasado, forzadas a encontrar nuevos métodos para reducir el eterno conflicto entre lograr retener y hasta expandir los servicios ofrecidos y una constante reducción en los subsidios. Esta situación es un resultado de la puja en objetivos de diferentes agentes involucrados e interesados en las mismas, gerencia de las propias compañías de transporte, pasajeros y políticos para mencionar algunos. Como consecuencia esta tensión resulta, hasta ahora, irresoluble.

Sin embargo, es posible atacar a este problema de varios ángulos simultáneamente logrando así trabajar con objetivos contrapuestos. Una forma de tratar este tipo de problemas es a través del desarrollo de sistemas de planeamiento asistidos por computadoras.

El proceso de planeamiento del transporte urbano puede ser dividido en cuatro etapas que debido al tamaño y complejidad del sistema, son generalmente tratadas de forma secuencial, donde pasos superiores sirven de input a niveles inferiores.

- Ruteo: En esta etapa se deciden y diseñan las rutas de los servicios a ofrecer. Esta etapa resulta la primera y más importante restricción en el proceso, limitando y determinando los objetivos globales de la empresa.
- Planeamiento Estratégico: De aquí se define el nivel de servicio que se dará el cual conlleva a la determinación de la frecuencia de viaje ofrecida. Otro resultado de esta etapa es la definición de los cronogramas de viaje a realizar que servirán como input a las próximas etapas.
- Planificación de vehículos: Teniendo los cronogramas de viaje a realizar junto con la cantidad de vehículos disponibles y las necesidades de tareas de mantenimiento (correctivo o preventivo) de los mismos se procede a la generación de cronogramas detallados de trabajo para cada vehículo. Estos cronogramas detallan la hora de salida y llegada de cada viaje junto con la ruta a seguir. Las restricciones de capacidad y velocidad de las unidades son agregadas en esta etapa.
- Planificación de personal: A los cronogramas de trabajo de los vehículos se le designan choferes encargados de desarrollar los recorridos establecidos. En esta etapa se incluyen las restricciones gremiales, contractuales e incluso legales de los trabajadores. Una de las mayores tareas en esta etapa es la asignación de días

libres. Tras esta etapa el *planner*¹ posee cronogramas detallados de personal y vehículos que cumplen con todas las estipulaciones determinadas en las etapas previas.

Esta secuencia, conocida como proceso de planeamiento, permite entender cómo se introducen los distintos elementos del sistema en la generación de planes específicos.

1.2- RELEVANCIA DEL PROBLEMA

El eje de esta tesis puede ser formulado como: ¿De qué manera se puede obtener una mejor planificación de las tareas operativas (tanto asignación de días libres como planificación de tareas de mantenimiento) de acuerdo a un contexto parametrizado?

La razón para la selección de esta problemática radica, en los beneficios que una correcta planificación puede otorgar a todos los agentes que intervienen en el sistema.

A continuación se detallan algunos de los más relevantes en cada categoría:

Beneficios para la Empresa

- Reducción de costos para un determinado cronograma de viajes, o un aumento en la capacidad de transporte para un costo determinado.
- Aumento en la utilización de los recursos disponibles.
- Detección de capacidad ociosa.
- Posibilidad de analizar las consecuencias de un cambio en los parámetros que gobiernan las operaciones.
- Herramienta para toma de decisión y generación de escenarios.

Beneficios para el *Planner*:

- Reducción en tiempos de trabajo dedicado a la planificación operativa.
- Menor tiempo de reacción frente a interrupciones u otros inconvenientes que pudiesen alterar el nivel de servicio.
- Posibilidad de manejar una mayor cantidad de cronogramas permitiendo adaptar el nivel de servicio a las fluctuaciones de la demanda.

Beneficios para la Sociedad

- Un servicio más eficiente y con mayor nivel de servicio.
- La reducción de transporte privado a favor del público conlleva a una reducción en el consumo de combustibles y también de la contaminación del aire.

¹Personas encargadas de la planificación en las compañías.

1.3- MOTIVACIÓN PARA ABORDAR EL TEMA

Existen varias razones, además de los beneficios esperados, que justifican la elección de la temática en cuestión. Siendo las más relevantes:

1. El interés personal en la aplicación y desarrollo de técnicas de optimización.
2. La posibilidad de realizar un proyecto de asesoría a una empresa de transporte que permitió el contacto directo con la temática y generó el deseo de profundizar la investigación en este campo.
3. El deseo de mejorar el transporte público en Argentina con en el cual he tenido que convivir durante la última década y cuya falta de eficiencia ha contribuido a la elección de este tema.

1.4- ETAPAS DEL PROYECTO

Esta tesis tiene como eje central el desarrollo de un caso de estudio basado en un proyecto de asesoría a una empresa de transporte urbano de la Capital Federal. Por esto, las etapas que se presentarán en la tesis seguirán a las del proyecto de asesoría.

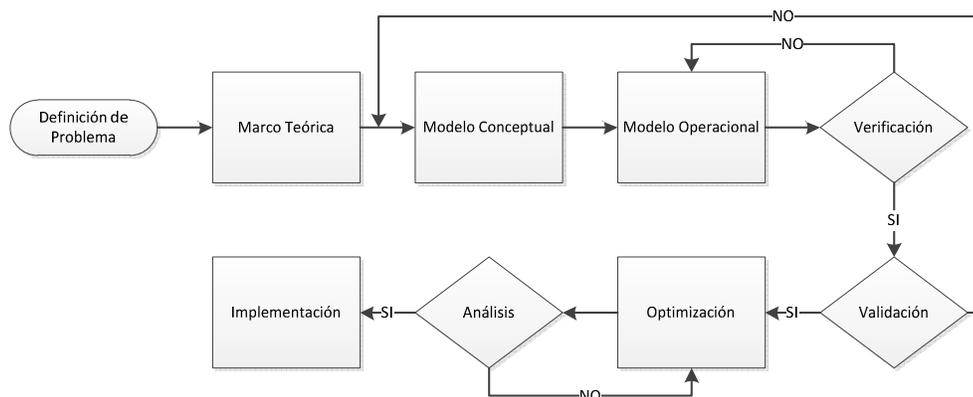


Figura 1-Etapas del Proyecto

El proyecto comenzará con una introducción de carácter académico a las teorías y técnicas aplicadas en la actualidad para la resolución de la planificación operativa en el transporte público. Tras la generación de este marco teórico se procederá a **conceptualizar** la problemática en estudio junto con realidad específica de la compañía a analizar. Entendiendo el sistema en estudio se desarrollará un modelo que sea consistente no solo con las hipótesis y restricciones impuestas para simplificar el problema sino también ser un reflejo fiel de la realidad a estudiar. El éxito y potencia del proyecto recaerá en qué tan bien se encuentra reflejada la realidad en el modelo de estudio. Integrados a este modelo se tendrán los módulos que generen la **optimización** y

por ende la solución a la problemática definida. La etapa de **análisis** presenta la iteración necesaria en la etapa de optimización para perfeccionar las soluciones aplicadas. Esta etapa es de una gran importancia porque permite ingresar el input de los *planners* ya que serán ellos los que, al fin de cuentas, aprueben o no los cronogramas obtenidos.

Si bien se presenta una última etapa de **implementación** en la cual se desarrollará la interface que permitirá al *planner* operar el modelo al igual que la generación de gráficos y elementos de salida del modelo, la misma no será reflejada al escapar el espectro de la tesis.

1.5- CRITERIO DE ÉXITO DEL PROYECTO

El éxito o no de la tesis estará ligado a varios criterios que se pueden apreciar a continuación. Cabe destacar que no todos están asociados al proyecto de asesoría, ya que el desarrollo de esta tesis deberá cumplir exitosamente criterios de evolución a nivel académico y también personal.

1. La elaboración de la tesis deberá generar una evolución en los conocimientos del autor con respecto a la temática analizada. Este objetivo resultará el más importante ya que este trabajo culmina el ciclo de formación académica.
2. El desarrollo satisfactorio de un modelo que logre cumplir con los objetivos definidos en el trabajo de asesoría. En este punto se evidencia la necesidad de que el proyecto de asesoría sea exitoso, brindándole al cliente una mejora respecto al proceso actualmente utilizado.
3. Brindar un estudio que nutra a la comunidad académica Argentina y sirva como punto de partida para futuros estudios en esta temática.

2 ESTADO DE LA CUESTIÓN

El objetivo de todo este capítulo es sumergir al lector en el mundo de la planificación operativa aplicada al transporte público en un país en vías de desarrollo como la Argentina. Se ha optado por un esquema de presentación gradual que intenta, partiendo de lo más general y global, ir apartado en apartado construyendo hasta llegar a la temática en cuestión. Tras recorrer la evolución histórica se procederá a indagar en detalle el contexto local de la compañía para luego presentar en detalle la técnica que, por su aplicabilidad y enfoque innovador, ha sido elegida como el centro del desarrollo de este proyecto.

2.1- EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA PLANIFICACIÓN

En este apartado se hará un paneo general a través de la historia y los paradigmas reinantes en materia de planeamiento. Cabe destacar que en sus comienzos la planificación refería a operaciones en su mayoría industriales, generalmente en la industria manufacturera. Hoy en día el concepto de planificación puede ser aplicado en ámbitos más generales y diversos. El objetivo es situar al lector en la evolución de las técnicas y pensamientos de cada periodo para luego poder comprender la evolución propia del sector de transporte público. El trabajo de los autores Gupta, Dadura y Wren ha posibilitado el desarrollo de esta sección, siendo sus trabajos la fuente de información para la misma.(1)(2)

PARADIGMAS REINANTES

No existe evidencia previa al comienzo del siglo XX que muestren, de forma fehaciente, un reconocimiento explícito o una definición del problema de planeamiento. Por este motivo, el horizonte temporal a estudiar será lo sucedido en el último siglo. Se ha decidido dividir al siglo en tres grandes etapas las cuales han sido asignadas nombres de fantasía que intentan, en breves palabras, describir los sucesos más relevantes del periodo. Cada paradigma, al igual que las etapas, ha sido nombrado intentando obtener el concepto más importante y central del mismo.

DEFINICIÓN DE LA OPTIMIZACIÓN (1900-1950)

LA FILOSOFÍA DE LA FUERZA (1900-1940)

Bajo este paradigma no existía ningún tipo de análisis científico de los problemas lo cual no implica que el problema no existía. Era el consenso popular que este tipo de problemas debía ser resuelto a través del principio de la fuerza bruta. El “capataz” ejercía su mejor juicio y los trabajadores seguían estrictamente sus órdenes. Esto generaba “sistemas” de decisión dependientes de la organización y el liderazgo en vez de la optimización. La falta de un proceso explícito sumado a la unilateralidad en la

toma de decisiones resultó en procesos de planificación carentes de optimización y con resultados rara vez positivos.

PROBLEMA DEL SUPERVISOR (1940-1950)

Promediando el fin de la Segunda Guerra Mundial, George Dantzig desarrolló el método simplex² para la resolución de problemas de programación lineal. Los efectos de este desarrollo afectaron drásticamente la percepción y el tratamiento en la resolución de problemas de planeamiento. Ya no era necesario el uso de la intuición de los “jefes” para determinar el planeamiento sino que ahora era posible implementar complejos modelos matemáticos para resolver dicho problema.

Si bien el desarrollo del método simplex tuvo efectos inmensurables en el área del planeamiento, el mismo no atacó de forma directa el problema de la planificación. Este paradigma planteaba la siguiente línea de pensamiento:

“Si se puede determinar, de forma matemática, el qué y cuánto a producir, los responsables de cada tarea podrían planificar el cuándo de los mismos” (scheduling³ de los productos a generar).

Apoyándose en las habilidades y experiencia de los supervisores de la línea de producción a la hora de generar los planes de producción, esta filosofía trajo las decisiones de planificación un escalón más cerca de la producción en sí. Ya no se dependía de la discreción de los “jefes” sino que era ahora la intuición de los “supervisores” la que generaba los esquemas de planificación.

¡COMIENZA LA PLANIFICACIÓN! (1950-1990)

DIVIDE Y CONQUISTARÁS (1950-1970)

Teniendo un método para optimizar el qué y el cuánto, todos los “ojos” se posaron sobre el problema del cómo y el cuándo. Desde la perspectiva de la planificación, esta etapa marcó el primer intento de optimización y enfoque al problema.

Johnson⁴, en 1954, formuló y resolvió el primer sistema de secuenciamiento que dio comienzo a este importante paradigma. La idea central del mismo se puede pensar como:

² Para más detalles sobre este método se recomienda (19)

³ Término en inglés que significa secuenciamiento de tareas. A veces es utilizado para describir problemas de planificación entendiéndose que la misma tiene como objetivo el secuenciamiento antes mencionado.

“Si no es posible resolver el problema en su totalidad, divídelo en partes suficientemente pequeñas para poder, de forma eficiente, resolverlas”.

Las suposiciones y limitaciones que fueron necesarias para poder dividir y resolver el problema de secuenciamiento obligaron a que los mismos fuesen alienados totalmente de la realidad. Las simplificaciones eran tan drásticas que los problemas tenían poco que ver con lo que realmente era necesario resolver. Esto desembocó en que, en la mayoría de los casos, los trabajos en esta área tomaran carácter académico debido a su alto nivel de idealización.

Pese a todo esto durante la década de los 60, y bajo este paradigma, se generaron varios algoritmos de resolución. Algunos lograron sobrepasar varias de las hipótesis planteadas originalmente, y así se aproximaron un poco más a la realidad analizada.

Cabe destacar que la mayoría de la literatura referida a la planificación y el secuenciamiento de la producción comienza con los desarrollos planteados bajo este paradigma demostrando así la importancia que tuvo esta década en los futuros desarrollos.

M&M (MUY COMPLEJO Y MUY CARO) (1970-1980)

Todo hasta este momento hacía indicar que el progreso en el área de secuenciamiento avanzaría sobre los principios de “dividir y conquistar”. Sin embargo, en 1971, las demostraciones de Karp con respecto a los problemas tipo NP completos⁵ y la inclusión de los problemas de secuenciamiento bajo esta categoría trajeron un inesperado contratiempo. El secuenciamiento fue catalogado como problema intratable y de bajo interés académico. El efecto generado es el explicado por el título de este paradigma, estos problemas de secuenciamiento pasaron a ser demasiado complejos y demasiado caros como para ser abordados y resueltos (incluso con todas las simplificaciones realizadas en la década anterior).

POR LO MENOS... (1980-1990)

Si bien el paradigma anterior puso en tela de juicio la "optimizabilidad" de los problemas de secuenciamiento, también generó un cambio de enfoque al tratamiento de los mismos. La investigación en soluciones ahora se centró en el desarrollo de métodos heurísticos de búsquedas de soluciones aproximadas y se comenzaron a buscar

⁴ Se recomienda al lector (18) para profundizar acerca del funcionamiento de este algoritmo.

⁵ Una de las características destacadas de un problema NP completo es que presenta tiempos de ejecución no polinómicos, es decir, a pequeños incrementos en la complejidad del input corresponderán desmesurados incrementos en los tiempos necesarios para su resolución. Lectores que deseen ampliar el estudio de este tipo de problemas y deseen una definición más formal de este concepto deberán referirse a (17)

situaciones particulares, con tiempos de proceso computacional polinómicos, para poder resolverlos. El paradigma de la década de los 80 se convirtió en:

“cualquier mejora en la búsqueda es mejor que ninguna mejora en la búsqueda”

Tras una década de incentivos negativos hacia el estudio de secuenciamiento, este nuevo enfoque generó una nueva aceptación dentro de los círculos industriales (donde el problema de la planificación había cobrado una gran importancia).

ERA INFORMÁTICA (1990-PRESENTE)

LA UNIÓN HACE A LA FUERZA HASTA QUE LLEGA EL JUSTO A TIEMPO (1990-2000)

Las tendencias de gerenciamiento que se han desarrollado a través de los 90's y que continúan siendo el método por excelencia en la toma de decisiones plantean que, dotando al decisor (gerencia) de la mayor cantidad de información referente a un problema, él mismo tomará una decisión óptima o muy cerca de ella. Bajo este razonamiento se presenta una evolución en el rol de los métodos de resolución del secuenciamiento pasando de ser competidores con el poder humano a complementarse entre sí. Por primera vez se plantea un paradigma que engloba a todos los anteriores puesto que cada uno, a su propia manera, presenta distintos aspectos de una misma situación.

El éxito de este enfoque radica en la interacción hombre-máquina. De esta fusión se logra incorporar la robustez de los métodos cuantitativos en existencia y la experiencia y habilidades de los gerentes en la evaluación de factores no modelizables por los métodos de resolución existentes.

La inclusión y popularización del sistema de producción justo a tiempo (JIT), si bien considerado un avance para la gerencia, resultó en un paso en retroceso en lo que concierne al secuenciamiento. Bajo esta nueva política se comenzó a cuestionar la necesidad de resolver los problemas de planificación a gran escala, generando cambios estructurales con el único propósito de evitar la definición y el tratamiento de cuestiones relacionadas con la planificación. Reglas de prioridad simples, polivalencia del personal y la noción de unidad de cada máquina (para así evitar tratar con secuenciamientos complicados) lograron volver obsoleto el estudio del secuenciamiento.

QUE LO HAGA LA COMPUTADORA (2000-PRESENTE)

El año 2000 no solo marcó el comienzo de un nuevo siglo, sino un nuevo paradigma en la teoría de la planificación. Los saltos cuánticos en áreas como la inteligencia artificial y la ingeniería informática han llevado a los investigadores a intentar imitar los

comportamientos de aprendizaje propios de los seres humanos. Motivados por estos avances se ha simplificado el problema de secuenciamiento conceptualmente a:

“una búsqueda en un espacio de soluciones posibles delimitado por un set de restricciones propias del sistema”.

Este espacio de soluciones puede ser recorrido utilizando heurísticas, algoritmos, programación lineal, e incluso por métodos de simulación⁶. Gracias al poder de la computación esta búsqueda, con el método que se elija, puede ser fácilmente codificada y realizada en un corto periodo de tiempo.

Si bien el avance desde el uso de la intuición de los “capataces” es notorio, existen todavía limitaciones que hacen cuestionar el paradigma actual. Se destaca la problemática concerniente al aprendizaje de los *planners* que se ven hoy en día cargando datos de entrada a una “caja negra” que procesa y devuelve un secuenciamiento optimizado sin dar ningún tipo de información al usuario. Esto representa un retroceso en la relación hombre-máquina volviendo a épocas previas a los 90's.

2.2- PLANIFICACIÓN EN EL TRANSPORTE PÚBLICO

Tomando como contexto lo explicado en la sección anterior se procede a sumergirse en la temática específica del proyecto. El lector puede, de esta forma, ir desde el enfoque global de la planificación y ver cómo cada paradigma se corresponde con las técnicas desarrolladas en el área del transporte.

Según un reporte generado por el departamento de transporte en la universidad de Texas, hacia fines de la década de los 60 casi todo el planeamiento operativo junto con la generación de cronogramas seguía siendo realizado de forma manual. Sin embargo, impulsados por un aumento de edad promedio de los *planners* y una merma en el interés hacia este sector laboral, se comenzó a investigar la posibilidad de automatizar el proceso de planificación. Estos métodos iniciales intentaban emular el comportamiento de trabajadores manuales y se basaban en el uso de heurísticas de búsqueda ya que no existían modelos de programación entera⁷ con la capacidad de resolver problemas de gran tamaño. Debido a la relación costo-performance de las computadoras disponibles y la poca eficiencia de los métodos de resolución, la introducción de la asistencia informática no fue fructífera.

⁶ Debido a la gran relevancia de este método al estudio en cuestión se ampliará la explicación en apartados futuros.

⁷ Referirse a (19) para una descripción de este método de resolución.

Uno de los resultados más relevantes de estos primeros estudios, promediando la década de los 70, fue la creación de los sistemas RUCUS⁸ y TRACS (el primero en Estados Unidos y el segundo en Inglaterra). Si bien estas heurísticas resolvían los problemas de *scheduling*, las mismas requerían de extensos estudios e investigación antes de poder ser adaptados a nuevos clientes o nuevas condiciones de trabajo de actuales clientes.

Ya para 1980 era de común entendimiento que las heurísticas solas no podrían ser utilizadas para obtener resultados óptimos tanto en el uso de los recursos como en los niveles de calidad esperada por los clientes. Esto impulsó a un cambio en el enfoque de las investigaciones en el área apuntado a la combinación de heurísticas de búsqueda y métodos de programación matemática. Los desarrollos en materia de hardware y software impulsaron la creación de computadoras más compactas y un concepto de descentralización de la computación. Los usuarios ahora podían tener la posibilidad de contar con los sistemas de computación en la comodidad de sus trabajos, esto impulsó el desarrollo del mercado de pequeñas y medianas empresas de transporte que al ver la baja en costos (de ambos hardware y software) comenzaron a re-evaluar la conveniencia de estos sistemas.(1)

Desde entonces se han desarrollado una gran variedad de métodos de resolución para los problemas de planificación de vehículos y personal.(3)Debido a las características altamente combinatorias (las cuales lo convierten en un problema del tipo NP-completo), la naturaleza dinámica y la gran aplicabilidad en las industrias el problema de planificación ha sido de gran interés para la comunidad de investigación. Esto ha llevado al desarrollo de varios métodos de resolución entre los cuales se pueden encontrar⁹:

- Heurísticas: Voraz, del escalador, reglas de despacho.
- Meta heurísticas: algoritmos genéticos, búsquedas tabú, redes neuronales, colonia de hormigas.
- Algoritmos: Algoritmo de Johnson, programación dinámica, ramificación y acotamiento.

Para el lector que desee indagar más en la evolución de las técnicas de planificación se recomiendan los trabajos de Anthony Wren (4). En este documento se recorre la vida laboral del autor el cual ha estado involucrado en el área de optimización y transportes desde los comienzos del mismo.

⁸Desarrollado en 1975 por Mitre Corporation y aplicado por Central New York Regional Transportation Authority.

⁹ Para un análisis más detallado de las diferentes técnicas de solución a los problemas de *scheduling* se recomienda (15)

2.3- UNA MIRADA AL CONTEXTO

Los países en vías de desarrollo han optado por utilizar métodos de planificación cuya complejidad oscila entre muy básica a totalmente computarizada. Cuanto más complejo es el sistema a implementar, mayor disciplina y compromiso se necesita para su correcto funcionamiento. En este apartado se presentarán algunos de estos métodos describiendo sus beneficios y limitaciones. De esta forma se agregará un nivel más de conocimiento al lector en pos de entender el entorno de la compañía a asesorar.

En la punta más básica del espectro de posibilidades encontramos a la no planificación. Los vehículos son puestos en fila en la terminal de inicio y solo se los libera para comenzar su recorrido. De esta forma los pasajeros son asignados de manera “equitativa” entre los vehículos disponibles y los choferes asignados a cada uno. Este método se encuentra asociado a situaciones en las cuales los salarios y beneficios de cada chofer estén “atados” a las cantidades de pasajeros (ingreso de dinero) que transportan. Con el tiempo han surgido varios modelos inspirados en este concepto, algunas de las posibles variantes incluyen:

- Sistemas donde el chofer tiene la posibilidad de salir vacío, si él considera que hay suficiente demanda en el recorrido para llenar el vehículo.
- Sistemas de demanda percibida donde por experiencia se sabe que llenando una cierta cantidad de asientos en la terminal se espera llenar el vehículo a lo largo del recorrido.

Si bien se logran vehículos con altos niveles de ocupación, y por ende se sabe con certeza que el operador obtendrá ganancias de cada recorrido, este sistema presenta varias limitaciones y complicaciones para los pasajeros. En franjas horarias cuando la demanda no es alta, la diferencia entre arribos (especialmente en puntos intermedios del recorrido) resulta no solo excesiva sino irregular. Esto genera que los pasajeros recurran a transporte intermedios para llegar hasta las terminales y así poder abordar los vehículos asignados a su recorrido, incrementando la congestión en las terminales.

Un sistema un poco más avanzado de planificación consiste en despachar vehículos según una frecuencia determinada. Esta frecuencia fluctúa durante el día para poder hacer frente a las horas pico pero también entre días (teniendo los fines de semana menor demanda que los días hábiles). Es importante en este tipo de sistema haber realizado un buen estudio de los tiempos ya que muy pocos vehículos en el recorrido llevarían a una gran demora entre arribo y arribo (aumentando el descontento de los pasajeros). Un exceso de vehículos terminaría en un excesivo solapamiento entre vehículos generando niveles de ocupación bajos y volviendo al sistema muy poco rentable.

Una planificación total resulta el máximo nivel de complejidad posible en estas tareas. En este sistema se definen: tiempos de partida de cada vehículo, con las frecuencias asociadas a cada franja horaria, cronogramas detallados para el personal (indicando el vehículo a utilizar, las paradas a realizar para el descanso y el posible transbordo entre vehículos necesario). Datos como tiempos de espera en terminales, solapamiento entre vehículos durante el recorrido también son necesarios ya que afectarán la coordinación y selección de cantidad de vehículos a despachar. Si bien este sistema automatizado permite la optimización de todos los aspectos de la planificación de la empresa, no resulta siempre conveniente o factible en países en desarrollo. Los costos relativamente altos de estos programas combinados con el reducido beneficio esperado de una mejor planificación resultan en una barrera importante para la adhesión a este tipo de planificación. Los bajos niveles de salarios, en comparación con países desarrollados, limitan el potencial, y también el incentivo, de lograr grandes reducciones de costo como consecuencia de una mejor utilización del capital humano. Lo mismo sucede en la planificación de vehículos, donde la gran frecuencia de trabajo de los vehículos limita los beneficios esperables de la aplicación de estas técnicas.

Siguiendo lo presentado por Iles en su trabajo “Public Transport in Developing Countries” existe una fuerza aun mayor que limita el uso de planificación asistida. Muchos de estos programas requieren de información de entrada extremadamente precisa (tiempos de corrida, matriz origen-destino de la línea, restricciones contractuales, entre otras) sin los cuales no es posible generar planes de trabajo óptimos (o suficientemente óptimos para justificar la inversión en los mismos). Conseguir esta información, como cualquier persona de un país latinoamericano podrá atestiguar, generalmente no resulta viable. (5)

Como se desarrollará en secciones futuras, la compañía a asesorar presenta grandes similitudes con el segundo método de planificación. Existe, sin embargo, un deseo de automatizar la planificación de forma integral. Esto la pondría en una sección intermedia entre el planeamiento totalmente asistido y la situación actual, brindando suficiente flexibilidad y herramientas para que, en caso de imprevistos propios del sistema, sea necesario un “ajuste” manual.

2.4- ANÁLISIS TÉCNICA EN DETALLE

Teniendo en cuenta la situación histórica, las limitaciones propias del contexto en el cual se encuentra situada la compañía a asesorar, se procede a introducir al lector en la técnica de optimización seleccionada para este proyecto. Al finalizar esta sección se espera lograr que el lector comprenda el razonamiento detrás de la selección de esta técnica junto con las limitaciones y consideraciones a tener en cuenta en la elaboración del modelo.

Todos los métodos de resolución “tradicionales”¹⁰, sean de carácter analítico, heurístico o meta heurístico encuentran grandes complicaciones cuando se las aplica a casos de la vida real. Esto resulta de la conjunción de dos características básicas:

- Requieren modelos de simplificación teórica para poder funcionar.
- Actúan como sistemas centralizados (en el sentido que todos los cálculos y tareas son realizados por una unidad central de procesamiento).

Como se verá en el apartado que sigue, la simulación presenta una alternativa innovadora para encarar estas limitaciones.

2.4.1 SIMULACIÓN

Cuando los prototipos o la experimentación con sistemas reales resultan extremadamente caros o simplemente no factibles (en el ámbito de los problemas sociales la experimentación no resulta viable) es necesario recurrir a otros métodos que permitan resolver o explicar problemas que ocurren en la vida real. El proceso de modelización es una de las tantas formas de atacar este tipo de problemas. De esta forma podemos “optimizar” el sistema previo a la implementación y en caso de poseer más de una alternativa seleccionarla sin la necesidad de recurrir a la comparación real de todas. Existen según lo planteado en (6) dos tipos de modelización: la analítica y la simulada. En la modelización analítica, también conocida como estática, el resultado obtenido depende funcional y exclusivamente de un set de parámetros de entrada al mismo. Este tipo de modelos suelen ser implementados utilizando planillas de cálculo. Si bien existen muchos sistemas modelizables por medio del método analítico, existe problemas que por sus condiciones dinámicas escapan el espectro de aplicación analítica o una implementación por estos medios resulta extremadamente compleja y costosa. Para este tipo de problemas la modelización por simulación resulta más apropiada. Este método utiliza reglas (ecuaciones, flujogramas, cuadros de estado, entre otros) para definir cómo el sistema que se quiere estudiar, cambiar o resultará en un estado futuro, a partir de su estado actual o presente.

Se puede entonces definir a la simulación como:

“el proceso de ejecución que ocurre en un modelo a través de cambios de estado (continuos o discretos) en un periodo de tiempo establecido”(6)

PARADIGMAS

Este método de resolución de problemas ha sido explorado por diferentes comunidades de investigación y ha dado a lugar a tres grandes enfoques o paradigmas. Es el objetivo

¹⁰ Remitirse a pg. 10

de este apartado introducir al lector en cada uno y así justificar la selección de paradigmas que será utilizada como herramienta central en el desarrollo de este trabajo.

DINÁMICA DE SISTEMAS

Desarrollada en la década del 1950 por el ingeniero Jay W. Forrester la dinámica de sistemas ve sus comienzos en la escuela de negocios de MIT. Una de sus primeras aplicaciones exitosas fue la investigación de las oscilaciones en las ventas de una compañía de Estados Unidos. En 1969 se publica *Urban Dynamics* en el cual se ejemplifica cómo el estudio por medio de herramientas de la dinámica de sistemas es aplicable a sistemas de ciudades. En 1970 y por medio de la publicación de “*World Dynamics*” esta rama de la simulación adquiere reconocimiento a nivel mundial popularizando así este enfoque de estudio.

Forrester define a la dinámica de sistemas como:

“El estudio de las cadenas y lazos de retroalimentación en las actividades industriales para demostrar cómo las estructuras organizacionales, la amplificación (en las políticas tomadas) las demoras temporales (tanto en decisiones como en las acciones a tomar) y sus interacciones afectan el éxito de la compañía”.(7)(8)

En otras palabras, esta ciencia intenta entender al sistema como un todo y estudiar los efectos de la retroalimentación entre partes del mismo.

Para representar los procesos de la realidad la dinámica de sistemas se basa en la utilización de diagramas de depósitos, flujos (más conocidos por sus designaciones en inglés *stocks* y *flows*) y la información que determina los valores de estos flujos (he aquí la importancia de la retroalimentación para esta rama de la simulación). Es por estas características que el tipo de problema para el cual la dinámica de sistemas resulta más apropiada presenta un alto nivel de abstracción, con una menor atención a los detalles (en comparación con los otros enfoques). Se relacionan a problemáticas de niveles estratégicos que buscan enfoques de carácter “macro” sobre los sistemas en análisis.

SIMULACIÓN DISCRETA

Originada por Geoffrey Gordon en la década de los 60 la simulación discreta parte de la premisa de que los procesos pueden ser reducidos a diagramas de flujo de sus elementos (llamados entidades). Estas entidades resultan objetos pasivos (que representa personas, recursos, tareas, mensajes, etc.) que “viajan” a través de flujogramas experimentando procesos como: demoras, colas, generación, salidas. Cada uno de estos viajes es generado por un “evento” (puede pensarse como un disparador) que ocurre de forma discreta. De esta forma es posible discretizar los procesos en estudio. Es a causa de esta característica que los problemas generalmente resueltos mediante esta técnica presentan

características opuestas a la dinámica de sistemas. Aquí se intenta resolver problemas de una menor abstracción, con mayor atención a los detalles como los que se encuentran en niveles operativos o tácticos de las empresas. Estas simulaciones se encargan generalmente de representar sistemas humanos o autómatas que deben ejecutarse en forma sincronizada, generando análisis estadísticos.(6)

SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES

En un enfoque por agentes un sistema está compuesto de agentes y la relación que existe entre ellos. Un agente puede ser definido como una entidad capaz de realizar decisiones de forma autónoma. Este enfoque da mucha importancia a las propiedades de cada agente, propiedades con las cuales los agentes toman decisiones y siguen diferentes reglas. La interacción de estas celdas autónomas es la base de los estudios de la simulación por agentes. De esta forma es posible exhibir complejos comportamientos emergentes que escapan las limitaciones de los modelos tradicionalmente dependientes de ecuaciones matemáticas.

El cuadro¹¹ que se presenta a continuación resume los usos de cada uno de los paradigmas (también permite ver la gran versatilidad y flexibilidad que posee la simulación basada en agentes).

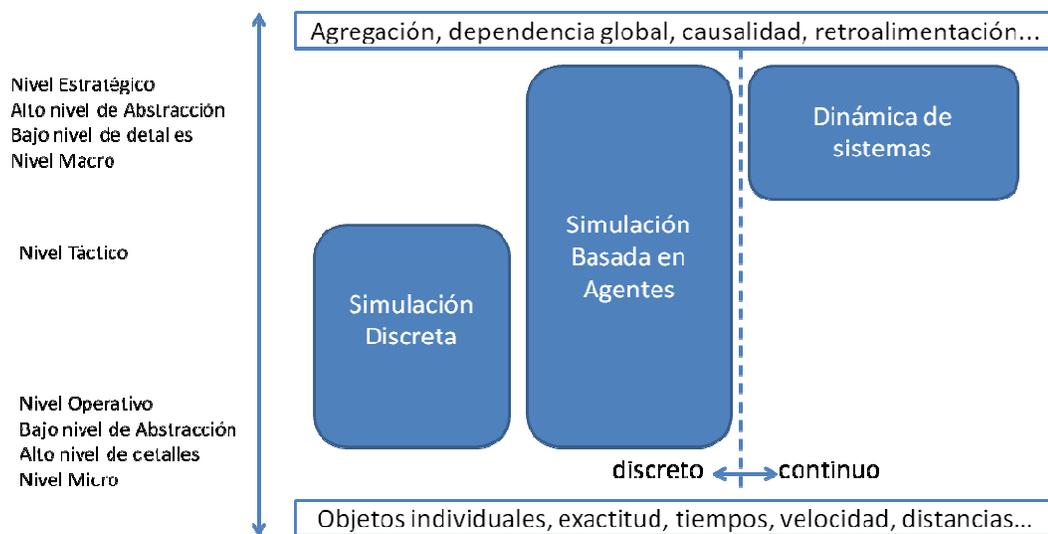


Figura 2-Paradigmas de la simulación y su área de aplicación

Debido a la importancia dada en este trabajo a este tipo de enfoque (el basado en agentes) se ha decidido ahondaren la explicación de este tipo de simulación.

¹¹Adaptado de (6)

SIMULACIÓN POR AGENTES

ENFOQUE

Como se introdujo anteriormente la simulación basada en agentes se centra en el concepto de generar sistemas a partir de la simulación e interacción de sus elementos más básicos, los agentes. Mucho se ha escrito acerca de este paradigma por lo cual se ha decidido tomar las palabras de Luis R. Izquierdo para exponer algunos de los puntos que hacen a la simulación basada en agentes un enfoque muy interesante para la resolución de problemas de la vida real.

Mediante la simulación basada en agentes, el modelador reconoce explícitamente que los sistemas complejos, y en particular los sociales, son producto de comportamientos individuales y de sus interacciones.

[...]

Lo que distingue a la simulación basada en agentes de otras técnicas de modelado es la forma en que se construye la primera abstracción del sistema real y, consecuentemente, el modelo formal. En los modelos formales construidos mediante simulación basada en agentes, los componentes básicos del sistema real están explícita e individualmente representados en el modelo. De esta forma, [...] las fronteras que definen a los componentes básicos del sistema real se corresponden con las fronteras que definen a los agentes del modelo, y las interacciones que tienen lugar entre los componentes básicos del sistema real se corresponden con las interacciones que tienen lugar entre los agentes del modelo. Esta correspondencia directa contrasta con el tradicional uso de 'agentes representativos' y es capaz de aumentar el realismo y el rigor científico de los modelos formales así construidos.

[...]

Los métodos basados en agentes facilitan el estudio y modelado de sistemas complejos a partir de las unidades que los componen, permitiéndonos construir modelos experimentales de la realidad desde un punto de vista diferente al tradicional: desde lo más simple hacia lo más complejo.

[...]

Puesto que el énfasis en la simulación basada en agentes está en encontrar abstracciones apropiadas que describan los componentes básicos del sistema y sus interacciones (en vez de buscar abstracciones que versen directamente sobre la dinámica global del sistema), esta

técnica de modelado es particularmente útil para modelar procesos emergentes de forma natural(9)

En conclusión, la simulación basada en agentes presenta un enfoque más flexible, eficiente y adaptable a las situaciones que se presentan en el mundo real que el resto de los métodos de resolución más “tradicionales”.

ELEMENTOS

La simulación basada en agente presenta tres grandes elementos. Los agentes, el ambiente en el cual estos interactúan, y la interacción misma (tanto entre agentes como con el entorno). Dado que los últimos dos elementos que se presentan son auto explicativos, y sumado al carácter central de los agentes en este enfoque, se hará una mención especial acerca de ellos. Se tratará así que el lector comprenda el potencial y los límites que presentan para el proyecto esta metodología.

Debemos comenzar por advertir que no existe una definición universalmente aceptada para un agente. Hasta el día de hoy existen debates acerca de las características que definen a un agente y que los separan del resto de los objetos presentes (proactividad, reactividad, la habilidad de aprender y socializar entre sí, etc.)(10).

Hecha esta aclaración sí existen, desde un punto de vista práctico, ciertas características en las que la mayoría de los autores tienden a coincidir:

- Un agente es un individuo discreto e identificable con un conjunto de reglas, características y parámetros que definen su comportamiento. Es importante destacar la posibilidad de identificar a cada agente puesto que esto genera un sentido de discernimiento en él. Es decir, es posible saber qué forma parte de un agente, y qué no. Esto le permite detectar a otros agentes y distinguirlos según qué tipo de agente sean.
- Un agente está situado en un entorno al cual pertenece y el cual comparte con otros agentes. Es en este entorno donde existe comunicación e interacción entre los agentes.
- Un agente es, como ya ha sido presentado, un individuo autónomo. Capaz de tomar decisiones y funcionar de forma independiente en el entorno que lo rodea (aunque sea en algunas situaciones que resulten de interés para el autor del modelo)
- Un agente es flexible, capaz de “aprender” de sus decisiones. Esto genera la necesidad de incluir un componente de memoria en los agentes que les permite modificar sus comportamientos basándose en lo ya realizado. (11)

BENEFICIOS

A continuación, y a modo de cierre de este estudio se procede a explicar brevemente algunas de las ventajas más importantes que este método de resolución posee por sobre no solo otros enfoques de simulación sino también por sobre métodos de resolución más tradicionales (programación lineal, heurísticas de construcción, etc.). Son estas ventajas las cuales generaron el interés y expectativa acerca de los posibles resultados de experimentar en el área de planificación operativa en el transporte público.

DESCRIPCIÓN DE FENÓMENOS EMERGENTES

Como se explicó los fenómenos emergentes surgen de la interacción de individuos. De esta forma nunca pueden ser atribuidos o reducidos a una u otra parte de los sistemas. De igual forma estos fenómenos pueden ser contra intuitivos o poseer propiedades que no resultan para nada relacionadas con las propiedades que se infieren del sistema. Esta característica hace que el fenómeno de la emergencia sea extremadamente difícil de entender, predecir y generar. El método *bottom-up*¹² que plantea la simulación por agentes permite sin problemas capturar este fenómeno. Al modelar y simular los comportamientos de los individuos y sus interacciones, la emergencia aparece en la ejecución de la simulación misma y no en el diseño del modelo.

FLEXIBILIDAD, DINAMISMO Y SIMPLEZA

Resulta relativamente sencillo incorporar nuevos agentes, atributos o comportamientos al sistema sin destruir o perder el conocimiento incorporado al modelo anteriormente. Gracias a esta flexibilidad es posible capturar estructuras de gran complejidad y alto nivel de dinamismo y construir modelos cuando no se posee información acerca de las interdependencias a nivel global en el sistema.

Los modelos suelen ser más fáciles de mantener y adaptar (en comparación con modelos bajo los otros paradigmas). Esto se debe a que al generarse el modelo a partir del estudio de agentes los cambios a realizar suelen ser a nivel local.

REALISMO EN LA CARACTERIZACIÓN DE LOS ACTORES

En cuanto a sus principios, la simulación basada en agentes es una representación bastante fiel de la realidad. Al fin y al cabo el mundo está compuesto de entidades que interactúan entre sí en un entorno definido, bajo reglas definidas. Esto lleva a que podemos explorar y evaluar escenarios en los modelos y aplicarlos en la realidad.

¹² Término que se utiliza para describir el fenómeno de generar comportamientos globales a partir de la simulación de los componentes más básicos del sistema. Modelar lo básico para explicar lo complejo.

Modelos tradicionales generalmente nos obligan a homogeneizar a los actores para permitir obtener resultados matemáticos. Bajo el enfoque por agentes la diversidad presente en los agentes nos da un alto nivel de heterogeneidad. Es este alto nivel el cual genera e impulsa los comportamientos y patrones emergentes que aparecen bajo este paradigma y que resultan tan interesantes y poderosos.

Una de las mayores flexibilidades que presenta este tipo de modelo es la capacidad de incorporar comunicación entre agentes. Estos pueden de cierta forma “hablar entre sí”, imitar a otros agentes o compartir información entre sí. Este nivel de sutileza generalmente cae fuera del alcance de modelos tradicionales (con base matemática) debido a que las redes sociales convierten rápidamente sistemas de ecuaciones tan complejas que resultan irresolubles.

No existe la necesidad de imponer como condición agentes totalmente racionales. La falta de información o limitada habilidad de procesarla pueden ser fácilmente incluidos al sistema. Esto también nos permite incorporar fenómenos como hábitos y presión social.

2.5- CONCLUSIONES ESTADO DE LA CUESTIÓN

En esta sección se hizo una breve reseña de aspectos que resultarán claves para el desarrollo del resto del trabajo. Se trató de emular las etapas y temas de investigación por los cuales el autor pasó a modo de generar una solución satisfactoria a la problemática en cuestión.

En una primera parte se estudió la evolución de los paradigmas reinantes en el ámbito de la planificación. Aquí se pudo apreciar la evolución del pensamiento global en la materia, al igual que las dificultades a las cuales en cada etapa se enfrentó. A medida que la habilidad para manejar mayores niveles de complejidad aumentó, los paradigmas, en general, se expandieron para progresar en dicha dirección. Esto no necesariamente resultó en mejores soluciones, ya que la inclusión de mayor complejidad resultó contraproducente en la aplicabilidad de las mismas a los problemas de planeamiento. La formulación de los problemas tanto como el enfoque de sus soluciones se alejó de las soluciones del mundo real a tal punto que los ejecutivos encargados del planeamiento decidieron “convivir” con los problemas de planeamiento antes que utilizar técnicas que no lograban resolver los problemas satisfactoriamente (según sus puntos de vista y necesidades).

Tras esta etapa global se decidió indagar más en el área de la planificación asociada al transporte público. Se pudo apreciar más en detalle las implicaciones de los paradigmas de pensamiento global en su aplicación. Se vio también que los comienzos de la planificación asistida datan desde los años 60, pero que los grandes progresos en la

materia se han dado recién a partir de los 80. Esta evolución llevó a concluir que la asistencia de la computación a la resolución resulta cada vez más necesaria y en la actualidad toda la planificación resulta, de una forma u otra, asistida por la informática.

El ámbito en el cual la compañía se encuentra sumergida también fue relevado. Se comprendió que si bien a nivel mundial la aplicación de técnicas de planificación asistida estaba muy de moda en Latinoamérica esto no era necesariamente el caso. Aquí se desarrollaron algunas de las técnicas de planificación más utilizadas en países en desarrollo al igual que una explicación de las dificultades que imposibilitan el aprovechamiento máximo de la asistencia computacional en la temática.

Teniendo en claro el aspecto histórico y regional se puso ojo en las técnicas que hoy en día se aplican en la materia. Se enumeraron algunas y se procedió a explicar la que por sus aptitudes y beneficios resultó la de mayor interés y aplicabilidad al proyecto, la simulación. Esto llevo a realizar una análisis en profundidad sobre la misma destacando los tres mayores paradigmas dentro de la simulación. La flexibilidad, innovación y descentralización de la técnica, entre sus muchas ventajas, resultaron suficientes para seleccionarla como la herramienta eje de esta tesis. El modelo que se desarrollará en el proyecto poseerá un enfoque multiparadigmático haciendo uso tanto de la simulación discreta como la basada en agentes.

3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

3.1- ALCANCE DEL TRABAJO

Como todo sistema complejo, el universo que engloba una compañía de transporte público obliga a realizar un delineamiento del alcance del proyecto. En el caso de estudio se ha decidido incluir a las siguientes actividades y procesos de la planificación operativa:

1. Asignación de días libres (francos) del personal: Junto con la asignación de turnos de trabajo un chofer debe poseer la asignación de días libres. Estos días libres siguen una serie de restricciones y condiciones que obligan a un estudio en detalle del mismo.
2. Asignación de tareas de mantenimiento: Un vehículo con un incorrecto mantenimiento no solo representa una seria ofensa legal, sino también un riesgo para la compañía (de romperse obliga a re planificar todos los cronogramas de la flota). Es por esto que la asignación de mantenimiento toma un carácter prioritario en el estudio de la planificación operativa

Estas dos grandes áreas deben ser definidas de tal forma de cumplir con las condiciones y restricciones específicas a cada una. A su vez se deberá tener en cuenta la interacción entre ellas y los objetivos globales de la compañía.

3.2- SITUACIÓN ACTUAL

En esta etapa resulta apropiado introducir al lector en la situación actual de la compañía en cuanto a la planificación operativa. De esta forma se espera que las justificaciones y decisiones tomadas en el desarrollo del modelo resulten intuitivas y de fácil seguimiento.

El proceso de diagramación tiene como primera etapa la generación de turnos y horarios de trabajo. Aquí se toman variables como tiempo de marcha, frecuencia a respetar, horarios de comienzo y fin de tareas, cantidad de vehículos y personal disponible. También se evalúa lo que la competencia ha hecho en el pasado. Esto responde, al hecho de que cada línea posee “rivales” directos de la competencia y si estos rivales proponen una frecuencia menor a la “nuestra” la cantidad de pasajeros a transportar disminuiría drásticamente. Si bien esto es algo que preocupa, a través de los años se han generado frecuencias aceptadas que son las que en general todas las compañías siguen. El trabajo a realizar en esta etapa presenta una gran variabilidad en tiempos de ejecución. Variables como características de la línea y ramal, cantidad de servicios a abastecer, limitaciones de personal o capacidad, entre otras, hacen que la diagramación de horarios tenga un estimado de trabajo que va desde algunas horas para las líneas

menos complejas hasta semanas para las líneas más intrincadas. Como resultado de esta primera etapa se obtienen diagramas de trabajo que especifican hora de salida y turnos a cumplir para cada línea.

Esta información es enviada a otro sector que se encarga de la asignación propiamente dicha de vehículos y personal. En esta tarea es donde se poseen indicadores generados para cada vehículo que ayudan a los planificadores a elegir qué vehículo será asignado a cada “slot” de trabajo. Tomando los diagramas de la etapa anterior junto con los datos específicos de cada vehículo y su respectiva dupla de choferes se genera un diagrama base con las asignaciones mensuales. Estos diagramas no solo presentan las restricciones establecidas por la etapa anterior (frecuencias de trabajo esperado y horario de salida) sino que cuentan también con las restricciones de los choferes (tiempo de trabajo máximo, descansos obligatorios¹³) lo cual agrega una nueva dimensión de complejidad. Debido al dinamismo del área de trabajo y los inevitables sucesos inesperados estos diagramas son verificados constantemente para asegurar que se esté respetando lo acordado en materia de horarios. La variable que mayor influencia presenta aquí es el tiempo de marcha. Este parámetro representa el tiempo total que tarda un vehículo en realizar el trayecto de ida y vuelta. Es una medida de cuándo estará ese vehículo disponible para ser asignado nuevamente. El resultado final de esta etapa es un diagrama detallado de las órdenes de trabajo a realizar y los vehículos y personal asignados. El método utilizado, como ha sido señalado, presenta una gran influencia del *planner* trabajando en ese momento, lo cual es un punto a tener en cuenta a la hora de rediseñarlo.

Como se ha mencionado al comenzar esta sección el análisis de esta tesis se centra en el estudio de tareas de mantenimiento y asignación de días libres. Las etapas anteriores atienden al módulo de diagramación de vehículos y personal. En este apartado se espera explicar el método actual de asignación de días libres (también conocidos como “francos”). En la actualidad esta asignación es la que presenta el mayor nivel de automatización de toda la planificación operativa. Mediante un software se cargan los datos de cada chofer junto con las restricciones necesarias y las necesidades de personal según cada día (dato que se obtiene de las etapas anteriores). El programa devuelve una planilla con una posible asignación que cumpla con la mayor cantidad de restricciones posibles. Esta asignación base es luego “pulida” y arreglada por el *planner* a cargo que tratará de lograr los siguientes objetivos:

1. Adaptar las preferencias de cada chofer acerca de qué días prefiere tener libre. Esto obliga a una personalización del diagrama para cada chofer en cada línea.

¹³ En el desarrollo del modelo de asignación de días libres se hará una mención más detallada de estas restricciones.

Existen además condiciones “gremiales” que pueden agregar restricciones en cuanto a los cronogramas asignados.

2. Nivelar la cantidad de francos asignados por día. Esto responde a:
 - a. Tener un margen de gente disponible al momento de asignar vacaciones y evitar que por una asignación dispareja se tengan que tomar vacaciones demasiados operarios simultáneamente.
 - b. Contrarrestar el porcentaje de ausencia por una asignación “tentativa”. Este fenómeno ocurre cuando se asignan en una misma semana los días viernes y domingo. Los choferes que se encuentran en esta situación presentan una mayor probabilidad de ausencia para obtener un “fin de semana largo”.

Si bien existen restricciones “duras” en la asignación de días libres (cantidad máxima de días de trabajo sin día libre, por ejemplo) existen también restricciones con mayor flexibilidad que dependen de las características del personal de cada línea. Un factor que debe tenerse en cuenta es que la involucración gremial de cada línea no es homogénea por lo cual existirán asignaciones que deberán re armarse para obtener el visto bueno del delegado en cuestión (es condición necesaria que el delegado apruebe los cronogramas designados). Estos factores hacen que la asignación de días libres responda a un horizonte temporal de trabajo relativamente corto y no mensual como se desearía.

El último aspecto a analizar en la planificación actual es la asignación de tareas de mantenimiento. No es casualidad que el mismo haya sido dejado para el final, sino que esto hace alusión a la prioridad que se le ha dado dentro de la planificación establecida hoy en día en la empresa. Las tareas de mantenimiento, si bien son informadas con anticipación y siguiendo un modelo de mantenimiento preventivo, no suelen ser incorporadas en las decisiones de las etapas uno y dos. Existe un sistema de asignación asistida por computadora en la cual se ingresan las características del vehículo (Km recorridos, días desde el último mantenimiento, etc.) y se obtiene una ventana de tiempo para realizar actividades de mantenimiento. Sin embargo, y debido a la falta de integración y prioridad, las tareas de mantenimiento son agendadas como consecuencia de la asignación de trabajo ya establecida. De esta forma se intenta incorporar al mantenimiento lo más rápido posible pero sin afectar a la diagramación existente. Esto hace que el mantenimiento termine siendo de carácter reactivo. Este fenómeno agrega mayores inconvenientes a la diagramación de vehículos pues resulta uno de los factores “inesperados” explicados anteriormente los cuales agregan complejidad a las tareas de la segunda etapa. La falta de integración de este módulo con el resto de la planificación es una fuente de preocupación para la empresa ya que genera situaciones de tensión entre los distintos sectores. El encargado de mantenimiento intenta seguir las recomendaciones establecidas para cada vehículo. Los *planners* de vehículos intentan

lograr las frecuencias establecidas, y el perder un vehículo para tareas de mantenimiento (generalmente un turno entero de duración) no es algo deseado.¹⁴

3.3- DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Como se puede apreciar, en la actualidad, no existe un método estandarizado y global de planificación operativa. Existen varios problemas con esta forma de planificación entre los cuales resulta importante señalar:

1. Consistencia en la generación de las órdenes de trabajo: Distintos *planners* ponderan de distinta forma las variables a evaluar y asignan sus propias prioridades a las tareas.
2. Tiempos de trabajo: Como se ha explicado los tiempos de trabajo fluctúan dependiendo de la complejidad de los diagramas y líneas a analizar. Con tiempos que oscilan entre horas hasta semanas las tareas de planificación consumen mucho capital humano y horas de trabajo.
3. Adaptabilidad a inesperados: Si bien el componente humano permite una flexibilidad para enfrentar sucesos y condiciones inesperadas, la falta de un enfoque sistémico para afrontar este fenómeno, limita la toma de decisiones al no contar con las herramientas óptimas para realizar la misma.
4. Optimización: El tratar de mantener a las distintas áreas de la planificación “contentas” no resulta una forma de optimización. El cumplimiento de restricciones y la optimización no deberían ser contradictorios sino complementarios en la resolución de problemas de planificación.
5. Estudio de Escenarios: La falta de un modelo de pruebas limita las posibilidades de generar escenarios que permitan evaluar distintas alternativas de trabajo o mejoras a implementar.
6. Cantidad de líneas asociadas a cada *planner*: La gran demanda de tiempo y recursos que conlleva el sistema actual obliga a limitar la cantidad de líneas asignadas a cada *planner*. Esto no solo genera un aumento en costos operativos sino que agrega mayor subjetividad y pérdida del efecto global en la empresa como se indicó en la etapa 1.

Una combinación de estas problemáticas fue el disparador que generó la posibilidad de desarrollar el proyecto de asesoría sobre el cual se basa esta tesis. De esta forma, y tras consensuar con la compañía en estudio se procedió a definir el siguiente objetivo del proyecto:

¹⁴ La información de esta sección fue obtenida en una entrevista con el encargado de planificación del área de diagramación de la empresa asesorada.

“Generación de una herramienta de automatización y optimización para la diagramación integral de las tareas operativas¹⁵”

Debe llamarle la atención al lector que existen dos términos en esta definición que resultan destacados por sobre el resto. Esto responde al orden de prioridades que se ha establecido para la resolución del proyecto. Si bien puede resultar apresurado priorizar algunos aspectos por sobre otros, en caso de no poder resolver todos los objetivos mencionados estos elementos señalados tendrán prioridad por sobre cualquiera de los demás.

La prioridad impuesta en la automatización tiene su explicación en los problemas mencionados anteriormente. El mayor inconveniente en estos momentos para la compañía en análisis resulta de la falta de homogeneidad y el exceso en recursos requeridos por este departamento. Queda sobre entendido además que dentro de las diferentes posibilidades de automatizar el proceso se intenta elegir la que, por sus características técnicas y adaptabilidad al problema a resolver, presente las mejores condiciones para optimizar la solución.

El otro eje central de este proyecto está en lograr una diagramación integral de las tareas. Como se presentó en este capítulo la diagramación en la actualidad posee un cierto aspecto automatizado mediante el uso de software para la asistencia de los *planners*, sin embargo cada una de las tareas a diagramar se evalúa bajo sus propias restricciones y sin tomar aspectos de otras tareas. Esta falta de integración, sumada a los objetivos a veces contrapuestos de las distintas áreas, genera conflictos de decisión y prioridad de algunas tareas por sobre otras lo que genera una merma en los resultados globales de la empresa.

¹⁵ Entendiendo por estas tareas a la asignación de días libres y planificación de tareas de mantenimiento

4 SOLUCIÓN PROPUESTA

4.1- INTRODUCCIÓN

No resultó casual la separación del problema en dos grandes áreas en la sección anterior. Tras realizar un estudio minucioso de las relaciones entre tareas, áreas y personal se pudo apreciar que cada una de estas áreas (de ahora en más referidas como módulos) presentaba una sinergia interna que no permitía una subdivisión mayor. De igual forma, los comportamientos y condiciones únicas de cada una no permitieron la integración total que en un principio había sido planteada. El compromiso por el cual se optó en el desarrollo del modelo es mantener como prioridad máxima el beneficio para el “*planner*” (persona responsable de la diagramación y planificación operativa) en criterios como tiempo de trabajo, simpleza de la solución, y consistencia en las soluciones planteadas. Además se intenta, en la medida que sea posible, introducir mecanismos de optimización que apunten a una mejora continua en los cronogramas generados.

El concepto general de la solución aquí planteada puede ser formulado como: La resolución individual de cada módulo mediante un modelo que logre satisfacer las condiciones particulares y una integración intermodular para lograr satisfacer las condiciones globales del sistema. La figura 4 muestra el proceso de trabajo del modelo.

De esta forma se lograría una optimización local (generada en cada módulo) y una aproximación iterativa a una optimización global (con la interacción intermodular).

En lo que resta del capítulo el lector encontrará el desarrollo del modelo utilizado. Se comenzará con un análisis detallado de cada solución tratando de esta forma de llevarlo a comprender cada uno de los módulos y el modelo desarrollado. Cada módulo estará acompañado de aspectos teóricos, restricciones y objetivos que ayudarán a respaldar la solución generada. Tras esto se procederá a explicar la interacción entre los modelos así como las modificaciones que debieron realizarse a cada uno para lograr generar una solución integral. Mediante este estilo de desarrollo se podrá apreciar la solución base a cada módulo y tras poseer los fundamentos de ellas el comportamiento integral de la solución planteada, así como las dificultades a la hora de su implementación.



Figura 3-Estructura de trabajo del modelo

4.2-MÓDULO I: PLANIFICACIÓN DE TAREAS DE MANTENIMIENTO

4.2.1 INTRODUCCIÓN

El mantenimiento de vehículos, en especial en una compañía de transporte, resulta una tarea de suma importancia. No solo por el aspecto legal de las condiciones de uso de los vehículos sino también porque el incorrecto mantenimiento de cualquier recurso y/o bien de uso reduce drásticamente su vida útil. Este problema presenta un comportamiento dinámico que se debe a la interacción de uno o más de los siguientes eventos:

- La rotura inesperada de vehículos: El carácter imprevisible de estos eventos fuerza a una re planificación de las tareas de mantenimiento. Esta necesidad resulta un gran condicionante a las técnicas aplicadas normalmente para la planificación puesto que las mismas se basan en premisas de conocimiento total de información a la hora de la planificación.
- Cambios en las asignaciones y planes de trabajo de los vehículos: Cada línea cuenta con una flota determinada de vehículos, sin embargo es posible que existan cambios en las unidades a realizar viajes específicos dentro del día. Esto genera un cambio en las cantidades de horas de trabajo de los vehículos lo cual afecta directamente la necesidad de mantenimiento de los mismos¹⁶.
- Cambios en las capacidades y disponibilidad de los talleres: Si bien las mayores limitaciones y eventos que generan el carácter dinámico de este problema yacen en los vehículos, los talleres también presentan variabilidades que generan comportamientos dinámicos. La falta de personal (por enfermedad por ejemplo) o materiales (por errores de los proveedores o pérdidas internas del taller) de manera inesperada puede ser un factor que obligue a la re planificación de las tareas de mantenimiento.

4.2.2 CONSIDERACIONES INICIALES

Corrientes de pensamiento gerencial han puesto ojos críticos a la necesidad de implementar políticas preventivas en lo referido al mantenimiento. De esta forma se logran minimizar paradas inesperadas en el trabajo de máquinas, y la urgencia en la necesidad de realizar tareas de mantenimiento, puesto que sin las mismas la “línea de producción” (sin importar la industria) se encuentra parada y la compañía incurre en inmensurables costos.

¹⁶ Como se verá más adelante en esta sección, la cantidad de kms. recorridos es uno de los controles que mide la necesidad de realizarle mantenimiento a un vehículo.

No resulta extraño entonces que la compañía en estudio en este proyecto presente sistemas de control y detección de necesidad de mantenimiento para sus recursos críticos, los vehículos. El sistema de alarmas del mantenimiento planteado presenta tres colores que indican la urgencia o uso del vehículo: verde, amarillo y rojo.

Los colores, análogamente a un semáforo de tránsito, representan la urgencia o necesidad de mantenimiento de cada unidad. Siendo verde una condición óptima para la utilización de la unidad, amarillo indicando una necesidad de ser planificada una “entrada” al taller pero no de carácter urgente, y rojo indicando la máxima urgencia en cuanto a necesidad de mantenimiento preventivo¹⁷. Cuando un vehículo se encuentra en una cabecera, se verifica que su semáforo interno esté en verde o amarillo y se procede a incorporarlo a la flota de vehículos aptos para ser utilizados.

Existen dos condiciones que definen el estado del vehículo. Estas condiciones también marcarán el tipo de mantenimiento a ordenar en caso de ser necesario:

1. Distancia recorrida.
2. Consumo de combustible.

Existen, en el caso de estudio, doce tipos diferentes de mantenimiento. Cada uno de ellos asociado a la realización de tareas que van desde cambios de filtros, hasta balanceo y trabajos de alineación. A su vez, y debido a que existen varios modelos de vehículo distintos, estas doce categorías no son necesariamente aplicables a todos los vehículos de la flota. Estas dos características sumadas a que la frecuencia con la cual deben ser realizadas fluctúa considerablemente, obligan a considerar a cada una de estas categorías de mantenimiento individualmente. La tabla 1¹⁸ da idea de las diferencias en frecuencias y consumo.

¹⁷ El carácter crítico de un mantenimiento no debe ser confundido con las tareas de mantenimiento correctivo (los cuales al ser inesperados no pueden ser planificados)

¹⁸ Los valores y nombres de los modelos y tipos de mantenimiento han sido modificados para mantener la confidencialidad de los datos.

MANTENIMIENTO (tipo)	KMS	MODELO 1 (consumo)	MODELO 2 (consumo)	MODELO 3 (consumo)	MODELO 4 (consumo)
A	5000	2780	2705	2765	3045
B	15000	8340	8115	8295	9135
C	50000	27800	27050	27650	30450
D	80000	44480	43280	44240	48720
E	100000	55600	54100	55300	60900
F	150000	83400	81150	82950	91350
G	200000	111200	108200	110600	121800
H	250000	139000	135250	138250	152250
I	300000	166800	162300	165900	182700
J	400000	222400	216400	221200	243600
K	600000	333600	324600	331800	365400
L	30000	16680	16230	16590	18270

Tabla 1-Limites críticos para cada tipo de mantenimiento

Se puede observar que los límites de kms. recorridos son universales para todos los modelos de vehículo, pero los límites de consumo no. Si bien todos los vehículos recorren la misma ruta y los mismos kms existen factores asociados a cada vehículo que generan la necesidad de realizar un mayor o menor número de tareas de mantenimiento. Algunos de estos factores incluyen: la antigüedad, tipo de caja de cambio, existencia o no de aire acondicionado, tipo de motor.

Por esto se deberán generar registros individuales de cada vehículo y sus doce mantenimientos específicos para determinar no solo cuando debe realizarse la próxima tarea de mantenimiento sino también el tipo de elementos necesarios para realizar la misma (el taller deberá recibir estos datos a fines de estar preparado para suplir el mantenimiento cuando sea asignado). El incumplimiento de cualquiera de las condiciones límites resulta en un estado crítico y consecuentemente en un semáforo rojo.

4.2.3 HIPÓTESIS DEL PROBLEMA

Como se ha discutido al comienzo de esta sección, el proyecto ha sido delimitado alrededor de la planificación de un solotaller de mantenimiento. Si, tras finalizar este proyecto, se decide que los resultados amparan el nuevo modelo se deberá re considerar las hipótesis planteadas y analizar en detalle el sistema. A través de este trabajo se utilizarán las siguientes hipótesis en lo que respecta a la planificación de tareas de mantenimiento:

1. Cada trabajo de mantenimiento es una entidad indivisible, que puede ser completada en una sola fosa.

2. Existen 3 fosas de trabajo en cada taller¹⁹. Cada uno de los talleres informará la disponibilidad de “entradas” permitidas por cada línea y banda horaria.
3. Todos los trabajos de mantenimiento, si bien asignados por condiciones diferentes, tendrán una duración idéntica. La misma será un promedio estimado que se tomará como 4 horas.
4. No existe la posibilidad de posponer trabajos. La tarea debe ser completada una vez que la misma arranca.
5. No es posible cancelar tareas ya planificadas. Una vez confirmada la tarea y asignada a una fosa y horario determinado la misma no podrá ser cancelada (sin importar la razón)²⁰
6. No se puede realizar más de un trabajo de mantenimiento en una fosa determinada en un mismo horario.
7. El taller trabajará solamente en días hábiles (de Lunes a Viernes)
8. Un vehículo no podrá encontrarse en más de una fosa simultáneamente.

4.2.4 OBJETIVOS

Debido a la complejidad del problema y la dificultad de generar un criterio único de optimización, se toman los siguientes objetivos a resolver en esta faceta del problema:

1. Minimizar la cantidad de vehículos en condición crítica de mantenimiento (semáforo rojo).
2. Minimizar la frecuencia de mantenimiento de cada vehículo.
3. Maximizar la utilización de los recursos de mantenimiento.

4.2.5 MARCO TEÓRICO

La evolución histórica expuesta en el capítulo 2 muestra que los problemas de planificación, de todas las variedades, han sido y siguen siendo tratados de muchas formas (con la utilización de programación lineal, heurísticas locales, inteligencia artificial, entre otros). En este módulo el carácter dinámico de la planificación es factor determinante a la hora de optar por un método u otro. La incorporación de ordenes no planificadas, sin incurrir en una demora excesiva en el recálculo del plan de trabajo, resulta un objetivo central del módulo. La optimización de los cronogramas de mantenimiento, desde el punto de vista de los recursos a utilizar también ha de tenerse

¹⁹Cada taller tiene asignadas ciertas líneas de colectivos. En este proyecto nos centraremos en el funcionamiento de uno que posee 4 líneas asignadas. La integración del resto de los talleres y las líneas se dejará como una línea de investigación futura.

²⁰Esta hipótesis es válida dentro del contexto de la planificación actual de las tareas de mantenimiento. En la realidad cuando existan eventos inesperados que alteren el plan armado se podrá correr el modelo nuevamente “recalculando” la planificación.

en cuenta, en especial si se espera en un futuro expandir el modelo para incorporar más líneas.

Con estos objetivos en mente se ha optado por la generación de un modelo de optimización basado en una “búsqueda voraz”. Resulta apropiado introducir al lector a este método de optimización a fines de que, durante la explicación y desarrollo del modelo, se pueda comprender y seguir de forma ordenada el funcionamiento de la solución desarrollada. Si bien solo se intenta generar una idea básica y simple sobre este método de optimización, se incorporan fuentes de información que permitirán al lector, que así lo desee, realizar un estudio más detallado de los fundamentos teóricos y matemáticos detrás de las búsquedas voraces.

Un algoritmo voraz (*greedy* en inglés) es aquel que para resolver un determinado problema, en nuestro caso de secuenciamiento, utiliza una meta heurística (regla de decisión) que elige la opción más prometedora en post del objetivo global en cada etapa. De esta forma se logra una optimización a nivel local pero no necesariamente se llega a una solución general óptima.²¹

El término voraz proviene de cómo el algoritmo evalúa a todas las opciones en cada paso, eligiendo la mejor (incluyéndola así en la solución final) y descartando todas las otras posibilidades. Esto permite una gran eficiencia en la búsqueda ya que el espacio de soluciones posibles se reduce drásticamente en cada paso, pero genera la posibilidad de no lograr un óptimo global(12). Se presenta a continuación un ejemplo simplificado para entender el funcionamiento del algoritmo.

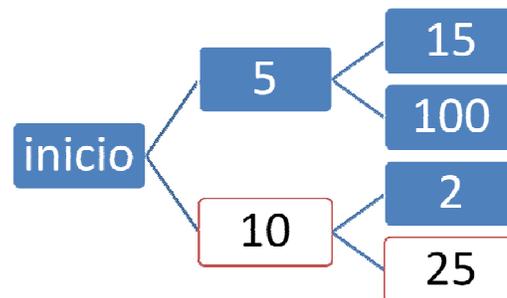


Figura 4-Ejemplo búsqueda voraz

Suponiendo que el objetivo es obtener la mayor suma posible, el algoritmo voraz seleccionaría los casilleros en rojo ya que son los que presentan la mayor esperanza de obtener el máximo resultado final. Por la configuración dada el algoritmo nunca lograría alcanzar el óptimo global, ya que el casillero “100” nunca sería seleccionado puesto que

²¹ La premisa detrás de este método de solución es “un óptimo local resulta siempre en un óptimo global”.

en un paso previo nunca se elegiría el casillero con el valor “5” Es por esto que se deberá plantear algún sistema complementario que permita: a) convertir el problema de secuenciamiento de forma tal que la búsqueda voraz pueda encontrar un óptimo o b) generar algoritmos secundarios que puedan lidiar con esta limitación y resulten en un algoritmo de optimización tanto global como local.

4.2.6 MODELO

Teniendo en claro el tipo de problema, las características expuestas y los objetivos a conseguir en este módulo, se ha decidido plantear un **modelo de planificación basado en la subasta de órdenes de mantenimiento**. Tomando lo presentado en la etapa anterior este método se refiere a una búsqueda *greedy* adaptada. El concepto original proviene de (13) y tomando dicho documento como base se procedió a la generación del modelo que se presenta a continuación.

Conceptualmente se trata de un modelo que genera subastas de órdenes de mantenimientos a realizar y cada *Fosa* realiza ofertas de cuándo es lo más temprano que puede realizar esa orden de mantenimiento. Cuando todas las ofertas han sido realizadas, los *Mediadores* eligen la mejor oferta y asignan dicha tarea al ganador. El *Receptor* se encarga de priorizar las órdenes entrantes y comenzar los procesos de subasta. Es esta priorización la que diferencia a este modelo de una búsqueda voraz tradicional. Esta modificación permite acercar el cronograma final a una optimización de carácter global intentando así reducir las limitaciones de la versión tradicional de este método. La figura 5 muestra los agentes existentes en el modelo y las interacciones explicadas

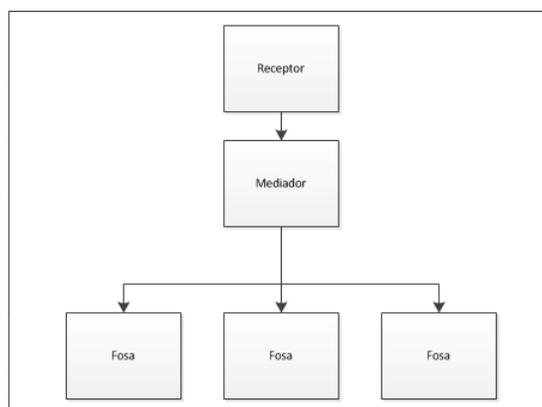


Figura 5-Agents y sus relaciones en el modelo

ETAPA DE GENERACIÓN DE SEMÁFORO INTERNO DE VEHÍCULO Y ORDEN DE MANTENIMIENTO

Si bien el modelo de asignación propiamente dicho comienza con las acciones del agente *Receptor*, existe una etapa previa en la cual se genera el estado de cada vehículo de la flota.

La primera tarea de esta etapa consiste en la importación de datos tanto concernientes a las diferentes categorías de mantenimiento y sus indicadores críticos como de datos históricos de vehículos. Dentro de estos últimos se incluyen datos de kilometraje histórico, y asignación de choferes para cada uno²².

El próximo paso es generar el semáforo interno de cada vehículo. Este semáforo, y su correspondiente hoja de datos (en la cual estarán los campos de ID de vehículo, duración, día de entrada, y criticidad de mantenimiento) serán el input del modelo de asignación de mantenimiento. El proceso para generar este semáforo se detalla a continuación.

Cada vehículo, en el modelo se encuentra asociado a un agente individual. De igual manera cada tipo de mantenimiento se asocia a un agente distinto dentro de cada vehículo. De esta forma podemos programar y trabajar individualmente con cada uno de ellos. Las figuras 6 y 7 dan muestra de esta configuración, así como la estructura interna de cada agente *Vehículo* y *Mantenimiento*.

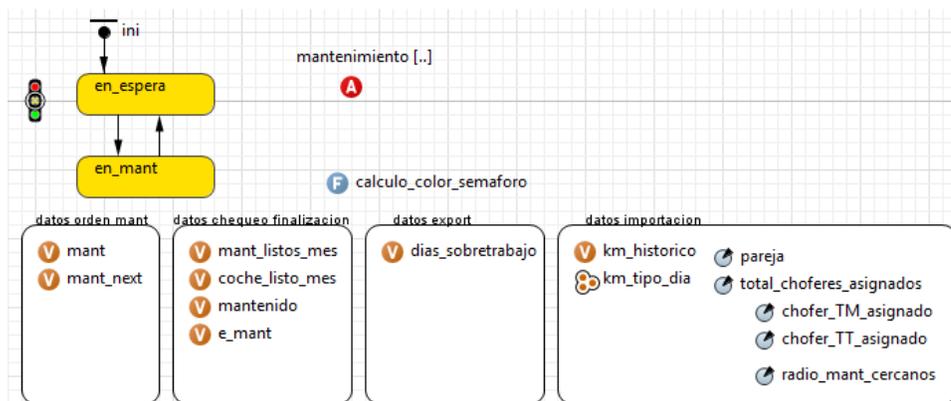


Figura 6-Estructura interna del agente Vehículo

²²Esta información noserá utilizada hasta el módulo de integración.

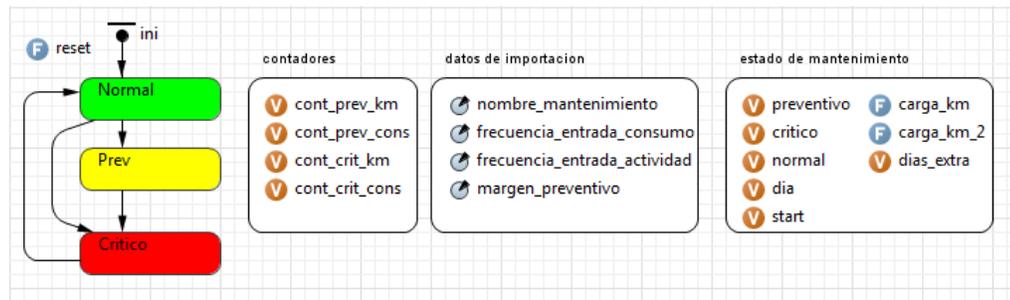


Figura 7-Estructura interna del agente Mantenimiento

Cada uno de estos agentes posee tres estados separados, cada uno indicativo de la situación que presenta ese tipo de mantenimiento. Para definir en cuál de estas categorías o estados se encuentra, utilizaremos contadores tanto de kilómetros como de consumo de gasoil. Estos contadores se van “agotando” a medida que se carga el kilometraje recorrido según cada tipo de día.²³ Al trabajar de forma independiente, cada *Mantenimiento* cargará la cantidad de días máximo antes de entrar en los estados *Prev.* o *Crítico*.

De esta forma el sistema tendrá, por cada vehículo y cada mantenimiento, una variable *día* que definirá la cantidad de días ya cargados en ese agente *Mantenimiento*. El paso siguiente es comparar cada uno de estos contadores dentro de cada vehículo para definir cuál de los tipos de mantenimiento resulta más urgente y por ende será la orden de mantenimiento a asignar en el modelo. La función *calcula_color_semaforo* es la encargada de realizar esta priorización y de cargar la orden a asignar en la variable *mant*.

Al comenzar la implementación de este módulo, el *planner*, cargará el estado inicial de cada uno de los contadores. Será en esta etapa donde, por cuestiones no planificadas o imposibilidad de entrar al taller en el periodo anterior, podrán aparecer vehículos en estado de mantenimiento crítico. En estos casos, donde la situación crítica sea definida al comienzo de la simulación, el sistema priorizará su asignación como se verá en los siguientes apartados. A partir de este momento, por el funcionamiento del módulo de carga de kms., las ordenes de mantenimiento que se generen serán siempre en un comienzo de carácter preventivo (siempre se “vaciará” el contador de preventivo antes que el de crítico²⁴).

²³ Como se explicará en el módulo de asignación de días libres existen cuatro tipos de día. Cada uno se encuentra asociado a una demanda diferente lo cual genera una necesidad de vehículos distinta. Teniendo cargados los diferentes tipos de día es posible asignarles un kilometraje diferencial.

²⁴ Se puede llegar a dar el caso donde los contadores de preventivo y crítico estén tan cerca de vaciarse que el agregar un día más de trabajo los vacíe a ambos. En estos casos también estaremos en presencia de mantenimientos críticos.

Por ejemplo, para que un vehículo entre en estado crítico el día 20 del periodo el mismo debe haber entrado en situación preventiva varios días de ante mano. El modelo detectará la entrada a mantenimiento preventivo y lo asignará como máx. hasta el día 20. Si no fuese posible esta asignación (tanto porque los días entre la entrada a preventivo y crítico fuesen fines de semana o feriados o porque los talleres ya se encuentran totalmente llenos) se agendará una tarea de mantenimiento para el día más cercano al 20.

Como se discutirá en secciones futuras las órdenes de mantenimiento crítico imponen restricciones adicionales sobre el módulo de asignación de días libres. Esto sumado a los inconvenientes (económicos y de reducción de plaza disponible para trabajar) que se generan por las tareas de mantenimiento crítico hacen que la minimización de este tipo de tareas de sean un objetivo en el desarrollo de este módulo.

Hecha esta aclaración en cuanto a las situaciones que pueden ocurrir se procede a la finalización de esta etapa del modelo. Teniendo el semáforo de cada vehículo y la orden de mantenimiento asociada se da comienzo al proceso de subasta que forma la base del módulo de asignación de órdenes de mantenimiento.

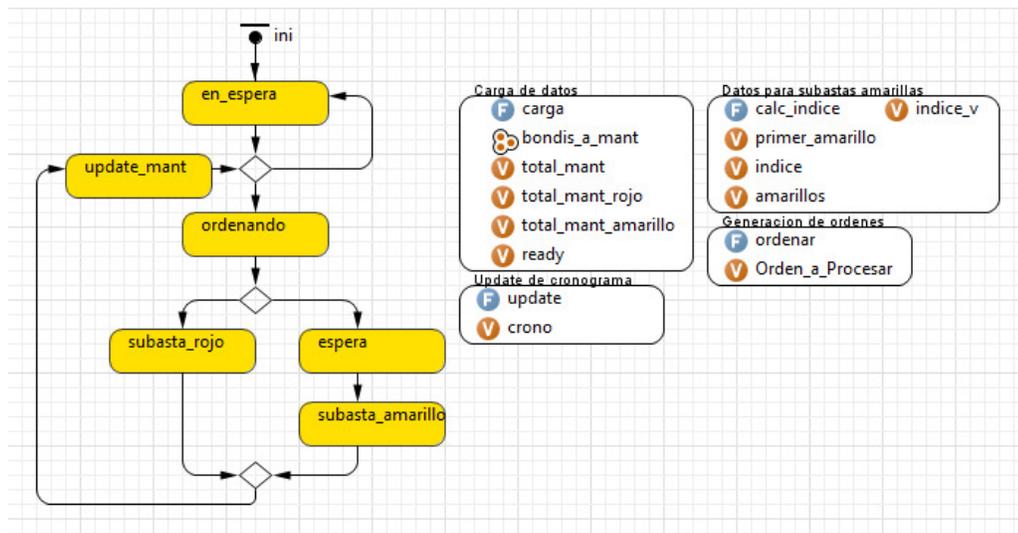
RECEPTOR

Al obtener la lista de vehículos a recibir mantenimiento se arma una orden de mantenimiento para cada vehículo. Esta orden contiene información sobre el *ID* del vehículo, duración del mantenimiento y máximo comienzo tardío que puede tener para evitar estar en semáforo rojo. Si se poseen varias órdenes, este agente se encarga de priorizarlas según su urgencia²⁵. Una vez ordenadas y definida la orden más urgente, el agente envía un mensaje con la palabra “comienzo” para asignar dicha orden al taller designado.

Este agente envía una orden a la vez y solo procederá con la próxima cuando reciba la confirmación de que la orden actual ha sido correctamente asignada y cargada en el cronograma de mantenimiento. Tras recibir la confirmación de una asignación satisfactoria este agente enviará confirmación a los agentes mantenimiento (incluidos dentro de cada vehículo) para “resetear” los contadores correspondientes a las tareas de mantenimiento realizadas.

La figura 8 muestra un esquema simplificado que ayuda a ver los estadios de decisión más importantes del agente junto con las variables y funciones que realiza y utiliza, se hará un análisis detallado en las funciones que, por su importancia en el modelo, merecen una explicación más completa.

²⁵ Se explicara más adelante el criterio de selección y priorización.

Figura 8-Estructura interna del agente Receptor²⁶

El funcionamiento del agente *Receptor* puede ser resumido en las siguientes tareas:

1. **Recibe** la orden de comenzar su planificación (marca la entrada al cuadro de estados).
2. **Carga** los semáforos de cada vehículo (generando una orden por vehículo²⁷ que se archiva en la variable de colección *bondis_a_mant*).
3. **Ordena** las órdenes según su urgencia.
4. **Genera** la orden a subastar cargándola en la variable *Orden_a_Procesar*
5. Envía confirmación de comienzo de subasta al agente *Mediador*.
6. Espera confirmación de subasta completa y orden asignada.
7. **Actualiza** el cronograma de trabajo e informa a los agentes de mantenimiento asociados a las tareas realizadas que las mismas han sido asignadas.
8. Elige la próxima orden en lista.
9. Repite hasta finalizar todas las ordenes a procesar (siendo la variable *total_mant* el contador que define cuándo se han procesado todas las órdenes²⁸)

²⁶Esta estructura corresponde al modelo final. Existen variables que no serán explicadas en este módulo pero que cobraran importancia

²⁷Tomando solo los vehículos con color de semáforo distinto de verde.

²⁸ Los contadores *total_mant_rojo* y *total_mant_amarillo* sirven para identificar bajo que rama se deberá proseguir en la subasta y también para informar al usuario la relación que existe en un momento específico entre los dos estados de mantenimiento.

De este proceso resulta interesante hacer un análisis más detallado en el ordenamiento de las tareas a realizar puesto que el mismo representa un aspecto crítico del modelo. Una priorización incorrecta puede terminar en un cronograma lejos de óptimo y una sub utilización de las capacidades de los talleres.

Para la priorización de las órdenes se elige un orden al azar y se evalúa el color de su semáforo. Esto nos da la primera segregación entre tareas de críticas y preventivas. En cada una de estas categorías se procede a evaluar la que presenta la mayor urgencia por medio de la ecuación que se muestra a continuación. De esta forma, y tras haber recorrido todas las órdenes a asignar, el modelo tendrá dos órdenes (una roja y una amarilla) que representan al vehículo que requiere de mantenimiento de forma más próxima. Cuando todas las órdenes han sido analizadas y evaluadas se elige la que posee la urgencia más alta. Se asigna en la variable *Orden_a_Procesar* y se da comienzo a la subasta de la misma.

$$urgencia = \frac{duracion\ de\ tareas}{entrada\ deseada\ a\ mantenimiento}$$

Como se puede apreciar la urgencia se evalúa comparando la duración de las tareas a desarrollar con la fecha deseada de entrada a tareas de mantenimiento²⁹. En casos de tareas críticas este momento “deseado” será el único posible. En tareas preventivas esta fecha será el comienzo más temprano que podrán tener las tareas de mantenimiento preventivo. Si bien en este modelo se ha simplificado la variable duración de las tareas asignándoles un valor uniforme a todas, el modelo se encuentra preparado para evaluar dicha variable cuando se decida no utilizar esta simplificación. De esta fórmula podemos apreciar que tareas que tengan una fecha de entrada más próxima a la actualidad (con menor número de día) tendrán una urgencia mayor.

Otra aclaración es que por el criterio de generación de la urgencia la separación entre mantenimientos críticos y preventivos no resulta necesaria. Sin embargo y por el

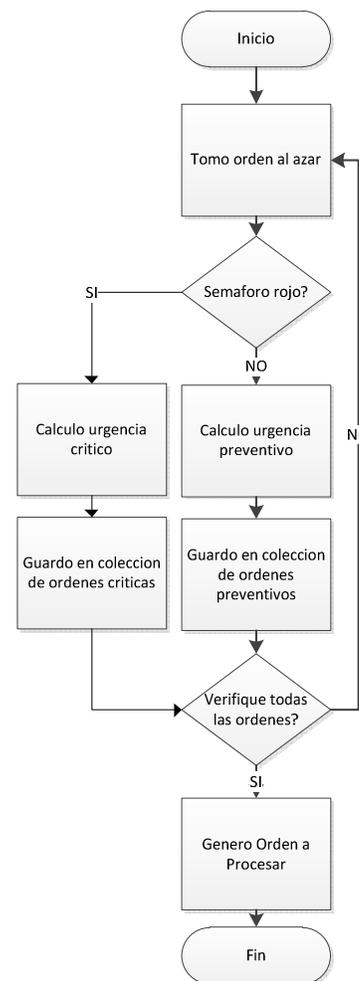


Figura 9-Esquema de generación de órdenes a procesar

²⁹ Las fechas son medidas en días.

funcionamiento del modelo (en especial el sistema de mensajes) es necesario indicar de qué tipo de mantenimiento nos referimos para saber si el mensaje a enviar al *Mediador* es de subasta roja o subasta amarilla.

MEDIADOR

El mediador es el agente responsable de comenzar el proceso de subasta entre las distintas fosas disponibles. Cuando una orden del *Receptor* se recibe, este agente transmite la orden de mantenimiento a todas las fosas existentes. Todas las “ofertas” realizadas por los agentes *Fosa* son “enviadas” al *Mediador*, el cual se encarga de evaluar y seleccionar la mejor oferta. Luego procede a informar a todas las *Fosas* los resultados enviando el mensaje “ganador” a quien haya sido adjudicada la orden de mantenimiento y “perdedor” a los demás. Su última tarea consiste en enviar un mensaje con la palabra “listo” al agente *Receptor* indicando que la subasta ha sido exitosa y que la orden actual ya ha sido asignada a una *Fosa* determinada (comenzando de vuelta el proceso y posicionando al agente *Mediador* en su estado de “espera”). La figura 10 da cuenta de este esquema de estadios.

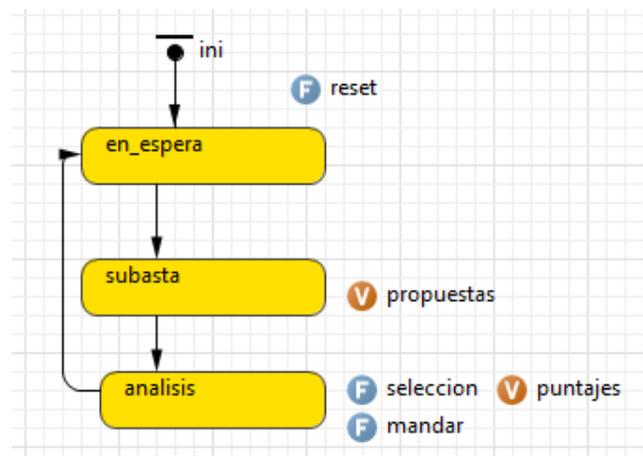


Figura 10-Estructura interna del agente Mediador³⁰

La secuencia de trabajo de este agente es:

1. **Recibe** el mensaje de mantenimiento por parte de *Receptor* para comenzar la subasta.
2. **Envía** el mensaje de subasta a todas las *Fosas* asociadas.
3. Espera a que cada *Fosa* genere una propuesta.
4. **Evalúa** y genera puntaje para cada propuesta.

³⁰ Esta estructura simplificada se utiliza en esta etapa para explicar el funcionamiento básico del agente. La complejidad que se introduce en el módulo III (pg. 54) generará un árbol de decisiones más complejo para este agente.

5. **Elige** la propuesta de mayor puntaje y **envía** el mensaje de “ganador” a la *Fosa* responsable de esa propuesta, a su vez **envía** el mensaje “perdedor” a todas las *Fosas* remanentes.
6. **Envía** el mensaje “listo” al agente *Receptor* confirmando la planificación y asignación de la orden de mantenimiento actual.
7. **Espera** la próxima orden a subastar.

El proceso de mayor relevancia al modelo, dentro de este agente, es el que sucede en la etapa de selección. Aquí es donde se revisan todas las propuestas y evalúan las mismas. Una evaluación incorrecta asignaría trabajos de mantenimiento a propuestas no óptimas lo cual desembocaría en una planificación de las tareas de mantenimiento poco eficiente e incorrecta. La figura 11 muestra el proceso de evaluación de las propuestas

El puntaje de cada propuesta se calcula mediante la fórmula:

$$Puntaje(i) = \frac{CP(i) - ETTM_{orden}}{ETTM_{orden}}$$

Siendo ETTM la entrada deseada a las tareas de mantenimiento y CP el comienzo ofertado en la *i*-ésima propuesta. Esta fórmula solo toma en consideración la cercanía de la propuesta a la entrada designada de mantenimiento (medido como un porcentaje de las cantidades críticas) asignando un mayor puntaje a las que sean más próximas a esta fecha. Si bien esto resulta una característica muy deseada (que se adjudiquen órdenes a propuestas más inmediatas) no es la única que debe ser considerada. Como primera aproximación a un modelo de planificación asistido es correcta esta simplificación pero en futuras mejoras al modelo se deberán tomar otros criterios de evaluación.

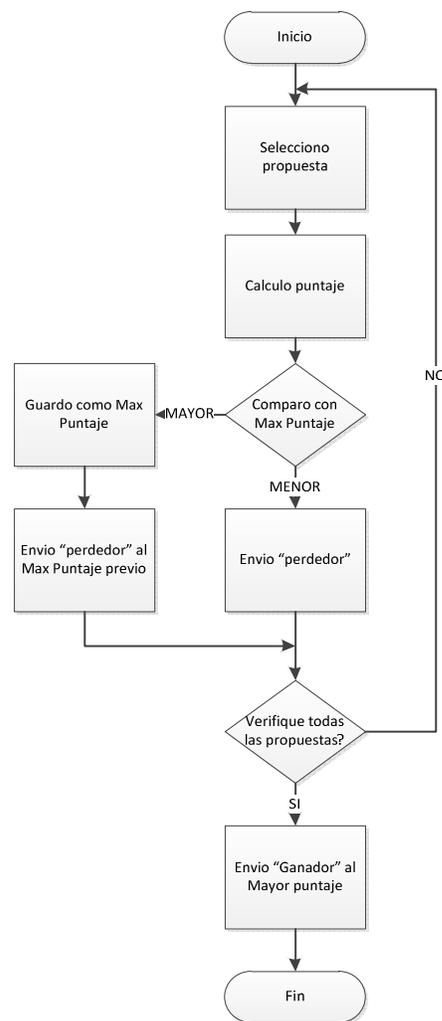


Figura 11-Esquema de selección de Propuesta

FOSA

Los agentes *Fosa* representan los verdaderos encargados del mantenimiento de los vehículos. Cuando uno de estos agentes es informado de una nueva subasta, el mismo procede a generar la mejor oferta que le resulte posible. Tomando como input los datos

incluidos en la variable *Orden_a_Procesar* (ID del vehículo, entrada deseada a tareas de mantenimiento y duración de las tareas) y su propio cronograma, cada agente *Fosa* genera su oferta intentando “ganar” la mayor cantidad de subastas. Si el *Mediador* confirma que ha sido seleccionada esta *Fosa* (mediante la recepción de un mensaje “ganador”) la fosa actualiza su cronograma para reflejar esta nueva incorporación de tareas y vuelve al estado “*en_espera*” hasta la próxima subasta. Si la oferta no ha sido seleccionada como la ganadora el agente *Fosa* recibirá una confirmación de que ha “perdido” (mediante un mensaje “perdedor”) en cual caso eliminará la propuesta generada y volverá a estar “*en espera*”.

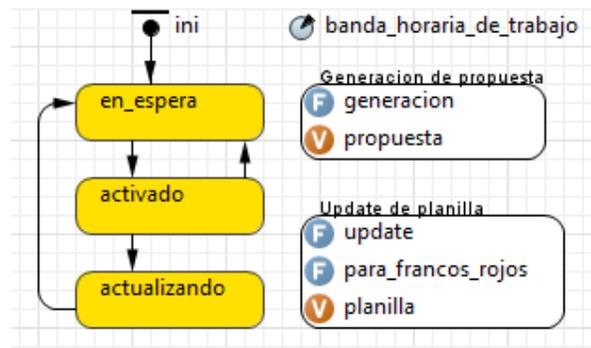


Figura 12-Estructura interna agente Fosa

Pasos a realizar por el agente Fosa:

1. **Recibe** mensaje “subasta” para indicar el comienzo del proceso
2. **Genera** la mejor oferta³¹ posible.
3. **Verifica** que la oferta cumpla las condiciones de la orden (no se trabajan los días feriado o fines de semana)
4. **Espera** confirmación de resultados
5. Si recibe ”ganador” **actualiza** su cronograma(variable planilla)
6. Si recibe “perdedor” **borra** propuesta
7. **Espera** la próxima subasta

Como se puede apreciar la etapa crítica dentro del comportamiento de este agente es la generación de las propuestas. Esta decisión es la verdadera optimización del modelo y es por esto que se le dará un estudio más

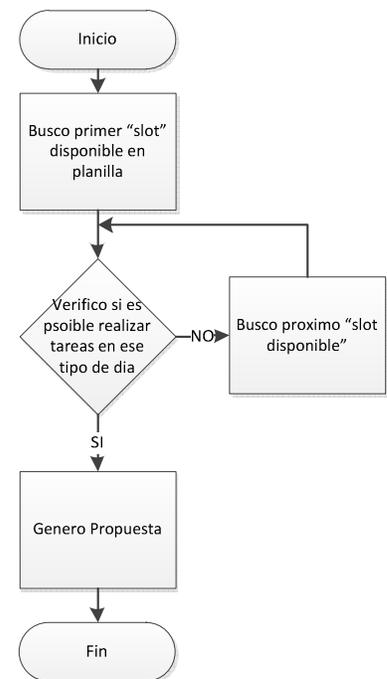


Figura 13-Eschema generación de propuesta

³¹ Se explicará en detalle el proceso de generación de propuestas más adelante en la sección

detallado. Al igual que en el proceso de selección de propuestas, se ha optado en esta primera etapa del proyecto por utilizar funciones simples y acotadas a fines de poder minimizar posibles errores de interpretación al igual que tiempos de trabajo. El agente trata de maximizar su utilización generando las propuestas más tempranas posibles (tomando como únicas limitaciones los trabajos ya asignados y el tipo de día). La figura 13 muestra el proceso de generación de propuestas.

ACTUALIZACIÓN DE VEHÍCULOS Y GENERACIÓN DE NUEVAS ÓRDENES DE MANTENIMIENTO

Con la confirmación de la asignación de todas las órdenes de mantenimiento, el modelo debe ahora actualizar los estados de cada vehículo. De esta forma se evaluará la próxima necesidad de mantenimiento dentro del periodo de análisis (en la actualidad cada vehículo entra una vez cada dos semanas). En esta etapa se “resetearán” los contadores del tipo de mantenimiento realizado pero además se cargarán el resto del kilometraje de los días posteriores al mantenimiento.

RESETEO DE CONTADORES

Por el funcionamiento en la carga de los km diarios cada agente *Mantenimiento* solo carga los kms. hasta la entrada al estado *Prev.* Una vez asignada la fecha de entrada al taller, se deberán cargar al sistema los kms. restantes del periodo para cada uno de los *Mantenimientos* realizados (entre la salida del taller hasta el fin del periodo).

Existe una función adicional que se realiza en esta etapa y resulta de analizar la posibilidad de realizar tareas de mantenimiento de más de un tipo. El modelo, hasta este momento, solo reinicia los contadores del tipo de mantenimiento que (por su nivel de urgencia) fue asignado. Sin embargo la realidad nos muestra que cuando se asigna una orden de mantenimiento tipo A, si existiesen otros tipos de mantenimiento cuyos contadores estuviesen por agotarse, se realizarían estas tareas también. A estas agrupaciones se las conoce en la industria como “combo” de mantenimientos. La exclusión de este fenómeno resultaría en un exceso de mantenimientos alejando el modelo de la realidad en análisis. Para evitar esto, se evalúa en esta etapa, la posibilidad de agrupar mantenimientos.

El proceso consta de “mirar” una cantidad de días en el futuro (a partir de cuándo se asignan las tareas iniciales) y cualquier mantenimiento que fuese a asignarse en esos días se considera como realizado en las tareas planificadas originalmente. A su vez se verifica que no exista ningún contador ya agotado en el periodo entre el comienzo asignado de la orden (el día en el cual se vacía el contador) y el inicio real de las tareas. De esta forma se reinician todos los contadores de las tareas en el “combo” y se da por finalizado el proceso de actualización.

Tras esto se evaluará nuevamente el semáforo de cada vehículo, generando nuevas necesidades de mantenimiento y dando comienzo a una nueva iteración del modelo.

Es importante destacar que si bien los kms. entre ETTM y CRTM (entrada deseada a tareas de mantenimiento y comienzo real de las tareas de mantenimiento respectivamente) son cargados, al “resetear” los contadores tras finalizar las tareas de mantenimiento estos no influyen en los contadores. De esta forma, comenzar las tareas de mantenimiento un día después del ETTM o una semana no presenta diferencias desde la perspectiva de los contadores de mantenimiento. Estos kms., en caso de ser las tareas de mantenimiento de carácter crítico, serán ingresados en la variable *días_extra* en cada agente *Mantenimiento*. En cada iteración se tomara el contador de días libres que mayor cantidad tenga y éste se cargará sobre la variable *días_sobreuso* que funciona como un acumulador de todos los días de sobre uso del periodo. De esta forma se tendrá un indicador del sobre uso (por sobre la fecha de mantenimiento preventivo crítico) que cada vehículo posee.

$$Kms_{findeperiodo} = Kms_{FTM-findeperiodo}$$

$$Kms_{sobreuso} = Kms_{ETTMC-CRTMC}$$

Siendo FTM el fin de las tareas de mantenimiento, ETTMC entrada temprana a tareas de mantenimiento crítico y CRTMC el comienzo real de las tareas de mantenimiento crítico.

CONDICIÓN DE SALIDA

La naturaleza iterativa del modelo nos obliga a tener una condición de finalización con la cual indicaremos al sistema que ya han sido correctamente cargados todos los kms. requeridos en el periodo. Esto indicará a su vez que las tareas de mantenimiento han sido asignadas (puesto que solo se pueden cargar días de kms. si los contadores no están depletados).

Recordando la estructura de cada *Vehículo* y de los agentes *Mantenimiento* dentro de estos³² procederemos a explicar las variables que indicarán la finalización de la carga de kms.

Cada *Mantenimiento* posee en su estructura una variable contador *día* que es aumentada cada vez que se ingresan los kms. de un día en el periodo. Cuando dicho contador llegue al valor de 31(en el modelo esto es un input que se carga mensualmente cuando se importan los diferentes tipos de día) se aumentará en uno un contador que posee cada vehículo de los mantenimientos que han cargado todos los requerimientos

³² Ver pg. 33

mensuales. Este contador toma el nombre de *mant_listos_mes* y es verificado en cada iteración para que cuando llegue a 12 (cantidad de tipos de mantenimiento existentes en cada vehículo) asigne el valor de verdadero a la variable *coche_listo_mes*. De esta forma en cada iteración los vehículos listos no serán tenidos en cuenta para mantenimiento. Tras un cierto número de iteraciones todos los vehículos estarán en condición de listo con lo cual se dará fin a la simulación y se exportarán los cronogramas generados.

4.2.7 CONCLUSIONES

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MODELO PLANTEADO

Entendiendo la solución planteada se pueden apreciar una serie de ventajas y desventajas que acompañan la decisión tomada. Recordando que las características buscadas en la resolución de este módulo eran: facilidad de comprensión, flexibilidad y adaptabilidad se puede juzgar como logrados dichos objetivos.

VENTAJAS

- Fácil entendimiento.
- Permite introducción de datos de forma dinámica. Situación no esperada puede ser incorporada sin alterar el modelo.
- La inclusión de mayor complejidad no incurre en mayores modificaciones a la estructura general del modelo (sistema de subastas sigue siendo igual).
- Implementación sencilla y modular lo cual minimiza los riesgos de incompatibilidad con otras partes del sistema.

DESVENTAJAS

- No asegura una optimización a nivel global.
- Hipótesis muy restrictivas que pueden llevar a la generación de cronogramas poco factibles u óptimos.
- Poca integración a la planificación de vehículos, los mantenimientos se generan como resultado de lo planificado sobre los vehículos. Comportamiento reactivo dentro del proceso de planificación.
- Funciones de decisión muy simples. Tanto en la selección como en la generación de ofertas.

FUTURAS MEJORAS

En esta primera etapa se han utilizado ciertas restricciones que limitan el potencial del modelo pero que, a falta de datos, información y una validación del modelo resultan necesarias. En esta sección se presentan algunas de las posibles mejoras en el modelo.

DISTINTOS MANTENIMIENTOS EN DISTINTAS FOSAS

Si bien en el caso de estudio se ha tomado como hipótesis que todos los trabajos de mantenimiento pueden ser realizados en cualquier *Fosa*, el modelo puede ser adaptado para incluir diferentes tipos de mantenimiento con diferentes *Fosas* en capacidad de atender a estas necesidades. Generando tantos *Mediadores* como tipos de mantenimiento existan es posible resolver dicho problema sin modificar la esencia del modelo. Cada uno de los *Mediadores* poseería una lista de *Fosas* asociadas cuyas características permitan la resolución de las tareas de mantenimiento específicas de la orden a subastar. El agente *Receptor* debería a su vez conocer las características de cada *Mediador* y la tarea a planificar de modo de comunicar solamente al *Mediador* correcto la tarea de mantenimiento a planificar.

EVALUACIÓN Y SELECCIÓN DE PROPUESTAS

Se presentan algunos criterios adicionales en la selección de la propuesta ganadora que intentaría generar diagramas con mayor nivel de optimicidad global:

- Costo oportunidad del mantenimiento: Puede suceder que una oferta en particular obligue al vehículo a salir de un trabajo ya programado. Incluyendo un factor que considere este fenómeno se lograría valorizar las ofertas que, sin sacar de trabajo agendado a un vehículo, se realicen en el menor horizonte temporal.
- Porcentaje de trabajo total de la fosa: La optimización debería ser enfocada a la minimización de *Fosas* a utilizar. Con este factor se priorizaría la maximización de la utilización de cada *Fosa* por sobre la distribución entre todas las *Fosas* existentes. Es posible que el número de *Fosas* asignadas en la actualidad sea excesivo en cual caso este criterio lograría detectar ese exceso e informar del mismo a la empresa
- Porcentaje de utilización antes y después de la fecha asignada: Este factor tomaría en cuenta el “nivel de compactación” de los cronogramas, dando mayor puntaje a un cronograma con menos “huecos improductivos” o tiempo muerto entre mantenimiento y mantenimiento.

GENERACIÓN DE PROPUESTAS

De igual forma que en la evaluación de propuestas, la generación de las mismas se podría beneficiar de la incorporación de otros factores de análisis. Algunos considerados son:

- Costo oportunidad: Las *Fosas* podrían generar una evaluación de cuánto estarían dejando de ganar al incorporar una cierta orden en un determinado horario. De esta forma horarios más “codiciados” (por su proximidad o duración) serían reservados para mejores subastas.

- Distancia a recorrer: La distancia entre el lugar donde se encuentra previo al mantenimiento y la ubicación del taller puede ser una nueva dimensión a minimizar reduciendo de esta forma el tiempo muerto que posee un vehículo en el viaje hacia el taller.
- Si existiesen varios tipos de mantenimiento posibles también se podría pensar en reducir los cambios de trabajo en cada *Fosa* de manera de lograr que cada *Fosa* se “especialice” en un tipo de mantenimiento reduciendo así el tiempo de preparación de la *Fosa* (sea en obtener la maquinaria necesaria para ese tipo de mantenimiento, el personal específico para el control y operación de dichas maquinas, etc.).

4.3- MÓDULO II: ASIGNACIÓN DE FRANCOS

4.3.1 INTRODUCCIÓN

Los choferes, en un símil con el mantenimiento que los vehículos requieren, necesitan de días de descanso (de ahora en más también referidos como francos). Estos días de descanso deben satisfacer restricciones particulares que refieren a tres grandes grupos de intereses (legales, sindicales, y personales). El problema de asignación de francos consiste en generar una asignación individual, en la cual son diseñados los días libre de cada chofer, sobre un horizonte de trabajo planificado.

4.3.2 CONSIDERACIONES INICIALES

Cada día de trabajo, en lo referido a la demanda esperada, es único. Partiendo de esta base resultaría muy compleja la modelización y planificación de los vehículos. Es por esto que se decidió dividir a los días de trabajo bajo una de las siguientes categorías:

- Hábil: Se refiere a los días entre lunes³³ y viernes donde la demanda es máxima³³.
- Fin de semana: Con una demanda marcadamente inferior, estos días también requieren de tratamiento especial puesto que su atractivo (a la hora de evaluar cuándo un chofer estaría interesado en obtener un franco) es considerablemente mayor que el de los días hábiles. El modelo separará ambos días ya que, como se verá en una de las restricciones del problema, se deberá cumplir una relación entre días Sábado y Domingo.
- Feriado: En su demanda, esta categoría presenta una gran similitud con la esperada de un fin de semana. La generación de esta categoría radica en que las condiciones de trabajo, como se verá a continuación, en estos días son únicas y requieren un tratamiento especial.

³³ Para este proyecto se tomarán los datos presentados por la compañía. Un estudio detallado de estos datos podría presentar variaciones en algunas de las suposiciones hechas en este trabajo.

4.3.3 HIPÓTESIS DEL PROBLEMA

Las restricciones que se tomaron como hipótesis en el modelo son:

- Cada chofer debe de recibir seis francos por mes.
- Se intercalarán francos en feriados (asignando feriado por medio un franco a cada chofer)
- No se generará un cronograma que presente un solo día laboral entre dos francos.
- La máxima cantidad de francos consecutivos a asignar será de tres.
- No se podrán generar cronogramas que obliguen a un chofer a trabajar por un periodo mayor a seis días sin un solo franco.
- Además de tener en cuenta las necesidades para cumplir con los servicios diarios, se deberá citar personal para responder a cuestiones imprevistas como ausencias (justificadas o no) del personal asignado a trabajar ese día. Es por esto que los sobrantes de choferes diarios durante la semana deberá estar lo más balanceada posible.
- Los Sábados deberán sobrar más choferes con franco que los Domingos. Esta condición, si bien no sigue un lineamiento legal o gremial trata de que, de ser necesarias suplencias en los días sábado, los choferes estén mejor predisuestos a realizar el cambio de día (la experiencia de la compañía sugiere que es más factible que un chofer cambie su franco de Sábado a Domingo que viceversa).
- De ser posible se tratará de emparejar los francos dados a un conjunto de choferes asociados a un mismo vehículo. Se entiende que existirá una cierta flexibilidad en esta restricción cuando la demanda lo amerite (es decir se podrá asignar solo uno si existe una necesidad de choferes que no puede ser cubierta)

4.3.4 OBJETIVOS

Para este módulo se fija como objetivo local la generación de asignaciones que cumplan con todas las restricciones establecidas y que logren, en alguna medida, maximizar la comodidad del sistema. Entendiendo que la comodidad total del sistema se calculará como la suma de las comodidades individuales de cada chofer.

Si bien el problema en análisis presenta características que lo convierten en uno de optimización, la realidad de las restricciones que se presentaron (tanto en cantidad como en rigidez) nos obliga a considerarlo uno preponderantemente de satisfacción de las mismas. El dinamismo necesario para atender a restricciones no planteadas en un comienzo (enfermedad, aumento en demanda, fluctuación en los feriados asignados por el gobierno de turno, etc.) generan la necesidad de presentar un modelo capaz de adaptarse y permitir cambios en las asignaciones si así fuese necesario. Es condición necesaria que el modelo sea lo más simple posible, tanto desde su entendimiento como

implementación y uso, para que el empleado actual pueda resolver las mismas problemáticas de forma más eficiente y rápida.

Lo que se busca con el modelo es agilizar la asignación de francos evitando en gran medida la necesidad de un input humano. No sólo le permite al *planner* concentrar esfuerzos en otro tipo de tareas, sino que también se crea una solución que combina todas las restricciones buscando una solución que se adapta mejor a las necesidades de la empresa. Al *planner* le lleva al menos una semana hacer el cronograma, y cualquier cambio de requerimiento de turno o feriado nuevo implica comenzar desde cero con la diagramación. El modelo facilitará la inclusión de estos cambios en la diagramación.

4.3.5 MARCO TEÓRICO

El modelo elegido para resolver este módulo tiene sus orígenes e inspiración en uno de los modelos planteados por Thomas C. Schelling e introducidos en 1970 en (14). Este conjunto de modelos representan uno de los primeros modelos de un sistema complejo que presenta el fenómeno de comportamiento emergente a raíz de la interacción de los agentes involucrados.

Si bien no se espera que el lector posea total conocimiento del modelo y los fundamentos teóricos que lo rodean, se presenta la siguiente reseña del mismo para generar la conexión entre el modelo planteado y el original.

En el modelo original Schelling los agentes, que solo pueden tomar uno de dos valores posibles (en forma de colores) se sitúan en un tablero de ajedrez. Cada color corresponde a miembros de dos grupos homogéneos los cuales difieren en una característica fundamental (los estudios de Schelling apuntaron a la segregación racial por lo cual este fue su criterio, sin embargo el modelo puede extenderse a características como nivel económico-social, religión, etc.). Una fracción del tablero se deja sin agentes para permitir el movimiento libre de los situados en el tablero. Los agentes de ambos colores tienen la posibilidad de moverse a estos casilleros en blanco. El “vecindario” de cada pieza es el comprendido por los ocho casilleros adyacentes. Si la proporción de “vecinos” del mismo grupo es inferior a un tercio, el agente en cuestión estará “triste”, y su utilidad (en términos económicos) será igual a 0. Si en cambio la relación de vecinos de su mismo grupo es superior a un tercio, el agente analizado se encontrará “feliz” y su utilidad será 1.

Partiendo de una distribución inicial aleatoria, Schelling “mueve” a los agentes descontentos a otro lugar disponible (casillero en blanco). Mediante la iteración de estos pasos:

1. Calculo utilidad de cada agente

2. Tomo los agentes tristes y los re posiciono en otro casillero disponible

Schelling observó que el sistema **siempre** se estabilizaba en un estado segregado donde grandes congregaciones del mismo color se formaban.

La conclusión más importante del modelo es que la segregación “aparece” como un fenómeno emergente y que el resultado global es drásticamente magnificado e inesperado partiendo de la premisa que los agentes individuales se encuentran “felices” de vivir en vecindarios mixtos.³⁴

4.3.6 MODELO

Teniendo en cuenta las limitaciones, condiciones y objetivos a resolver en este módulo se ha optado por el siguiente modelo: **una asignación de francos basada en una evaluación de comodidad y atractivo de cada día.**

En pocas palabras, se plantea que los francos son agentes individuales que van “moviéndose” dentro de los diferentes días y tratando de cumplir con las diferentes condiciones fijadas para cada chofer, de forma de obtener la mayor comodidad posible no solo para los choferes en cuestión sino para el sistema como un conjunto. El modelo utiliza el siguiente esquema de trabajo para la asignación de los francos.

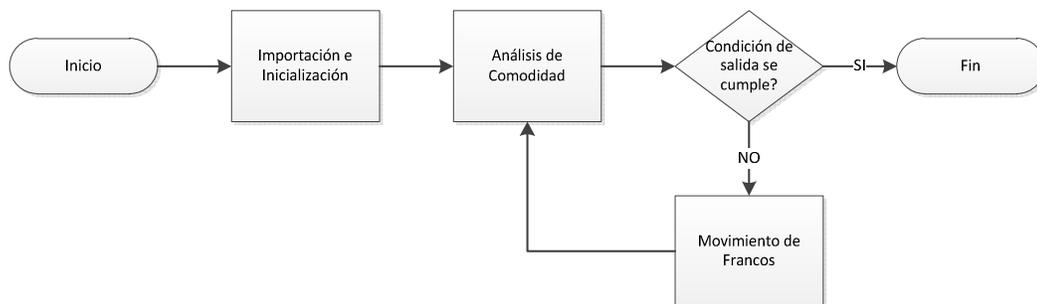


Figura 14- Diagrama de trabajo del módulo II

IMPORTACIÓN E INICIALIZACIÓN

Al igual que todos los otros módulos la asignación de francos debe obtener información acerca de los choferes, desde su identificación, hasta condiciones de trabajo de cronogramas pasados. Una vez cargados todos los datos correspondientes al personal se deben obtener las cantidades de cada tipo de día (hábil, fin de semana y feriado) a fines de poder generar un “calendario virtual”. Estos datos servirán para poder hacer una correcta evaluación de las restricciones y necesidades propias de cada categoría. La figura 15 muestra todos los datos a importar:

³⁴ El contenido teórico de esta reseña se encuentra basado en lo presentado en (16)



Figura 15-Datos a importar por el modelo

Teniendo todos los datos importados, se asignarán, por primera vez, los seis *Francos* correspondientes a cada *Chofer* en el periodo. El procedimiento para la “inicialización” de los *Francos* se detalla a continuación:

1. Siendo la restricción de los días tipo feriado la más rígida³⁵ se fijan los *Francos* del periodo correspondientes a esta categoría. Se verifica la condición del feriado anterior (con un contador booleano que marca verdadero si se tomó franco en el feriado pasado y falso si no) y se procede a intercalar *Francos* según la cantidad de días tipo feriado que existan en el periodo de asignación.
2. Tomando el resto de los días disponibles para asignar *Francos* (del tipo hábiles y fines de semana) se seleccionan de forma aleatoria los días que se darán los francos remanentes a cada *Chofer*. El objetivo de esta etapa es generar una “población” inicial de francos para cada *Chofer* (en estos momentos no es necesario respetar las restricciones puesto que el incumplimiento de cualquier de ellas se verá reflejado en la “comodidad” de los *Francos*).

De esta forma se concluye la etapa de inicialización obteniendo una distribución de todos los *Francos* para todos los choferes.

ANÁLISIS DE COMODIDAD

Durante la etapa de inicialización se presentó la primera distribución de *Francos*. Esta primera aproximación, si bien el procedimiento incluye una distribución aleatoria de algunos *Francos*, se encargó de respetar la restricción relacionada a los días tipo feriado. Es en la etapa actual en la que se procede a reorganizar los *Francos* anteriormente tratados de forma aleatoria a fines de evaluar el cumplimiento de las

³⁵ Como se explicó previamente la asignación de francos en días tipo feriado es del tipo intercalado dando un franco cada otro feriado (uno si y el otro no)

restricciones del problema. De esta evaluación también se calculará la comodidad de cada *Chofer* y la del sistema en su totalidad. Para esto el modelo plantea la siguiente secuencia de pasos:

1. Se ordenan los *Franco*s de forma ascendente según su fecha de asignatura. Cada *Franco* entonces tiene constancia del día de asignación del *Franco* anterior como del *Franco* asignado inmediatamente posterior a sí mismo.
2. Tomando las distancias al *Franco* anterior y posterior se asigna coeficiente de comodidad al agente en análisis (coeficiente beta que tomará un valor de 2 cuando se encuentren a menos de 6 días de diferencia³⁶ y un valor de 1 cuando sea menor a 3 días del anterior o posterior y un valor de 0 cuando la distancia exceda los 6 días)
3. Teniendo la comodidad de cada *Franco* y sumando todos los correspondientes a cada *Chofer* se logra evaluar la comodidad de estos últimos.
4. Mediante la comparación de la comodidad de cada *Chofer* se genera un “ranking” de los *Choferes* en base a su comodidad.
5. Teniendo el ranking de *Choferes* y *Franco*s se procede al movimiento de *Franco*s.
6. Se evalúa la comodidad total del sistema y se la compara con la “corrida” que ha presentado (hasta ese momento) la mayor comodidad. De superar a esta última se reemplaza la misma.
7. Se verifican los criterios de salida del modelo, prosiguiendo con la iteración hasta cumplir con estos.

La comparación de comodidades resulta la pieza angular de todo este proceso. Esta función es la responsable de seleccionar una corrida por sobre otra. Para esta selección se deben tener en cuenta diferentes indicadores que intentan considerar las distintas necesidades y objetivos del modelo. El alto grado de diferencia entre las diferentes líneas y plantillas de choferes hace que estos indicadores tomen pesos diferentes. Para poder acomodar esto en el modelo se ha decidido dejar la ponderación a los encargados del área de planeamiento de la empresa a asesorar entendiendo que ellos, al estar en constante contacto con el proceso, serán los más calificados para realizar dicha selección de pesos.

CONDICIONES DE SALIDA

Debido a la complejidad del sistema y la dificultad para acomodar todas las restricciones mencionadas, el modelo desarrollado deberá poseer un carácter iterativo que permita recorrer el conjunto de soluciones posibles. Este carácter genera la necesidad de fijar algún criterio de cumplimiento que permitan al sistema detectar

³⁶ En cumplimiento con la restricción de máximo periodo sin francos

cuándo se ha obtenido una asignación de francos satisfactoria. En cada iteración, o ronda, se evaluará el indicador frente a las condiciones establecidas como límite. De cumplirse el módulo habrá terminado y el cronograma actual será tomado como el resultado final del módulo continuando con el procedimiento ya definido. Este indicador será, en esta etapa de prototipo una medida de estabilidad en el tiempo calculado como la cantidad de iteraciones sin cambios tomando el valor de 800 para esta etapa del modelo.

MOVIMIENTO DE FRANCOS

Para el proceso de movimiento se deben elegir tanto un *Chofer* como un *Franco*. El proceso de selección y diferenciación de los diferentes días disponibles se presenta a continuación. Es aquí donde el modelo logra generar mejoras con respecto a la asignación de francos anterior.

El movimiento de francos debe tomar en consideración el atractivo de cada día. Esto resulta necesario debido a que es en este parámetro donde se presentan varias de las restricciones a cumplir. Este análisis del atractivo permite al franco moverse hacia el punto de mayor beneficio para el chofer en cuestión.

Existe una dificultad en incluir este fenómeno: si cada *Chofer* optimizase sus propios resultados, los resultados a nivel global (el cual es donde realmente se buscan mejoras) no guardan una relación con esta optimización (pueden no ser los mejores). Esta desconexión entre máximos locales y globales genera la necesidad de utilizar criterios de selección (tanto para el chofer a mejorar como para el franco a reordenar) de carácter probabilístico. La asignación individual de las probabilidades estará asociada a las diferentes condiciones que generen mayor interés en obtener un agente en particular (en este modelo la comodidad) Se presentan varias razones que justifican la necesidad de agregar criterios de selección probabilísticos, entre los cuales se destacan:

- Asegurar que no exista una convergencia prematura del modelo.
- Agregar posibilidad de aumentar el espacio de posibles soluciones a modo de reducir el impacto de las condiciones iniciales (dadas por la primera asignatura de *Francos*³⁷).
- Agregar posibilidades de mejora global a la comodidad que pueden provenir de soluciones “peores” a los ojos del individuo.

Se presenta un ejemplo de la vida real cuya similitud con el problema a resolver en el modelo nos ha servido de inspiración para generar una solución al problema del movimiento de *Francos*.

³⁷ Ver etapa de importación e inicialización (pg. 49)

En el juego de la ruleta, como el lector sabrá, existen 37 diferentes posiciones donde la “bola” puede caer³⁸. Suponiendo que el *croupier* no tiene control sobre donde caerá la bola y la mesa no presenta ningún tipo de modificación, se puede pensar que el lugar donde caerá la misma presenta probabilidad de $1/37$ en cada tirada. Si ahora incluimos a los jugadores en nuestro modelo vemos que si existiesen 36 jugadores (cada uno apostando a un número) la probabilidad de ganar de cada uno sería también $1/36$. Olvidándose de los costos y ganancias de las apuestas y tomando solo el criterio de ganar como seleccionar el número ganador, se puede pensar que cuantos más números un jugador seleccione, mayor será su probabilidad de ganar. Sin embargo, y como consecuencia del carácter impredecible del tiro, ese jugador nunca podrá asegurarse que ha ganado. (A menos que apueste a todos los números). Tomando este sistema como inspiración se ha desarrollado un sistema de ruleta para la selección tanto de *Chofer* como de *Franco* a ser reordenado.

Utilizando el atractivo de cada día como el rango donde cada día puede ganar, y a partir de esto una función de atractivo acumulado que dé cuenta de estos rangos, se genera un número aleatorio (entre 0 y el atractivo total³⁹). El día cuyo rango asignado contenga el número aleatorio generado será el “ganador” y el *Franco* en análisis se “moverá” a este día. La figura 16 da cuenta de este proceso y los pasos que lo componen.

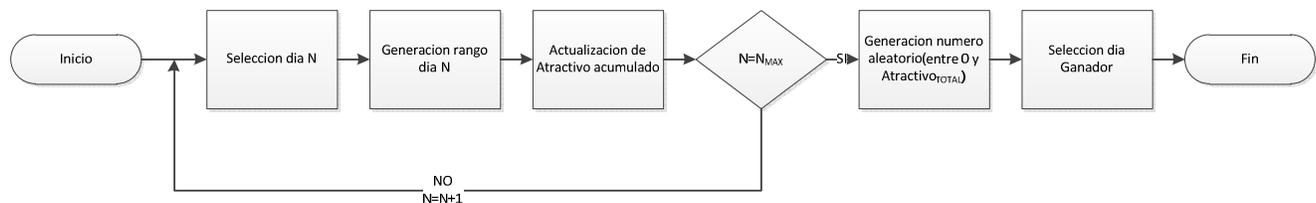


Figura 16-Proceso de movimiento de días libres

De esta forma logramos generar tanto la dependencia con el parámetro atractivo (a más atractivo mayor probabilidad de ganar) y el carácter aleatorio que nos permite obtener soluciones no óptimas para el individuo pero que puedan llegar a resultar beneficiosas para el sistema como un todo. Asignada la nueva posición del franco analizado se posiciona al modelo en la etapa de *Análisis de Comodidad*.

³⁸ Se ignoran las apuestas a color, decena, 4 números, y el casillero “doble cero”

³⁹ Proveniente de la suma de los atractivos de cada día del periodo

4.3.7 CONCLUSIONES

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL MODELO

El modelo plantea un sistema novedoso de resolución donde la asignación se realiza individualmente. La simpleza tanto en el entendimiento como en la implementación resultan características destacadas del mismo. Los rasgos más importantes se delinean a continuación:

VENTAJAS

- Fácil entendimiento.
- Innovador desde su idea conceptual.
- La inclusión de mayor complejidad no incurre en mayores modificaciones a la estructura general del modelo (sistema de comodidad de *Francos* se mantiene intacto).
- Adaptabilidad a cambios en políticas de francos en corto tiempo.
- Fácil reproductibilidad y escalabilidad para incluir personal de otras líneas de colectivo.
- Implementación sencilla y modular lo cual minimiza los riesgos de incompatibilidad con otras partes del sistema.

DESVENTAJAS

- Poca integración a la planificación de vehículos. No existe relación con mantenimiento para lograr coordinar *Francos* con días de mantenimiento.
- Restricciones flexibilizadas, incurre en necesidad de contratar gente extra por no poder cumplir con lo requerido. Puede desembocar en asignaciones incompatibles con las restricciones.

POSIBLES MEJORAS

Para mejorar la velocidad de procesamiento y quizá asegurar una convergencia global a una asignación óptima se podrían utilizar datos históricos de meses similares en cuanto a cantidad de días de cada tipo para generar la primera aproximación eliminando el sistema aleatorio que se presenta en la actualidad. De esta forma al aumentar el uso del modelo y mejorar la serie histórica también mejoraría la primera aproximación logrando que cada iteración que se mejore tienda a una máxima comodidad en menor tiempo.

Se puede tomar como una mejora a este módulo la expansión de los límites fijados en el modelo de forma de abarcar la asignación integral de todas las tareas del personal. Esto incluiría francos, cronogramas de trabajo e incluso vacaciones. De esta forma el modelo

poseería mayores libertades e información para generar un cronograma de trabajo óptimo para los choferes.

4.4- MÓDULO III: INTEGRACIÓN E ITERACIÓN

4.4.1 INTRODUCCIÓN

Tras haber desarrollado la optimización interna de cada módulo queda como gran desafío lograr introducir cada uno de los modelos en un ambiente común a ambos. Es esta comunicación y relación la cual permitirá optimizar de forma global al sistema.

Sin la restricción impuesta por la compañía asesorada que obliga a que ciertas “parejas” de choferes estén asociadas a cierto vehículo, la integración de ambos módulos sería muy sencilla⁴⁰. Bastaría con optimizar los mantenimientos, asignar los días libres y tomando los vehículos y el personal disponibles armar los cronogramas diarios de trabajo.

Desafortunadamente este no es el caso, por estar ligados entre sí vehículos y choferes quedan por consecuencia interrelacionados días libres y tareas de mantenimiento. Es aquí donde se comienza a entender la dificultad del enfoque integrador puesto que a más restricciones impuestas al sistema menos probabilidad de encontrar una solución óptima que se ajuste a este.

Cabe aclarar que el “emparejamiento” de dos choferes con un vehículo no implica que ambos choferes deban tomarse días libres en las mismas fechas. Como se ha visto en el módulo de mantenimiento las tareas de mantenimiento solo llevan en promedio 4 horas. Es por esto que podrá tomarse un día libre el chofer del turno mañana y no el del turno tarde si las tareas asignadas de mantenimiento ocurriesen en el horario matutino. Sin embargo, y retomando lo establecido en las restricciones del módulo II, se buscará siempre y cuando sea posible mantener este emparejamiento de francos.

4.4.2 OBJETIVO

Como ha sido costumbre en el desarrollo de este trabajo se comenzará por explicar el objetivo en este caso global a desarrollar. Por un lado se intenta obtener una solución dinámica y flexible a la planificación de las tareas de mantenimiento. Por el otro una asignación de días libres para los choferes que no solo cumpla con las restricciones

⁴⁰Esta política responde a una lógica de maximización de recursos. Existe también un factor de pertenencia con los vehículos que muestra que cuando un chofer utiliza siempre “su” vehículo tiende a cuidarlo mejor. Este fenómeno se puede observar en la personalización y cuidado que los empleados de oficina dan a sus escritorios de trabajo

planteadas⁴¹ sino que genere la mayor satisfacción al conjunto de choferes como un todo. De esta forma se establece la siguiente definición de objetivo global:

“Lograr que la asignación de días libres y las tareas de mantenimiento sean realizadas de forma integral, obteniendo así situaciones de solapamiento entre los días libres de los choferes y las tareas de mantenimiento del vehículo asignado a estos”

Sabiendo que cada módulo optimizó de forma local su sistema, se tratará de, generando la menor cantidad de interferencias, acoplar los cronogramas definidos para lograr generar la mayor cantidad de “cruces” entre días libres y tareas de mantenimiento, de esta manera se logrará, si bien sacrificando un poco de beneficio local (óptimo de cada módulo) generar una condición de beneficio global al sistema abarcado por ambos módulos (óptimo global).

4.4.3 MODELO

A diferencia de lo desarrollado en los modelos por separado aquí se procederá a explicar el comportamiento global primero. Con esta información y el conocimiento del funcionamiento de cada modelo (para cada módulo) se procederá a explicar las variaciones que debieron sufrir cada uno a fines de acomodar la interacción buscada en esta sección. De esta forma el lector recorrerá de forma análoga lo experimentado en el desarrollo del proyecto de asesoría.

PROCESO DE TRABAJO

En general, las tareas de mantenimiento (por su carácter preventivo) presentan un grado de flexibilidad (a la hora de ser asignadas) superior al que presentan los días libres. Se establece una fecha límite que se deberá respetar pero, a menos que el mantenimiento sea del tipo crítico, no existen más restricciones a la asignación de las mismas mientras que los días libres, como se vio en el desarrollo de su modelo, tienen una extensa serie de restricciones. Esta característica nos induce a dar una mayor prioridad a la asignación de días libres, logrando que las tareas de mantenimiento se asignen en dichos días. Este método logra combinar ambos módulos logrando una situación óptima para la empresa pero a costa de perder el nivel “óptimo” del módulo de mantenimiento.

Existe un caso donde esta priorización deberá ser invertida a modo de lograr optimizar la situación global de la empresa. Un vehículo en estado crítico (semáforo en color rojo) queda detenido⁴² en la terminal y no podrá ser utilizado en ninguna asignación hasta que las tareas de mantenimiento sean realizadas. Para este caso de vehículo, el módulo

⁴¹ Remitirse al módulo II de este capítulo (pg. 46)

⁴² El vehículo puede continuar realizando sus tareas aumentando el contador de días de sobreuso cosa que no es bien vista salvo por situaciones que escapen el control de los operarios.

deberá generar una asignación de tareas de mantenimiento lo más rápido posible y luego intentar que las asignaciones de los días libres de los choferes asociados sean ajustadas a estas tareas.

El primer paso en el modelo deberá ser identificar cada uno de los tipos de vehículo que deberán tener tareas de mantenimiento.

INPUT DEL MODELO

Hasta este momento no se ha hecho mención al método que genera las diagramaciones de vehículos. Este módulo, el cual escapa el espectro del proyecto, debe ser citado en esta etapa pues es el input de nuestro módulo integral de asignación de tareas. No se entrará en detalles acerca de cómo se generan las asignaciones ni qué criterios de optimización se utilizan⁴³. Si se deberá saber que, al igual que en los módulos aquí desarrollados la asignación de vehículos presenta un mar de posibilidades que cumplen las restricciones de trabajo pero debido a las características altamente combinatorias del problema⁴⁴ no es posible asegurar que es la planificación óptima. Nuestro modelo toma como válida esta hipótesis y supone que la diagramación es óptima. En caso de lograr asignar las tareas de mantenimiento y días libres se supondrá finalizada la planificación operativa. En caso de no lograrse se devolverá al módulo de planificación de vehículos un error por el cual este desarrollará otra diagramación factible. El proceso se repetirá hasta que exista una compatibilidad entre los módulos y así se finalice la planificación operativa de la línea en análisis.

INICIALIZACIÓN

Como recordará el lector, el primer paso del módulo de mantenimiento constaba en el ordenamiento de las necesidades de mantenimiento presentes para una diagramación determinada. De esta forma se separaban las críticas y las preventivas.⁴⁵ Esta inicialización se mantiene válida para el módulo integrado y será considerada la primera etapa del proceso de asignación. Al finalizar, el módulo de mantenimiento exportará a una plataforma en común para el sistema una variable que contenga las órdenes críticas y otra variable que contenga las órdenes “amarillas”.

PROCESAMIENTO ÓRDENES CRÍTICAS

Como se mencionó estas órdenes presentan una prioridad por ingresar al módulo de mantenimiento y así recibir la asignación más temprana posible. De esta forma se

⁴³La optimización de los diagramas responde a una minimización en los costos pero su elaboración escapa el desarrollo de este trabajo.

⁴⁴ Referirse a pg. 7

⁴⁵ Referirse a pg. 36

procederá a asignar todas las órdenes mediante el proceso de subasta discutido en el módulo I. Una vez que se hayan asignado satisfactoriamente todas las órdenes críticas se dará aviso al módulo de asignación de días libres para que incorpore estas fechas como días libres para los choferes correspondientes.

El módulo de asignación de días libres, toma ahora, carácter activo en el proceso. Al recibir la orden de asignar los días libres “rojos” el mismo los incorporará en la etapa de importación e inicialización⁴⁶. Recordando que tras la importación de todos los datos requeridos (los cuales incluían información de los choferes, cantidad de días según su tipo, relación chofer y vehículo) se procedía a inicializar los días del tipo feriado. Es aquí donde se asignarán, también, los días que han sido designados como mantenimiento crítico. La razón de incluir a dichos días en esta etapa es simplemente para lograr darle la prioridad máxima posible dentro del módulo. De esta forma la asignación del resto de días libres para cada chofer será alrededor de estos previamente fijados. La figura 17 muestra el proceso descrito en esta etapa y resume las interacciones entre los módulos.

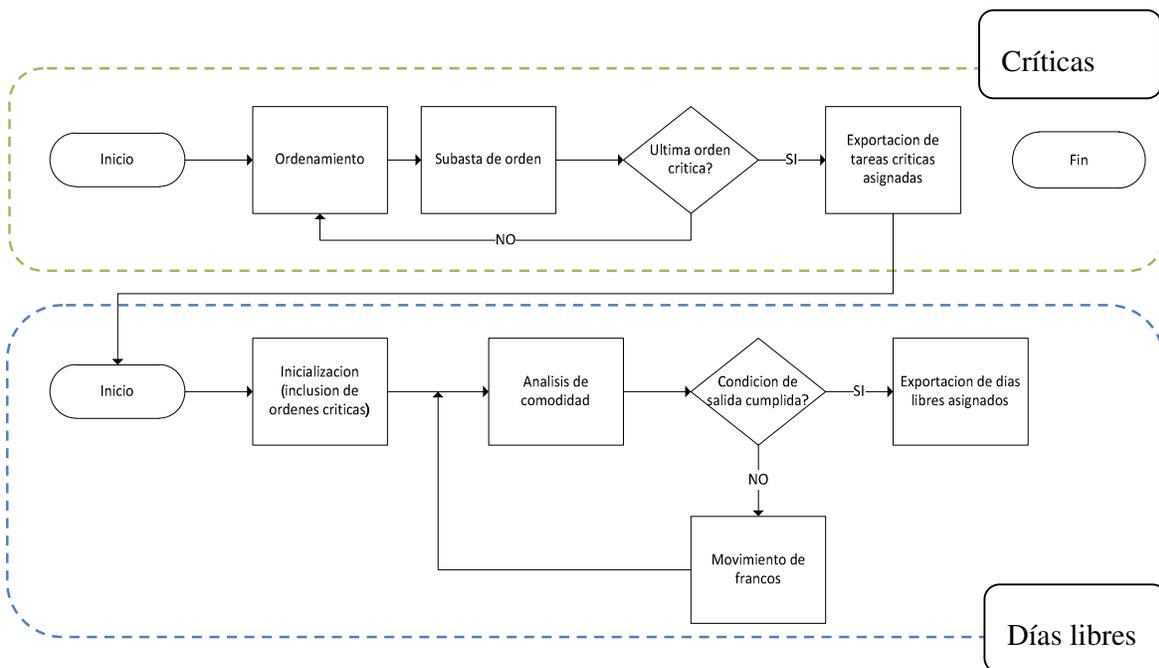


Figura 17-Flujograma procesamiento órdenes críticas

⁴⁶Referirse a pg. 49

Las mismas se generan a través de mensajes entre los distintos agentes involucrados, lo cual simplifica el entendimiento del proceso y lo lleva a un plano más similar a lo que pasaría en la realidad (donde agentes del departamento de mantenimiento estarían en contacto con agentes del departamento de días libres). El proceso finaliza cuando se prosigue a ejecutar la secuencia del módulo II, y se logra asignar el resto de los días libres para estos choferes.

De esta etapa se obtiene una asignación de órdenes críticas en el módulo I y una consecuente asignación de todos los días libres de los choferes asociados logrando un solapamiento entre ambos. Esta etapa otorga una prioridad mayor al módulo de mantenimiento logrando cronogramas óptimos según sus estándares. Por el contrario se incorpora una nueva restricción al módulo de días libres que podría reducir la comodidad máxima posible del sistema pero que logra cumplir con el objetivo delineado para el sistema global.

PROCESAMIENTO ÓRDENES AMARILLAS

Asignadas ya las órdenes críticas se procede a tratar el remanente de tareas de mantenimiento. Estas presentan más flexibilidad en el módulo de mantenimiento por lo cual comenzarán su proceso de asignación en el módulo de días libres.

Tal como ha sido desarrollado en la explicación del módulo II, cada *Franco* se acomoda según el atractivo de cada día dentro del periodo intentando de esta forma mejorar el atractivo total de sistema. Una vez que todos los francos han sido asignados, se emite la orden desde este módulo hacia el módulo de mantenimiento para realizar la asignación de las órdenes de mantenimiento correspondientes (en este caso solo las presentan un semáforo interno de color amarillo). El proceso de subasta ahora se ve ligeramente modificado para acomodar el objetivo del solapamiento entre asignaciones.

1. El agente *Receptor* procede a ordenar las órdenes restantes (ahora solo preventivo) y a priorizarlas de la misma forma que se discutió en el módulo de mantenimiento.
2. Se toma la orden de mayor prioridad y se importan los días libres del conjunto de trabajo asignados a ese vehículo. Se recuerda que cada vehículo tiene asignados dos choferes (uno por cada turno) y que los días libres de cada uno pueden o no coincidir, De esta forma la cantidad de días importados será la mínima cantidad que incluya a ambos choferes.⁴⁷

⁴⁷Cada chofer tiene asignados seis días libres por periodo, se importarán al módulo mantenimiento cada uno de los primeros seis (correspondientes al primer chofer) y luego todos los días libres que no coincidan con alguno de estos ya cargados del segundo chofer. Los límites del tamaño de la importación serán como

3. Se procede a subastar la orden asignando como día **privilegiado** el primer día libre del grupo. La diferencia con los métodos de subasta tradicionalmente utilizados en este trabajo resulta de que se planteará en el mediador como condición de selección del ganador que :*“La fosa ofertante haya generado una propuesta que resulte en tareas de mantenimiento coincidentes con este día privilegiado”*
4. Si alguna de las *Fosas* es capaz de acomodar las tareas de mantenimiento en este día, se da por terminada esta subasta y se procede a evaluar la próxima orden.
5. Si, por cualquier razón no existiese *Fosa* alguna capaz de realizar las tareas en este día, se procede a tomar el próximo día libre del conjunto como nuevo **día privilegiado** y se re subastaría la orden.
6. Este proceso se repite tantas veces como días libres hayan asignados entre el presente y el máximo comienzo de las tareas de mantenimiento. Esta tarea se realizará en conjunto con el paso de importación, generando así una variable que **solo** incluya los días libres de este “equipo” que cumplan con esta condición de borde para las tareas de mantenimiento.
7. Existe la posibilidad que tras evaluar todos los días libres no sea posible solapar las tareas de mantenimiento con estos días. A estos casos se los llamará “no solapados” y para resolverlos se deberá seguir un proceso más complejo el cual se detalla en el apartado que sigue.

El figura 18 muestra este proceso en detalle.

mínimo seis (si coinciden en todos los días libres) y como máximo doce (si tuviesen asignaciones completamente diferentes)

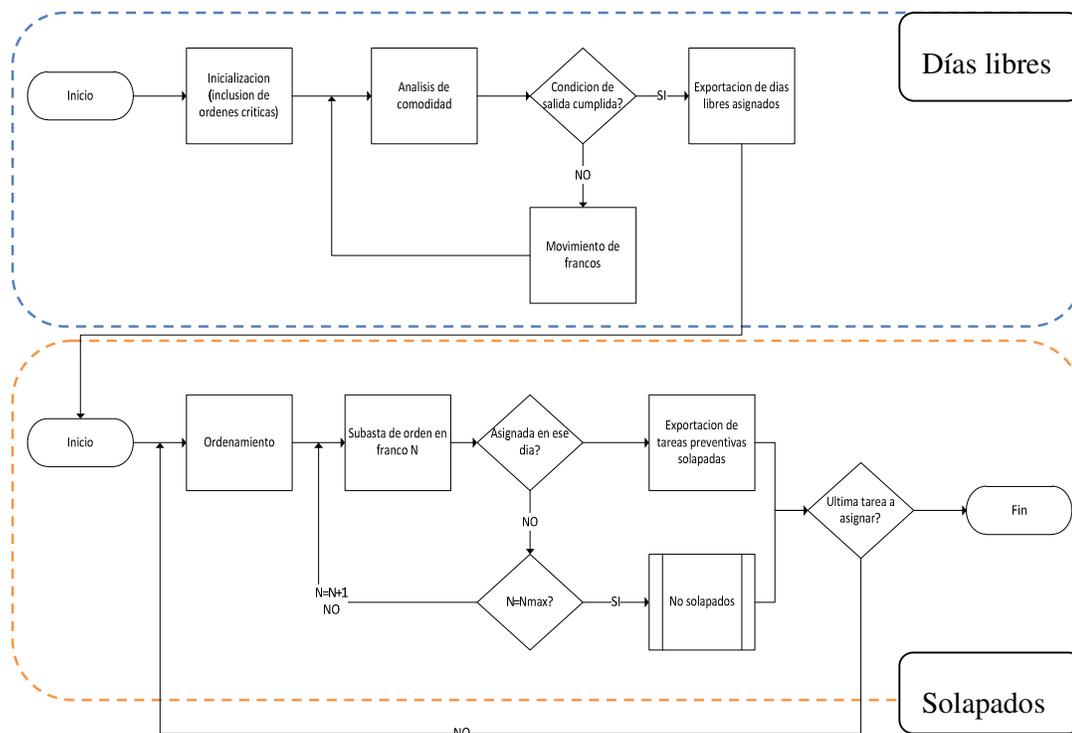


Figura 18-Flujograma órdenes Solapadas

ASIGNACIÓN ITERATIVA DE CASOS NO SOLAPADOS

Al llegar a esta etapa el módulo integrado tendrá finalizadas las asignaciones para las ordenes críticas, a su vez se tendrán también las asignaciones solapadas de mantenimientos preventivos y solo restarán los casos que han sido designados “no solapados”.

En estos casos se seguirá un proceso iterativo entre ambos módulos hasta que se logre una asignación óptima o se recorran todas las posibilidades y se decrete que la diagramación inicial no puede ser asignada. El método iterativo consistirá en, tras no poder asignar las tareas de mantenimiento, subastar la orden sin tomar estos días como privilegiados. Esto generará una asignación de mantenimiento que presenta tres posibles días (uno por cada *Fosa*). Estos días de asignación, ahora serán transferidos al módulo días libres y se les incrementará el atractivo (para la etapa de movimiento de francos) en 1. Si existiese dos *Fosas* cuyas ofertas fuese el mismo día el atractivo de este se verá aumentado en 2. De esta forma, se volverá a ejecutar el módulo II esperando que por la reconfiguración en los atractivos de estos días factibles se genere un cronograma de días libres que incluya a alguno de ellos. De ser satisfactoria esta condición, se dará por asignado tanto los días libres como las tareas de mantenimiento. Se enviará una confirmación a la fosa “ganadora” y se procederá al próximo caso “no solapado”.

Como se mencionó existe un aspecto iterativo que todavía no se ha mencionado. Este se presenta cuando pese a incrementar el atractivo del día asignado, el mismo no queda como día libre.⁴⁸ En estos casos se procederá a situar al modelo en la etapa procesamiento de órdenes amarillas y se volverá a aplicar el árbol de decisión hasta aquí mencionado para el tratamiento de órdenes de mantenimiento preventivo. Las etapas que se siguen para la asignación de los casos no solapados se presentan en la figura 19.

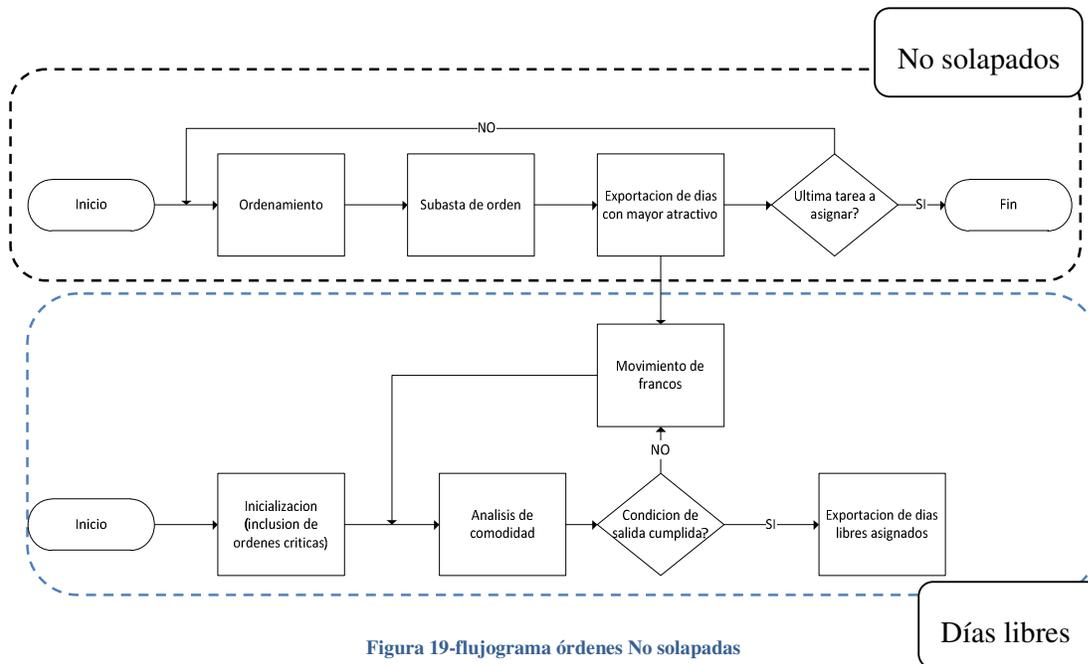


Figura 19-flujograma órdenes No solapadas

De esta forma se obtendrán asignaciones de días libres y tareas de mantenimiento que logren los objetivos globales de la empresa (aumentar el solapamiento) y traten de optimizar la asignación individual de cada módulo (optimizar localmente).

4.4.4 MODIFICACIONES

La sección anterior explicó en detalle el nuevo funcionamiento del módulo integrado. Como se pudo apreciar existen algunas modificaciones que debieron ser realizadas sobre cada módulo para poder permitir la comunicación entre ellos. El apartado anterior da cuenta de los cambios conceptuales que han sido necesarios para integrar ambos modelos. Si bien existieron leves modificaciones en todos los agentes, resultan más marcados los cambios en el agente Mediador dentro del módulo de asignación de

⁴⁸Se recomienda revisar el método de movimiento de días libres para comprender como esto puede suceder (pg. 52)

mantenimiento. Se presenta a continuación la nueva estructura de este agente (ver figura 20) y una breve descripción de la jerarquía y aplicación de cada uno de los análisis expuestos en el apartado anterior.

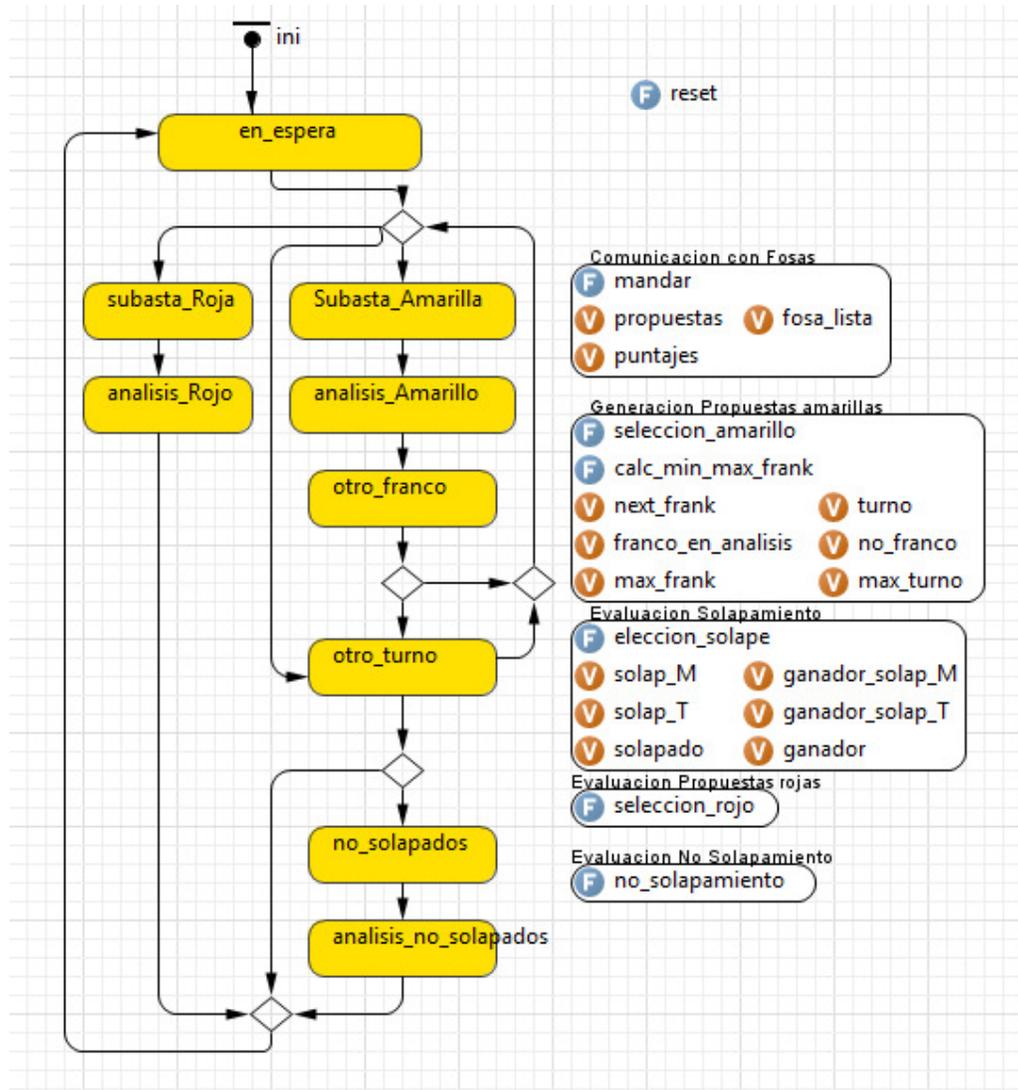


Figura 20- Estructura Interna del agente Mediador

Como se explicó en la sección 4.2.6 este agente tiene la función de evaluar y recibir las propuestas de cada *Fosa* y asignar al ganador de cada subasta. La integración con el módulo de días libres, como ya se ha expuesto, generó una distinción de procesos a realizar según sea la orden que se desea subastar. La primera gran separación es entre subastas críticas (aquí representadas por su color de semáforo rojo) y las preventivas (llamadas amarillas en este esquema). En el caso de las primeras, las órdenes de

mantenimiento crítico toman prioridad de asignación en las tareas de mantenimiento, por lo que se asignan por un proceso directo de subasta.⁴⁹

En la rama de los mantenimientos preventivos se debe seguir un proceso un poco más complejo ya que las subastas deben ser tal que coincidan con los días libres asignados para la dupla de choferes asignados a ese vehículo. Aquí se sigue el proceso de asignación de órdenes solapadas⁵⁰ De no ser posible “solapar” las tareas de mantenimiento y los días libres se procede al tratamiento de órdenes no solapadas⁵¹.

En el esquema se puede ver esta sucesión de etapas donde, de ser exitosa la subasta (en el caso del “solapamiento”) se dará como finalizada la asignación de esa subasta y se procederá a enviar un mensaje de confirmación al agente *Receptor* para continuar con la próxima etapa del modelo.

4.4.5 CONDICIONES DE FINALIZACIÓN DEL SISTEMA

Se mencionó brevemente cuando se explicaba el procesamiento de las órdenes algunas de las condiciones de salida del modelo. Las más obvias resultan cuando se logra el solapamiento o en las órdenes críticas en las cuales la condición de salida es marcada por el desarrollo de los pasos ya explicados en apartados anteriores. En esta sección se tratará la salida del modelo cuando se incurre en casos “no solapados”, particularmente cuando tras la iteración no se logra ese solapamiento buscado.

Existe en la empresa un tipo de chofer especial conocido como *franquero* capaz de cubrir baches en días donde la dotación de choferes no sea suficiente. A su vez existe un equivalente a los franqueros en las flotas de vehículos conocidos como vehículos “*muletos*”. La empresa posee una flota de vehículos extra capaces de suplir las necesidades inesperadas provenientes de las fluctuaciones del sistema. Es con estos comodines (tanto vehículos como franqueros) que si la asignación de tareas de mantenimiento y de días libres se logra en un 90% el resto de los casos se pueden suplir sin problemas con este exceso de capacidad disponible. El lector puede estar tentado a pensar que, si la compañía tuviese un mayor nivel de *buffer*, las asignaciones evaluadas en este proyecto podrían realizarse sin tantas restricciones y de forma más eficiente. Se deberá recordar la envergadura de la compañía y que los problemas desarrollados en este proyecto solo corresponden a cuatro de esas líneas. Plantear un aumento de 1% podría tener impactos sumamente catastróficos para la economía de la empresa. Es por esto que, si bien se entiende que existe esta posibilidad, a través de todo el trabajo se ha

⁴⁹Ver pg. 57

⁵⁰ Ver pg. 58

⁵¹ Ver pg. 60

tratado de minimizar el uso de estos comodines e intentar optimizar las asignaciones con el personal y vehículos base.

Existe la posibilidad de que incluso haciendo uso de estos “comodines” no se logre llegar a cumplir con la diagramación inicial. En estas situaciones el modelo devolverá al módulo de asignación de diagramas un mensaje de error como se discutió en el apartado “input del modelo”. A su vez se enviará una notificación de los días que no se han podido cumplir junto con las cantidades de vehículos y choferes con los cuales se dispondría en estos días. Esta información le servirá al diagramador para generar diagramas que sean compatibles con los requerimientos de días libres y mantenimientos preventivos de la flota. De esta forma se finalizará la asignación y se esperará una nueva diagramación a evaluar.

5 RESULTADOS

5.1- DEFINICIÓN DE INDICADORES

La complejidad del sistema evaluado junto con el enfoque integrador que se decidió utilizar nos obligan a generar diversos indicadores para la evaluación del performance del modelo planteado.

Es en la definición clara, precisa y fundamentalmente medible de los indicadores que se podrá evaluar y analizar correctamente la solución planteada. Estas medidas fueron definidas en conjunto con todo el equipo de trabajo (tanto desde los generadores del modelo como los propios planificadores y la gerencia de la compañía evaluada). De esta forma fue posible incluir los puntos de vista y objetivos de todos los actores. Estos indicadores se pueden dividir en tres grandes categorías: indicadores del módulo de asignación de mantenimiento, indicadores del módulo de asignación de días libres e indicadores de performance del sistema integral.

El grupo de indicadores de la primera categoría busca evaluar qué tan efectiva fue la asignación de los días libres de los choferes. Las mediciones aquí incluidas son:

- Cumplimiento en las restricciones de los choferes [*choferes*]: En su momento se explicó el set de restricciones que gobiernan el mundo de los “francos” asignados a choferes. Este indicador busca cuantificar este cumplimiento evaluando la cantidad de choferes cuya asignación cumple con estas restricciones.
- Cantidad de turnos que cumplen [*turnos*]: Este indicador verifica la cantidad de turnos en los cuales se posee suficiente dotación para cumplir los requerimientos establecidos.
- Francos que cumplen [*francos*]: Similar a los indicadores anteriores aquí se analiza cuantos francos (del total de toda la flota) cumplen con las restricciones impuestas.
- Distribución de francos [*francos*/*francos promedio_i*]: Para cada tipo de día la relación entre día específico y promedio. Una medida del desvío que presenta la asignación. Se intenta que los francos estén distribuidos de la forma más uniforme posible.

La segunda categoría presenta una evaluación similar a la explicada anteriormente pero en lo referente al módulo de asignación de tareas de mantenimiento. Recordando que el módulo de mantenimiento poseía tres grandes objetivos:

1. Minimizar la cantidad de mantenimientos críticos realizados

2. Minimizar la frecuencia de mantenimientos realizados (aumentando así las horas útiles que el mismo tiene por período)
3. Maximizar la utilización de los vehículos antes de entrar en mantenimiento.

Esto puede ser traducido a la siguiente frase:

“Lograr realizar las tareas de mantenimiento lo más tarde posible⁵² sin incurrir en mantenimientos del tipo crítico que reduzcan la vida útil de cada vehículo”

Para lograr medir estos objetivos se utilizaron las siguientes métricas de análisis:

- Días de sobre uso de los vehículos[días]: Este indicador cumple el rol de moderador de la utilización de los vehículos. Un mayor número de días de sobre uso nos indicará que el vehículo estuvo operativo un mayor tiempo tras su entrada al “carácter de vehículo en condiciones de preventivo”, esto no resulta deseado puesto que el aumento de este sobre uso generará una mayor probabilidad de incurrir en tareas de carácter correctivo que dejarán al vehículo parado por un tiempo considerable (en general las roturas de este tipo requieren de 20 días de mantenimiento). Es por esa última característica que el modelo intenta minimizar la sobre utilización de los vehículos. Una disminución en este indicador implicará una mejora en el sistema de mantenimientos preventivos de la compañía.
- Tiempo de rotación de la flota de vehículos[días]: Esta métrica nos servirá no solo para comparar la solución planteada con la solución actual, evaluando qué tan bien utilizados están los recursos del taller. Una alta rotación nos indicará un alto índice de uso de los talleres.
- Cantidad de vehículos mantenidos por categoría[mant. preventivo/mant. total] [mant. crítico/mant. total]: Este par de indicadores nos dará una evaluación acerca de la composición de las tareas asignadas. Un aumento en las tareas de mantenimiento preventivo “amarillo” darán cuenta de una mejor aplicación de las políticas de mantenimiento discutidas en la sección 3.2

Existe una tercera categoría de métricas que debe ser considerada ya que su objetivo es medir la interacción entre ambos módulos. Como se presentó en la definición de la problemática, los objetivos principales del proyecto son: automatizar e integrar la planificación de las tareas, un objetivo quizás secundario será cumplir con los objetivos expresados de la forma más eficiente y óptima. Estas metas se evaluarán con las siguientes métricas:

⁵²Este máximo resulta de la aplicación de un coeficiente de seguridad al máximo real. De esta forma se logrará quedar “cubiertos” en caso de imprevistos.

- Cumplimiento de diagramas[días/días totales]: Sin duda la mayor restricción de los módulos mantenimiento y días libres es cumplir con los requerimientos definidos por los diagramas presentados. Aquí se evaluará la cantidad de días del periodo en análisis en los cuales se logra cumplir como mínimo con lo solicitado en materia de personal y vehículos disponibles. Este índice dará cuenta del grado de cumplimiento en lo referido a la optimización de la asignación de estas tareas.
- Tiempos de trabajo/horas hombre]: Para medir el grado de automatización de las tareas evaluadas se utilizará la medición de tiempos que requiere la generación de planes de días libres y mantenimientos con y sin el modelo generado. Una reducción en los tiempos de proceso y trabajo de los operarios de planificación darán indicios de un mayor grado de automatización de las asignaciones de estas tareas operativas
- Solapamiento días libres y mantenimiento[mant. /total mant. preventivos]: El otro gran objetivo a cumplir es la integración de la planificación de estas tareas. Para medir el progreso en materia de integración se utilizará la cantidad de tareas de mantenimiento que pudieron ser solapadas con respecto al total de tareas a asignar⁵³. Este porcentaje medirá la capacidad del modelo de integrar las necesidades de un módulo en el otro y viceversa.

5.2- CARACTERÍSTICAS DE LAS LÍNEAS SELECCIONADAS

Para validar el modelo y analizar los indicadores ya presentados se utilizaron tres líneas de la compañía. Estas líneas presentan las siguientes características que justifican su selección por sobre el resto:

Taller para mantenimiento

Como se explicó en el módulo de mantenimiento, cada taller tiene asignados como “clientes” una determinada cantidad de líneas. Para poder realizar conclusiones válidas sobre la performance del modelo es necesario analizarlo bajo condiciones normales de trabajo. Es por esto que las líneas seleccionadas comparten un mismo taller. Una de las hipótesis/simplificaciones de este trabajo fue que todos los tipos de mantenimiento fuesen iguales. Si bien en la práctica esto no sucede, al compartir un mismo taller, resulta que las partes utilizadas en las tareas de mantenimiento son (para estas líneas en especial) similares.

⁵³ Este total hace referencia al total de tareas “preventivas” que pudieron haber sido solapadas, no del total de tareas de mantenimiento (que incluirían las órdenes de mantenimiento correctivo).

Condiciones de choferes

Durante la optimización de los parámetros utilizados en el modelo de asignación de días libres, se incluyeron datos de las preferencias de los choferes y condiciones particulares de la línea en estudio. Las líneas que aquí se han seleccionado presentan cantidades de personal y vehículos similares, y parámetros de optimización comparables. Esto nos permite que, si bien existen diferencias entre las líneas, sea posible suponer un comportamiento y preferencia similar en los choferes de las líneas.

Rutas de trabajo

Al igual que en el punto anterior, se buscó analizar líneas que tuviesen rutas a desarrollar similares. De esta forma reducimos el desvío en cuanto a los km recorridos y las condiciones del recorrido, que podrían hacer que las frecuencias de mantenimiento o los tipos de mantenimiento se modifiquen drásticamente de las condiciones planteadas en el modelo.

5.3- PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Por cuestiones de confidencialidad los datos reales utilizados en el proyecto de asesoría han sido modificados. Los parámetros utilizados no serán presentados en este trabajo y los resultados serán modificados de forma de que solo tengan validez de forma comparativa (entre los datos actuales y los arrojados por el modelo planteado). Los nombres de cada línea también han sido modificados con el mismo fin. Los indicadores se muestran a continuación⁵⁴:

INDICADORES DE MANTENIMIENTO

Como se puede apreciar, existe un aumento en los días necesarios para realizar tareas de mantenimiento de toda la flota (de cada una de las líneas). Estas diferencias, que se encuentran en menos del 25%, se pueden atribuir a alguna de las siguientes cuestiones:

- Al ser objetivo del módulo aumentar el “solapamiento” de las tareas de mantenimiento y los días libres de los choferes, es posible que se haya perdido optimicidad en el momento de entrada de los vehículos. Esto resaltaría en un incremento del tiempo necesario para mantener a toda la flota.
- Si bien se aprecia un patrón claro de empeoramiento, las variaciones son suficientemente bajas (en el peor de los casos un aumento de 5 días) como para ser atribuidas al azar en las condiciones iniciales de los vehículos. Al no es condición necesaria realizar tareas de mantenimiento en todos los vehículos

⁵⁴ Los datos que permiten estas gráficas se encuentran en el anexo 8.1 (pg. 83)

antes de “repetir” alguno de ellos, se puede dar el caso donde un vehículo entre dos veces antes que otro siquiera lo haga una vez.⁵⁵

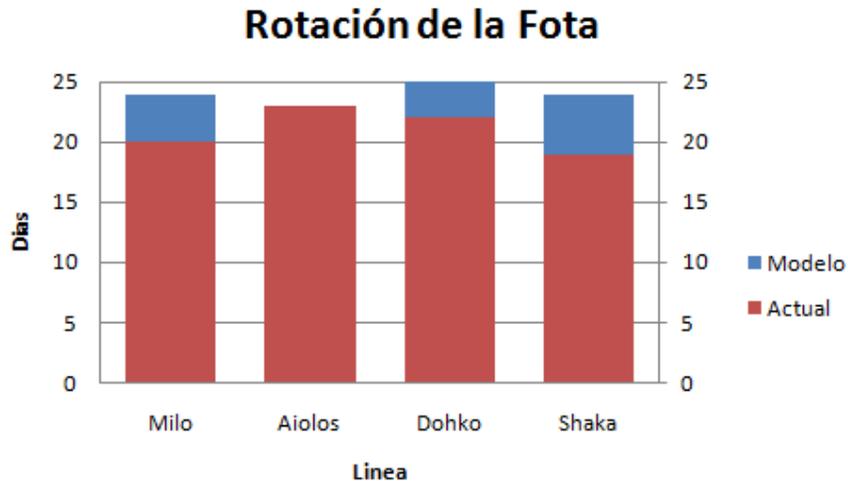


Figura 21- Indicadores de rotación de la flota

Milo		Aiolos		Dohko		Shaka	
Actual	Modelo	Actual	Modelo	Actual	Modelo	Actual	Modelo
10.17	1.59	10.12	1.02	7.80	0.40	10.90	0.66
84%		90%		95%		94%	

Tabla 2- Indicadores de sobreuso de cada línea

La tabla 2 muestra la relación de días de sobreuso de cada vehículo separado por línea al igual que el rendimiento del modelo en función de la situación actual. De esta tabla se aprecia la gran mejora en materia de sobreuso. El lector deberá recordar que los días de sobreuso se calculan como los días de trabajo tras la fecha de entrada tentativa a tareas de mantenimiento crítico. Los datos de la actualidad no deberían sorprendernos, ya que como se presentó en la sección 3.2⁵⁶, la falta de políticas de mantenimiento preventivo es una de las razones por las cuales se decidió dar comienzo a este proyecto de asesoría.

El mecanismo de asignación de tareas de mantenimiento “crítico” que tiene el modelo⁵⁷ ha permitido reducir considerablemente estos índices. La cantidad finita de espacios diarios ofertados por cada taller hace que los valores no sean nulos, como se podría esperar por lo desarrollado en la explicación del modelo. Los porcentajes hablan

⁵⁵Este es el caso de un vehículo que este en mantenimiento crítico a principio de mes y presente otro mantenimiento a días de entrar en preventivo. De esta forma entraría en los primeros días del periodo y nuevamente a mediados del mismo.

⁵⁶ Ver pg. 23

⁵⁷ Ver pg. 57

por sí solos y en lo que refiere a este indicador se ve una clara mejora en todas las líneas y con valores superiores al 80%

Las figuras 22 y 23 muestran la composición de las tareas de mantenimiento para la línea MILO⁵⁸. Existen dos fenómenos a analizar en estas gráficas. El primero corresponde a la composición de mantenimientos preventivos y correctivos⁵⁹. La figura 22 da cuenta de la falta de cumplimiento de políticas de mantenimiento preventivo actual. La implementación del modelo aumenta el porcentaje de mantenimientos preventivos en un 60%. Un segundo aspecto donde se ven claras mejoras es en la distribución dentro de los mantenimientos preventivos. No solo se incrementa la cantidad de preventivos sino que la relación entre “amarillo” y “críticos” también se ve favorecida. El modelo permite pasar de una distribución altamente sesgada hacia las tareas “críticas” hacia una que prioriza la entrada de

mantenimiento realmente preventivo.

Estos efectos aumentan la vida útil de los vehículos, reducen la necesidad de mantenimientos correctivos (y sus consecuentes desventajas) y dan flexibilidad a la asignación de tareas de mantenimiento. Este último punto

se logra apreciar al recordar que las tareas “críticas” son programadas en base a la primera vacante del taller y las preventivas pueden ser asignadas en un intervalo que permite “solapar” la asignación de días libres con las de mantenimiento.

La tabla 3 resume la composición de las tareas en las cuatro líneas en análisis.

Composición de mantenimientos MILO (actual)

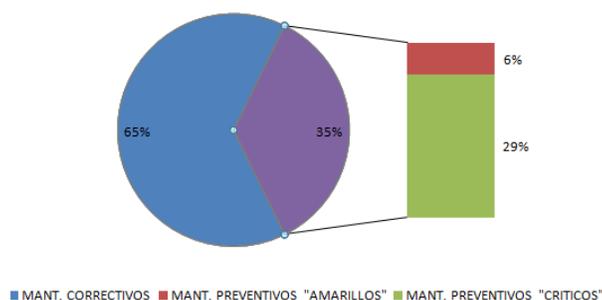


Figura 22-Composición de mantenimientos MILO (actual)

Composición de mantenimientos MILO (modelo)

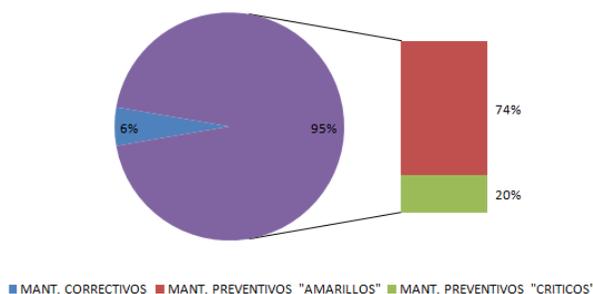


Figura 23-Composición de mantenimientos MILO (modelo)

⁵⁸ Los indicadores para el resto de las líneas se encuentran detallados en el anexo 8.2 (pg. 84-86).

⁵⁹ Para generar mantenimientos correctivos, al no ser planificados, el modelo asigna una probabilidad de que al cargar un día de trabajo el vehículo, se averíe de forma inesperada.

	Milo		Aiolos		Dohko		Shaka	
	Actual	Modelo	Actual	Modelo	Actual	Modelo	Actual	Modelo
MANT. CORRECTIVOS	65%	5%	43%	11%	44%	4%	67%	5%
MANT. PREVENTIVOS	35%	95%	57%	89%	56%	96%	33%	95%
"AMARILLOS"	18%	79%	24%	75%	40%	80%	78%	83%
"CRITICOS"	82%	21%	76%	25%	60%	20%	22%	17%

Tabla 3- Indicadores de composición de mantenimiento

Aquí se puede ver que las mejoras son significativas en todas las líneas de estudio. Si bien existen fluctuaciones en cuanto a los valores obtenidos (propios de las condiciones únicas de cada una al igual que la impredecibilidad de los mantenimientos requeridos)

INDICADORES DE DÍAS LIBRES

Indicadores cumplimiento choferes Indicadores cumplimiento turnos

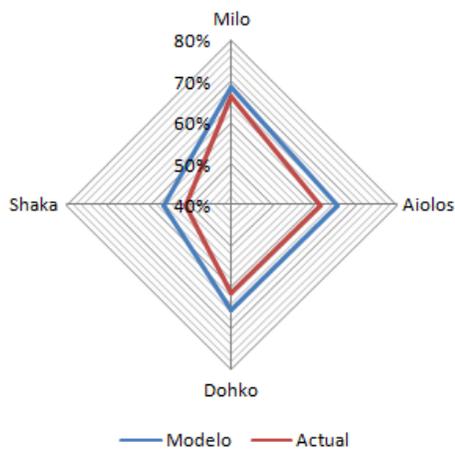


Figura 24-Indicadores cumplimiento choferes

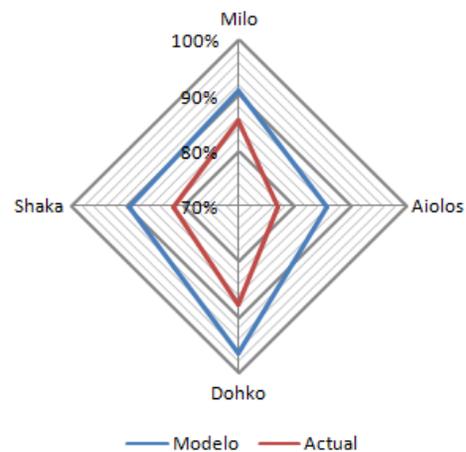


Figura 25-Indicadores cumplimiento turnos

Como muestran las figuras x y z la implementación de la herramienta deparará mejoras de carácter global en la asignación de días libres. Comparando ambas situaciones vemos mejoras en todos los indicadores y líneas lo cual refuerza la potencia de la herramienta generada. Mirando detalladamente los indicadores y los valores obtenidos con la implementación del modelo se pueden apreciar algunas características que merecen ser discutidas. Los indicadores de cumplimiento de turnos

Indicadores cumplimiento francos

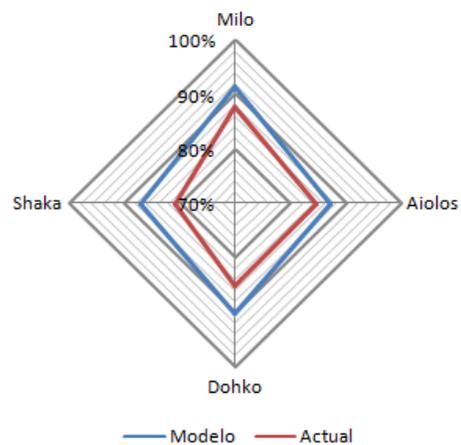


Figura 26- Indicadores cumplimiento francos

y francos presentan niveles de cumplimiento que se encuentran en el 90% pero al evaluar los valores obtenidos en cantidad de choferes los mismos se encuentran en el 60%. Esto podría parecer una incongruencia en los datos puesto que la única diferencia en los mismos es el nivel de agregación en el cual se está evaluando el cumplimiento. La realidad nos muestra que si bien en números totales se generan altos niveles de cumplimiento en francos y turnos, los que no cumplen se encuentran dispersos entre varios choferes. De esta forma logro muy buen performance en los primeros dos indicadores pero a costa del performance de los choferes. Se espera que una utilización regular de la herramienta logre afinar los parámetros de generación de atractivo de cada día logrando así diagramas de días libres con resultados elevados en todos los indicadores. Existe un último indicador a considerar que releva el desvío en la cantidad de días libres asignados para cada tipo de día.

Desvío Acumulado en distribución de Francos

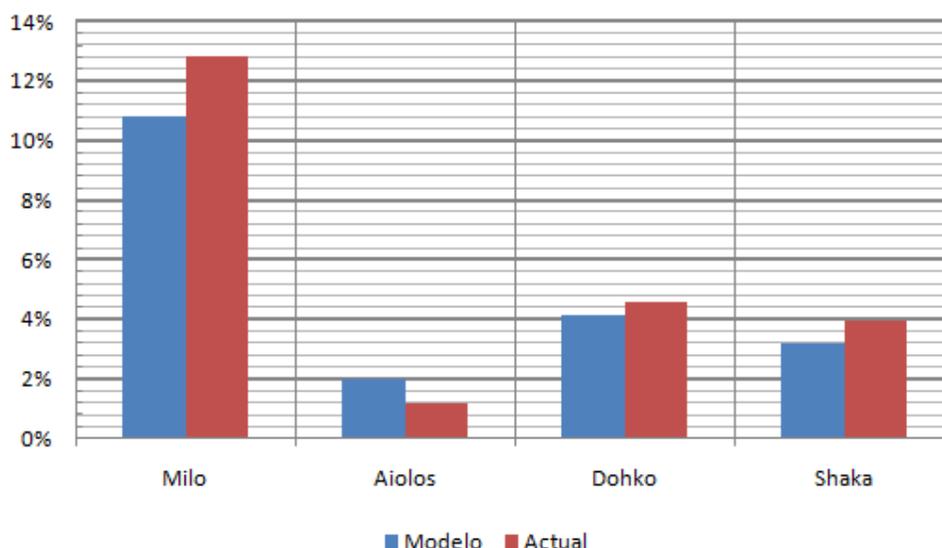


Figura 27-Desvío Acumulado en distribución de Francos

La figura 27 muestra que, en líneas generales hay una mejora respecto de la situación actual. Los resultados en la línea *Aiolos* demuestran que existen mecanismos no considerados en el modelo que atentan contra la mejora a niveles globales y deberán ser estudiados. Al igual que con los anteriores indicadores se espera que una afinación en los parámetros de evaluación y generación de atractivo⁶⁰ podría generar resultados más contundentes y positivos.

⁶⁰ Ver pg. 50

SISTEMA INTEGRAL

Hasta este momento los indicadores evaluados tomaron en consideración aspectos individuales de cada módulo. Como gran conclusión se obtuvo que en cada uno de los módulos la implementación de la herramienta desarrollada presenta resultados, en cantidades diferentes, positivos. Es momento de analizar la integración de estas dos soluciones y evaluar su cumplimiento en cuanto a los objetivos globales del sistema. Recordando los indicadores desarrollados en el apartado anterior se procede a la presentación de los resultados obtenidos:

Cumplimiento de diagramas

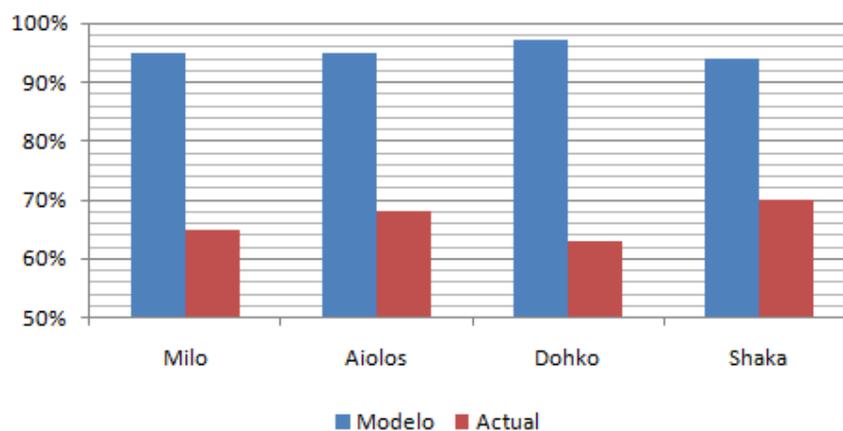


Figura 28-cumplimiento de diagramas

Inicialmente y basándonos en los números presentados en la figura 28, promedio de cumplimiento de 95% por sobre el 67% de la actualidad, podemos concluir que la inclusión de la herramienta integral de planificación aumenta considerablemente el cumplimiento de los diagramas.

Se debe tener en cuenta que, al incorporar el modelo, también estamos variando la modalidad de diagramación. Al poder planificar en avanzado tanto los días libres como las tareas de mantenimiento, la diagramación toma un carácter dinámico. Esto genera que, al incluir nuevas tareas de mantenimiento el diagrama se adaptará a esto, lo cual resulta en una menor carga de requerimientos lo cual genera un aumento de los cumplimientos de diagramas. Por otra parte, la metodología actual presenta una diagramación estática, con requerimientos fijos no adaptables. De esta forma se aumenta el número de incumplimientos. Esta diferencia en metodología es la que origina la tan marcada diferencia en cumplimientos.

Recordará el lector de la sección 3.2 las dificultades que enfrentan los *planners* hoy en para generar las asignaciones de los días libres de cada línea. Teniendo en cuenta los

tamaños de las líneas a evaluar se tardaron los siguientes tiempos en generar las asignaciones tanto de días libres como de tareas de mantenimiento para el periodo en análisis. Según la línea se obtuvieron los tiempos que se presentan en la tabla 4.

	Milo	Aiolos	Dohko	Shaka
TIEMPO TRABAJO (hrs)	15	60	1.5	7

Tabla 4-Tiempos de trabajo por línea

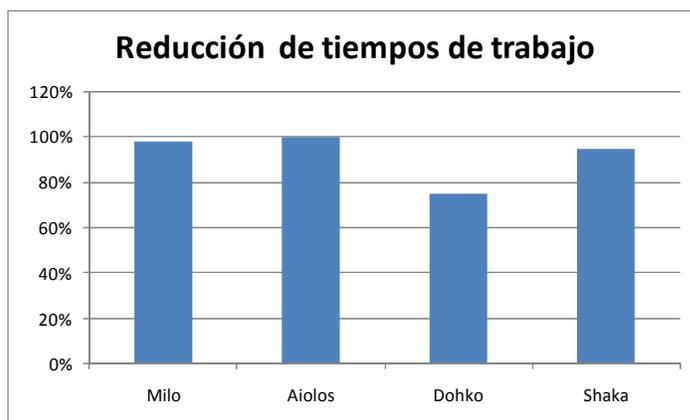


Figura 29 - Reducción en tiempos de trabajo

Al evaluar los tiempos de trabajo al implementar la herramienta desarrollada se debe hacer una distinción respecto de las actividades relacionadas al mismo. La generación propia (al realizarse todo por computadora) toma un tiempo de 5 minutos para las cuatro líneas. A este valor le debemos agregar la preparación necesaria de los datos que servirán de input al sistema. De igual forma se debe incorporar un tiempo de “seteo” de parámetros (donde se definen las características individuales de la línea a asignar) y cualquier eventualidad que pudiese ocurrir en el proceso de carga o exportación de los datos⁶¹. Tras contemplar todos estos factores y correr simulaciones con los *planners* utilizando la herramienta se concluyó que el **tiempo de trabajo** requerido **para las cuatro líneas es de 1.5 hrs.**

Este valor, al tratarse de una herramienta “piloto”, se verá incrementado puesto que los diagramas resultantes deberán ser corregidos manualmente por los mismos *planners*. De esta forma ellos podrán agregar factores que hoy la herramienta no tiene en cuenta (vacaciones siendo uno de ellos) y armar las asignaciones finales.

⁶¹ Al tratarse de un sistema totalmente automatizado un error en la carga implicará un error en la simulación que puede o no ser entendido por el usuario (no se requieren conocimientos de programación informática en los *planners*)

Es aquí donde se releva una de las mayores ventajas del sistema planteado. La reducción de tiempo dedicado a la generación de estas asignaciones se ve, en algunos casos reducido de semanas a horas (con reducciones en tiempos de proceso en promedio del 92%). Este indicador nos da razones más que suficientes para confirmar el logro de uno de los objetivos planteados en la sección 2.4, la automatización del proceso⁶² de asignación de tareas operativas.

El último indicador que nos queda relevar es el que evalúa la capacidad del modelo de integrar las asignaciones de ambas tareas (días libres y mantenimiento). Como se explicó estos indicadores medirán la cantidad de mantenimientos solapados por sobre el total de tareas de mantenimiento posibles de solapar. La figura 29 da cuenta de los resultados obtenidos.

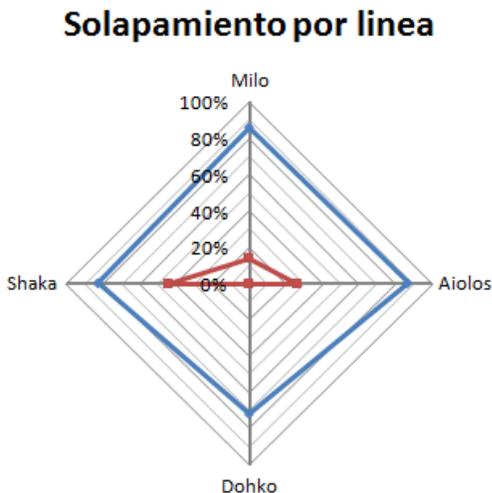


Figura 30- Solapamiento por línea

Sin necesidad de ver los resultados podíamos prever que los valores arrojados por el modelo serían superiores a los de la actualidad. Esto no es algo especulativo sino que responde a analizar los objetivos tanto cargados al modelo como hoy en la compañía. Sumado a la falta de mantenimientos del tipo preventivo que suceden y la desconexión de la planificación de ambas tareas no era esperable un número muy alto de solapamientos. Esto también se comprueba al ver la volatilidad entre los porcentajes de solapamiento en la situación actual en ambos indicadores de todas las líneas.

Remitiéndonos a los números se puede ver una diferencia en el solapamiento de en promedio 60%. Estos resultados nos permiten afirmar que el segundo gran objetivo de este proyecto ha sido cumplido, se logra una asignación integral de las tareas.

⁶²Ver pg. 25

6 CONCLUSIONES

6.1- RECOMENDACIONES DEL PROYECTO

En función de los resultados presentados en el capítulo anterior, se generó una serie de recomendaciones a la compañía asesorada a modo de cierre del proyecto. Las mismas han sido separadas según los objetivos planteados en la definición de la problemática en la sección 3.3.

Como primera gran conclusión se puede confirmar que la herramienta mejora la situación actual. Los resultados muestran que lo hace en todos los frentes pero resulta especialmente importante en los factores de tiempo e integración. Este último punto merece una distinción especial, el modelo no solo optimiza los módulos individuales, reduciendo a su vez el trabajo de los encargados de las diferentes áreas, sino que también logra integrarlos y lograr un grado de optimicidad global.

“Se ha logrado generar una herramienta que, no solo reduce tiempos de trabajo, sino que logra integrar y agregar un análisis de tareas de planificación de áreas que al día de hoy no son tenidas en cuenta”

La recomendación del proyecto es implementar la herramienta y al liberar tiempo de los *planners*, involucrarlos en la mejora continua de la misma. Al final de esta sección se presentan algunas líneas de investigación a tal fin.

Pensando en el desarrollo futuro de la herramienta se hacen las siguientes recomendaciones para cada uno de los pilares del trabajo así como los grupos de gente que los componen.

En lo concerniente a la integración de la planificación de las tareas operativas el desarrollo de este proyecto, si bien no de forma planeada, demostró que uno de los pilares para mejorarla resulta ser una buena comunicación inter departamental. La disociación entre objetivos contrapuestos a nivel de cada sector (asignación de mantenimiento y días libres) no permite obtener resultados óptimos a nivel global. El modelo generado logra aumentar este fenómeno logrando “solapar” los días libres y las tareas de mantenimiento.

La automatización de la planificación, representada por los tiempos de trabajo, se ve claramente cumplida. Estas mejoras en los tiempos ayudaran drásticamente a reducir las tareas de los *planners* y permitirán que los mismos tomen una posición de control y mejora y logren así planificar un mayor horizonte temporal. La contra cara de la herramienta se ve en las particularidades propias de cada línea y cada plantilla de choferes. Para lograr incluir y programar todas las líneas de la compañía será necesario realizar un relevo de las preferencias de cada chofer (en cuanto al atractivo de los días

libres) al igual que las condiciones de los talleres (horarios de trabajo y tiempos de los mismos) y tipos de mantenimiento para la flota de vehículos a analizar. Como primera aproximación a un sistema totalmente automatizado el modelo resulta exitoso pero se deberán tener en cuenta estas variaciones si se desea "escalar" el mismo para incluir a todas las líneas pertenecientes a la empresa.

Como en todo proyecto inicial, las restricciones e hipótesis de simplificación planteadas reducen la comparabilidad de los diagramas generados y pueden llegar a distorsionar los resultados obtenidos. Se deberá tener en claro esto a la hora de implementar el modelo generado en este proyecto ya que existirán tanto diferencias como imprevistos entre lo que se espera de los diagramas y lo que se podrá cumplir. Desde esta óptica la herramienta desarrollada no generará diagramas totalmente finalizados ya que por variaciones en el día a día o incluso limitaciones en las consideraciones de la programación las condiciones dinámicas no harán posible la aplicación de los diagramas aquí generados. Debe pensarse que los diagramas generados aquí estarán apuntados a generar una mejor base para la diagramación siendo la tarea de los *planners* la modificación final (ajuste fino) para adaptarse a las condiciones diarias.

Siguiendo con el tema de los desvíos y fluctuaciones en las condiciones dentro del periodo en análisis (planificación mensual) se ve que el módulo de asignación de mantenimiento presenta una gran fortaleza. Este módulo tiene la capacidad de incorporar, de forma dinámica, eventos inesperados. Corriendo el módulo de forma semanal se podrán obtener planes de tareas de mantenimiento mensuales con actualizaciones semanales tanto en los kms. reales recorridos como en los estados de cada vehículo. De esta forma, roturas inesperadas de los vehículos, podrán ser incorporadas en los diagramas con mínimos esfuerzos de los *planners* e intentando de mantener un alto grado de solapamiento con los días libres.

Como todo desarrollo tecnológico, el uso de la herramienta por personal calificado y con *know-how* de las tareas llevará a mejoras en cuanto a los parámetros y funcionamiento del mismo. No se puede esperar que el estudio de algunos meses supere el trabajo diario durante años de los empleados de planificación. Esto resulta alentador puesto que de darse este proceso de mejora continua e iterativa se logrará fusionar la potencia del cálculo y automatización del modelo computacional con el *expertise* de los empleados de planificación. Esta combinación generará una herramienta de tiempos de trabajo reducido con la capacidad de adaptarse dinámicamente a eventos inesperados.

Se deberá revisitar el tema de optimización de los diferentes módulos una vez en uso la herramienta. La situación de planificación actual obligó a relegar los objetivos de optimización al no poseer una base estable para evaluar la misma. Teniendo implementada la herramienta, la misma servirá como base para evaluar distintas

combinaciones tanto de módulos como de técnicas de optimización. Si bien esto resulta una deuda del proyecto, la misma era esperada ya que se hizo una clara diferenciación cuando se definió el objetivo del proyecto en la sección 3.3.

6.2- EVALUACIÓN DE ÉXITO DEL PROYECTO

Para evaluar el éxito o no de este proyecto deberemos visitar los criterios seleccionados en sección 1.5⁶³. Pese a no haber definido métricas y límites para la determinación del cumplimiento de dichos objetivos, se puede concluir que todos los objetivos fueron, en mayor o menor grado cumplidos.

La elaboración de la tesis deberá generar una evolución en los conocimientos del autor con respecto a la temática analizada. Este objetivo resultará el más importante ya que este trabajo culmina el ciclo de formación académica

Como primer criterio se considera al proyecto exitoso ya que se logró el estudio y aplicación de técnicas de optimización, simulación y modelización. A esta evolución se le deben sumar aspectos relacionados a la interacción con el cliente y la presentación de las soluciones. Esto no debe tomarse a la ligera ya que el aspecto académico nunca puede estar desconectado del aspecto humano y social.

El desarrollo satisfactorio de un modelo que logre cumplir con los objetivos definidos en el trabajo de asesoría. En este punto se evidencia la necesidad de que el proyecto de asesoría sea exitoso, brindándole al cliente una mejora respecto al proceso actualmente utilizado.

Este criterio tendrá dos etapas de cumplimiento. La primera relacionada a las pruebas preliminares realizadas como conclusión de este proyecto. En esta etapa se puede considerar exitosa la herramienta desarrollada. Esto se ve reflejado en los resultados presentados en el trabajo al igual que la sensación que se obtuvo de los *planners* con los cuales se ha estado trabajando en el equipo de desarrollo del proyecto. La segunda etapa, y la que definirá la utilización o no de la herramienta (indicando el verdadero éxito o no de la solución) estará ligado a los meses de uso posteriores a la finalización del proyecto de asesoría. Será entonces cuando los *planners* utilicen de forma independiente la herramienta y se vean los verdaderos resultados del mismo.

Brindar un estudio que nutra a la comunidad académica Argentina y sirva como punto de partida para futuros estudios en la temática elegida.

Se considera, desde una posición humilde, que el proyecto ha aportado un enfoque interesante e innovador en la diagramación de las tareas aquí analizadas. Se logró

⁶³Ver pg. 4

combinar heurísticas de optimización, de probado funcionamiento y validez, de forma innovadora y en problemáticas de tanto de industrias como de áreas no antes exploradas con este enfoque.

El verdadero éxito en este criterio vendrá si este trabajo sirve como un disparador de pensamiento que actúe como punto de arranque en el desarrollo de mejoras a esta herramienta o nuevas soluciones para el problema de la planificación operativa.

6.3- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Con el último criterio de éxito en mente y a forma de cierre de este proyecto se ha decidido incluir una serie de líneas de investigación que apunten a continuar generando conocimiento y “piedras de apoyo” en materia de conocimiento de las temáticas tratadas. Esta no es bajo ningún criterio una lista exhaustiva sino que apunta a disparar la creatividad y curiosidad del lector que decida continuar esta senda de estudio.

Enfoque totalmente integrado de planificación

Uno de los objetivos del trabajo fue la integración de las tareas de planificación operativa. Extendiendo este concepto se deja planteada la necesidad de integrar de forma global a todas las tareas de planificación. Esto incluiría desde la definición de los recorridos y líneas, frecuencias de trabajo hasta asignación de días libres. Este trabajo es prueba de la potencia del enfoque integral en la resolución de problemas y la abolición del “divide y conquistarás”. No cabe duda que el incluir a todos los agentes y objetivos involucrados, sin importar la industria o problemática a resolver, solo puede resultar en soluciones más equitativas y globalmente óptimas.

Se lograría así convertir las, hoy en día, restricciones de requerimientos diarios en un problema de maximización de ganancias.

Evolución en sistema de subasta

Existen una infinidad de mejoras en cuanto al desarrollo de las soluciones planteadas en cada uno de los módulos. Aquí se dan una serie de mejoras a evaluar, algunas de carácter operacional y otras de mayor profundidad, apuntadas a obtener mejores resultados que los presentados en este trabajo:

- Ofertas anticipadas: Permitir que los mediadores generen órdenes antes de que las mismas sean necesarias.
- Variación de tiempos de decisión tanto en las ofertas como en las decisiones de ganadores.
- Permitir la cancelación de órdenes.
- Aplicación de teoría de juegos en agente.

- Cooperación entre fosas (colusión).
- Introducir prioridades para las distintas tareas.

Evaluación de métodos de optimización

Las prioridades de este proyecto sumadas a las limitaciones de tiempo no permitieron realizar un estudio más detallado de los aspectos de optimización de cada problema. Tomando los resultados obtenidos en este proyecto como base de comparación se podrían desarrollar herramientas más apuntadas a la optimización de los recursos de los talleres al igual que de los choferes. De la investigación realizada por el autor se recomienda presentar especial atención a los métodos conocidos como “biomímica” en los cuales se tratan de implementar herramientas de optimización encontradas en la naturaleza para resolver problemas humanos. Uno de los mejores ejemplos involucra el algoritmo de hormigas, algoritmos genéticos y algoritmos de abejas.

7 BIBLIOGRAFÍA

1. *Computer Aided Transit scheduling*. **Daduna, Joachim R. and Wren, Anthony, [ed.]**. Hamburg : Springer-Verlag, 1988. Fourth International Workshop on Computer-Aided Scheduling of Public Transport.
2. *An Excursion in Scheduling theory: an overview of scheduling research in the twentieth century*. **N.D.Gupta, Jatinder**. 2, s.l. : Taylor & Francis Group, 2002, Production Planning & Control , Vol. 13, págs. 105-116.
3. **Torrance, Kristen, Haire, Ashley R. and Machemehl, Randy B.***Vehicle and Driver Scheduling for Public Transit*. Center for Transportation Research, University of Texas at Austin. Austin : s.n., 2009.
4. *Heuristics Ancient and Modern: Transport Scheduling through the Ages*. **Wren, Anthony**. Leeds : Kluwer Academic Publishers, 1998, Journal of Heuristics, Vol. 4, pp. 87-100.
5. **Iles, Richard.***Public Transport in Developing Countries*. s.l. : Elsevier, 2005. pp. 178-202.
6. *From System Dynamics to Discrete Event to Practical Agent Based Modeling:Reason,Techniques,Tools*. **Borshchev, Andrei and Filippov, Alexei**. Oxford : s.n., 2004. The 22nd International Conference of the System Dynamics Society.
7. *Industrial Dynamics: A major Breakthrough for Desicion Makers*. **Forrester, Jay**. 4, Boston : s.n., 1958, Harvard Business Review, Vol. 36, pp. 37-66.
8. **Forrester, Jay.***Industrial Dynamics*. Cambridge : MIT Press, 1961.
9. *Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas*. **Izquierdo, Luis R., et al**. 16, s.l. : EMPIRIA, 2008, Revista de Metodología de Ciencias Sociales, pp. 85-112. 1139-573.
10. *Modeling the Forest or Modeling the Trees-A comparison of System Dynamics and Agent-Based Simulation*. **Schieritz, Nadine and Milling, Peter**. New York : s.n., 2003. The 21st International Conference of the system Dynamics society.
11. *Tutorial on Agent-Based Modelling and Simulation part 2:How to Model with Agents*. **Macal, Charles M and North, Michael J.** [ed.] L. F. Perrone, et al. Argonne : s.n., 2006. Winter Simulation Conference.

12. *Stochastic Greedy Search: Efficiently Computing a Most Probable Explanation in Bayesian Networks*. **Wilkins, D. C., Roth, D. and Mengshoel, O. J.** Champaign : University of Illinois at Urbana, 2000.
13. *Bus maintenance scheduling using multi-agent systems*. **Zhou, R., et al.** 6, 2004, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 17, pp. 623-630.
14. *Dynamic Models of Segregation*. **Schellin, Thomas C.** 1, Journal of Mathematical Sociology, pp. 143-186.
15. *Evaluacion de Alternativas para Programacion del la Produccion*. **Carabba, Alejandro N.** Buenos Aires : Instituto Tecnologico de Buenos Aires, 2009, pp. 12-24.
16. *Phase diagram of a Schelling segregation model*. **Gauvin, L., Vannimenus, J. and Nadal, J.P.** 2, July 2009, The European Physical Journal B, Vol. 70, pp. 293-304 .
17. *Complexity Theory*. **Johan, Hastad.** Stockholm : s.n., 2009.
18. *Some Notes on Johnsons's Algorithm For Scheduling*. **Jonena, A.** Hong Kong : University of Science and Technology-School of engineering.
19. **Winston, W.** *Investigacion de Operaciones*. s.l. : Editorial Sengage, 2004. 9706863621.

8 ANEXOS

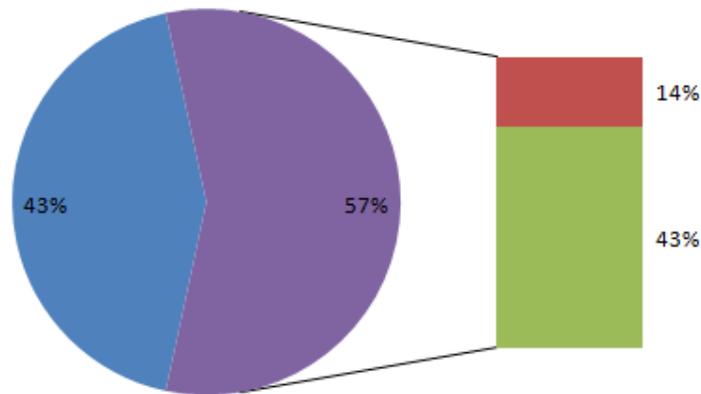
8.1- TABLA DE DATOS BASE

MES A 2010	Milo		Atoles		Dohiko		Shaka	
	Actual	Modelo	Actual	Modelo	Actual	Modelo	Actual	Modelo
LINEA	46	52	15	41	26	78	2080	488
VEHICULOS	92	104	612	156				
CHOFERES	2394	3095						
TURNOS TOTAL	552	624						
FRANCOS TOTAL								
ROTACION (días)	20	24	23	23	22	25	19	24
SOBRETREBAJO (días total flota)	468	73	526	53	117	6	447	27
MANTENIMIENTOS	62	74	74	76	18	26	27	37
MANT. CORRECTIVOS	40	4	32	8	8	1	18	2
MANT. PREVENTIVOS "AMARILLOS"	4	55	10	51	4	20	7	29
MANT. PREVENTIVOS "CRITICOS"	18	15	32	17	6	5	2	6
CUMPLIMIENTO DIAGRAMAS	65%	95%	68%	95%	63%	97%	70%	94%
TIEMPO TRABAJO (hrs)	15	1.5	60	0.375	1.5	0.375	7	0.375
SOLAPAMIENTO (mant que coinciden)	3	60	11	59	0	18	4	29
CHOFERES QUE CUMPLEN	61	63	64	68	16	17	40	44
TURNOS QUE CUMPLEN	2045	2175	2309	2501	537	591	1701	1869
FRANCOS QUE CUMPLEN	485	505	528	544	133	141	279	408
DESVIO	13%	11%	2%	1%	5%	4%	4%	3%
ITERACIONES NECESARIAS PARA MAX		2843		2136		502		992

Tabla 5- Tabla de datos base

8.2- COMPOSICIONES DE MANTENIMIENTO

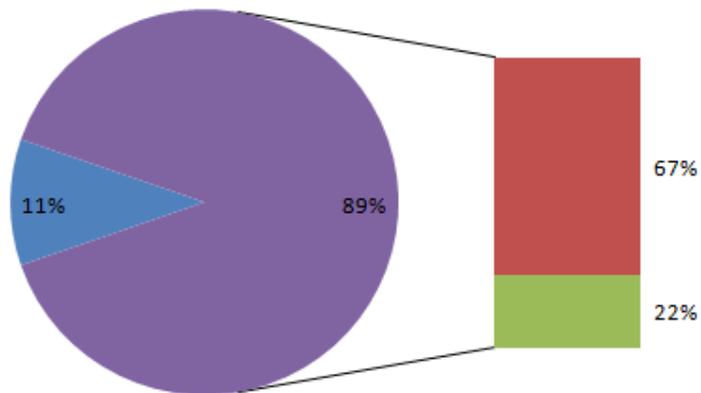
Composición de mantenimientos AIOLOS (actual)



■ MANT. CORRECTIVOS ■ MANT. PREVENTIVOS "AMARILLOS" ■ MANT. PREVENTIVOS "CRITICOS"

Figura 31-Composición de mantenimientos AIOLOS (actual)

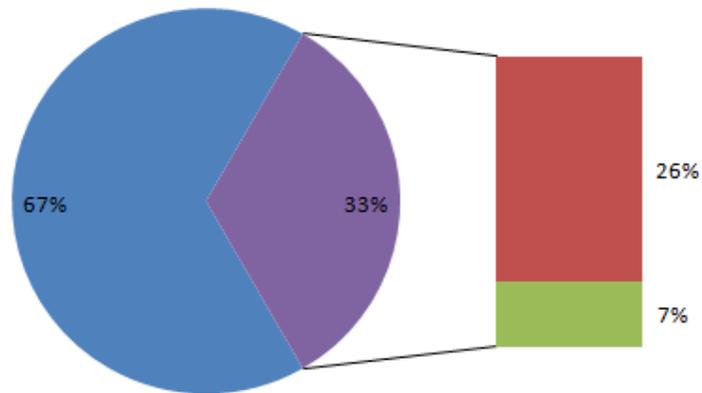
Composición de mantenimientos AIOLOS (modelo)



■ MANT. CORRECTIVOS ■ MANT. PREVENTIVOS "AMARILLOS" ■ MANT. PREVENTIVOS "CRITICOS"

Figura 32- Composición de mantenimientos AIOLOS (modelo)

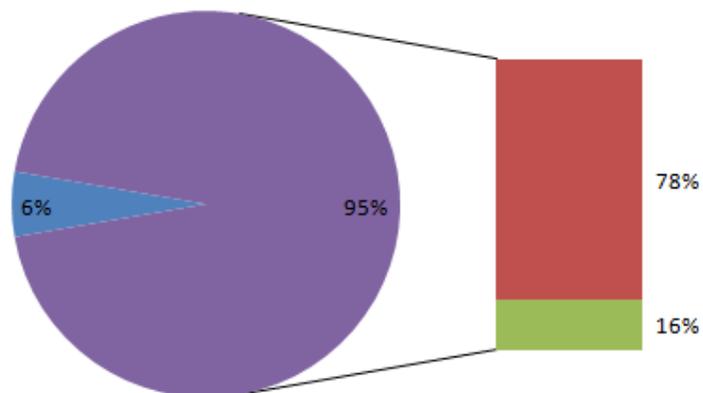
Composición de mantenimientos SHAKA (actual)



■ MANT. CORRECTIVOS ■ MANT. PREVENTIVOS "AMARILLOS" ■ MANT. PREVENTIVOS "CRITICOS"

Figura 33- Composición de mantenimientos SHAKA (actual)

Composición de mantenimientos SHAKA (modelo)



■ MANT. CORRECTIVOS ■ MANT. PREVENTIVOS "AMARILLOS" ■ MANT. PREVENTIVOS "CRITICOS"

Figura 34- Composición de mantenimientos SHAKA (modelo)

Composición de mantenimientos DOHKO (actual)

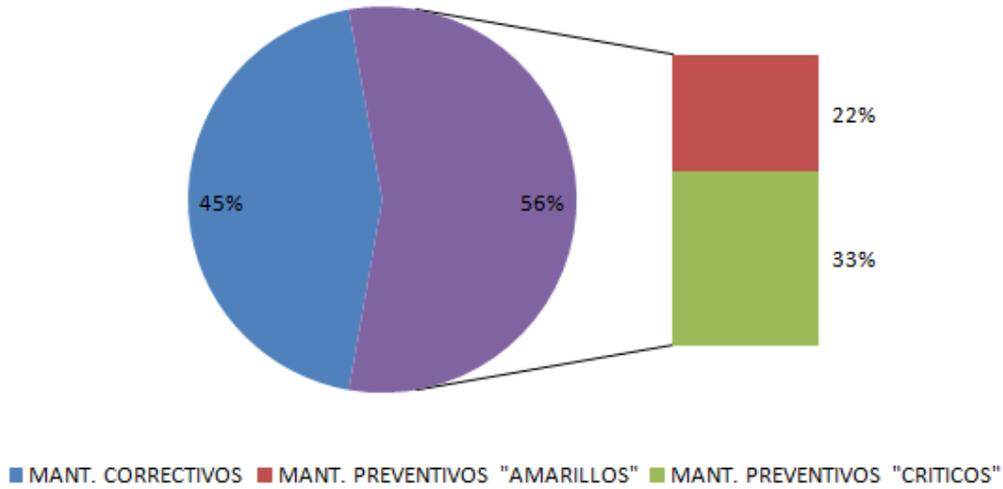


Figura 35- Composición de mantenimientos DOHKO (actual)

Composición de mantenimientos DOHKO (modelo)

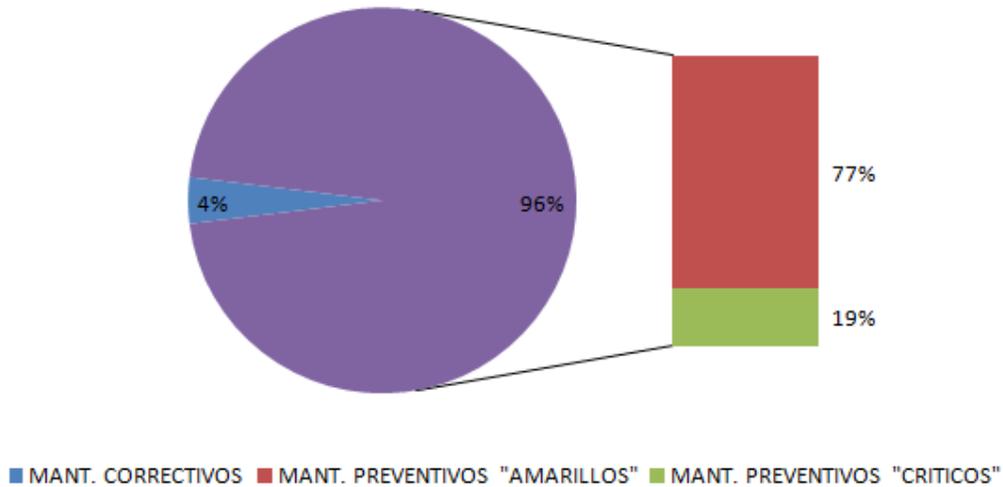


Figura 36- Composición de mantenimientos DOHKO (modelo)