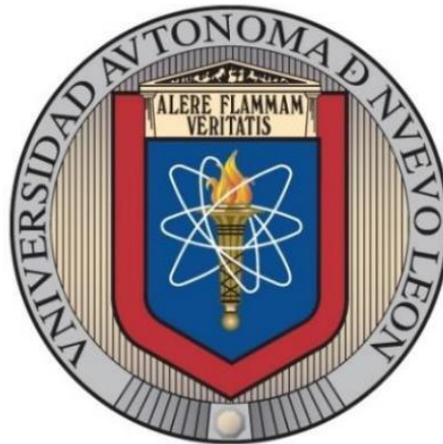


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



TESIS

**ASIGNACIÓN DE VEHÍCULOS Y CHOFERES CON
CRITERIOS DE CALIDAD**

**POR
FRANCISCO GERARDO MEZA FIERRO**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA DE SISTEMAS**

OCTUBRE, 2019

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



TESIS

**ASIGNACIÓN DE VEHÍCULOS Y CHOFERES CON
CRITERIOS DE CALIDAD**

**POR
FRANCISCO GERARDO MEZA FIERRO**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA DE SISTEMAS**

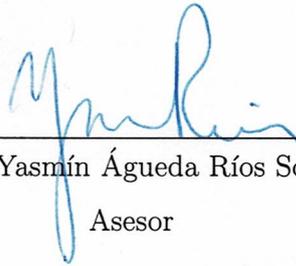
SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN, MÉXICO

OCTUBRE 2019

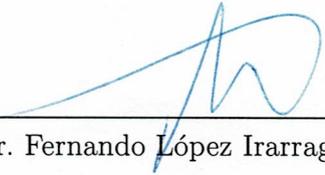
Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Subdirector de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Asignación de vehículos y choferes con criterios de calidad», realizada por el alumno Francisco Gerardo Meza Fierro, con número de matrícula 1607312, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

El Comité de Tesis



Dra. Yasmín Águeda Ríos Solís
Asesor

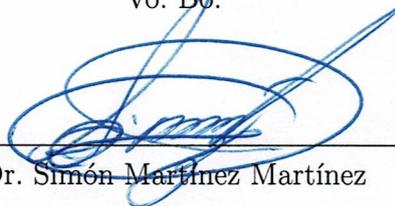


Dr. Fernando López Irarragorri
Revisor



Dr. Omar Jorge Ibarra Rojas
Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, octubre 2019

A mis padres
Irene y Silverio

A mi hermano
Silverio

A mi novia
Beatriz

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	XI
Resumen	XIII
1. Introducción	1
1.1. Justificación	2
1.2. Objetivo	3
1.3. Hipótesis	3
1.4. Estructura de la Tesis	4
2. Antecedentes	5
2.1. Toma de Decisiones con Criterios Múltiples	5
2.2. Método ELECTRE	6
2.2.1. ELECTRE TRI	8
2.3. Aplicación del Método ELECTRE TRI	9
2.3.1. Ejemplo, Funcionamiento y Utilidad del Software	10
2.4. Problema de Asignación Flexible de Choferes y Vehículos AFCV	14

2.4.1. Modelo matemático para el AFCV	16
3. Incluyendo la Calidad en la Toma de Decisiones	21
3.1. Descripción de los Datos Relacionada con la Calidad	21
3.2. Nueva Función Objetivo que Incluye Calidad	24
3.2.1. Generación de Datos para la Experimentación	27
4. Resultados Computacionales	34
Instancia 1	35
Instancia 2	39
5. Conclusiones y Trabajo Futuro	45
5.1. Conclusiones	45
5.2. Trabajo Futuro	46
Bibliografía	47

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Visualización de la pantalla con una matriz creada para 3 clases, 3 alternativas y 5 criterios.	11
2.2. Solución para el ejemplo.	12
2.3. Solución factible para tres líneas: líneas azul, verde y naranja. Para cada tabla, la primera línea corresponde a la etiqueta de los viajes, la segunda (TT) es el horario de cada viaje, la tercera línea (VSP) es la programación del vehículo que une un viaje con un vehículo, y la última línea (CSP) es la programación del conductor que vincula a un conductor con un vehículo y un viaje [3].	15
3.1. Datos relacionados con la calidad de los choferes de una empresa de transporte.	22
3.2. Datos relacionados con la calidad de los vehículos de una empresa de transporte.	23
3.3. Datos relacionados con la importancia de los viajes de una empresa de transporte con respecto al tiempo de viaje o la demanda de usuarios.	23
4.1. Asignación de viajes para choferes con objetivo de mejora de calidad, instancia 1.	36

4.2. Asignación de viajes para camiones con objetivo de mejora de calidad, instancia 1.	37
4.3. Asignación de viajes para choferes con objetivo de minimización de costos, instancia 1.	38
4.4. Asignación de viajes para camiones con objetivo de minimización de costos, instancia 1.	39
4.5. Asignación de viajes para choferes con objetivo de mejora de calidad, instancia 2.	40
4.6. Asignación de viajes para camiones con objetivo de mejora de calidad, instancia 2.	41
4.7. Asignación de viajes para choferes con objetivo de minimización de costos, instancia 2.	42
4.8. Asignación de viajes para camiones con objetivo de minimización de costos, instancia 2.	42

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Datos del ejemplo de Mousseau [18].	10
2.2. Clasificación de las alternativas en el ejemplo.	12
3.1. Ponderación para las clasificaciones.	25
3.2. Datos generados para 16 choferes/camiones.	28
3.3. Clasificación para 16 choferes/camiones.	29
3.4. Datos generados para 14 choferes.	30
3.5. Clasificación para 14 choferes.	31
3.6. Datos generados para 13 camiones.	32
3.7. Clasificación para 13 camiones.	33
4.1. Horario de viajes para la línea azul con objetivo de mejora de calidad, instancia 1.	35
4.2. Horario de viajes para la línea naranja con objetivo de mejora de calidad, instancia 1.	36
4.3. Horario de viajes para la línea azul con objetivo de minimización de costos, instancia 1.	37

4.4. Horario de viajes para la línea naranja con objetivo de minimización de costos, instancia 1.	38
4.5. Horario de viajes para la línea azul con objetivo de mejora de calidad, instancia 2.	39
4.6. Horario de viajes para la línea naranja con objetivo de mejora de calidad, instancia 2.	40
4.7. Horario de viajes para la línea azul con objetivo de minimización de costos, instancia 2.	41
4.8. Horario de viajes para la línea naranja con objetivo de minimización de costos, instancia 2.	41

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mis padres Irene Fierro Rosales y Silverio Isaac Meza Muñíz. Solo ustedes saben lo mucho que han sacrificado y lo mucho que nos han dado a mí y a mi hermano para poder llegar hasta donde estamos. Pero más aún, les agradezco el apoyo incondicional que siempre nos han brindado pese a cualquier situación o problema, ya sea bueno o malo. Aunque no siempre todo sea color de rosa, sé que siempre podrán contar ustedes conmigo y yo con ustedes.

Agradezco a mi hermano Silverio Isaac Meza Fierro. En muy pocas ocasiones te he comentado la gran fuente de inspiración que tú representas en mi vida. Fuiste la indirecta y enorme causa de que haya estudiado Matemáticas y, prácticamente sin eso, seguramente no estaría ahora presentado esta tesis. No sé, tal vez esté ahora más cerca del “player uno”.

Agradezco también a mi novia Beatriz Alejandra García Ramos. Contigo encontré más que una amiga y una compañera. Tú mejor que nadie sabe cuánto trabajo me costó hacer este trabajo. Gracias por tu ayuda y tu paciencia, por tu apoyo cuando lo necesité y sobre todo por ser mi “patito de hule”.

Agradezco a mis amigos y compañeros de PISIS por su amistad, su compañerismo y por esos momentos de distracción y desestrés porque entendemos bien que no todo es trabajo ni tampoco todo es relaxo.

Agradezco enormemente a la Dra. Yasmín Águeda Ríos Solís por la oportunidad de formar parte de su grupo de trabajo, por sus consejos, lecciones, disponibili-

dad, por su inagotable paciencia, por su comprensión y empatía. Sé que no fue una tarea fácil para ambos realizar este trabajo estando a un continente de distancia, pero aquí está demostrado que imposible no fue.

Agradezco al Dr. Fernando López y al Dr. Omar Jorge Ibarra por haberse tomado el tiempo de guiarme y por ser parte de mi comité de tesis de maestría.

Agradezco a la Universidad Autónoma de Nuevo León, a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y al Posgrado en Ingeniería de Sistemas por sus instalaciones y el equipo suficiente y necesario para realizar tanto mis estudios como el presente trabajo; asimismo agradezco a todos los doctores que forman parte del cuerpo académico responsable de mis asignaturas y estudios, gracias por sus clases y sus enseñanzas.

Por último y no menos importante, agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo de la beca. Seguro que no soy el primero ni el último en agradecerles por eso.

RESUMEN

Lic. Francisco Gerardo Meza Fierro.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

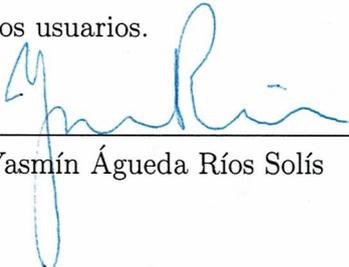
Título del estudio: ASIGNACIÓN DE VEHÍCULOS Y CHOFERES CON CRITERIOS DE CALIDAD.

Número de páginas: 49.

OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO: El objetivo de esta investigación es proponer una nueva y buena solución al conocido problema de transporte público. La metodología de solución que proponemos consiste en un código en C++ vinculado con el optimizador de *Gurobi*.

CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES: La principal contribución de esta investigación es una asignación eficiente entre choferes, vehículos y viajes de manera que cubran todos los viajes diarios de una red de transporte público mejorando la calidad del servicio brindado hacia los usuarios.

Firma del asesor: _____


Dra. Yasmín Águeda Ríos Solís

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Esta tesis aborda el problema de la programación de vehículos y choferes que enfrentan las agencias de transporte de autobuses urbanos de manera a incluir criterios de calidad en la toma de decisiones. Se tienen que asignar los recursos de la empresa (vehículos y conductores) para cubrir los horarios generados a nivel táctico pero de manera a ofrecer un mejor servicio para el usuario.

Para este problema tomamos en cuenta las características del vehículo, la disponibilidad y amabilidad del conductor de cada línea además de las normas laborales, es decir, los conductores tienen una jornada de trabajo limitada, descansos obligatorios y horas extra limitadas. Además, el tiempo de inicio del turno de los conductores no se fija a priori, por lo tanto, se requiere flexibilidad para calcular las jornadas de los conductores, pero también es necesario considerar que el número disponible de conductores y vehículos cambia casi todos los días.

Nos basamos en un modelo de programación lineal entero mixto y al introducir características cualitativas y cuantitativas de los choferes, vehículos y viajes en un método de clasificación multicriterio, modificamos la función objetivo para obtener mejor calidad para el usuario sin mermar los costos operativos de la empresa de transporte urbano.

1.1 JUSTIFICACIÓN

A nivel operativo del proceso de planificación del transporte, las agencias de autobuses urbanos tienen que asignar sus principales recursos (vehículos y conductores) para cubrir los horarios (TT, “timetabling” en inglés) generados a nivel táctico. Esta asignación se descompone en dos subproblemas conocidos como el problema de programación del vehículo (VSP, “vehicle scheduling problem” en inglés) y el problema de programación de los choferes (CSP, “crew scheduling problem” en inglés). En general, el objetivo es minimizar los costos operativos en términos del uso de los vehículos y el salario de los conductores, mientras se satisfacen las restricciones operativas para los vehículos y las regulaciones laborales para los conductores. Es aquí en donde en esta tesis, incluimos en la función objetivo, características de calidad de manera a poder ofrecer un mejor servicio al cliente.

En particular, el VSP define el conjunto de viajes que debe cubrir cada vehículo y el CSP define los viajes diarios que se le asignan a un conductor específico. El VSP y el CSP son problemas NP-difíciles por lo que un enfoque secuencial para resolver estos problemas conduce a soluciones subóptimas. Por esa razón, los enfoques integrados, como el que se presenta en esta tesis, han sido considerado en la literatura [2, 11, 24].

En muchos países en desarrollo, las decisiones del VSP y CSP deben tomarse todas las semanas (o incluso todos los días) ya que la flota de vehículos y los conductores disponibles cambian drásticamente con el tiempo. En Monterrey, México, hasta el 10 % de la flota de vehículos puede tener incidentes en un día dado: averías, mantenimiento, accidentes o robos. Además, la cantidad de conductores disponibles también varía de un día a otro: los bajos salarios generan rotación, los conductores generalmente son contratados por semana y otras razones culturales (por ejemplo, después del día de pago, hasta el 30 % de los conductores no se presentarán o no pasarán la prueba del alcoholímetro) [3].

1.2 OBJETIVO

No es común ni trivial considerar las asignaciones de vehículo-viaje, conductor-viaje y conductor-vehículo, junto con las decisiones clásicas de programación. Además, en esta tesis incluimos características cualitativas y cuantitativas de los conductores, vehículos y viajes, para generar un modelo matemático que considere calidad para el usuario. Dado que no consideramos estructuras de servicio fijo, el tiempo de inicio de los turnos y la asignación de descansos también son parte de la decisión. Entonces, nuestros principales objetivos son los siguientes:

- Identificar las características particulares de los choferes, vehículos y viajes que pueden influir en una nueva solución de la asignación de dichos recursos. Se usa un método de clasificación multicriterio para obtener parámetros significativos.
- Definición de una nueva función objetivo que tome en cuenta la clasificación obtenida de las características específicas de los choferes, vehículos y viajes.
- Validación de nuestra clasificación y de la nueva función objetivo en dos instancias.

1.3 HIPÓTESIS

Mediante la inclusión de características cuantitativas y cualitativas clasificadas por métodos de clasificación multicriterio, se enriquecen los modelos matemáticos de la asignación flexible de choferes, vehículos y viajes.

1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS

En el segundo capítulo presentamos los antecedentes de esta tesis que contemplan una breve introducción a los métodos de clasificación multicriterio que usamos para este trabajo, en particular el ELECTRE TRI.

En el capítulo 2 mostramos nuestras principales aportaciones en donde incluimos la manera en la que incluimos la calidad en el modelo matemático de la asignación flexible de choferes y vehículos.

En el capítulo 3, se muestran dos instancias en donde comparamos el modelo de la literatura contra el modelo que nosotros modificamos para mostrar que sí tiene relevancia incluir la calidad.

Finalmente, en el capítulo 4 presentamos las conclusiones y el trabajo futuro de esta tesis.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

La metodología usada para resolver este problema fue mediante la implementación de una nueva función objetivo a un modelo matemático propuesto y el uso de un método de clasificación y ordenamiento que agrupa a los choferes y camiones en distintas clases para, en base a esa agrupación, ser asignados a los viajes que se deben cubrir en el día.

2.1 TOMA DE DECISIONES CON CRITERIOS MÚLTIPLES

La toma de decisiones con criterios múltiples, conocido como *MCDM* por sus siglas en inglés, es una herramienta que es usada en el área de investigación de operaciones para facilitar la resolución de problemas que se caracterizan por tener diferentes alternativas que pueden ser elegibles para la solución de los mismos; a su vez, dichas alternativas pueden presentar ciertas propiedades, llamadas criterios, que influyen en la decisión de elegir o no esa alternativa para solucionar el problema. Las alternativas y criterios que tiene un problema pueden llegar a ser contradictorios entre ellos, por lo que decidir por una alternativa o criterio se vuelve una tarea complicada; además, por lo general, no existe una única solución óptima.

Dicho de otra manera, estos problemas involucran varias alternativas de entre las cuales se escoge una y la manera de elegirla de entre las otras es comparándolas con base a ciertos atributos o criterios con los que se van a evaluar y para cada uno de estos criterios se establece un peso de importancia.

El proceso de la toma de decisión está conformado por las siguientes etapas: inteligencia, diseño, selección o elección e implementación [17]. La solución a este tipo de problemas de optimización multicriterio no solo depende de los datos involucrados en la evaluación sino también de la subjetividad del tomador de decisiones, misma que refleja sus preferencias que en definitiva son las que se incorporan a los modelos [4].

Los problemas de decisión se clasifican según la naturaleza de las consecuencias asociadas a las alternativas: decisión bajo certeza, decisión bajo incertidumbre y decisión bajo estricta incertidumbre. También influyen la cardinalidad del conjunto de alternativas, si son finitas, numerables, infinitas. Además, se tienen que tomar en cuenta las operaciones que se realizarán sobre las alternativas. Las más frecuentes son la jerarquización, la selección y la clasificación (más detalles en [23]).

En esta tesis consideramos un problema multicriterio bajo certeza con un conjunto numerable de alternativas. Usaremos la clasificación como herramienta para introducir los criterios de calidad en los problemas de transporte urbano. La dificultad de este tipo de problemas no proviene del hecho de que la solución del mismo pueda interpretarse de distintas maneras, sino de la presencia de más de un criterio que las alternativas puedan tener. Para ello, se han desarrollado distintos métodos para resolver esta problemática. Uno de ellos se describe a continuación.

2.2 MÉTODO ELECTRE

ELECTRE, acrónimo de *ELimination Et Choix Traduisant la REalité*, es una familia de métodos de análisis de decisiones con criterios múltiples cuyos orígenes

se remontan al año de 1965 y que, desde entonces hasta el día de hoy, se ha estado trabajando y mejorando en cada una de sus versiones.

Este método evalúa las ventajas y desventajas entre las alternativas en cada criterio y las jerarquiza en orden de preferencias, es decir, de la mejor a la peor. Este método fue creado por B. Roy en 1969 [9] y desde entonces se ha modificado varias veces. Es un método comparativo de alternativas que se basa en operaciones efectuadas en tablas o matrices, a partir de las calificaciones en los criterios de cada alternativa.

A continuación se muestran de manera sintetizada los diferentes problemas que abordan cada una de las versiones de ELECTRE. Se muestran en orden problemático y cronológico. Cabe señalar que el objetivo de el presente trabajo no es presentar todas y cada una de las versiones de ELECTRE, de manera que los detalles de las mismas serán omitidas, sin embargo, se pueden consultar las referencias citadas anteriormente para encontrar información precisa sobre las mismas [9].

- **Problema de elección:** el objetivo de esta problemática consiste en ayudar a los tomadores de decisión a seleccionar un subconjunto de acciones, lo más pequeño posible, de manera que, con éstas, pueda al final elegir una sola alternativa.
 - Versiones de ELECTRE que abordan este problema:
 - ELECTRE I
 - ELECTRE IV
 - ELECTRE IS

- **Problema de clasificación:** esta problemática considera una clasificación de todas las alternativas, de la mejor a la peor, dando como resultado un orden completo o parcial del conjunto de alternativas, después de compararlas entre sí.
 - Versiones de ELECTRE que abordan este problema:

- ELECTRE II
 - ELECTRE III
 - ELECTRE IV
- **Problema de ordenamiento:** para esta problemática se debe definir primero un conjunto de categorías. Cada alternativa se considera independiente de las demás para poder determinar a qué categoría sería justo asignarla. Estos resultados se expresan de la forma de *asignado* o *no asignado* a una categoría, *similar* o *no similar* a un perfil de referencia, *adecuado* o *no adecuado* a alguna norma, etcétera. En otras palabras, esta problemática consiste en asignar cada alternativa a una de las categorías predefinidas por alguna norma, donde la asignación de alguna alternativa a una categoría no influye en la asignación de otra alternativa a la misma u otra categoría.
- Versiones de ELECTRE que abordan este problema:
 - ELECTRE TRI

Hasta el día de hoy, se han creado extensiones del método ELECTRE TRI, tales como ELECTRE TRI-B, ELECTRE TRI-C y ELECTRE TRI-nC, pero éstos pueden considerarse como casos particulares del método ELECTRE-TRI.

2.2.1 ELECTRE TRI

El software ELECTRE TRI, escrito para Windows en C ++, fue desarrollado conjuntamente por LAMSADE en la Universidad de París-Dauphine, Francia, y el Instituto de Informática de la Universidad Tecnológica de Poznan, Polonia. ELECTRE TRI clasifica las alternativas utilizando alternativas de referencia y relaciones superiores. Se proporcionan dos procedimientos de clasificación (pesimista y optimista) para tratar situaciones en las que las alternativas específicas son incomparables con algunas alternativas de referencia. [8].

En la sección 2.3 se muestra un ejemplo que explica el funcionamiento de este método y se explica la razón por la que el empleo de este método resultó ser de gran utilidad para nuestro problema.

2.3 APLICACIÓN DEL MÉTODO ELECTRE TRI

En esta sección se muestra un ejemplo para enseñar el funcionamiento del método ELECTRE TRI con los datos que se tendrán relacionados con los choferes, los vehículos y los viajes de cada línea (ver sección 3.1). Cabe aclarar que, para la fecha en que se realizó este trabajo, el software original u oficial que se encontraba en la página de la LAMSADE [1] ya no estaba disponible. El software utilizado, entonces, es una aplicación llamada *J-Electre-v1.0* publicada por Valdecy Pereira, profesor de la Universidad Federal Fluminense en la ciudad de Niterói, Brasil [20, 22]. El software fue creado para poder resolver problemas desde el ELECTRE I hasta el ELECTRE TRI-ME. Pero dado que el método usado para la resolución de nuestro problema fue el ELECTRE TRI, solo se hablará de éste. Más detalles en [20].

La aplicación J-Electre-v1.0 cuenta con un pequeño menú de selección donde se le permite al usuario seleccionar alguna de las versiones de ELECTRE mencionadas previamente. Para nuestro problema usaremos ELECTRE TRI.

Pereira cuenta con toda una documentación completa tanto del funcionamiento del método como de la aplicación [21], pero reiteramos que el propósito de nuestro problema no es dar a conocer el funcionamiento del método ELECTRE sino de su utilidad para la resolución de nuestro problema. Para ello se muestra un pequeño ejemplo a continuación.

2.3.1 EJEMPLO, FUNCIONAMIENTO Y UTILIDAD DEL SOFTWARE

El siguiente ejemplo propuesto por Mousseau [18] será de gran utilidad para mostrar cómo funciona la aplicación. Este ejemplo cuenta con 5 criterios, 3 clases y 3 alternativas.

La tabla 2.1 muestra los datos que se usarán para el ejemplo mencionado, donde las g_n representan los criterios, las b_n representan las clases, las a_n representan las alternativas y los renglones Q , P , V y W representan respectivamente la preferencia débil, la preferencia fuerte, el umbral de veto y la importancia de cada criterio. [18]

	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
b_1	70	75	80	75	85
b_2	50	48	55	55	60
Q	5	5	5	5	5
P	10	10	10	10	10
V	30	30	30	30	30
W	1	1	1	1	1
a_1	75	67	85	82	90
a_2	28	35	70	90	95
a_3	45	60	55	68	60

Tabla 2.1: Datos del ejemplo de Mousseau [18].

De estos datos podemos observar que el renglón b_1 define la mejor de las clases, la b_2 define la clase regular y la peor de las clases no está definida puesto que si ninguna de las alternativas resulta ser *tan buena como* una de las otras dos clases entonces es peor que éstas.

Al seleccionar ELECTRE TRI en el menú de la aplicación, ésta nos pedirá ingresar cuatro parámetros: número de clases o categorías, nivel de corte (λ), número de alternativas y cantidad de criterios. El parámetro λ varía entre 0.5 y 1 y representa la suma mínima ponderada de criterios que deben estar en concordancia con la

relación de superación para que ésta se mantenga. Por ejemplo, un nivel de corte de 0.6 significa que el 60% de los criterios ponderados deben ser *al menos tan buenos* para que esta relación se mantenga. La literatura recomienda un uso de λ del 0.75. [25].

La imagen 2.1 muestra la aplicación con una matriz lo suficientemente grande para contener los datos del ejemplo mostrados en la tabla 2.1.

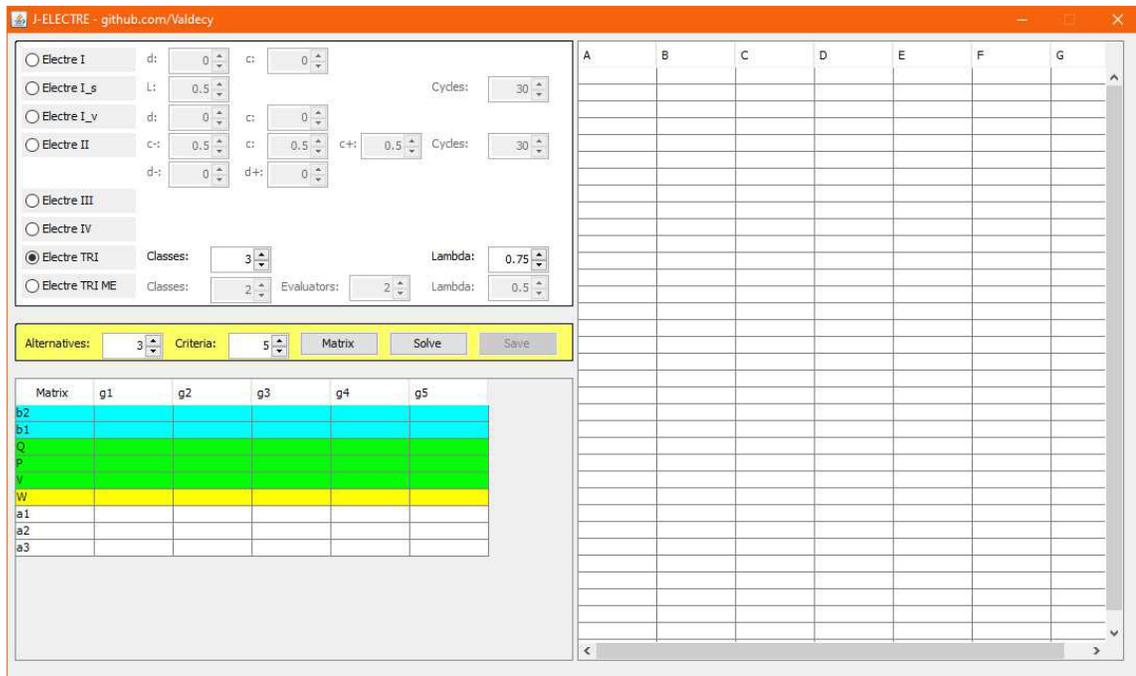


Figura 2.1: Visualización de la pantalla con una matriz creada para 3 clases, 3 alternativas y 5 criterios.

Una vez ingresados los datos en la matriz, se presiona el botón *solve* y en la parte derecha de la ventana de la aplicación se despliegan todas las matrices que componen la solución.

La solución contiene **matrices de concordancia** (concordancia global entre una alternativa y una clase y concordancia global entre una clase y una alternativa), **matrices de discordancia** (discordancia global entre una alternativa y una clase y discordancia global entre una clase y una alternativa), **matriz de credibilidad**

y el **tipo de clasificación** (pesimista y optimista).

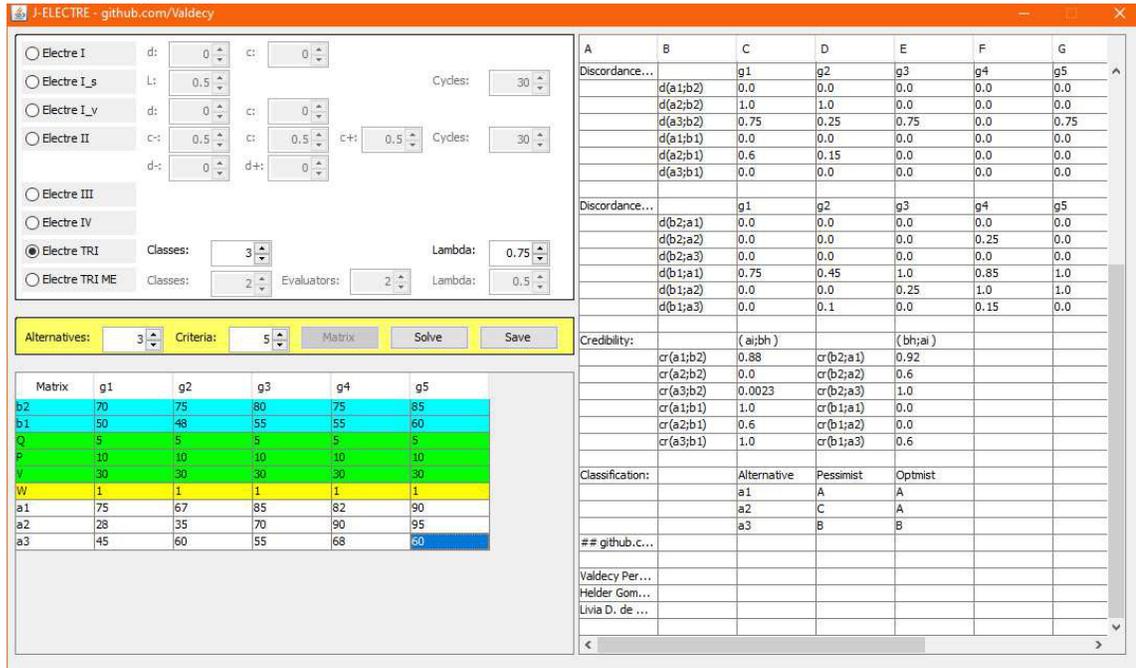


Figura 2.2: Solución para el ejemplo.

De manera general, los conceptos de concordancia y discordancia pueden considerarse como *armonía* y *desarmonía*, es decir que para cada criterio estamos buscando ver si, para cada par de alternativas, hay armonía o falta de armonía con la afirmación *a es al menos tan bueno como b*. Así, la matriz de credibilidad evalúa la solidez de la afirmación de que *a es al menos tan bueno como b* [5].

Lo último que muestra la solución brindada por la aplicación es la manera en que clasifica a las alternativas tal y como se muestra en la tabla 2.2.

Alternative	Pessimist	Optimist
a_1	A	A
a_2	C	A
a_3	B	B

Tabla 2.2: Clasificación de las alternativas en el ejemplo.

Si el método clasifica a una alternativa con A , significa que esa alternativa pertenece al conjunto de las mejores alternativas para ser consideradas, asignadas o cual sea el propósito del tomador de decisiones para clasificar las alternativas; si una alternativa es clasificada con B , significa que esa alternativa pertenece al conjunto de las segundas mejores alternativas y así sucesivamente.

Esto quiere decir que, para este ejemplo, si consideramos la clasificación pesimista, la mejor de las tres alternativas es la a_1 , seguida por la a_3 y la peor de las tres sería la a_2 ; pero si consideramos la clasificación optimista, las alternativas a_1 y a_2 pertenecen al conjunto de las mejores, seguidas por la alternativa a_3 y ninguna fue asignada como la peor.

Algunos autores afirman que la clasificación pesimista está indicado para situaciones en las que se requiere precaución o donde hay escasez de recursos; mientras que el procedimiento optimista está indicado para casos en los que se desea fomentar acciones que tengan cualidades atractivas o excepcionales [10].

Ahora que se conoce la funcionalidad del método ELECTRE TRI es más fácil entender su utilidad e importancia para este trabajo: dado que se busca saber qué choferes y camiones son los mejores para éstos ser asignados a cubrir los viajes más importantes, solo faltaría que las empresas definan sus propios criterios y clases, como los propuestos en la sección 3.1, para que en base a ellos se puedan clasificar los choferes y camiones que tienen a su disponibilidad. De esta manera, su asignación será realizada de manera más objetiva y eficiente comparada con la asignación que en realidad se hace, que simplemente es asignar un chofer o camión con la única condición o criterio de que éste se encuentre disponible.

2.4 PROBLEMA DE ASIGNACIÓN FLEXIBLE DE CHOFERES Y VEHÍCULOS AFCV

En esta sección se muestra un modelo que resuelve el problema que enfrenta un sistema de transporte público de asignación de choferes y vehículos para poder cubrir todos los viajes con objetivo de reducir los costos. El problema y modelo en el que nos basamos es conocido como el problema de la asignación flexible de la choferes y vehículos (AFCV). Presentamos en esta sección un ejemplo de una solución para el problema AFCV y luego el modelo matemático presentado por [3] .

La figura 2.3 (de [3]) muestra tres tablas correspondientes a una solución factible para tres líneas: línea azul, verde y naranja. Para cada tabla, la primera fila corresponde a la etiqueta de los viajes, la segunda (TT) es el horario de cada viaje, la tercera fila (VSP) es la programación del vehículo que une un viaje con un vehículo, y la última fila (CSP) es la programación del conductor que vincula a un conductor con un vehículo y un viaje. Esta solución utiliza seis conductores y seis vehículos. Un conductor no puede trabajar más de 10 horas (ocho horas normales más dos horas adicionales), y por restricciones legales, un conductor no puede conducir más de cuatro horas seguidas sin un descanso de al menos 30 minutos. En esta tesis no se consideran los descansos legales por conducción de más de 4 horas seguidas.

Es de notar que no tenemos horarios genéricos que puedan asignarse a cualquier conductor, los horarios de los choferes diseñarse junto con la asignación de los vehículos para minimizar la cantidad de conductores necesarios en la solución. Aquí en este ejemplo todavía no se incluyen los conceptos y características de calidad (ver capítulo siguiente). Para este problema consideramos *compatibilidad* entre cada par de vehículo-conductor, conductor-línea y línea-vehículo. De hecho, no todos los conductores pueden operar los nuevos autobuses de la flota, un conductor puede no conocer la ruta de una línea, o un vehículo puede tener su número de línea pintado por lo que no se puede usar para otra línea. Tampoco limitamos el número de

Trips	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
TT	6:00	7:03	8:03	8:33	9:03	9:33	10:05	10:35	11:07	11:40	12:40	13:40	14:35
VSP	v_1	v_6	v_1	v_3	v_1	v_2	v_3	v_1	v_3	v_1	v_1	v_5	v_4
CSP	d_1	d_6	d_1	d_3	d_1	d_2	d_3	d_1	d_3	d_1	d_1	d_5	d_4

Trips	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
TT	6:01	6:35	7:01	8:01	8:42	9:42	10:43	11:20	11:58	12:40	13:58	14:58
VSP	v_2	v_4	v_2	v_2	v_5	v_5	v_2	v_5	v_2	v_3	v_2	v_2
CSP	d_2	d_4	d_2	d_2	d_5	d_5	d_2	d_5	d_2	d_3	d_2	d_2

Trips	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
TT	6:10	7:10	7:35	8:35	9:14	10:05	10:14	11:14	11:35	12:35	13:35	14:10	15:10
VSP	v_3	v_3	v_4	v_4	v_6	v_4	v_6	v_6	v_4	v_4	v_4	v_3	v_3
CSP	d_3	d_3	d_4	d_4	d_6	d_4	d_6	d_6	d_4	d_4	d_4	d_3	d_3

Figura 2.3: Solución factible para tres líneas: líneas azul, verde y naranja. Para cada tabla, la primera línea corresponde a la etiqueta de los viajes, la segunda (TT) es el horario de cada viaje, la tercera línea (VSP) es la programación del vehículo que une un viaje con un vehículo, y la última línea (CSP) es la programación del conductor que vincula a un conductor con un vehículo y un viaje [3].

intercambios de vehículos que un conductor puede tener a lo largo de su horario diario.

En la literatura, existen varios trabajos relacionados con el problema AFCV. Por ejemplo, [7] proponen separar el problema en varias instancias del VSP y el CSP. Otro método usado es la generación de columnas [12, 14, 15]. Sin embargo, no se pueden resolver instancias de tamaño real por lo que se han propuesto también trabajos metaheurísticos como el de [24] en donde se propone un algoritmo evolutivo.

2.4.1 MODELO MATEMÁTICO PARA EL AFCV

En esta sección retomamos primordialmente el trabajo de [3] y lo explicamos con nuestra visión y palabras.

Para definir el problema AFCV, suponemos que la compañía de autobuses tiene que cubrir un conjunto de líneas L . Cada línea $l \in L$ se compone de un conjunto de viajes $Viajes(l)$ ($|Viajes(l)| = numTrips(l)$) y cada viaje $i \in Viajes(l)$ tiene un horario fijo $sched_i$. Sea $Trips = \cup_{l \in L} Trips(l)$ sea el conjunto con todos los viajes de todas las líneas. El tiempo de ida y vuelta de cada viaje $i \in Trips$ es $roundTime_i$. La compañía de autobuses tiene una flota heterogénea V , por lo tanto, no todos los vehículos pueden asignarse a todos los viajes. De hecho, algunos vehículos tienen el número de la línea pintada, otros tienen paneles electrónicos, se pueden asignar nuevos autobuses a las líneas cercanas al centro y los antiguos a los suburbios. Denotamos por $V(i)$ el conjunto de vehículos que se pueden asignar al viaje $i \in Trips$. El objetivo del problema de AFCV es minimizar el costo operativo total basado en el uso de vehículos y el salario de los conductores. De hecho, si no se necesita un vehículo para el día, puede ir a mantenimiento preventivo. Por lo tanto, se impone un costo fijo $vehicleCost$ por usar un vehículo.

El conjunto de choferes D también puede tener una restricción de compatibilidad con los viajes de las líneas. Supongamos que $D(i)$ es el conjunto de conductores

que pueden realizar el viaje $i \in Trips$. Además, el vehículo $v \in V$ solo se puede asignar a un subconjunto $D(v)$ de conductores. Análogamente, $V(d)$ es el conjunto de vehículos que puede manejar el conductor $d \in D$. Cada conductor tiene un día de trabajo regular de $regularDay$ horas con un pago de $payDay$. El día de trabajo se puede extender en $extraHours$ horas con un pago adicional de $extraPay$. En nuestro caso de estudio, un conductor trabaja durante 8 horas y puede ser contratado para hacer dos horas más si es necesario. Tengamos en cuenta que a los conductores se les paga todo el día, incluso si han trabajado menos de 8 horas. La misma política se aplica a las horas extra. Las regulaciones laborales requieren que se le dé un descanso de $restTime$ a un conductor que ha estado conduciendo por $maxTimeNoRest$ de horas. En nuestro caso, los conductores necesitan un descanso de al menos media hora si han estado conduciendo durante cuatro horas seguidas. Un conductor puede haber tenido un descanso de 10 minutos entre un par de viajes, pero como la duración de este descanso es inferior a $restTime$, cuenta como trabajo sin descanso.

En términos de flujos de red, sea $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{A})$ un grafo con vértices $\mathcal{V} = \{o\} \cup Trips$ donde o denota el depósito, y $\mathcal{A} = \{(i, j) \in Trips \times Trips : sched_i + roundTime_i \leq sched_j\}$ corresponde a los arcos. Para efectos de este trabajo, no consideraremos por el momento las variables y restricciones relacionadas con los descansos legales de los choferes. Eso será parte del trabajo futuro.

Para modelar el problema de AFCV, presentamos las siguientes variables binarias como se hace en el artículo de [3].

$$z^d = \begin{cases} 1, & \text{si el conductor } d \in D \text{ está de servicio durante el día,} \\ 0, & \text{de lo contrario.} \end{cases}$$

$$y^d = \begin{cases} 1, & \text{si chofer } d \in D \text{ hace horas adicionales durante el día,} \\ 0, & \text{de lo contrario.} \end{cases}$$

$$w_{ij}^d = \begin{cases} 1, & \text{si chofer } d \in D \text{ realiza el viaje } i \text{ justo antes del viaje } j, \text{ para } (i, j) \in \mathcal{A}, \\ 0, & \text{de lo contrario.} \end{cases}$$

$$s_{ij}^v = \begin{cases} 1, & \text{si vehículo } v \in D \text{ realiza el viaje } i \text{ justo antes del viaje } j, \text{ para } (i, j) \in \mathcal{A}, \\ 0, & \text{de lo contrario.} \end{cases}$$

Como mencionado en [3], la variable $w_{oj}^d = 1$ representa el caso donde el viaje $j \in Trips$ es el primer viaje del conductor $d \in D(j)$ mientras que $w_{io}^d = 1$ representa el caso donde el viaje $i \in Trips$ es el último viaje del conductor $d \in D(i)$ (lo mismo modo para las variables s_{io}^v y s_{oj}^v).

También se introducen varias variables reales auxiliares para el FVCS para modelar las restricciones laborales: x^d es la duración del trabajo para el conductor $d \in D$.

La función objetivo (2.1) del AFVC es minimizar el costo de los conductores (incluidas las horas adicionales), más el costo de los vehículos utilizados durante el día. Esta es la ecuación que modificaremos en el capítulo 3.

$$\text{mín} \sum_{d \in D} (\text{payDay} \cdot z^d + \text{extraPay} \cdot y^d) + \text{vehicleCost} \sum_{v \in V} \sum_{j \in Trips: v \in V(j)} s_{oj}^v. \quad (2.1)$$

Las restricciones relacionadas con la jornada laboral de cada chofer $d \in D$ se definen de la siguiente manera:

$$x^d = \sum_{j \in Trips: d \in D(j)} \left(h_j^d + \text{roundTime}_j \sum_{i: (i, j) \in \mathcal{A}} w_{ij}^d \right), \quad (2.2)$$

$$x^d \leq \text{regularDay} \cdot z^d + \text{extraHours} \cdot y^d, \quad (2.3)$$

$$y^d \leq z^d. \quad (2.4)$$

Las restricciones (2.2) establecen que la duración del trabajo para el conductor $d \in D$ corresponde al tiempo de inactividad más el tiempo de conducción. Las restricciones (2.3) garantizan que el tiempo total que un conductor puede estar de servicio no puede ser mayor que la duración normal del día más las horas adicionales. Las restricciones (2.4) aseguran que los choferes puedan trabajar horas extra adicionales solo si han trabajado un día normal.

Las restricciones (2.5) implican que si un viaje j se realiza con el vehículo v , entonces debe haber otro viaje que siga a j con este vehículo. Las restricciones (2.6) son similares a las anteriores, pero en este caso, consideramos los viajes y los conductores. Cada viaje debe estar cubierto exactamente una vez por un vehículo y un conductor como se indica en las restricciones (2.7) y (2.8). Además, las restricciones (2.9) garantizan que si un vehículo v cubre el viaje j , un conductor d compatible con v debe cubrir ese viaje. Finalmente, solo un viaje puede ser el primero para un conductor y, de manera similar, solo un viaje puede ser el primero para un vehículo como se expresa en las restricciones (2.10) y (2.11), respectivamente.

$$s_{oj}^v + \sum_{i:(i,j) \in \mathcal{A}} s_{ij}^v = s_{jo}^v + \sum_{k:(j,k) \in \mathcal{A}} s_{jk}^v, \quad j \in \text{Trips}, \quad v \in V(j), \quad (2.5)$$

$$w_{oj}^d + \sum_{i:(i,j) \in \mathcal{A}} w_{ij}^d = w_{jo}^d + \sum_{k:(j,k) \in \mathcal{A}} w_{jk}^d, \quad j \in \text{Trips}, \quad d \in D(j), \quad (2.6)$$

$$\sum_{v \in V(j)} \left(s_{oj}^v + \sum_{i:(i,j) \in \mathcal{A}} s_{ij}^v \right) = 1, \quad j \in \text{Trips}, \quad (2.7)$$

$$\sum_{d \in D(j)} \left(w_{oj}^d + \sum_{i:(i,j) \in \mathcal{A}} w_{ij}^d \right) = 1, \quad j \in \text{Trips}, \quad (2.8)$$

$$\sum_{i:(i,j) \in \mathcal{A}} s_{ij}^v \leq \sum_{d \in D(j) \cap D(v)} \left(w_{oj}^d + \sum_{i:(i,j) \in \mathcal{A}} w_{ij}^d \right), \quad j \in \text{Trips}, \quad v \in V(j), \quad (2.9)$$

$$\sum_{j \in \text{Trips}: v \in V(j)} s_{oj}^v \leq 1, \quad v \in V, \quad (2.10)$$

$$\sum_{j \in \text{Trips}: d \in D(j)} w_{oj}^d \leq 1, \quad d \in D. \quad (2.11)$$

En el artículo de [3] se presentan restricciones que limitan la duración del tiempo de trabajo consecutivo. Como mencionado, por el momento este trabajo no las considera. Por lo tanto la formulación entera mixta que usaremos en esta tesis para el problema de AFCV es entonces:

$$\text{mín} \quad (2.1)$$

$$\text{s.a.} \quad (2.2) - (2.11)$$

$$z^d, y^d, w_{ij}^d, s_{ij}^v \in \{0, 1\}, \quad d \in D, \quad v \in V, \quad (i, j) \in \mathcal{A}$$

$$x^d \in \mathbb{R}^+, d \in D(j).$$

El FVCS es un problema NP-difícil aún sin considerar las restricciones de tiempo consecutivo de conducción ya que involucra varias restricciones de tipo mochila, y se puede reducir a un problema de mochila múltiple que es NP-difícil en el sentido fuerte [16, 6].

CAPÍTULO 3

INCLUYENDO LA CALIDAD EN LA TOMA DE DECISIONES

El objetivo de este capítulo es introducir la calidad en el problema de Asignación Flexible de Choferes y Vehículos, AFCV del artículo [3]. Eso se hará primero describiendo los datos que se tienen del caso de estudio real en la sección 3.1 y luego se usará el método de ELECTRE TRI (presentado en el capítulo 2.3) para clasificar los datos y así poder ser incluidos en la función objetivo del problema AFCV.

En efecto, en el modelo propuesto por [3], no se considera más que los costos de los choferes y los costos fijos de los vehículos. Al tener información por cada chofer, por cada vehículo y por cada viaje, nosotros aprovechamos ese modelo para incluir calidad en la función objetivo.

3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS RELACIONADA CON LA CALIDAD

En esta sección se presentan datos que tiene o que le es fácil de obtener a una empresa de transporte urbano de camiones. Dichos datos serán tratados y aprovechados para mejorar el modelo matemáticos del AFCV en la sección 3.2.

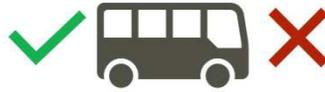
En la empresa del caso de estudio, los choferes están calificados en varias categorías (ver figura 3.1) que pueden ser su antigüedad (Tiempo), la cantidad de multas en el mes, la cantidad de accidentes en el mes, sus ausencias o retardos o la amabilidad con los usuarios.



	Chofer 1	Chofer 2	Chofer 3	Chofer 4	Chofer 5
Tiempo					
Multas					
Accidentes					
Ausencias o retardos					
Amabilidad					
Calificación / Promedio					

Figura 3.1: Datos relacionados con la calidad de los choferes de una empresa de transporte.

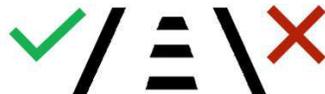
La empresa también puede obtener datos de sus vehículos como se muestra en la figura 3.2. Estos datos pueden ser con respecto al año del motor del vehículo, el número de reparaciones que ha sufrido, las fallas que ha tenido recientemente o la comodidad para el usuario.



	Camión 1	Camión 2	Camión 3	Camión 4	Camión 5
Nuevo/viejo					
Reparaciones					
Fallas					
Comodidad					
Calificación / Promedio					

Figura 3.2: Datos relacionados con la calidad de los vehículos de una empresa de transporte.

Finalmente, los viajes de cada línea también pueden tener diferentes categorías dependiendo del tiempo promedio del viaje o el número de usuarios que las requieren como se ve en la figura 3.3.



	Viaje 1	Viaje 2	Viaje 3	Viaje 4	Viaje 5
Tiempo					
Usuarios					
Calificación / Promedio					

Figura 3.3: Datos relacionados con la importancia de los viajes de una empresa de transporte con respecto al tiempo de viaje o la demanda de usuarios.

Así, tenemos una serie de datos cuantitativos y cualitativos relacionados con los choferes, los vehículos y los viajes de cada línea que usaremos para tener una

clasificación que nos permita tener parámetros apropiados para poder modificar la función objetivo del modelo AFCV (ver sección 2.4.1) que será presentada en la sección 3.2.

En efecto, en la literatura no se ha usado información específica de los choferes y de los vehículos para mejorar la asignación de vehículos y choferes de tal manera a aumentar la calidad ofrecida a los usuarios sin mermar los beneficios de las empresas.

A continuación presentamos cómo usamos dicha información para poderla introducir en el modelo matemático usando el método ELECTRE-TRI presentado en la sección 2.2.

3.2 NUEVA FUNCIÓN OBJETIVO QUE INCLUYE CALIDAD

Para fines de este trabajo, el modelo mostrado en la sección 2.4.1 nos será de gran utilidad, ya que está demostrado que la funcionalidad de ese modelo es excelente, pues busca un equilibrio en las horas de trabajo de los choferes considerando la compatibilidad que tienen los choferes, camiones y viajes entre sí, sin descuidar el hecho primordial de tener que cubrir todos los viajes [3]. Lo único que difiere a nuestro problema es su función objetivo, la cual busca reducir los costos.

El objetivo que tiene nuestro trabajo es brindar una mejor calidad a los usuarios que usan el sistema de transporte público mediante una mejora en la asignación de choferes y camiones a los viajes que realizan las líneas de camiones y con la ayuda de ELECTRE TRI podemos clasificar sin problemas a los choferes y camiones de manera que podamos saber cuáles son los mejores, cuáles son los regulares y cuáles son los peores.

Para crear nuestra nueva función objetivo se consideraron principalmente los siguientes aspectos:

- **importancia de los viajes**, que tal como se menciona en la sección 3.1, se tomaron en cuenta los tiempos normalizados de los viajes;
- **importancia o peso de los choferes y camiones**, dado que se toma de hipótesis que los usuarios prefieren mejores choferes que mejores camiones;
- **clasificación de choferes y camiones**, la cual se obtuvo con ELECTRE TRI.

Tomando en cuenta los puntos anteriores y partiendo del hecho que nuestro objetivo es mejorar la calidad, se pensó en ponderar las clasificaciones hechas con ELECTRE TRI e incluir esa ponderación en nuestra función objetivo. La tabla 3.1 muestra dicha ponderación; para ambas clasificaciones de choferes y camiones se tomará la misma ponderación.

Clasificación	Ponderación
A	0
B	1
C	2

Tabla 3.1: Ponderación para las clasificaciones.

Para cubrir un viaje es necesario un chofer y un camión, entonces lo que se busca con la ponderación de la tabla 3.1 es asignar a los viajes más importantes los choferes y camiones con clasificación *A* para que el peso de cubrir ese viaje sea 0. Con esta idea, lo que se busca ahora es minimizar los pesos de cubrir todos los viajes.

De esta manera y considerando las mismas variables del modelo descrito en la sección 2.4.1, se llegó a la siguiente función:

$$\sum_{j \in \text{Trips}} \sum_{i: (i,j) \in A} \left\{ \sum_{d \in D} \left[((w_{oj}^d + w_{ij}^d) \cdot NrT_j \cdot p^d + \sum_{v \in V} (s_{oj}^v + s_{ij}^v) \cdot NrT_j \cdot p^v) p^d \right] \right\}$$

donde NrT_j es el tiempo promedio normalizado del viaje j , p^d es la penalidad del chofer d y p^v es la penalidad del camión v .

Esta función nos dice que para cada viaje j que sea cubierto con un chofer d y un camión v , se calcula el peso que tendría ese viaje al ser cubierto por ese chofer y ese camión. El peso de un viaje se obtiene de la siguiente manera: el tiempo promedio normalizado de ese viaje j se multiplica por la suma de las penalidades del chofer y el camión y el resultado se multiplicará una vez más por la penalidad del chofer. Al final se vuelve a multiplicar por la penalidad del chofer para darle más importancia a los choferes y procurar que se asignen más los mejores choferes.

Así, nuestro nuevo modelo es el siguiente, considerando que $p^d, p^v \in \{0, 1, 2\}$:

$$\text{mín} \quad \sum_{j \in \text{Trips}} \sum_{i: (i,j) \in A} \left\{ \sum_{d \in D} \left[((w_{oj}^d + w_{ij}^d) \cdot \text{NrT}_j \cdot p^d + \sum_{v \in V} (s_{oj}^v + s_{ij}^v) \cdot \text{NrT}_j \cdot p^v) p^d \right] \right\} \quad (3.1)$$

s.a.

$$x^d = \sum_{j \in \text{Trips}: d \in D(j)} \left(h_j^d + \text{roundTime}_j \sum_{i: (i,j) \in A} w_{ij}^d \right), \quad (3.2)$$

$$x^d \leq \text{regularDay} \cdot z^d + \text{extraHours} \cdot y^d, \quad (3.3)$$

$$y^d \leq z^d, \quad (3.4)$$

$$s_{oj}^v + \sum_{i: (i,j) \in A} s_{ij}^v = s_{jo}^v + \sum_{k: (j,k) \in A} s_{jk}^v, \quad j \in \text{Trips}, v \in V(j), \quad (3.5)$$

$$w_{oj}^d + \sum_{i: (i,j) \in A} w_{ij}^d = w_{jo}^d + \sum_{k: (j,k) \in A} w_{jk}^d, \quad j \in \text{Trips}, d \in D(j), \quad (3.6)$$

$$\sum_{v \in V(j)} \left(s_{oj}^v + \sum_{i: (i,j) \in A} s_{ij}^v \right) = 1, \quad j \in \text{Trips} \quad (3.7)$$

$$\sum_{d \in D(j)} \left(w_{oj}^d + \sum_{i: (i,j) \in A} w_{ij}^d \right) = 1, \quad j \in \text{Trips} \quad (3.8)$$

$$\sum_{i: (i,j) \in A} s_{ij}^v \leq \sum_{d \in D(j) \cap D(v)} \left(w_{oj}^d + \sum_{i: (i,j) \in A} w_{ij}^d \right), \quad j \in \text{Trips}, v \in V(j), \quad (3.9)$$

$$\sum_{j \in \text{Trips}: v \in V(j)} s_{oj}^v \leq 1, \quad v \in V, \quad (3.10)$$

$$\sum_{j \in \text{Trips}: d \in D(j)} w_{oj}^d \leq 1, \quad d \in D, \quad (3.11)$$

$$z^d, y^d, r_j^d, w_{ij}^d, s_{ij}^v \in \{0, 1\}, d \in D, v \in V, (i, j) \in A \quad (3.12)$$

$$x^d \in \mathbb{R}^+, j \in Trips, d \in D(j) \quad (3.13)$$

En la siguiente sección evaluaremos el impacto de la modificación de la función objetivo con los parámetros obtenidos mediante el método de ELECTRE TRI.

3.2.1 GENERACIÓN DE DATOS PARA LA EXPERIMENTACIÓN

En esta sección se describen los datos creados y utilizados para llevar a cabo la experimentación descrita en la sección 4.

Debido a la falta de datos reales por parte de una empresa, los datos que se usaron fueron creados en base al ejemplo propuesto por Mousseau [18] que, al brindarnos un buen ejemplo del funcionamiento de la herramienta ELECTRE TRI, sabemos será de gran ayuda para corroborar que nuestro modelo funcione adecuadamente.

Una de las instancias usadas en la parte experimental de este trabajo cuenta con 16 choferes, 16 camiones y 15 viajes. La tabla 3.2 muestra los datos creados para representar las clases (b_n), los criterios (g_n) y los choferes o camiones (a_n), así como la preferencia débil, la preferencia fuerte, el umbral de veto y la importancia de cada criterio (Q, P, V y W, respectivamente).

	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
b2	90	85	80	80	75
b1	65	60	60	53	55
Q	10	10	10	10	10
P	15	15	15	15	15
V	35	35	35	35	35
W	1	1	1	1	1
a1	72	95	80	87	90
a2	33	95	100	75	40
a3	65	60	73	65	50
a4	73	65	60	50	65
a5	60	50	65	65	73
a6	95	90	87	72	80
a7	65	65	50	73	60
a8	100	75	95	40	33
a9	95	40	75	33	100
a10	87	72	90	80	95
a11	90	80	72	95	87
a12	75	33	40	100	95
a13	72	95	80	87	90
a14	40	100	33	95	75
a15	33	95	100	75	40
a16	65	60	73	65	50

Tabla 3.2: Datos generados para 16 choferes/camiones.

Los datos de la tabla 3.2 se ingresan a la aplicación donde ELECTRE TRI nos da la clasificación mostrada en la tabla 3.3.

Los datos de las tablas 3.2 y 3.3 fueron utilizados tanto para los choferes como para los camiones.

Alternative	Pessimist	Optmist
a1	A	A
a2	C	B
a3	B	B
a4	B	B
a5	B	B
a6	A	A
a7	B	B
a8	C	B
a9	C	B
a10	A	A
a11	A	A
a12	C	A
a13	A	A
a14	C	A
a15	C	B
a16	B	B

Tabla 3.3: Clasificación para 16 choferes/camiones.

De manera análoga se crearon los datos para la segunda instancia que cuenta con 14 choferes, 13 camiones y 16 viajes.

Las tablas 3.4 y 3.5 muestran a los choferes de esta segunda instancia y las tablas 3.6 y 3.7 a los camiones.

	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
b2	90	85	80	80	75
b1	65	60	60	53	55
Q	10	10	10	10	10
P	15	15	15	15	15
V	35	35	35	35	35
W	1	1	1	1	1
a0	65	60	73	65	50
a1	100	75	95	40	33
a2	95	90	87	72	80
a3	73	65	60	50	65
a4	95	40	75	33	100
a5	87	72	90	80	95
a6	60	50	65	65	73
a7	75	33	40	100	95
a8	90	80	72	95	87
a9	65	65	50	73	60
a10	40	100	33	95	75
a11	72	95	80	87	90
a12	65	60	73	65	50
a13	33	95	100	75	40

Tabla 3.4: Datos generados para 14 choferes.

Alternative	Pessimist	Optmist
a1	B	B
a2	C	B
a3	A	A
a4	B	B
a5	C	B
a6	A	A
a7	B	B
a8	C	A
a9	A	A
a10	B	B
a11	C	A
a12	A	A
a13	B	B
a14	C	B

Tabla 3.5: Clasificación para 14 choferes.

	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5
b2	90	85	80	80	75
b1	65	60	60	53	55
Q	10	10	10	10	10
P	15	15	15	15	15
V	35	35	35	35	35
W	1	1	1	1	1
a0	65	60	73	65	50
a1	100	75	95	40	33
a2	95	90	87	72	80
a3	73	65	60	50	65
a4	95	40	75	33	100
a5	87	72	90	80	95
a6	60	50	65	65	73
a7	75	33	40	100	95
a8	90	80	72	95	87
a9	65	65	50	73	60
a10	40	100	33	95	75
a11	72	95	80	87	90
a12	65	60	73	65	50

Tabla 3.6: Datos generados para 13 camiones.

Alternative	Pessimist	Optmist
a1	B	B
a2	C	B
a3	A	A
a4	B	B
a5	C	B
a6	A	A
a7	B	B
a8	C	A
a9	A	A
a10	B	B
a11	C	A
a12	A	A
a13	B	B

Tabla 3.7: Clasificación para 13 camiones.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS COMPUTACIONALES

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos para dos instancias diferentes, éstos son tanto del objetivo propuesto que busca maximizar la calidad como del objetivo del modelo original que busca minimizar los costos. Resolvemos el modelo matemático presentado en la sección 2.4.1 y usamos una computadora iMac con procesador intel Core i7, velocidad 3.1 GHz y memoria de 16 GB con Gurobi 8.01 [13, 19].

Para cada instancia y función objetivo se muestran dos cuadros que corresponden a dos líneas diferentes que serán llamadas línea azul y línea naranja. La primera fila de cada tabla muestra el número de viajes que esa línea hace, la segunda muestra la hora de salida para cada viaje, la tercera muestra qué chofer es asignado para realizar ese viaje y la cuarta muestra qué camión es asignado. Así, por ejemplo, si vemos el cuadro 4.1, para cubrir los viajes 1 y 7 de la línea azul fueron asignados, respectivamente, los choferes d_{13} y d_5 y el camión v_0 para ambos viajes.

Junto con estas tablas, se muestran también dos figuras distintas por cada instancia y por cada función objetivo: una mostrando los horarios de cada uno de los choferes y la otra los horarios de cada uno de los camiones. Para cada figura, la primer columna muestra la cantidad de choferes d o camiones v con los que cuenta la instancia. Los choferes y camiones resaltados con color verde representan los mejores

choferes o camiones, los resaltados con color rojo representan los peores y los que están resaltados en blanco representan aquellos en un punto medio entre los mejores y los peores. Cada fila representa la cantidad de viajes que se les fueron asignados a cada chofer o camión, cada rectángulo representa un viaje, el color del rectángulo representa la línea a la que pertenece ese viaje, los rectángulos con borde más grueso representan los viajes más importantes de esa línea y el número dentro del rectángulo nos dice el número de viaje de esa línea. De esta manera, por ejemplo, podemos leer en la imagen 4.1 que el chofer d_7 , que es un mal chofer, realiza únicamente el viaje 2 de la línea azul y en la imagen 4.2 que el camión v_3 , que es regular, realiza primero el viaje 1 de la línea naranja y después el viaje 3 de la línea azul.

Instancia 1

Esta primer instancia cuenta con un total de 2 líneas, 15 viajes, 16 choferes y 16 camiones.

OBJETIVO: MEJORAR CALIDAD

Viajes	1	2	3	4	5	6	7	8
Salida	06:17	07:16	07:33	07:50	08:07	08:24	08:41	08:58
Chofer	d_{13}	d_7	d_{10}	d_{12}	d_{14}	d_0	d_5	d_{13}
Camión	v_0	v_{14}	v_3	v_1	v_{11}	v_{12}	v_0	v_8

Tabla 4.1: Horario de viajes para la línea azul con objetivo de mejora de calidad, instancia 1.

Viajes	1	2	3	4	5	6	7
Salida	05:23	07:14	07:34	07:54	08:14	08:34	08:54
Chofer	d_{11}	d_1	d_6	d_{11}	d_9	d_2	d_{15}
Camión	v_3	v_{15}	v_7	v_{10}	v_9	v_5	v_4

Tabla 4.2: Horario de viajes para la línea naranja con objetivo de mejora de calidad, instancia 1.

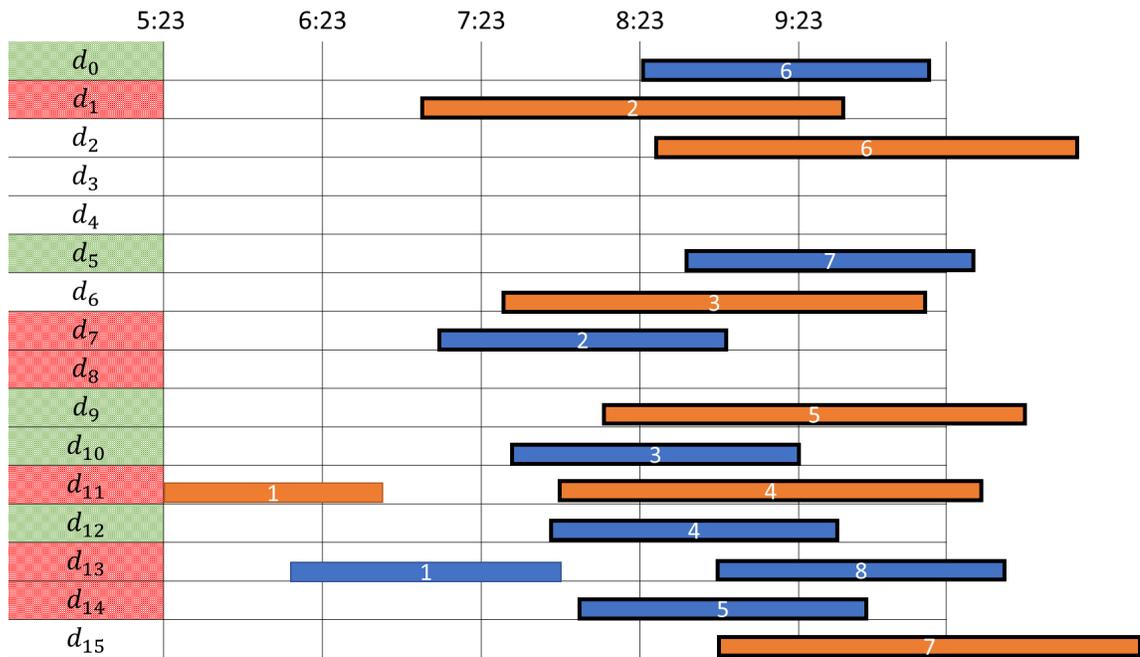


Figura 4.1: Asignación de viajes para choferes con objetivo de mejora de calidad, instancia 1.

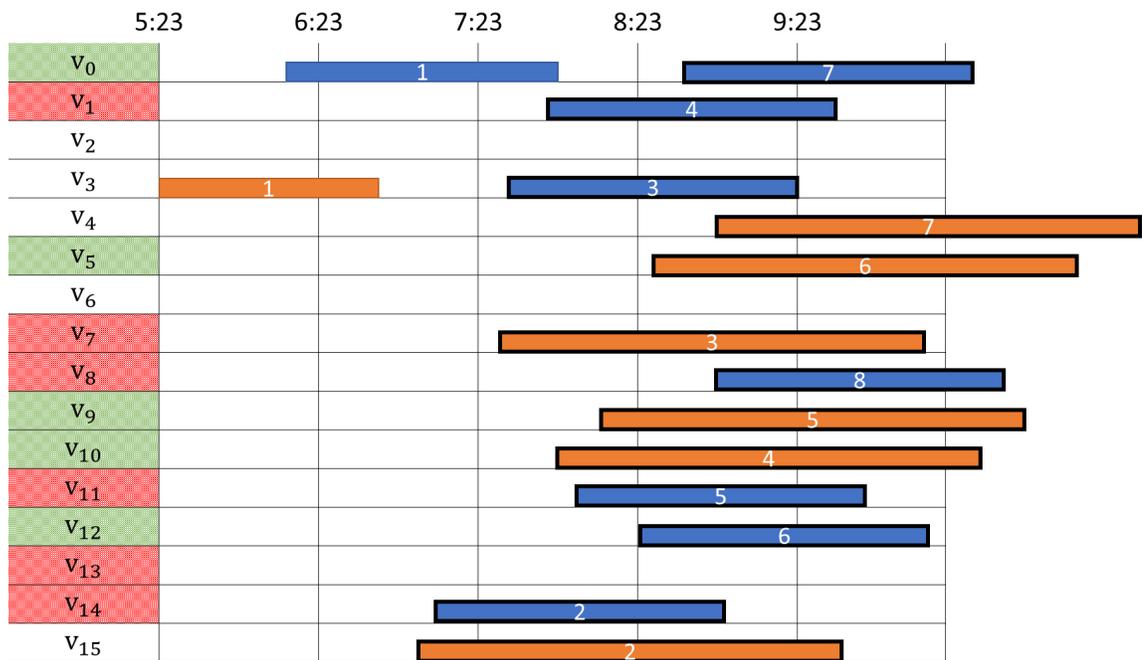


Figura 4.2: Asignación de viajes para camiones con objetivo de mejora de calidad, instancia 1.

OBJETIVO: REDUCIR COSTOS

Viajes	1	2	3	4	5	6	7	8
Salida	06:17	07:16	07:33	07:50	08:07	08:24	08:41	08:58
Chofer	d_{13}	d_7	d_{10}	d_{12}	d_{14}	d_0	d_5	d_{13}
Camión	v_0	v_{14}	v_3	v_1	v_{11}	v_{12}	v_0	v_8

Tabla 4.3: Horario de viajes para la línea azul con objetivo de minimización de costos, instancia 1.

Viajes	1	2	3	4	5	6	7
Salida	08:53	07:14	07:34	07:54	08:14	08:34	08:54
Chofer	d_{11}	d_1	d_6	d_{11}	d_9	d_2	d_{15}
Camión	v_3	v_{15}	v_7	v_{10}	v_9	v_5	v_4

Tabla 4.4: Horario de viajes para la línea naranja con objetivo de minimización de costos, instancia 1.

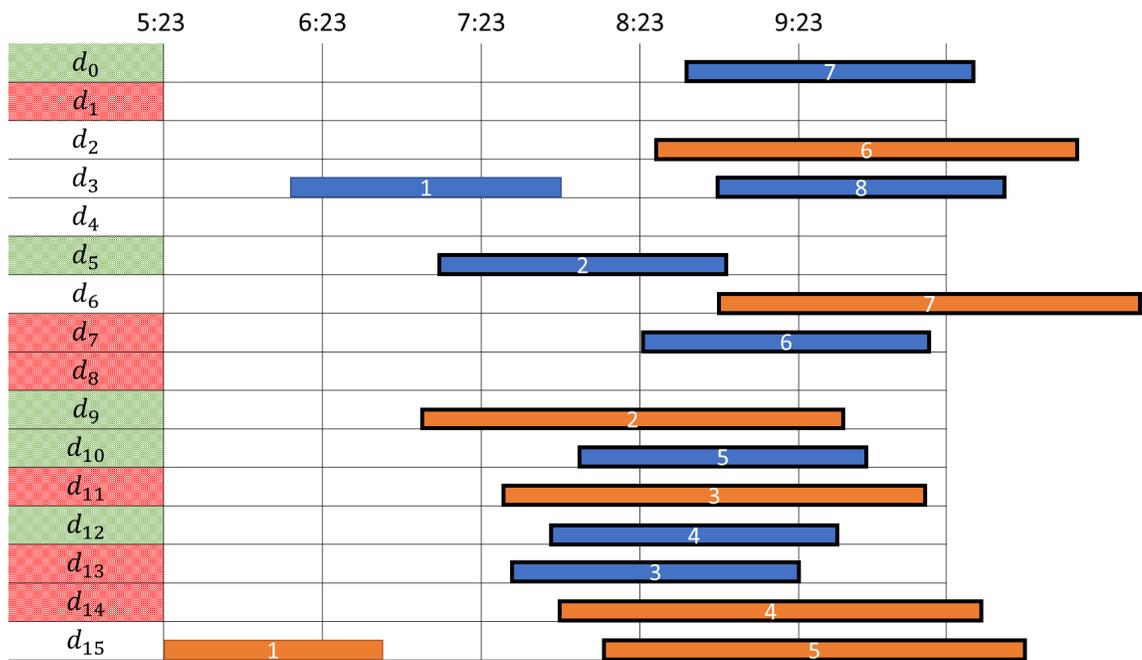


Figura 4.3: Asignación de viajes para choferes con objetivo de minimización de costos, instancia 1.

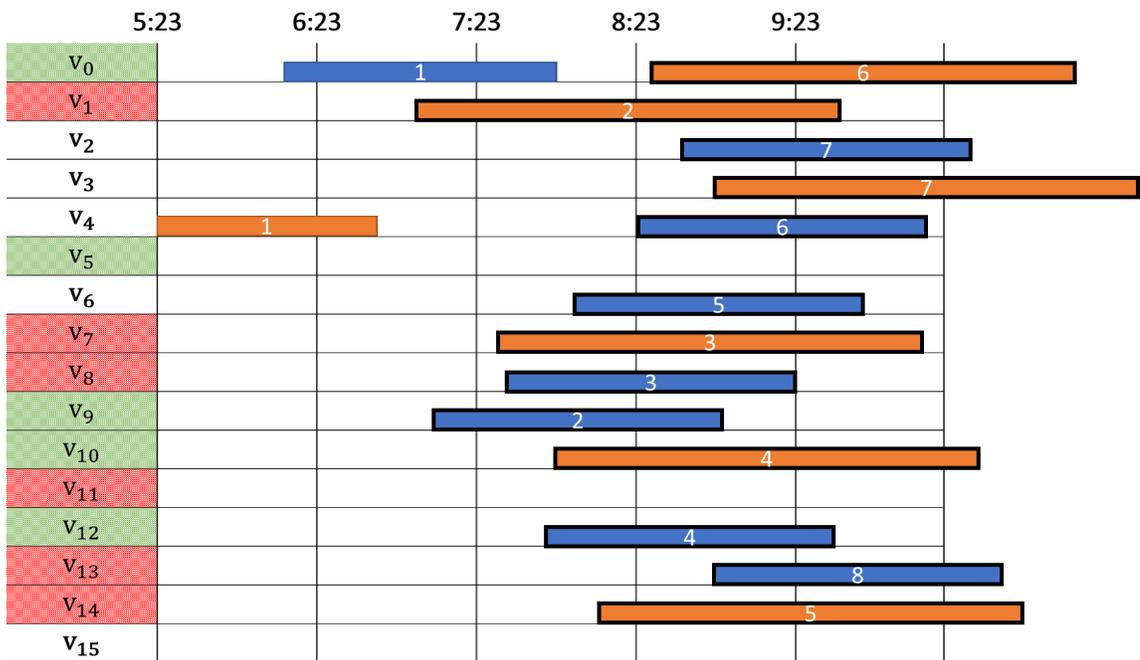


Figura 4.4: Asignación de viajes para camiones con objetivo de minimización de costos, instancia 1.

Instancia 2

Esta segunda instancia cuenta con un total de 2 líneas, 16 viajes, 14 choferes y 13 camiones.

OBJETIVO: MEJORAR CALIDAD

Viajes	1	2	3	4	5	6	7	8
Salida	05:06	06:06	07:17	07:37	07:57	08:17	08:37	08:57
Chofer	d_{12}	d_7	d_1	d_8	d_3	d_5	d_{11}	d_{13}
Camión	v_0	v_6	v_3	v_2	v_{10}	v_1	v_5	v_0

Tabla 4.5: Horario de viajes para la línea azul con objetivo de mejora de calidad, instancia 2.

Viajes	1	2	3	4	5	6	7	8
Salida	05:27	06:27	07:05	07:25	07:45	08:05	08:25	08:45
Chofer	d_9	d_{13}	d_9	d_0	d_7	d_6	d_{12}	d_{10}
Camión	v_8	v_1	v_0	v_7	v_4	v_8	v_{11}	v_6

Tabla 4.6: Horario de viajes para la línea naranja con objetivo de mejora de calidad, instancia 2.

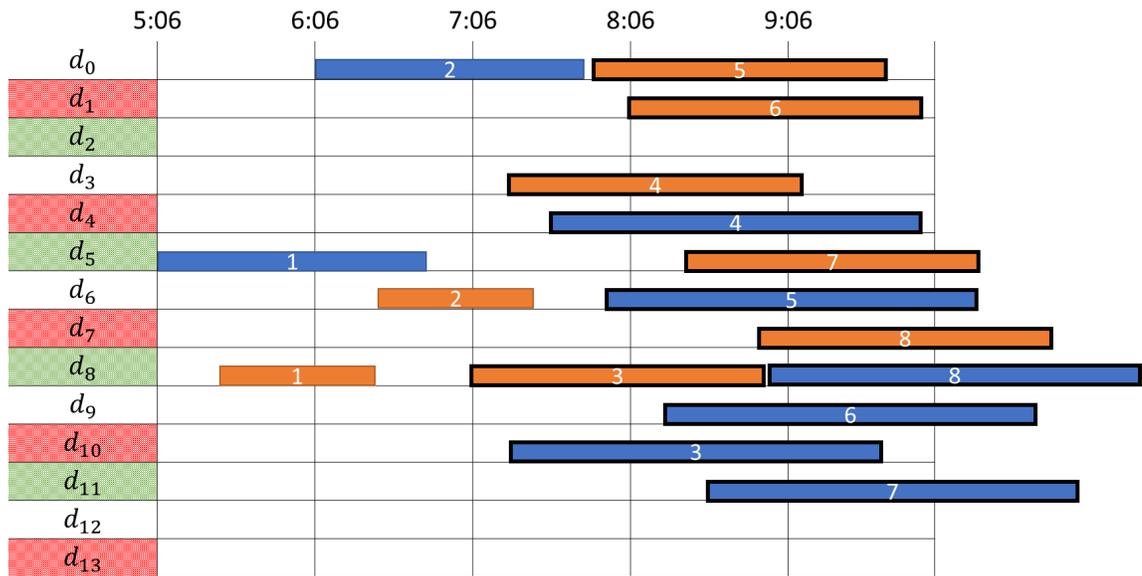


Figura 4.5: Asignación de viajes para choferes con objetivo de mejora de calidad, instancia 2.

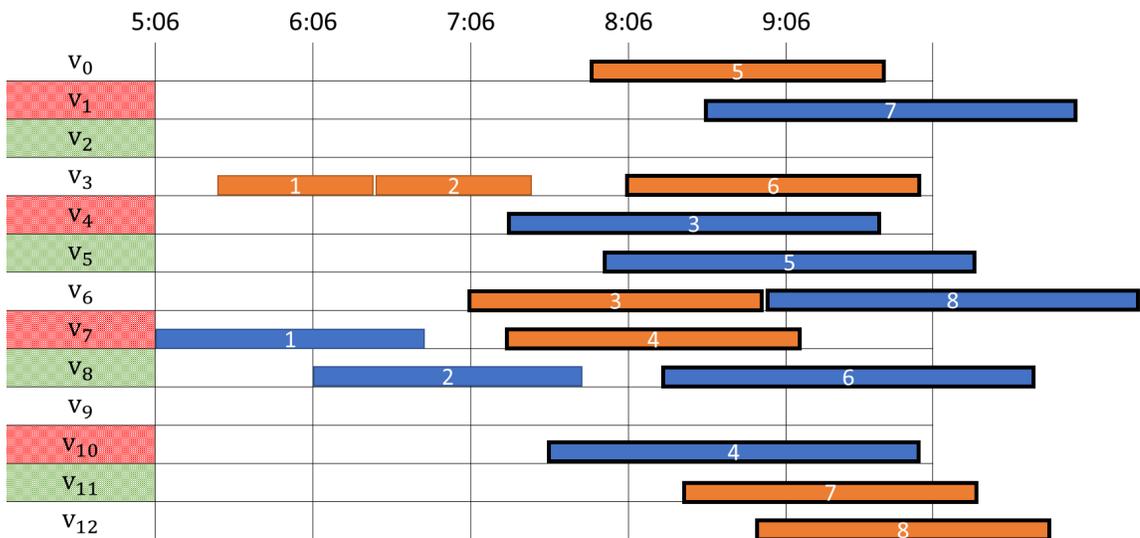


Figura 4.6: Asignación de viajes para camiones con objetivo de mejora de calidad, instancia 2.

OBJETIVO: REDUCIR COSTOS

Viajes	1	2	3	4	5	6	7	8
Salida	05:06	06:06	07:17	07:37	07:57	08:17	08:37	08:57
Chofer	d_{12}	d_7	d_1	d_8	d_3	d_5	d_{11}	d_{13}
Camión	v_0	v_6	v_3	v_2	v_{10}	v_1	v_5	v_0

Tabla 4.7: Horario de viajes para la línea azul con objetivo de minimización de costos, instancia 2.

Viajes	1	2	3	4	5	6	7	8
Salida	05:27	06:27	07:05	07:25	07:45	08:05	08:25	08:45
Chofer	d_9	d_{13}	d_9	d_0	d_7	d_6	d_{12}	d_{10}
Camión	v_8	v_1	v_0	v_7	v_4	v_8	v_{11}	v_6

Tabla 4.8: Horario de viajes para la línea naranja con objetivo de minimización de costos, instancia 2.

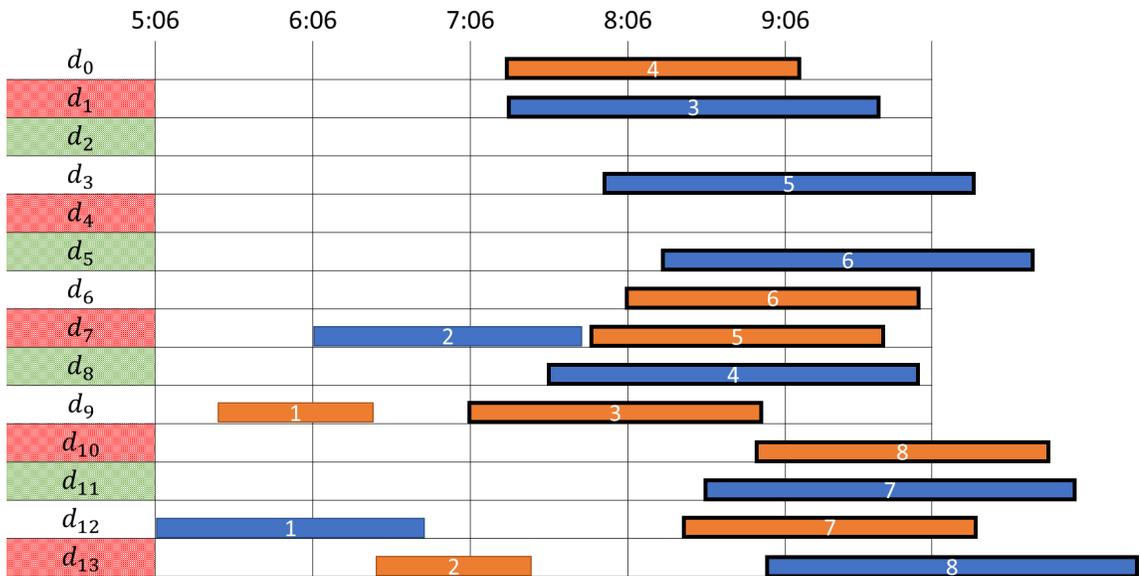


Figura 4.7: Asignación de viajes para choferes con objetivo de minimización de costos, instancia 2.

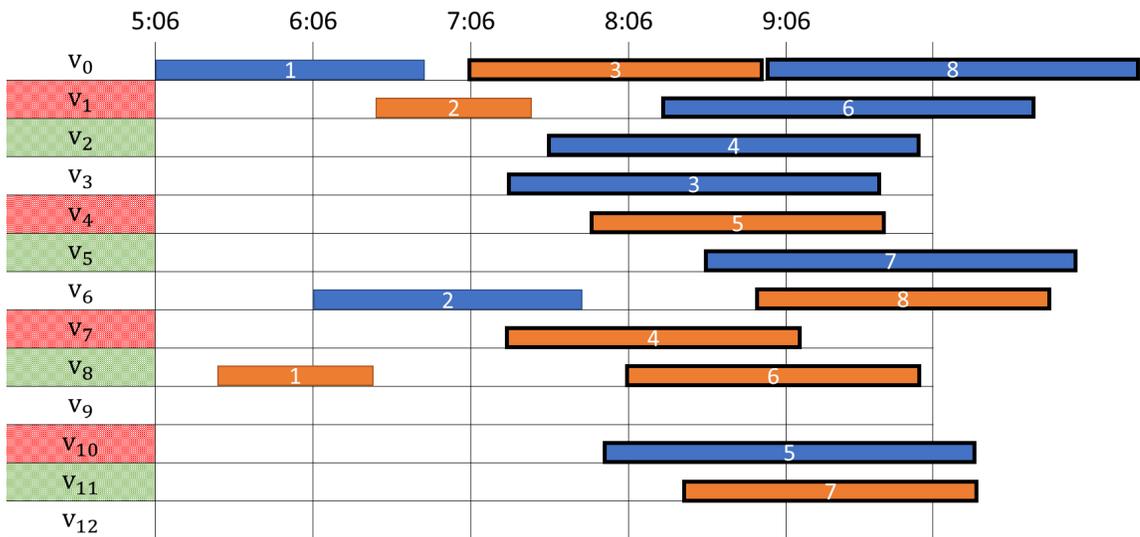


Figura 4.8: Asignación de viajes para camiones con objetivo de minimización de costos, instancia 2.

Los resultados para la primera instancia, para ambos objetivos, son prácticamente iguales:

- a tres choferes no se les fue asignado ningún viaje,
- a dos choferes se les asignaron dos viajes,
- a tres camiones no se les fue asignado ningún viaje,
- a dos camiones se les asignaron dos viajes.

Sin embargo, la asignación no fue exactamente igual, claro está, pero sí en cuanto a la cantidad de choferes y camiones usados, así como la cantidad de viajes que a cada chofer y camión se les asignó. De esta manera podemos decir que los resultados obtenidos para esta primera instancia son iguales pero la nueva solución considera mejores asignaciones chofer vehículo y chofer viaje sin mermar los costos.

En cambio, para la segunda instancia, se pueden apreciar los siguientes cambios:

- Para el primer objetivo (mejorar la calidad), a tres choferes no se les fue asignado ningún viaje; para el segundo (reducir costos) solo a dos choferes no se les fue asignado ningún viaje.
- Para el primer objetivo, a dos choferes se les asignaron dos viajes y a uno se le asignó un viaje; para el segundo, a tres choferes se les asignaron dos viajes.
- Para ambos objetivos, a dos camiones no se les fue asignado ningún viaje.
- Para ambos objetivos, a tres camiones se les asignaron dos viajes y a uno se le asignaron tres.

La mayor diferencia en estos resultados es que al mejorar la calidad se hace uso de un chofer menos que al querer reducir los costos, pero este chofer menos hace que los costos se reduzcan aún más ya que asignar al menos un viaje a un chofer, se le tiene que pagar el día completo. En este ejemplo, el chofer al que se le asignaron tres viajes no sobrepasa el número de horas de trabajo diarias por lo que no se le

pagarían horas extra. Otra cosa que hay que resaltar es que el chofer al que se le fueron asignados tres viajes es uno de los mejores y que, en esa misma asignación, a los tres de los cinco peores choferes que se les asignó viajes solo se les dio uno, mientras que al querer reducir costos, a cuatro de los peores choferes se les asignó al menos un viaje y a dos de ellos se les asignaron dos viajes.

Claramente podemos decir que la asignación al mejorar la calidad es mucho mejor que al querer reducir los costos, aunque cabe recordar que estas instancias son muy pequeñas. Aún así nos ayudan para afirmar que al querer mejorar la calidad se hará una buena asignación de horarios igual o incluso mejor que al querer reducir los costos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este capítulo hacemos un resumen del trabajo efectuado durante este trabajo de tesis y ponemos en la sección 5.2 una lista del trabajo futuro que queda por realizarse.

5.1 CONCLUSIONES

El problema de asignar choferes y vehículos ha sido ampliamente estudiado. Sin embargo, normalmente no se hace una diferenciación entre cada chofer y cada vehículo. En el modelo propuesto por [3], sí se puede incluir información para cada chofer y vehículo además de los viajes. Así, modificamos la función objetivo de dicho modelo para poder mejorar la calidad que se le brinda a los usuarios.

Primeramente, detectamos la información que se tiene disponible en las empresas de transporte urbano y la procesamos con el método de clasificación ELECTRE TRI. Luego, incluimos esos parámetros en una nueva función objetivo.

Comparamos las soluciones obtenidas por el modelo previo y por nuestro modelo modificado y comprobamos que obtenemos mejores soluciones con respecto a calidad sin aumentar los gastos para la empresa.

5.2 TRABAJO FUTURO

Describiremos a continuación las líneas de investigación futuras:

- Se requiere formular un modelo bi-objetivo ya no es justo comparar los dos modelos cada uno con una función diferente y tratar solo la calidad, pero no el costo.
- Implementar una suma ponderada y generar un frente de Pareto, sobretodo para las instancias son chicas.
- Incluir las restricciones de descansos legales para choferes en los modelos matemáticos.
- Hacer una experimentación más amplia con instancias más grandes y variadas.
- Considerar diferentes parámetros de calibración del ELECTRE TRI y ver su impacto en los resultados.
- Validar los resultados con empresas reales.
- Incorporar más elementos ligados a la calidad en el modelo matemático sin comprometer su linealidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «LAMSADE - Université Paris-Dauphine»,
url: <http://www.lamsade.dauphine.fr/english/software.html>, 2018.
- [2] BORNDÖRFER, R., A. LÖBEL y S. WEIDER, «A bundle method for integrated multi-depot vehicle and duty scheduling in public transit», en *Computer-aided systems in public transport*, Springer, págs. 3–24, 2008.
- [3] BOYER, V., O. J. IBARRA-ROJAS y Y. Á. RÍOS-SOLÍS, «Vehicle and crew scheduling for flexible bus transportation systems», *Transportation Research Part B: Methodological*, **112**, págs. 216–229, 2018.
- [4] BRANS, J.-P. y B. MARESCHAL, «PROMETHEE methods», en *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*, Springer, págs. 163–186, 2005.
- [5] BUCHANAN, J. T., P. J. SHEPPARD y D. VANDERPOOTEN, *Project ranking using ELECTRE III*, Department of Management Systems, University of Waikato, 1999.
- [6] CHEKURI, C. y S. KHANNA, «A polynomial time approximation scheme for the multiple knapsack problem», *SIAM Journal on Computing*, **35**(3), págs. 713–728, 2005.
- [7] DE GROOT, S. y D. HUISMAN, «Vehicle and crew scheduling : solving large real-world instances with an integrated approach», en *Proceedings of the 9th International Conference on Computer-Aided Scheduling of Public Transport*, 2004.

-
- [8] FIGUEIRA, J., S. GRECO y M. EHRGOTT, *Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys*, tomo 78, Springer Science & Business Media, 2005.
- [9] FIGUEIRA, J., V. MOUSSEAU y B. ROY, «ELECTRE methods», en *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*, Springer, págs. 133–153, 2005.
- [10] FONTANA, M. E. y C. A. V. CAVALCANTE, «Electre tri method used to storage location assignment into categories», *Pesquisa Operacional*, **33**(2), págs. 283–303, 2013.
- [11] FRELING, R., D. HUISMAN y A. P. WAGELMANS, «Models and algorithms for integration of vehicle and crew scheduling», *Journal of Scheduling*, **6**(1), págs. 63–85, 2003.
- [12] GINTNER, V., N. KLEWER y L. SUHL, «A Crew Scheduling Approach for Public Transit Enhanced with Aspects from Vehicle Scheduling», en M. Hickman, P. Mirchandani y S. Voß(editores), *Computer-aided Systems in Public Transport*, tomo 600, Springer Berlin Heidelberg, págs. 339–359, 2008.
- [13] GUROBI OPTIMIZATION, I., «Gurobi optimizer reference manual», URL <http://www.gurobi.com>, 2015.
- [14] KÉRI, A. y K. HAASE, «Simultaneous Vehicle and Crew Scheduling with Trip Shifting», *Operation Research Proceedings*, **2007**, págs. 467–472, 2007.
- [15] KÉRI, A. y K. HAASE, «Vehicle and Crew Scheduling with Flexible Timetable», *Operation Research Proceedings*, **2006**, págs. 339–342, 2007.
- [16] MARTELLO, S. y P. TOTH, *Knapsack problems: algorithms and computer implementations*, John Wiley & Sons, Inc., 1990.
- [17] MLADENIC, D., N. LAVRAČ, M. BOHANEČ y S. MOYLE, *Data mining and decision support: Integration and collaboration*, Springer Science & Business Media, 2003.

-
- [18] MOUSSEAU, V., R. SLOWINSKI y P. ZIELNIEWICZ, «ELECTRE TRI 2.0 a. methodological guide and user's manual», *Document du LAMSADE*, **111**, págs. 263–275, 1999.
- [19] OPTIMIZATION, G., «Inc., “Gurobi optimizer reference manual,” 2015», , 2014.
- [20] PEREIRA, V., «J-Electre-v1.0 User Guide: An ELECTRE $I, I_s, I_v, II, III, IV, TRI$ and $TRI ME$ software», , 2017.
- [21] PEREIRA, V., «MCDA-06-ELECTRE TRI», , 2017.
- [22] PEREIRA, V., H. G. COSTA y L. D. DE OLIVEIRA NEPOMUCENO, «J-ELECTRE-v2. 0.», , 2016.
- [23] ROY, B., *Multicriteria methodology for decision aiding*, tomo 12, Springer Science & Business Media, 2013.
- [24] STEINZEN, I., M. BECKER y L. SUHL, «A hybrid evolutionary algorithm for the vehicle and crew scheduling problem in public transit», en *Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Singapore, págs. 25–28, 2007.
- [25] TERVONEN, T., I. LINKOV, J. R. FIGUEIRA, J. STEEVENS, M. CHAPPELL y M. MERAD, «Risk-based classification system of nanomaterials», *Journal of Nanoparticle Research*, **11**(4), págs. 757–766, May 2009.

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Francisco Gerardo Meza Fierro

Candidato para obtener el grado de
Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

ASIGNACIÓN DE VEHÍCULOS Y CHOFERES CON CRITERIOS DE
CALIDAD

Nací el 7 de julio de 1993 en Torreón, Coahuila, lugar donde crecí y realicé todos mis estudios previos a la licenciatura. En el año 2011 me mudé a la ciudad de Monterrey, Nuevo León, para ingresar a la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Universidad Autónoma de Nuevo León, lugar donde realicé mis estudios de Licenciatura en Matemáticas concluyéndolos en junio del 2017. En agosto del mismo año ingresé a la Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.