

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

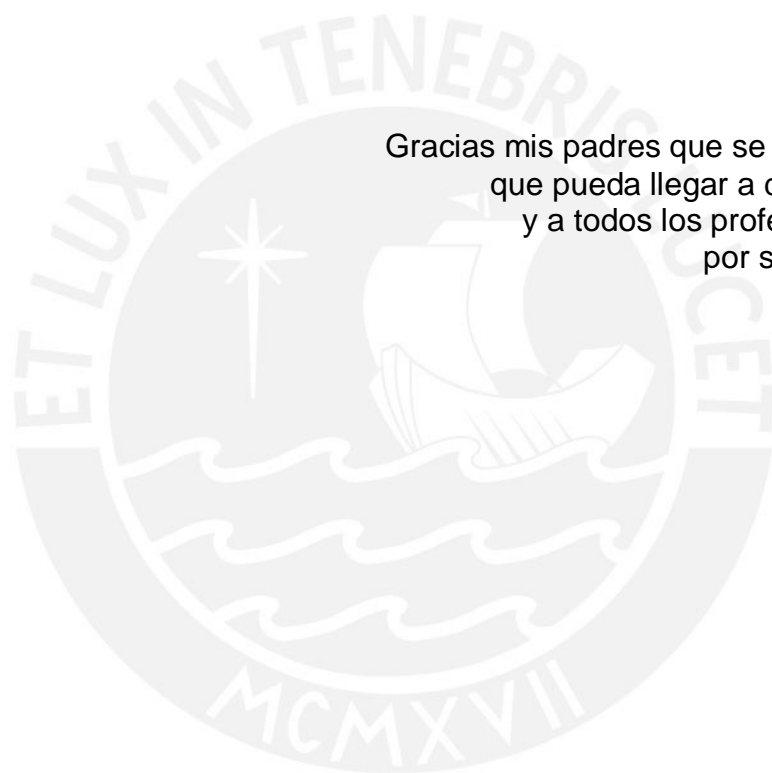
**Implementación de algoritmos meta heurísticos para la
definición de frecuencias y horarios para rutas de transporte
público**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Informático, que presenta el bachiller:

José Miguel, Sato Yamada

ASESOR: Mag. Fernando Alva Manchego

Lima, Julio del 2017



Gracias mis padres que se esforzaron para que pueda llegar a donde estoy hoy y a todos los profesores y amigos por sus enseñanzas.

RESUMEN

En los últimos años, se han implementado servicios como el Metropolitano y el Metro que buscan aliviar la congestión vehicular que se genera en las calles de Lima. Si bien estos nuevos servicios han logrado disminuir el tiempo de viajes de los pasajeros, estos aun presentan algunos de los inconvenientes que tienen los viajes en buses y combis tradicionales, como son la falta de capacidad para satisfacer la demanda de los pasajeros y la poca confiabilidad de los servicios. Problemas como estos se deben a deficiencias en el diseño de la red de transporte, este consiste en cinco pasos (Kepaptsoglou y Karlaftis 2009, p 491) los cuales son: Definición de rutas, definición de frecuencias, definición de horarios, asignación de unidades y asignación de choferes. La falta de capacidad de los servicios para atender la demanda se debe a que las frecuencias de las unidades no están definidas correctamente; y la poca confiabilidad de los servicios se debe a que estas no tienen horarios establecidos que pueden ser usados para que los pasajeros sepan las horas de llegadas de las unidades o como una forma de control para la empresa.

En el proyecto se buscó dar solución al problema de definición de las frecuencias y definición de horarios implementando algoritmos meta heurísticos que ayuden a definir frecuencias y horarios para cada una de las rutas que componen la red de transporte. Si bien en el proyecto se toma el caso del Metropolitano y el Metro, la solución puede ser utilizada en cualquier sistema de transporte que tenga rutas y demandas definidas.

Primero fue necesario obtener toda la información relevante relacionada a la red de transporte, esta información fue procesada y colocada en archivos que son leídos por los algoritmos. Luego se diseñó la solución y la estructura de datos que se emplearan en el programa. Para poder definir las funciones objetivos fue necesario analizar los diferentes componentes que estos presentan.

Para la implementación del programa primero se implementó las funciones objetivos, luego se realizó la generación de soluciones aleatorias y luego cada una de los algoritmos que contiene la solución, posteriormente se buscó mejorar la eficiencia de los algoritmos utilizando programación multi-hilos, se siguió los mismos para la definición de frecuencias y la definición de horarios. Una vez

implementado todos los algoritmos se creó una interfaz de usuario que facilita el uso y configuración de los algoritmos.



TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO INFORMÁTICO

TÍTULO: Implementación de algoritmos meta heurísticos para la definición de frecuencias y horarios para rutas de transporte público.

ÁREA: Ciencias de la computación.

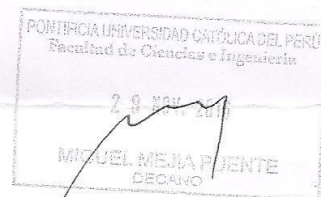
ASESOR: Mag. Fernando ALVA MANCHEGO

ALUMNO: José Miguel SATO YAMADA

CÓDIGO: 20080435

TEMA N°: #653

FECHA: San Miguel, 16 de Noviembre de 2016



DESCRIPCIÓN

Con el fin de diseñar una red de transporte público eficiente y que sea capaz de satisfacer la demanda de los pasajeros se siguen cinco pasos secuenciales: definir las rutas del servicio, definir las frecuencias de buses en las rutas, establecer los horarios de llegada de unidades a los paraderos, asignar unidades a las rutas y asignar choferes a cada unidad. Todos estos pasos son complejos y requieren de la implementación de algoritmos que permitan brindar una solución a cada uno de ellos de forma eficiente y teniendo en cuenta sus restricciones particulares.

En la ciudad de Lima, se ha implementado una red de transporte público que busca contrarrestar el caos originado por el transporte público tradicional, el cual consiste de buses y micros de distintas empresas que generan una gran congestión vehicular. Sin embargo, esta red de transporte público, que consiste del Metropolitano y el Metro, presenta problemas para satisfacer la demanda de sus pasajeros. Para satisfacer esta demanda, se opta por aumentar el número de buses con la intención de disminuir el intervalo entre las unidades. Sin embargo, este aumento se hace de forma arbitraria y no garantiza la solución del problema. Para asignar adecuadamente las unidades a cada ruta, de forma que se pueda satisfacer toda la demanda sin exceder con los gastos de operación, es necesario definir las frecuencias de las unidades utilizando un algoritmo que brinde una solución efectiva al problema.

En este proyecto se implementarán algoritmos para definir las frecuencias adecuadas de unidades que permitan satisfacer la demanda de pasajeros. Se procurará

implementar diversos algoritmos para realizar una experimentación numérica y definir el algoritmo que brinda una mejor solución. Posteriormente, se implementarán algoritmos que definan los horarios de las unidades en base a las frecuencias definidas en el paso anterior. Para la definición de horarios se utilizará un proceso similar al usado para definir de frecuencias.

OBJETIVO GENERAL

Implementar algoritmos meta heurísticos para la definición de frecuencias de unidades y generación de horarios para el transporte público.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos son:

- OE1. Obtener, procesar y almacenar los datos relacionados a la red de transporte público.
- OE2. Diseñar la solución y estructuras de datos de los algoritmos.
- OE3. Desarrollar los algoritmos para definición de frecuencias y horarios.
- OE4. Implementar un prototipo que incorpore los algoritmos implementados y presente las soluciones que estos generan.

ALCANCE

En este proyecto se busca implementar un software que defina las frecuencias y horarios en una red de transporte público que permitan satisfacer la demanda de pasajeros minimizando los costos de operación.

Se integrará en un mismo software los algoritmos que permitirán definir tanto las frecuencias como los horarios, se incluirán también otras funcionalidades que facilitarán tanto el ingreso de datos de la red de transporte público como la visualización de los resultados de los algoritmos.

Con el fin de definir el algoritmo que produzca las mejores soluciones, se implementarán diversos algoritmos y mediante la experimentación numérica se seleccionará a los que mejor se desempeñen para la definición de frecuencias y de los horarios, no se utilizará necesariamente el mismo algoritmo para ambas tareas.

Máximo: 100 páginas

Índice

ÍNDICE DE TABLAS.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE CÓDIGOS	VIII
CAPÍTULO I: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	1
1.1 Problemática.....	1
1.1.1 Causas.....	3
1.1.2 Consecuencias.....	3
1.2 Objetivo general.....	4
1.3 Objetivo específicos.....	5
1.3.1 Obtener, procesar y almacenar los datos relacionados a la red de transporte publico 5	5
1.3.2 Diseñar la solución y estructuras de datos de los algoritmos.....	5
1.3.3 Desarrollar los algoritmos para definición de frecuencias y horarios.	6
1.3.4 Implementar un prototipo que incorpore los algoritmos implementados y presente las soluciones que estos generan.....	6
1.4 Resultados Esperados	7
1.5 Herramientas, métodos, metodologías y procedimientos	8
1.5.1 Herramientas.....	8
1.5.2 Métodos y procedimientos	9
1.5.3 Metodologías.....	10
1.6 Alcance	11
1.6.1 Limitaciones	12
1.6.2 Riesgos.....	12
1.7 Estudio de viabilidad.....	13
1.7.1 Justificación.....	13
1.7.2 Viabilidad del proyecto.....	14
CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL.....	15
2.1 Objetivo del marco conceptual.....	15
2.2 Conceptos sobre la problemática	15
2.2.1 Problema del diseño de red de rutas de transporte (TRNDP)	15
2.2.2 Definición de frecuencias	15
2.2.3 Definición de horarios.....	16

2.2.4 Sincronización de rutas	16
2.3 Conceptos sobre los parámetros.....	17
2.3.1 Grafos	17
2.3.2 Demanda	18
2.4 Conceptos sobre los algoritmos	18
2.4.1 Heurística y Meta-heurísticos.....	18
2.4.2 Búsqueda local.....	19
2.4.3 Algoritmo genético (GA).....	19
2.4.4 Algoritmo colonia de hormiga	20
2.4.5 Algoritmo enjambre de Abejas.....	21
2.5 Conclusión	22
CAPÍTULO 3: ESTADO DEL ARTE	24
3.1 Objetivos de la revisión del estado del arte	24
3.2 Método usado en la revisión del estado del arte.....	24
3.3 Programación en enteros mixtos	24
3.4 Algoritmo genético y Colonia de hormiga	26
3.5 Algoritmo de colonia de abejas.....	27
3.6 Conclusión	28
CAPÍTULO 4: OBTENER, PROCESAR Y ALMACENAR LOS DATOS RELACIONADOS A LA RED DE TRANSPORTE PÚBLICO	29
4.1 Base de datos de la red de transporte público.....	29
4.1.1 Recolección de información	29
CAPÍTULO 5: DISEÑAR LA SOLUCIÓN Y ESTRUCTURAS DE DATOS DE LOS ALGORITMOS.....	34
5.1 Función objetivo para el algoritmo de definición de frecuencias.	34
5.1.1 Función objetivo para la definición de frecuencias.....	35
5.2 Restricciones del algoritmo de definición de frecuencias.....	35
5.3 Estructura de datos del algoritmo de definición de frecuencias.	36
5.3.1 Paradero	36
5.3.2 Camino	36
5.3.3 Ruta 36	
5.3.4 Red de transporte	36
5.3.5 Abeja.....	37
5.3.6 Colmena de abejas.....	37
5.4 Función objetivo para el algoritmo de definición de horarios.....	37

5.4.1	Función objetivo para la definición de horarios	38
5.5	Restricciones del algoritmo de definición de horarios.	39
5.6	Estructura de datos del algoritmo de definición de horarios.	39
5.6.1	Individuo	39
5.6.2	Population.....	39
CAPÍTULO 6: IMPLEMENTACIÓN DE LOS ALGORITMOS		40
6.1	Algoritmo para definición de frecuencias	40
6.1.1	Creación de una solución inicial	40
6.1.2	Simulación del comportamiento de las unidades	40
6.1.3	Cálculo del valor de la función objetivo.....	41
6.2	Algoritmo para la definición de horarios.....	41
6.2.1	Creación de una solución inicial	41
6.2.2	Simulación del comportamiento de las unidades	41
6.2.3	Cálculo del valor de la función objetivo.....	41
6.3	Algoritmo enjambre de abejas	41
6.3.1	Modificar solución de la abeja.....	42
6.3.2	Definir fidelidad de abeja.....	43
6.4	Algoritmo genético	44
6.4.1	Generación de descendencia	44
6.5	Comparación de los algoritmos	45
CAPÍTULO 7: IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO		46
7.1	Formulario para la ejecución de la aplicación	46
7.2	Formularios de configuraciones.....	46
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....		49
8.1	Conclusiones.....	49
8.2	Recomendaciones y trabajos futuros.....	49
BIBLIOGRAFIA		51

Índice de Tablas

CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

TABLA 1.1 Herramientas empleadas para cada resultado esperado.....	8
TABLA 1.2 Ejemplo de validaciones de un usuario	9
TABLA 1.3 Riesgos del proyecto.....	12

CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL

TABLA 2.1 Matriz de demanda	18
-----------------------------------	----

CAPÍTULO 3: ESTADO DEL ARTE

TABLA 3.1 Resultados de uso de programación entera mixta.....	25
TABLA 3.2 Resultado de la experimentación utilizando colonia de hormigas.....	26
TABLA 3.3 Resultado de la experimentación utilizando algoritmo genético.....	27



Índice de Figuras

CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

FIGURA 1.1 Descomposición del objetivo general en objetivos Específicos	4
FIGURA 1.2 Diagrama del modelo RUP.....	10

CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL

FIGURA 2.1 Grafo.....	17
FIGURA 2.2 Red de rutas	18
FIGURA 2.3 Comportamiento de una búsqueda Local.....	19
FIGURA 2.4 Algoritmo Genético	20
FIGURA 2.5 Gráfico del comportamiento de las hormigas	20

CAPÍTULO 3: ESTADO DEL ARTE

FIGURA 3.1 Árbol de problemas.....	28
------------------------------------	----

CAPÍTULO 4: OBTENER, PROCESAR Y ALMACENAR LOS DATOS RELACIONADOS A LA RED DE TRANSPORTE PÚBLICO

FIGURA 4.1 Validaciones del Metro.....	30
FIGURA 4.2 Matriz origen-destino de la demanda	31
FIGURA 4.3 Validaciones del Metropolitano	32

CAPÍTULO 5: DISEÑAR LA SOLUCIÓN Y ESTRUCTURAS DE DATOS DE LOS ALGORITMOS

FIGURA 5.1 Función Objetivo de Frecuencia.....	35
FIGURA 5.2 Función Objetivo de Horarios.....	38

CAPÍTULO 6: IMPLEMENTACIÓN DE LOS ALGORITMOS

FIGURA 6.1 Registro de unidades	40
---------------------------------------	----

CAPÍTULO 7: IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

FIGURA 7.1 Interfaz para la ejecución del programa	46
FIGURA 7.2 Interfaz de configuración para la frecuencia.....	47
FIGURA 7.3 Interfaz de configuración para los horarios.....	48
FIGURA 7.4 Interfaz de configuraciones generales.....	48

Índice de Códigos

CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL	
CÓDIGO 2.1 Pseudocódigo del algoritmo enjambre de abejas	21
CAPÍTULO 6: IMPLEMENTACIÓN DE LOS ALGORITMOS	
CÓDIGO 6.1 Pseudocódigo del algoritmo enjambre de abejas	42
CÓDIGO 6.2 Pseudocódigo del método de modificación de solución	43
CÓDIGO 6.3 Pseudocódigo de la definición de fidelidad.....	43
CÓDIGO 6.4 Pseudocódigo del algoritmo genético.....	44
CÓDIGO 6.5 Pseudocódigo de la generación de descendencia	44



CAPÍTULO 1: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En este capítulo se presenta la problemática y el contexto que generó la necesidad de un Proyecto que brinda una solución al problema.

1.1 Problemática

El transporte público ha sido visto como una forma de combatir los problemas de contaminación (sonora y ambiental) y exceso de tráfico que se dan en las ciudades más grandes, además es el medio más común empleado por las personas para movilizarse por Lima (Lima Cómo Vamos 2014, p 11). Según una encuesta realizada por JICA el 2013, solo el 11% de los entrevistados posee un automóvil (JICA 2013, p 14).

A pesar de la implementación del Metropolitano y el Metro, la mayoría de pasajeros considera que les toma más tiempo transportarse en la ciudad (Costa 2015).

En el caso del Metropolitano, el principal problema es que el servicio no puede cubrir la demanda de pasajeros, por lo cual se opta por el aumento de buses para cubrir las rutas con el objetivo de disminuir el intervalo entre buses (RPP Noticias 2015). Este incremento busca solucionar el problema de frecuencias de buses. Sin embargo, esto no puede ser solucionado solo con el aumento de unidades. Los propios operadores del Metropolitano indicaron que la solución de este problema no se basa solo en el aumento de unidades, sino también en un mejor manejo de las frecuencias, el manejo de salidas de buses y en la creación de horarios (América Noticias 2015).

En el 2004, el Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC) realizó un Plan Maestro de Transporte Urbano para el Área Metropolitana de Lima y Callao en la República del Perú, conocido como PMTU 2025, que permitiría brindar un servicio de transporte público efectivo para Lima Metropolitana y Callao para el 2025 (MTC, JICA 2004). Sin embargo, el problema por el que pasa el Metropolitano en la actualidad se origina en que la situación actual sobrepasa las proyecciones que se plantearon en el PMTU 2025.

En la encuesta realizada en 2013 por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) se muestra que el crecimiento económico y poblacional que se está dando en el Perú superará lo proyectado en el PMTU 2025 en especial en la zona

norte, como San Juan de Lurigancho, este crecimiento también se ve reflejado en un aumento del tráfico y el tiempo de viaje, donde el promedio de viaje en bus es de 50 minutos (JICA 2013, p 53). Todo esto lleva a la necesidad de realizar cambios en el PMTU 2025, los que incluyen la elaboración que una red de transporte público eficiente que pueda satisfacer las nuevas necesidades que se presentaran (JICA 2013, p 45-46).

Pero esta no es una tarea fácil ya que la implementación de una red de transporte público eficiente tiene muchos niveles que se deben considerar: a nivel de usuario, un transporte público eficiente abarcará factores como precio, rapidez de transporte, comodidad, cobertura, regularidad y frecuencia; mientras que a nivel operacional se busca obtener la mayor cantidad de ganancia monetaria (Guihaire y Hao 2008, p 1251).

Con el objetivo de generar un servicio de transporte público efectivo se siguen cinco pasos secuenciales definidos en (Kepaptsoglou y Karlaftis 2009 P 491): el primero es definir las rutas del servicio, luego definir la frecuencia de los buses, establecer horarios de llegadas de las unidades a los paraderos, asignar unidades a cada ruta, basados en las frecuencias y horarios, y por último asignar los choferes a cada unidad.

En este Proyecto se buscó dar solución al problema de las frecuencias y horarios para transporte público. En el proyecto se asumirá que previamente se definieron las rutas del servicio de transporte público. No se realizó la asignación de unidades ni la asignación de conductores.

Como caso de estudio se tomó el Metropolitano y el Metro de Lima y se definió las frecuencias de salidas de buses e implementó los horarios para el uso de los pasajeros. En la actualidad el Metropolitano cuenta con una ruta alimentadora y una ruta troncal. La ruta alimentadora contiene varias vías que son agrupadas en una ruta alimentadora sur y una ruta alimentadora norte (Metropolitano 2013). Estas rutas tienen como objetivo llevar a los pasajeros a los paraderos de la ruta troncal. La ruta troncal tiene tres servicios regulares y cinco servicios expresos (Metropolitano 2013). La ruta troncal conecta 12 distritos de la ciudad a través de un corredor exclusivo desde Chorrillos hasta Comas.

A continuación se presentan los principales componentes del problema de frecuencia y horarios del transporte público.

1.1.1 Causas

En nuestro país el principal medio de transporte utilizado son los combis y buses del transporte público, más del 50 por ciento de los usuarios los emplea para movilizarse hacia su trabajo o centro de estudio (Lima Cómo Vamos 2014, p 11). Sin embargo los usuarios dan una baja calificación a la calidad de los servicios que estos brindan, donde casi el 80 por ciento de los usuarios los califican entre regular y mala. (Lima Cómo Vamos 2014, p 11).

Con el fin de poder mejorar el servicio del transporte público se construyó el Metro y Metropolitano, los cuales han tenido un gran impacto en la capital, esto se puede notar en las altas calificaciones que los usuarios dan al servicio, donde el 70% y 57.5% de usuarios califica sus servicios, respectivamente, como buenos (Lima Cómo Vamos 2014, p 11).

Sin embargo el servicio que brinda el Metro y el Metropolitano presentan problemas que se han vuelto más visibles con el paso del tiempo; no presenta un buen control de las frecuencias y horarios de salidas de buses (América Noticias 2015), lo cual se ve reflejado en la opinión de los usuarios, si bien la mayoría de ellos califica el servicio como bueno, cuando se les pregunta por característica como la puntualidad o la comodidad, solo el 7% de los usuarios los ve como una característica resaltante del servicio (Lima Cómo Vamos 2014, p 11). Estos problemas deben ser solucionados con el fin de brindar un mejor servicio a los pasajeros.

1.1.2 Consecuencias

Las redes de transporte público presentan diferentes tipos de costos que pueden ser utilizados para medir la eficiencia del diseño de transporte público, estos se pueden dividir en diferentes tipos de costos (Mazloni, Ceder, Moridpour y Currier 2011, p 220):

- El costo del tiempo de espera del pasajero en paradero. Si el tiempo de espera es demasiado alto los pasajeros optarán por otro medio de transporte.

- El costo del tiempo del pasajero en el vehículo. A mayor sea el tiempo del viaje menor será la satisfacción del cliente.
- El costo de operación se refiere al número de unidades necesarias para satisfacer la demanda. Si no se cuenta con un horario bien establecido será necesario emplear más unidades de las necesarias para poder satisfacer la demanda de los pasajeros.
- El costo de tardanza de las unidades a los paraderos. El cual es ocasionado por falta o mala implementación de controles de unidades.
- El costo de pasajeros rechazados. Esta se refiere a la demanda que no puede ser atendida por falta de capacidad. Esta no solo genera una pérdida en satisfacción del cliente sino que también en la ganancia de operación.

Un incremento en alguno de estos costos puede ocasionar que el pasajero perciba el servicio como poco confiable y opte por medios de transporte más confiables o en muchos casos más baratos.

1.2 Objetivo general

A continuación se presenta el objetivo general del Proyecto, adicionalmente en la Figura 1.1 la descomposición del objetivo general en objetivos específicos.

"Implementar un algoritmo meta heurístico para la definición de frecuencias de unidades y generación de horarios para el transporte público."

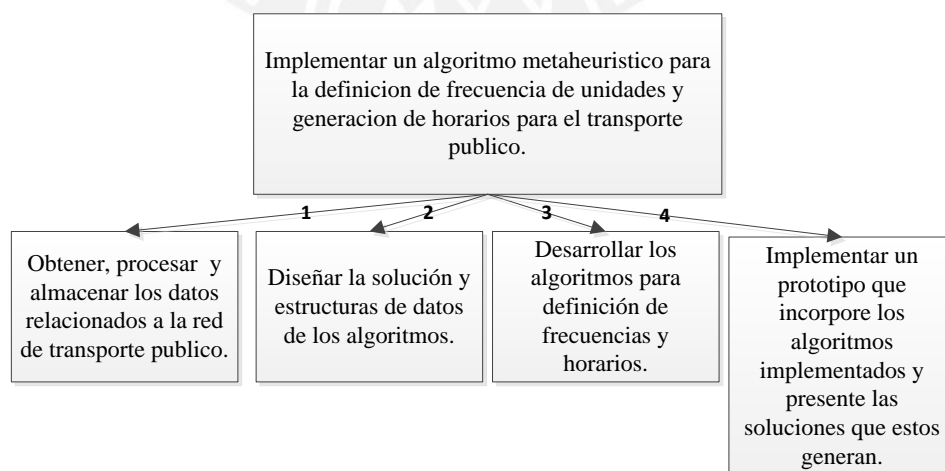


Figura 1.1: Descomposición del objetivo general en objetivos Específicos.

1.3 Objetivo específicos

A continuación se explicará el propósito de cada objetivo específico del proyecto, sus entradas, sus salidas, herramientas que se utilizarán y la metodología empleada en ellas.

1.3.1 Obtener, procesar y almacenar los datos relacionados a la red de transporte público

El primer paso del proyecto fue la obtención y almacenamiento de los datos de la red de transporte público. Una vez que se obtuvo los datos estos fueron procesados para obtener la demanda de pasajeros.

Entradas:

- Calles de la red de transporte público.
- Las rutas troncales de la red de transporte público.
- Los horarios de operación de las rutas.
- Los paraderos de la red de transporte público.
- Demanda de pasajeros.
- Velocidad de tránsito de las calles.
- Características de los vehículos (Capacidad y número de unidades disponibles).

1.3.2 Diseñar la solución y estructuras de datos de los algoritmos.

En este objetivo se buscará definir las funciones objetivos que utilizarán los algoritmos para el cálculo de la frecuencia y la definición de horarios. Para ello es necesario definir las entradas, las variables de decisión y las restricciones. La función objetiva buscará minimizar el tiempo de espera de todos los pasajeros. En el problema de definición de frecuencias, se considera dos (2) tipos de costos, el primero es el costo de pasajeros, el cual incluye el tiempo de espera y el tiempo de viaje, y el costo de operación el cual es el costo en el que incurre la empresa que brinda el servicio para el funcionamiento de la red de transporte público. En el proyecto se daba mayor énfasis a minimizar el costo de los pasajeros y se utilizará el costo de operación como una restricción del problema, es decir el valor del costo de operación no podrá exceder un valor definido.

En el caso del algoritmo de definición de horarios, se buscará maximizar el número de sincronizaciones entre las rutas. La sincronización consiste en minimizar el tiempo que le toma a un pasajero realizar un transbordo, para lograr esto es necesario definir una hora inicial de salida en cada ruta de forma que cuando una pasajero baje en un paradero y llegue al siguiente paradero haya una unidad lista para ser abordada.

Adicionalmente se buscara definir las estructuras de los datos que se utilizarán en los algoritmos, en las cuales se guardarán la información que se lee desde la base de datos durante la ejecución del programa.

Entradas:

- Información de las calles de la red de transporte público.
- Información de las rutas de la red de transporte público.
- Información de los paraderos de la red de transporte público.
- Información de la demanda de pasajeros.
- Información de las características de los vehículos.

1.3.3 Desarrollar los algoritmos para definición de frecuencias y horarios.

En este paso se desarrollarán los algoritmos para el cálculo de frecuencias y horarios de las unidades de transporte. El primero definirá la frecuencia de salida de las unidades para cada ruta de la red de transporte público. El segundo algoritmo buscará definir la primera hora de salida de las unidades de cada ruta maximizando la sincronización entre las rutas.

Entradas:

- Datos de la red de transporte público.
- Funciones objetivo.
- Restricciones de los algoritmos.

1.3.4 Implementar un prototipo que incorpore los algoritmos implementados y presente las soluciones que estos generan.

En este objetivo se desarrollará la interfaz de usuario que permitirá mostrar el resultado en un formato que sea comprensible para el usuario final del proyecto, la empresa de transporte público. Esto se realizará mediante la generación de

reportes sobre las frecuencias para cada ruta y los horarios de llegada de unidades en cada paradero.

Entradas:

- Datos de la red de transporte público.
- Frecuencias de cada ruta.
- Hora de salida inicial para cada ruta.
- Horario de atención de las rutas.

1.4 Resultados Esperados

A continuación se mostrarán los resultados que se busca conseguir en cada uno de los objetivos específicos del proyecto.

a) Obtener, procesar y almacenar los datos relacionados a la red de transporte público

- Datos procesados de la red de transporte público para ser usado por los algoritmos.

b) Diseñar la solución y estructuras de datos de los algoritmos

- Función objetivo para el algoritmo de definición de frecuencias.
- Función objetivo para el algoritmo de definición de horarios.
- Restricciones del algoritmo de definición de frecuencias.
- Restricciones del algoritmo de definición de horarios.
- Estructura de datos del algoritmo de definición de frecuencias.
- Estructura de datos del algoritmo de definición de horarios.

c) Desarrollar los algoritmos para definición de frecuencias y horarios.

- Algoritmo para la definición de frecuencias.
- Algoritmo para la definición de horarios.

d) Implementar un prototipo que incorpore los algoritmos implementados y presente las soluciones que estos generan.

- Interfaz de usuario para el uso de los algoritmos.
- Interfaz de usuario para las configuraciones de los algoritmos.
- Reporte de los horarios.

1.5 Herramientas, métodos, metodologías y procedimientos

A continuación se presentan las herramientas, metodologías, métodos y procedimientos que se utilizara en cada uno de los objetivos específicos. Se busca brindar una descripción a cada una de ellas e indicar el aporte que dan al Proyecto.

Se presentan solo las herramientas, metodologías, métodos y procedimientos que son considerados relevantes y se omiten los que se consideren triviales o cuyos usos no aporten un gran valor para la obtención de los resultados esperados.

1.5.1 Herramientas

En la tabla 1.1 se muestran los resultados esperados y las herramientas que se utilizarán para su obtención.

Tabla 1.1. Herramientas empleadas para cada resultado esperado

Resultados esperado	Herramientas
Función objetivo de los algoritmos	<ul style="list-style-type: none">• Literatura sobre el problema de optimización de redes de transporte.
Estructura de datos de los algoritmo	<ul style="list-style-type: none">• Literatura sobre el problema de optimización de redes de transporte.
Restricciones que se considerarán en el proyecto	<ul style="list-style-type: none">• Literatura sobre el problema de optimización de redes de transporte.
Algoritmo para la definición de frecuencias.	<ul style="list-style-type: none">• Literatura sobre el problema de optimización de redes de transporte.• Algoritmo enjambre de abeja.
Algoritmo para la definición de horarios.	<ul style="list-style-type: none">• Literatura sobre el problema de optimización de redes de transporte.
Interfaz de usuario para la muestra de las soluciones.	<ul style="list-style-type: none">• Netbeans IDE• Microsoft Excel

La literatura sobre los problemas de optimización de redes de transportes, permitirá ver cómo fueron definidas las funciones objetivos por los autores y que conjunto de restricciones que emplearon, en base a esto se definirán las funciones objetivos y las restricciones que se emplearan en este Proyecto.

Literatura sobre el problema de optimización de redes de transporte permitió también analizar los posibles algoritmos a emplear para el proyecto.

El IDE para programación de formularios brinda funcionalidades que facilitan la elaboración de una interfaz gráfica para la toma y muestra de información. Esta herramienta facilitó la creación de la interfaz gráfica para usuario donde se muestran los resultados de los algoritmos. En el Proyecto se utilizó Netbeans IDE con el lenguaje JAVA para la implementación de los algoritmos.

1.5.2 Métodos y procedimientos

A continuación se describirán los métodos y procedimientos que se utilizarán en el proyecto

1.5.2.1 Cálculo de la demanda

Para el cálculo de la demanda se tomó los datos de las validaciones en cada una de las estaciones del Metropolitano. Las validaciones son los registros que se generan cuando se hace uso de una tarjeta para el cobro de los pasajes. Las validaciones solo se dan en las entradas de las estaciones, por lo cual no se registran las salidas de los pasajeros. Por lo cual se utilizó la información de las entradas de los pasajeros para poder definir el itinerario de cada pasajero. En la Tabla 1.2 se muestra las validaciones de un día de un usuario.

Tabla 1.2 Ejemplo de validaciones de un usuario

FECHA	TARJETA	PARADA	MONTO
02/06/2015 19:34	49328892	Javier Prado	2.5
02/06/2015 12:19	49328892	Estacion Central	2.5
02/06/2015 08:51	49328892	El Milagro	2.5

Tomando las validaciones del usuario se asumió que este viaje desde la estación el Milagro hasta la Estación Central, desde la Estación Central hasta Javier Prado y desde Javier Prado hasta El Milagro. De esta manera se calculará la matriz origen-destino de la demanda de la red de transporte público.

1.5.3 Metodologías

En la implementación del proyecto se empleó la metodología de desarrollo Rational Unified Process (RUP), RUP provee un enfoque disciplinado para la asignación de tareas y responsabilidades. Su objetivo es asegurar la producción de programas de alta calidad que cumplan con las necesidades del usuario final, con un costo y cronograma previsible (IBM 2011, p 1).

Debido a la naturaleza del proyecto sólo se utilizó algunos de los componentes de RUP:

- Administración de requisitos.
- Desarrollo iterativo.
- Control de cambios.
- Modelado visual del software.
- Verificación de la calidad del software.

En la figura 1.2 se muestra el diagrama del modelo RUP a emplear.

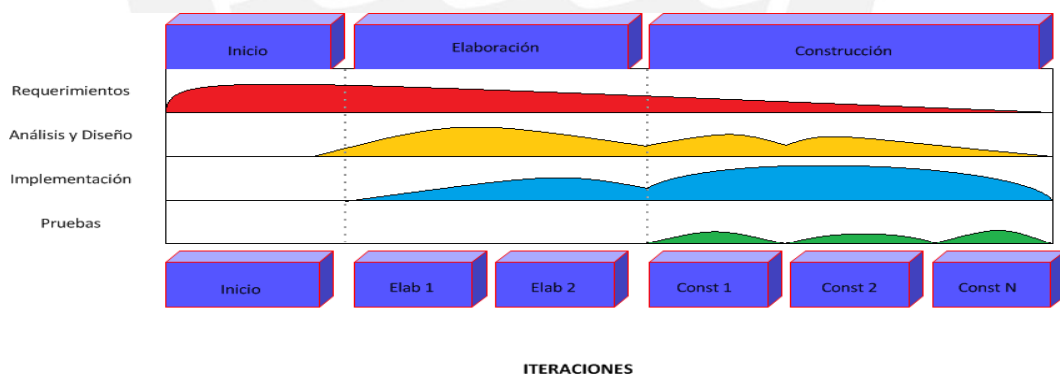


Figura 1.2: Diagrama del modelo RUP (Elaboración propia).

Los puntos más importantes son el desarrollo iterativo los cuales son guiados por los casos de uso. Al inicio de la etapa de desarrollo se definió los requisitos del programa y con ellos se generó casos de usos, los cuales se colocaron en un cronograma que consistió de iteraciones. La idea es poder medir el avance del proyecto según el cumplimiento de cada iteración, de forma que se pueda controlar los avances y manejar cualquier posible retraso.

1.6 Alcance

El presente Proyecto de fin de carrera es un proyecto de investigación aplicada en el campo de ciencias de la computación en el sub campo de algoritmos de optimización. El propósito del proyecto es definir frecuencias y horarios óptimos para una red de transporte público. En el proyecto se definió el cumplimiento de los siguientes puntos:

1. El diseño e implementación de la información necesaria para la definición de frecuencias y horarios.
2. Elaboración de algoritmos que permitan definir las frecuencias y horarios para una red de transporte público.
3. La presentación de los resultados mediante reportes a los usuarios. Los reportes incluyen la frecuencia y la hora inicial de salida de las unidades en cada ruta, también se generará los horarios de llegada de las unidades a cada paradero.

Las delimitaciones presentadas en el Proyecto fueron las siguientes:

1. Se utilizan valores promedios para representar tanto la demanda como la velocidad de tránsito en las calles. En el caso de la demanda se calculará un promedio para rangos de horas, los rangos serán de 3 horas desde las 5 a.m. a 11 p.m. Esto se debe a que el pronóstico de toda la demanda y velocidad de transporte para cada ruta a cada hora requerirá de una gran cantidad de inversión de tiempo para su cálculo. Además los valores promedios de demanda y velocidad de transito son suficientes para el cumplimiento de los objetivos del proyecto.
2. Se enfocará en el algoritmo enjambre de abeja y el algoritmo genético para el cálculo de frecuencias y horarios. Se escogió el algoritmo de enjambre de abeja porque no existen tantos trabajos que lo propongan para la definición de frecuencias y horarios; y se utilizó el algoritmo genético para la experimentación numérica, ya que esta es la más utilizada para este tipo de problemas. Por lo cual se puede medir el desempeño del algoritmo de enjambre de abeja contra el algoritmo más empleado en este tipo de problemas.

3. La interfaz de usuarios se realizará por programación de formularios y será un ejecutable. No se creará una interfaz de usuario web. Esto se debe a que la definición de frecuencias y horarios no es un proceso que se realiza de forma continua y no requiere de un gran número de usuarios.
4. El proyecto abarcará solo los pasos de definición de frecuencias y definición de horarios del Diseño de red de transporte público. Esto se debe a que los demás pasos (Definición de rutas, asignación de unidades y asignación de choferes) son complejos y requieren una mayor inversión de recursos para su elaboración.

1.6.1 Limitaciones

El proyecto tomó como caso de estudio el Metropolitano por lo cual los datos necesarios para el desarrollo del proyecto provienen de la información que brinde Pro transporte. Esta fue solicitada en las oficinas de Pro transporte.

1.6.2 Riesgos

Los riesgos asociados al proyecto son los relacionados a la obtención de datos de la red de transporte público. Los riesgos identificados son los siguientes:

Tabla 1.3 Riesgos del proyecto (Elaboración propia)

Riesgo identificado	Impacto en el proyecto	Medidas correctivas para mitigar
Dificultad para la obtención de datos.	Baja	En caso pasen 2 semanas sin respuesta por parte de Pro transporte se deberá informar que este no brinda la información pública solicitada.
Información incompleta.	Media	Se deberá estimar los datos faltantes en base a los datos que se tiene.
No se obtiene los datos de la red de transporte.	Media	Se deberá conseguir un nuevo caso de estudio como fuente de los datos necesarios.
Indisponibilidad del asesor.	Alta	Se deberá conseguir un nuevo asesor.

Se definió que el impacto de estos riesgos es mediana, ya que en caso no hubiese sido posible obtener los datos suficiente para el Proyecto hubiese sido necesario buscar una nueva fuente de información o utilizar un método para la obtención de los datos faltantes. Sin embargo la falta de estos datos no detiene completamente el avance del proyecto ya que tanto los algoritmos como la interfaz gráfica pueden seguir siendo implementados.

Si el asesor se encuentra indisponible se puede perder mucho tiempo en conseguir un nuevo asesor y durante todo ese tiempo no se contaría con las correcciones y ayudas que el provee.

1.7 Estudio de viabilidad

A continuación se presenta la justificación y la viabilidad del Proyecto de fin de carrera que se planteó.

1.7.1 Justificación

- El proyecto buscará optimizar las frecuencias de salidas de unidades y definir los horarios de las rutas que conforman la red de transporte público.
- Se brindará un mejor servicio a los pasajeros, se reducirán los tiempos de espera en paradero, se tendrá un mayor porcentaje de atención a la demanda y se contará con horarios que permitirá saber a los pasajeros la hora en la que pueden abordar las unidades y la hora que se espera llegar a su paradero.
- Permitirá definir el número de unidades necesarias para la atención a los pasajeros reduciendo los costos de operación y la incertidumbre sobre el número de unidades necesarias. Adicionalmente, se brindará horarios que podrán ser utilizados como una forma de control de unidades.
- El uso del algoritmo enjambre de abeja permitirá aportar información del desempeño de este algoritmo aplicada al problema de Diseño de transporte público.
- Los horarios definidos en este proyecto pueden serán utilizadas en los siguientes pasos del diseño de red transporte público, para la asignación de unidades a las rutas y de los choferes. Estos pasos pueden ser desarrollados en proyectos futuros.

1.7.2 Viabilidad del proyecto

A continuación se presentan los componentes que permitieron definir la viabilidad del proyecto.

- Viabilidad técnica: La elaboración del proyecto puede realizarse con las tecnologías disponibles y no requiere de ninguna tecnología difícil de obtener, instalar o aprender.
- Viabilidad temporal: Cada uno de los objetivos del proyecto pueden ser alcanzados en 75 horas hombre incluyendo la realización de las pruebas necesarias. Por lo tanto se estima que el proyecto puede ser cumplido en el rango de tiempo disponible para el proyecto de fin de carrera. Además se considera un pequeño rango de tiempo ante cualquier riesgo que se pueda presentar durante el desarrollo del mismo.
- Viabilidad económica: El proyecto no requiere de una gran cantidad de inversión monetaria ya que puede ser desarrollado utilizando programas y servicios libres o gratuitos.
- Análisis de necesidades: Los resultados del proyecto permitirían mejorar el servicio de transporte público brindado por el Metropolitano y el Metro.

CAPÍTULO 2: MARCO CONCEPTUAL

2.1 Objetivo del marco conceptual

En el Proyecto se ha visto la necesidad de describir algunos conceptos necesarios para un adecuado entendimiento de los algoritmos que se implementaron. A continuación se presenta información tanto de conceptos básicos, como el significado de algunos términos que se dan a lo largo del Proyecto.

En la primera parte se describirá los conceptos relacionados al problema que se abordará en el proyecto. Posteriormente se definirán conceptos relacionados a los parámetros y variables del problema, como grafos y su uso para la definición de rutas y paraderos. Por último se describirán conceptos relacionados a la realización de algoritmos heurísticos y meta-heurísticos.

2.2 Conceptos sobre la problemática

A continuación se presentarán los conceptos relacionados a la problemática que se abordará en el proyecto. A este tipo de problema se le conoce como problema de diseño de redes rutas de tránsito (TRNDP por sus siglas en inglés) el cual tiene como objetivo definir redes de rutas de transporte eficiente en costo y en servicio (Kepaptsoglou y Karlaftis 2009, p 491).

2.2.1 Problema del diseño de red de rutas de transporte (TRNDP)

El diseño de las rutas es el componente más importante del proceso de planeación de transporte público eficiente. Inicialmente se planteó que la solución el TRNDP está compuesto de cuatro pasos (Ceder 2001, p 126). Posteriormente se definieron cinco pasos para la solución de un TRNDP. Estos pasos son (a) Definición de rutas; (b) Definición de frecuencias; (c) Definición de horarios; (d) Asignar vehículos; (e) Asignar choferes (Kepaptsoglou y Karlaftis 2009. P 491).

2.2.2 Definición de frecuencias

En este paso de la planeación para la operación del transporte público se busca definir la frecuencia de unidades en cada ruta de la red (Guiahaire y Hao 2008, p 1254). La cual está definida generalmente por la cantidad de pasajeros esperados (demanda) y un conjunto de restricciones como disponibilidad deseada, valor máximo y/o mínimo de frecuencia, número de vehículos, factores locales deseados, entre otros (Kepaptsoglou y Karlaftis 2009, p 493).

Tomando como base un conjunto de rutas ya definidas y la demanda de pasajeros se busca definir la frecuencia de cada ruta que permitirá minimizar el tiempo de

espera de pasajeros, tiempo de transferencia y tiempo de viaje; mientras se maximiza la ganancia (Guihaire y Hao 2008, p 1254).

Luego de definidas las frecuencias se buscará establecer los horarios.

2.2.3 Definición de horarios

Los horarios de las rutas de buses son un componente importante en toda red de transporte público, ya que una de las medidas que los usuarios toman para medir el nivel de confianza del transporte público es la puntualidad. Ya que esta refleja su habilidad para mantener sus horarios (Mazlomi E., Mesbah M., Ceder A., Moridpour S. y Currie G. 2011, p 217).

Para lograrlos se busca definir puntos de llegada (*Timing points* en inglés), usualmente paraderos, a los cuales los vehículos deben llegar a una hora determinada, para cada uno de estos puntos de llegada se debe definir un tiempo de holgura (*Slack Time* en inglés) el cual permitirá compensar problemas de tráfico que se puedan originar a lo largo del viaje (Mazlomi, Mesbah, Ceder, Moridpour, Currie 2011, p 217).

Cuando se define los horarios de una ruta se busca también obtener un nivel de sincronización entre rutas, lo cual optimizará las transferencias de pasajero entre las rutas (Muñoz J., Giesen R., Knapp P. y Ibarra-Rojas O. 2015, p 1). Existen diversos métodos que permiten aumentar las posibilidades de estas sincronizaciones, una de ellas es el aumento de la frecuencia ya que se aumenta la posibilidad de sincronizaciones (Muñoz J., Giesen R., Knapp P. y Ibarra-Rojas O. 2015, p 2). Otro método es la implementación de tiempos de espera en paraderos, lo cual brindará una ventana de tiempo a los pasajeros para abordar las unidades. Estos tiempos de espera tienen la desventaja de que se irán acumulando, lo que incrementará el tiempo que le toma a cada unidad en terminar su ruta. (Mazlomi, Mesbah, Ceder, Moridpour, Currie 2011, p 220).

2.2.4 Sincronización de rutas

La sincronización busca que en paraderos que pertenezcan a más de una ruta, se busca sincronizar los buses para maximizar las transferencias, en especial bajo condiciones de bajas frecuencias, tiempos de viaje bajos y circunstancias de esperas no deseables (Muñoz J., Giesen R., Knapp P. y Ibarra-Rojas O. 2015, p 1).

2.3 Conceptos sobre los parámetros

A continuación se presentan los conceptos relacionados a los parámetros que se utilizarán para la solución del problema de frecuencias y horarios para transporte público.

2.3.1 Grafos

Un grafo finito G es definido como un par $(V(G), E(G))$ donde $V(G)$ es un conjunto finito y no vacío de elementos llamados nodos o vértice; $E(G)$ es un conjunto de pares de $V(G) \times V(G)$ que define una relación, una línea, entre dos nodos del conjunto $V(G)$, a los elementos de $E(G)$ también se les conoce como aristas (Giudici 1997, p 1).

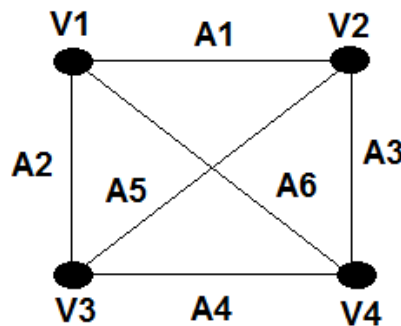


Figura 2.1 Grafo (Elaboración propia)

En la Figura 2.1 se muestra un grafo finito, donde el conjunto $V(G)$ está compuesto de los nodos $V1$, $V2$, $V3$ y $V4$. El conjunto $E(G)$ está compuesto de todas las líneas que conectan los nodos, de manera que la arista $A1$ que conecta el $V1$ y $V2$ puede estar representarse como $A1 = (V1, V2)$.

La lo largo del Proyecto se emplearon grafos finitos para representar la red de rutas de tránsito, donde cada nodo representará cruces, esquinas o paraderos, y cada arista representará las calles que se sigue para ir de un nodo a otro.

En la Figura 2.2 se tiene un ejemplo de una red de rutas representada con un grafo finito. En ella la ruta $P1$ - $P7$ está representado por la línea más gruesa, por lo tanto la ruta $P1$ - $P7$ estará compuesta por los paraderos $P1$, $P2$, $P3$, $P4$, $P5$, $P6$ y $P7$ y los caminos $C1$, $C2$, $C3$, $C4$, $C5$ y $C6$.

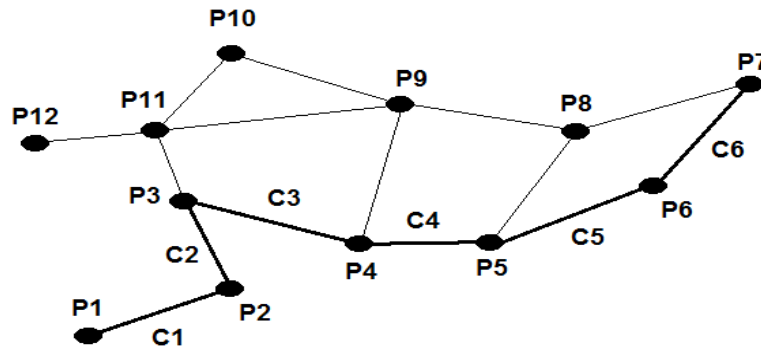


Figura 2.2 Red de rutas (Elaboración Propia)

2.3.2 Demanda

La demanda se representa en una matriz origen-destino de dimensiones $M \times M$, donde M es el número de paraderos. En la Tabla 2.1 se muestra un ejemplo de una matriz de demanda con 3 paraderos.

Tabla 2.1. Matriz de demanda.

Origen - Destino	Paradero 1	Paradero 2	Paradero 3
Paradero 1	-	16	30
Paradero 2	60	-	23
Paradero 3	40	32	-

La tabla muestra los valores de un periodo de horas. Se puede ver que el número de pasajeros que desean ir del paradero1 al paradero2 es de 16 en ese periodo.

2.4 Conceptos sobre los algoritmos

En esta sección se describen los conceptos relacionados a los algoritmos que se ven en el estado del arte.

2.4.1 Heurística y Meta-heurísticos

En muchos problemas de optimización computacional, obtener la solución óptima es muy difícil debido a la gran cantidad de posibles soluciones que se tienen que explorar, sin embargo para fines prácticos no es necesario hallar la solución óptima para un problema, muchas veces solo se necesita de una “buena” solución (Talbi 2009, p 1). En estas situaciones se emplean los algoritmos meta-heurísticos, ya que brindan una solución “aceptable” en un tiempo razonable para problemas computacionales complejos y difíciles si no que a diferencia de las optimizaciones exactas, los algoritmos meta-heurístico no garantizan que la solución sea la más óptima (Talbi 2009, p 1).

2.4.2 Búsqueda local

Una búsqueda local tiene como objetivo acercar la solución a la solución óptima, para ello se empieza por obtener una solución inicial del problema y en cada iteración la heurística reemplaza la solución actual por una solución vecina que mejore la función objetivo (Talbi 2009, p 121). En la Figura 2.3 se puede observar el comportamiento de una búsqueda local.

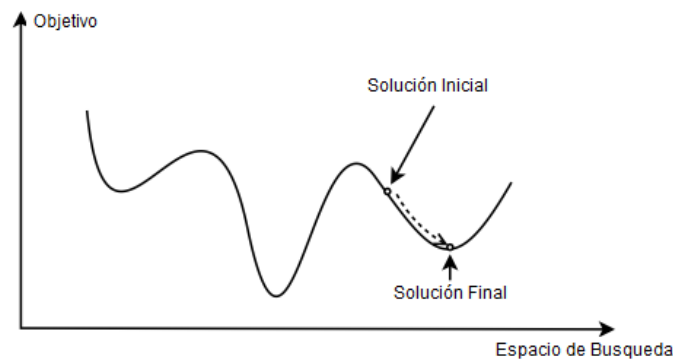


Figura 2.3 Comportamiento de una búsqueda Local (Talbi 2009, p 122)

Una vez hallada la solución inicial las soluciones vecinas son generadas utilizando una estrategia de selección propia del problema (Talbi 2009, p 121).

2.4.3 Algoritmo genético (GA)

Un algoritmo genético (GA por sus siglas en inglés) es un algoritmo evolutivo, que está basado en la noción de competencia de las soluciones. Cada iteración del algoritmo de optimización simula la evolución de las especies (Talbi 2009, p 199).

Primero se generan soluciones iniciales de forma aleatoria, estas soluciones son llamados soluciones padres (Talbi 2009, p 201). Los GA emplean un operador de cruce y un operador de mutación a dos de las soluciones padres para generar nuevas soluciones, llamadas descendencia, a las cuales se le aplica la función objetivo para identificar las mejores soluciones dentro de la descendencia, las cuales reemplazarán a las soluciones padres (Talbi 2009, p 201 - 204). Este proceso continuará de forma iterativa generando nuevas soluciones hasta que se alcance un punto de detención (Talbi 2009, p 201 - 204). En la Figura 2.4 se puede ver el proceso iterativo de un algoritmo evolutivo.

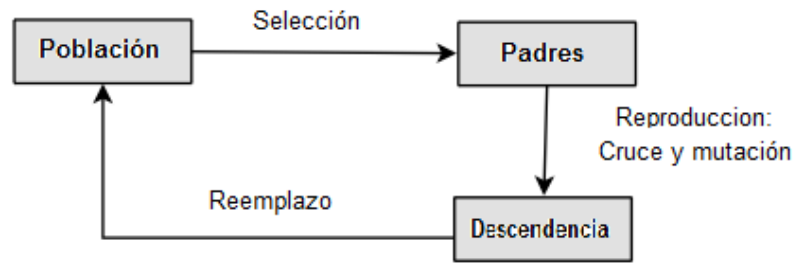


Figura 2.4 Algoritmo Genético (Talbi 2009, p 199).

2.4.4 Algoritmo colonia de hormiga

El algoritmo de colonia de hormiga (ACO por sus siglas en inglés), busca simular el método de comunicación de una colonia de hormigas para encontrar los mejores caminos para transportar su comida; estos utilizan una feromona para comunicar el mejor camino. Esta es una sustancia olfativa y volátil que se va disipando con el tiempo. Las hormigas seleccionarán su camino de acuerdo al nivel de feromona (Talbi 2009, p 240).

En la Figura 2.5 se puede ver el comportamiento de una colonia de hormiga en la búsqueda de un camino. Inicialmente cuando una hormiga encuentra un obstáculo tiene la misma probabilidad de escoger cualquier camino disponible. Cada hormiga dejará un rastro de feromonas, debido a que el camino derecho es más corto requerirá un tiempo de viaje menor y por lo tanto el rastro de feromonas será más intenso (Talbi 2009, 241).

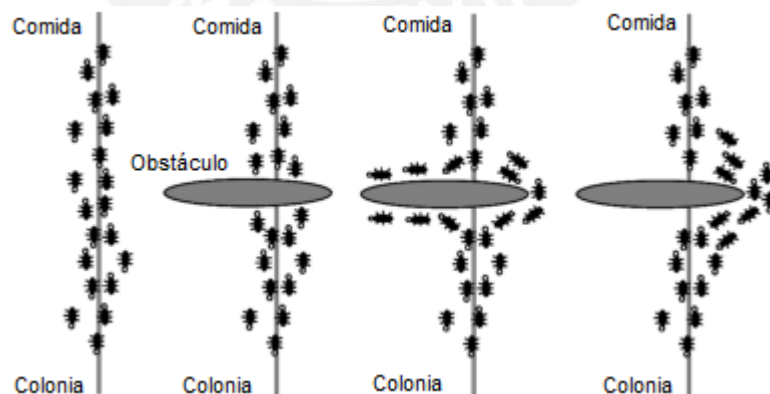


Figura 2.5 Gráfico del comportamiento de las hormigas (Talbi 2009, p 241).

El ACO simula el comportamiento de las hormigas seleccionando caminos de forma aleatoria para las hormigas, las hormigas que tengan los caminos más óptimos en cada iteración actualizarán las feromonas. Al finalizar las iteraciones los caminos óptimos tendrán un “nivel de feromona mayor” y se considerarán como las mejores soluciones (Talbi 2009, 241).

2.4.5 Algoritmo enjambre de Abejas

El algoritmo de enjambre de abejas (BCO por sus siglas en inglés) simula el comportamiento de un enjambre de abejas para la búsqueda y transporte de néctar. Para poder explicar el algoritmo de enjambre de abeja utilizaremos como referencia a Talbi (Talbi 2009, p 258). En el alcance que abarca este proyecto el comportamiento que se desea simular es de los “recolectores empleados”, los cuales son abejas que tienen una fuente de néctar ya asignada. Estas fuentes de néctar tienen tres posibles estados: bajo, suficiente y alto. Si el nivel de néctar es bajo la abeja abandonará la fuente. Si el nivel es suficiente la abeja continuará la recolección normalmente. Si una fuente de néctar se encuentra en un estado alto la abeja asignada a esta fuente reclutará a otra abeja para la recolección de néctar en esa fuente

En el Código 2.1 se puede ver el pseudocódigo del algoritmo enjambre de Abejas.

```

procedimiento BCO (B, IT, NP, NC) retorna S
  Hallar una solución inicial.
  S ← solución inicial.
  for j=1 to IT do
    for i=1 to B do
      solución de abeja i ← S
    end for
    for k=1 to NP do
      for r=1 to NC do
        for i=1 to B do
          Realizar una modificación a la solución de la abeja i.
          Evaluar la función objetivo de la solución de la abeja i.
          if la solución de la abeja i es mejor que S then
            S ← solución de abeja i.
          end if
        end for
      end for
    end for
    for i=1 to B do
      Decidir si la abeja i es fiel a su solución.
      if abeja i no es fiel a su solución then
        solución de abeja i ← solución de otra abeja
      end if
    end for
  end for
end procedimiento

```

Código 2.1 Pseudocódigo del algoritmo enjambre de abejas

Dónde:

- B: Número de abejas.
- IT: Número de iteraciones.
- NP: Número de pases por iteración.
- NC: Número de cambios por pase.
- S: Mejor solución.

Los pasos básicos para la implementación del algoritmo son los siguientes (Mikolic y Teodorovic 2014, p 7203 - 7205):

- Generar una solución inicial de manera aleatoria.
- Asignar a cada abeja un tipo, el cual indica la forma en que la abeja modificará la solución.
- Iniciar las iteraciones, las cuales esta compuestas de varios pases, la cual consiste en dos tipos de pases, un pase hacia adelante y un pase hacia atrás.

En el pase hacia adelante cada abeja modifica su solución de acuerdo a su tipo, luego verificará si su nueva solución es mejor que la mejor solución actual utilizando la función objetivo, si su solución es mejor esta pasará a ser la mejor solución (Mikolic y Teodorovic 2014, p 7203 - 7205). En el pase hacia atrás se definirá de forma aleatoria las abejas fieles, que serán las abejas que mantendrán su solución, las abejas no fieles seleccionarán de forma aleatoria una de las soluciones de las abejas fieles, comenzando una nueva etapa de pase (Mikolic y Teodorovic 2014, p 7203 - 7205).

2.5 Conclusión

Los conceptos sobre la problemática permiten comprender los diferentes componentes del problema, y del contexto, que es abordado en la solución del Proyecto. Estos conceptos permiten dividir el problema en sub-problemas que podrán ser abordadas una por una de forma secuencial a lo largo del proyecto.

Los conceptos que se presentaron en la parte de los parámetros, como la demanda y la velocidad de tránsito, permiten familiarizarse con los parámetros que se utilizaron en la modelación del problema, así como la estructura de los parámetros de entrada de la solución.

Los conceptos de los algoritmos permiten ver cómo funcionan los diferentes componentes de los algoritmos, como las búsquedas locales y soluciones iniciales que facilitará la implementación de estos componentes en la solución. Adicionalmente ayudan a la comprensión de los algoritmos que se utilizaron en la solución planteada en el Proyecto y las soluciones que se explorarán en el capítulo del estado del arte.



CAPÍTULO 3: ESTADO DEL ARTE

3.1 Objetivos de la revisión del estado del arte

En todo proyecto uno de los pasos más importante es la investigación de tecnologías o soluciones a un mismo problema o un problema similar. Esto nos permite realizar un proceso de evaluación comparativa con el cual se puede seleccionar los métodos, tecnologías o procesos más efectivos.

Adicionalmente la investigación de la literatura permite realizar comparaciones que muestran la efectividad de las soluciones planteadas o incluso formas en las que estas pueden ser mejoradas.

Con la revisión del estado del arte se busca mostrar de forma resumida los distintos métodos que se han utilizado para la solución del diseño de una red de transporte. Esto con la finalidad de seleccionar el método o métodos que mejor se adecuen y nos brinde la mejor solución al problema.

También brindará una base teórica para la elaboración del algoritmo que buscará solucionar el problema de diseño de horarios.

3.2 Método usado en la revisión del estado del arte

Se consultó literatura sobre los distintos métodos que buscan solucionar el problema de generación de horarios de transporte, el único criterio para la selección de la literatura será la solución de problemáticas similares a la del proyecto. Se ha determinado que este es el método más eficiente y más rápido, ya que existen gran cantidad de bibliografía acerca del diseño de una red de transporte y de los métodos que se emplean para solucionarlas, en las cuales en muchos casos se presentan los resultados de los métodos empleados.

3.3 Programación en enteros mixtos

Bruno Coswig Fiss implementó una solución utilizando programación de enteros mixtos para hallar una solución exacta al problema de ruteo para tránsito urbano (Coswig 2012).

Para medir la calidad de las soluciones, el autor define su función objetivo como 2 tipos de costos: (1) El primero calcula el costo de operación calculando el tiempo que le toma a una unidad ir desde el paradero inicial al paradero final de la ruta y

(2) El segundo calcula el tiempo de los pasajeros para llegar a su destino, considerando el tiempo para transbordo (Coswig 2012, p 29).

Coswig considera también dos restricciones principales: (1) Todas las rutas deben ser un solo camino y la red de rutas permitirán cubrir toda la demanda de los pasajeros incluyendo el uso de transbordo, (2) Se asume que las rutas no son direccionadas (Coswig 2012, p 29).

Luego de realizar las pruebas utilizando la red de caminos Suizos de Mandl obtuvo los resultados que se muestra en la Tabla 3.1. Dónde:

- di: Es el porcentaje de la demanda de clientes satisfecha con i transferencias.
- ATT: Es el tiempo promedio de viaje (en minutos por pasajeros).
- Co: Es el costo de operación.

Las columnas de las tablas indican el número de rutas que conforman la red de transporte público.

Analizando los resultados se puede ver que el tiempo de proceso se incrementa en gran medida cuando se aumenta el número de rutas, por lo tanto el uso de este método no es factible para el uso de un problema que tenga una gran cantidad de rutas.

**Tabla 3.1 Resultados de uso de programación entera mixta
(Coswig 2012, p 51-52)**

Número de Rutas	2	3
d0	84.90%	93.67%
d1	14.00%	5.43%
d2	1.10%	0.90%
ATT	11.33 min.	10.50 min
Co	98 min.	150 min.
Tiempo de proceso (s)	1065	78992
2 rutas	6-14-7-5-2-1-4-3-11-10-9-13-12 0-1-3-5-7-9-6-14-8	
3 rutas	4-3-11-10-12-13-9-7-5-2-1-0 4-3-1-2-5-14-6-9-10-11 0-1-4-3-5-7-9-6-14-8	

3.4 Algoritmo genético y Colonia de hormiga

Mazloni, Ceder, Moridpour y Currier realizaron una experimentación numérica para la solución del problema de diseño horarios de transporte utilizando los algoritmos de colonia de hormiga y un algoritmo genético (Mazloni, Mesbah, Ceder, Moridpour, Currie 2011). Los resultados de su experimentación se pueden observar en la Tabla 3.2 y la Tabla 3.3 respectivamente.

Analizando los resultados de la experimentación se puede observar que ambas soluciones resuelven el problema con mayor eficiencia cuando se tiene más soluciones posibles, sin embargo se observa que el algoritmo de colonia de hormiga es más eficiente que el algoritmo genético (Mazloni, Ceder, Moridpour y Currier 2011, p 230).

Los autores consideran cuatro componentes para su función objetivo: (1) Se busca minimizar el tiempo de espera del pasajero en paradero, (2) el tiempo del pasajero en el vehículo, (3) costo de operación y (4) el tiempo de holgura de las unidades a los paraderos (Mazloni, Ceder, Moridpour y Currier 2011, p 220).

La única restricción que los autores consideran es un máximo valor para los tiempos de holgura, el cual será un valor dado por los operadores (Mazloni, Ceder, Moridpour y Currier 2011, p 221).

Tabla 3.2 Resultado de la experimentación utilizando colonia de hormigas (Mazloni, Ceder, Moridpour y Currier 2011, p 230)

Colonia de hormigas						
			Eficiencia		Precisión	
N° de puntos de llegada	N° de posibles soluciones	Solución óptima (\$)	N° de evaluaciones	Soluciones evaluadas (%)	Solución obtenida por el algoritmos	Error (%)
2	288	5026	70	24.3	5048	37.8
3	952	4902	85	8.9	4963	22.5
4	1116	4909	98	8.7	4965	16.0
5	408	4947	74	18.1	4964	19.1

**Tabla 3.3 Resultado de la experimentación utilizando algoritmo genético
(Mazloni, Ceder, Moridpour y Currier 2011, p 230)**

Algoritmo genético						
N° de puntos de llegada	N° de posibles soluciones	Solución óptima (\$)	Eficiencia		Precisión	
			N° de evaluaciones	Soluciones evaluadas (%)	Solución obtenida por el algoritmos	Error (%)
2	288	5026	109	37.8	5079	8.5
3	952	4902	214	22.5	4964	8.3
4	1116	4909	179	16.0	4964	7.4
5	408	4947	78	19.1	5014	9.5

3.5 Algoritmo de colonia de abejas

En un trabajo realizado por Mikolic y Teodorovic, se implementó una solución utilizando el algoritmo de colonia de abeja (Mikolic y Teodorovic 2014). Para probar las soluciones se utilizó la red de caminos Suizos de Mandl para probar su eficiencia. Los resultados se encuentran en el Anexo 1: Tabla de resultados utilizando el algoritmo de colonia de abejas.

Los autores consideraban tres posibles funciones objetivos: (1) Buscar minimizar el número de pasajeros que no pueden atendidos, (2) buscar minimizar el tiempo de viaje de los pasajeros y (3) buscar minimizar el número de buses necesarios (Mikolic y Teodorovic 2014, p 7201).

En el trabajo realizado por Mikolic y Teodorovic se consideraron las tres funciones objetivos, de las cuales se generaron dos funciones objetivos. Uno de ellos da prioridad a los costos de usuario, dando mayor énfasis en la minimización de pasajeros no atendidos y el tiempo de viaje de los pasajeros, el segundo pone prioridad a la minimización del número de buses necesarios (Mikolic y Teodorovic 2014, p 7207).

3.6 Conclusión

Después de la realización del estudio del arte y de la evaluación comparativa que los autores realizan en sus trabajos, se pudo observar que debido al gran crecimiento de las posibles soluciones con relación al número de rutas que pueden componer una red de transporte público, el uso de algoritmos de optimización exacta es poco recomendable para redes de transporte que contengan muchas rutas. Por lo cual se decidió implementar algoritmos heurísticos en este Proyecto, ya que esta contiene varias rutas.

En el Proyecto se consideró una función objetivo que minimice el número de pasajeros no atendidos y el número de unidades necesarias. Se dio mayor importancia a la satisfacción de los pasajeros. Adicionalmente se consideró que el número de unidades será entrada del problema y funcionaria como una restricción, con lo cual la función objetivo se enfocará a la satisfacción del cliente, seleccionando a las soluciones que empleen menos unidades.

Se consideró dos restricciones principales. Se consideró que toda la demanda podrá ser cumplida, esto quiere decir que por cada entrada en la matriz de demanda existirán rutas, con uso de transbordo, que conecte esos paraderos. Se puede utilizar un número máximo de unidades para descartar soluciones que sobrepasan este límite.

El estudio del arte también permite identificar los diferentes componentes del problema que se desea solucionar en este tipo de proyecto. En la Figura 3.1 se muestra el árbol de problemas.

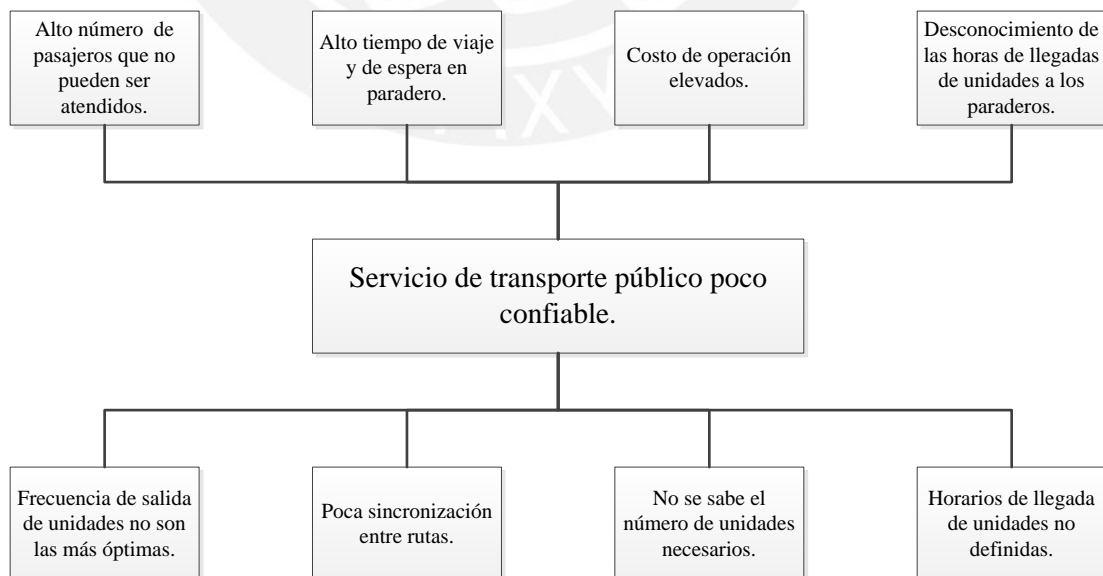


Figura 3.1 Árbol de problemas

CAPÍTULO 4: OBTENER, PROCESAR Y ALMACENAR LOS DATOS RELACIONADOS A LA RED DE TRANSPORTE PÚBLICO

En el presente capítulo se presenta el proceso seguido para alcanzar el primer objetivo específico del proyecto, el cual es obtener, procesar y almacenar los datos relacionados a la red de transporte público y el resultado del mismo. Se mostrará el método utilizado para el procesamiento de la información y el diseño de la estructura de datos que se empleará para guardar la información.

4.1 Base de datos de la red de transporte público

A continuación se detalla el proceso seguido para la implementación de la base de datos de la red de transporte que se utilizó en el proyecto.

4.1.1 Recolección de información

Con el fin de poder definir las frecuencias y horarios para una red de transporte pública, es necesario conseguir información sobre la red. Para ello se utilizó varias fuentes de información, como el Plan maestro de transporte urbano para el área metropolitana de Lima y Callao en la República del Perú (MTC, JICA 2014), las páginas web de Metro y Metropolitano (Metropolitano 2013), entidades encargadas de la gestión del transporte público. La información obtenida fue la siguiente:

- **Validaciones en estaciones del Metro**

Los datos de las validaciones del Metro fueron brindados por el Instituto Metropolitano Protransporte de Lima. Estos archivos contienen la información de todas las validaciones, marcado de una tarjeta, en las estaciones del Metro de Lima. Los archivos se encuentran en formato .txt y contienen la información que se registra cada vez que un usuario del metro hace uso de su tarjeta. Se observó que la información más relevante para el Proyecto son la fecha, hora y la estación en donde se usaron las tarjetas y el ID de la tarjeta. La estructura de la información contenida en estos archivos se puede apreciar en la Figura 4.1, la imagen muestra la información exportada a un archivo Excel para facilitar la visualización de los campos.

	A	B	C	D	H	I	J	K	L	M
1		FECHA	HORA	ESTACION	ID_TIPO	TIPO	NUM_EXTERNO	NUM_INTERNO	NUM_TRX_TARJETA	SALDO_ATEF
2		01-JAN-15	05:51:00	0001 V. El Salvador	17	Uso	5824769	776223628	425	8
3		01-JAN-15	05:51:01	0001 V. El Salvador	17	Uso	5868518	783628412	235	11
4		01-JAN-15	05:51:04	0001 V. El Salvador	17	Uso	4580620	1184901238	164	32
5		01-JAN-15	05:51:04	0001 V. El Salvador	17	Uso	5592576	674870620	382	2
6		01-JAN-15	05:51:06	0001 V. El Salvador	17	Uso	4824499	1770877344	522	5
7		01-JAN-15	05:51:07	0001 V. El Salvador	17	Uso	3813321	1389899082	702	13
8		01-JAN-15	05:51:07	0001 V. El Salvador	17	Uso	3907798	2330432906	89	5
9		01-JAN-15	05:51:07	0026 Bayóvar	17	Uso	5881556	776017500	149	6
10		01-JAN-15	05:51:09	0001 V. El Salvador	17	Uso	5354504	3580998340	736	4
11		01-JAN-15	05:51:09	0026 Bayóvar	17	Uso	5730658	820206332	337	25
12		01-JAN-15	05:51:10	0001 V. El Salvador	17	Uso	5242994	103113220	99	4.5
13		01-JAN-15	05:51:10	0026 Bayóvar	17	Uso	5574636	770600108	249	7.5

Figura 4.1 Validaciones del Metro

Las columnas relevantes para el proyecto son:

- FECHA: Indica la fecha en la que se utilizó la tarjeta.
- HORA: Indica la hora en la que se utilizó la tarjeta.
- ESTACION: Indica en que estación se utilizó la tarjeta.
- ID_TIPO: Muestra el tipo de transacción que se realizó.
- NUM_EXTERNO: El código de la tarjeta, única para cada tarjeta.
- NUM_INTERNO: El código interno de cada tarjeta.

Utilizando estos archivos es posible calcular la demanda del Metro. Para esto es necesario procesar la información. Con este fin se elaboró un programa que lee cada una de las entradas del archivo y que solo considere las de tipo 17 y 18, las cuales son entradas y salidas de la estación respectivamente. Una vez obtenido un registro de tipo 17 se debe buscar un registro de tipo 18 para la misma tarjeta y de esta forma se obtiene la estación de entrada y salida de una tarjeta. Las horas de cada registro son relevantes porque la demanda será separada en intervalos de 3 horas desde las 5 a.m. hasta las 11 p.m. Una vez procesada la información de un día se obtiene una matriz de demanda origen-destino diario para cada intervalo de hora como se puede apreciar en la Figura 4.2.

8	0	2	5	6	5	2	1	10	27	33	28	92	29	17	86	0	2	15	9	10	16	24	2	10	38	
0	0	0	1	1	1	3	4	3	9	23	5	33	2	9	20	1	1	4	2	1	3	4	2	3	9	
1	0	0	1	1	1	5	0	7	11	22	9	19	5	9	21	2	0	4	3	1	0	3	1	1	5	
7	3	0	5	1	1	1	5	10	17	27	19	79	15	11	68	1	1	9	6	11	6	15	5	4	21	
7	1	1	1	0	0	1	1	6	5	11	14	36	7	7	32	2	1	6	9	3	4	24	8	6	31	
10	0	0	1	1	1	0	1	2	10	8	8	52	8	8	34	3	1	3	5	5	9	18	8	7	20	
4	2	2	1	0	2	7	0	1	1	2	0	25	10	6	28	1	0	5	6	15	4	22	10	7	33	
2	1	2	0	0	0	0	2	0	0	0	1	11	2	2	18	1	2	2	7	4	2	5	2	6	6	
10	3	1	1	3	4	1	0	0	0	2	3	12	6	3	19	1	2	6	8	8	7	8	6	7	21	
20	4	2	11	6	2	1	1	0	1	0	0	4	1	1	7	3	3	12	13	19	9	15	7	12	34	
25	7	2	16	12	5	2	1	1	0	2	0	1	0	4	15	2	0	17	9	20	10	25	8	16	46	
11	0	1	5	11	5	2	1	1	0	2	2	1	0	2	7	0	0	5	2	3	6	9	8	5	22	
61	11	10	54	37	11	16	5	3	9	5	0	5	1	2	19	3	4	28	23	25	13	35	22	32	72	
17	2	2	14	6	2	3	3	7	4	0	1	2	1	0	0	0	2	7	4	11	4	16	6	12	34	
11	4	2	2	9	5	6	1	0	6	5	0	1	0	2	0	0	0	4	5	4	6	13	5	7	22	
54	15	11	33	34	9	11	6	9	14	15	7	15	1	2	6	0	1	14	10	15	9	31	12	24	71	
0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
2	0	0	5	2	4	1	1	0	5	5	0	2	0	1	0	0	0	2	2	1	3	2	2	0	3	
9	6	3	5	11	5	10	4	4	17	29	8	33	5	5	12	0	0	3	0	2	1	2	3	4	19	
6	2	2	1	5	3	9	3	7	19	22	3	29	7	3	16	1	2	0	2	0	0	1	1	4	9	
23	7	6	6	9	6	22	4	8	27	29	8	36	15	23	38	1	1	0	0	4	0	4	3	6	15	
15	3	3	12	9	1	9	2	3	16	29	6	37	9	14	15	2	2	0	0	1	2	0	1	1	4	
16	2	1	10	12	8	18	9	5	21	28	11	37	12	12	17	3	3	1	2	0	0	4	0	2	15	
11	1	1	5	5	0	11	1	5	9	20	5	22	8	7	28	1	2	5	1	1	0	1	1	1	1	
15	1	4	5	8	6	12	2	9	15	21	6	41	15	17	57	0	3	8	1	3	0	0	0	4	0	
48	8	2	29	24	18	37	13	26	61	74	25	115	52	53	101	2	6	18	14	10	2	0	0	0	4	

Figura 4.2 Matriz origen-destino de la demanda

Una vez obtenida la demanda diaria para cada día se calcula el promedio de los valores de cada matriz demanda origen-destino diario para obtener la matriz de demanda final. Se cuenta con la información de los meses de enero, febrero y marzo del 2015, se optó por utilizar la información de Marzo por ser la más actual y por qué tanto enero y febrero se consideran meses en la que una buena cantidad de usuario se encuentra de vacaciones.

- **Validaciones en estaciones del Metropolitano**

Los datos de las validaciones fueron brindados por el Instituto Metropolitano Protransporte de Lima. Los archivos contienen la información de todas las validaciones, marcado de tarjetas, en las estaciones del Metropolitano. Los archivos se encuentran en formato .csv y contiene la información de uso de las tarjetas del Metropolitano. La información más relevante es la fecha, hora y la parada en donde se usaron las tarjetas y el ID de la tarjeta. La estructura de la información se puede apreciar en la Figura 4.3.

1	FECHA	VALIDADOR	SECUENCIA	ARCHIVO	TARJETA	PERFIL	TIPO_VALIDADOR	TIPO_VALIDACION	PARADA	MONTO
2	01/06/2015 05:06	1043	1	2015\06\01\S_072	1074736179	GE	N	A	Matellini Alimentador	0.5
3	01/06/2015 05:06	1043	2	2015\06\01\S_072	3878606795	GE	N	A	Matellini Alimentador	0.5
4	01/06/2015 05:06	1043	3	2015\06\01\S_072	2935917699	GE	N	A	Matellini Alimentador	0.5
5	01/06/2015 05:24	1043	4	2015\06\01\S_072	242096332	GE	N	A	Matellini Alimentador	0.5
6	01/06/2015 05:25	1043	5	2015\06\01\S_072	1574445610	GE	N	A	Matellini Alimentador	0.5
7	01/06/2015 05:27	1043	6	2015\06\01\S_072	64602780	GE	N	A	Matellini Alimentador	0.5
8	01/06/2015 05:27	1043	7	2015\06\01\S_072	1174920058	GE	N	A	Matellini Alimentador	0.5
9	01/06/2015 05:30	1043	8	2015\06\01\S_072	1269746874	GE	N	A	Matellini Alimentador	0.5
10	01/06/2015 05:31	1043	9	2015\06\01\S_072	182524188	GE	N	A	Matellini Alimentador	0.5
11	01/06/2015 05:33	1043	10	2015\06\01\S_072	2199528723	PL	N	A	Matellini Alimentador	0
12	01/06/2015 05:37	1043	11	2015\06\01\S_072	183579868	GE	N	A	Matellini Alimentador	0.5
13	01/06/2015 05:37	1043	12	2015\06\01\S_072	2511105227	GE	N	A	Matellini Alimentador	0.5
14	01/06/2015 05:43	1043	13	2015\06\01\S_072	449525228	GE	N	A	Matellini Alimentador	0.5
15	01/06/2015 05:45	1043	14	2015\06\01\S_072	3130926692	GE	N	A	Matellini Alimentador	0.5
16	01/06/2015 05:52	1043	15	2015\06\01\S_072	2646521072	GE	N	A	Matellini Alimentador	0.5
17	01/06/2015 05:54	1043	16	2015\06\01\S_072	2199528723	PL	N	A	Matellini Alimentador	0
18	01/06/2015 05:56	1043	17	2015\06\01\S_072	4291383883	GE	N	A	Matellini Alimentador	0.5
19	01/06/2015 06:02	1043	18	2015\06\01\S_072	50461388	GE	N	A	Matellini Alimentador	0.5

Figura 4.3 Validaciones del Metropolitano

Las columnas de relevantes para el proyecto son:

- FECHA: Indica la fecha y hora en la que se utilizó la tarjeta.
- TARJETA: El código de la tarjeta, única para cada tarjeta.
- PARADERO: El paradero en la que se utilizó la tarjeta.

Utilizando estos archivos se calcula la demanda del Metropolitano. El procesamiento de la información es similar a la aplicada en la información del metro, con la diferencia que en el Metropolitano no se marcan las salidas. Al momento de recolectar la información se consultó cual era el proceso que se emplea en Protransporte para hallar la matriz origen-destino, se indicó que era necesario esperar una segunda entrada de los pasajeros y asumir que esta segunda entrada fue la salida del primer viaje. Similar a la demanda de metro, la demanda del Metropolitano también será calculada para intervalos de tiempo de 3 horas desde las 5 a.m. hasta las 11 p.m.

Una vez que se obtiene las matrices de demanda en cada día, la matriz final de demanda es calculada con el promedio de las demandas diarias. Se cuenta con la información de los meses de Junio y Julio 2015, se decidió utilizar la información del mes de Junio porque el mes de Julio posee varios días feriados que afectan el valor de la demanda final y por lo tanto se consideró que el mes de Junio presentaría una mejor representación de la demanda normal.

• Información desde las pagina web de Protransporte

Utilizando las fuentes digitales del Instituto Metropolitano Protransporte de Lima. Las cuales incluyen la página web de Protransporte (Metropolitano 2013) y la página web del Metro de Lima (Metro de Lima 2015) se obtuvieron los siguientes datos:

- Los paraderos del Metropolitano.
- La capacidad de los buses del Metropolitano (160 pasajero por unidad).
- La velocidad de viaje de los buses del Metropolitano (en promedio 30 km/h).
- Las estaciones del Metro.
- La capacidad de los vagones del Metro
- Tiempo de viaje entre paraderos del metro.

Todos estos datos fueron registrados manualmente para su utilización en el Proyecto.



CAPÍTULO 5: DISEÑAR LA SOLUCIÓN Y ESTRUCTURAS DE DATOS DE LOS ALGORITMOS

En este capítulo se presenta el segundo objetivo específico del proyecto. Antes de iniciar la implementación de los algoritmos es necesario definir los diversos componentes del mismo, desde la función objetivo, las restricciones hasta la estructura de datos que se empleó.

5.1 Función objetivo para el algoritmo de definición de frecuencias.

A continuación se define la función objetivo que se utilizó en el algoritmo que busca definir la frecuencia de las rutas de la red de transporte público. Los algoritmos que se emplearon son el algoritmo de colmena de abejas y el algoritmo genético.

Para definir la función objetivo, es necesario analizar los diferentes componentes de costos que se manejan en el problema de definición de frecuencias. El primer componente es el costo de operación, el cual indica cuanto le cuesta a la empresa encargada del servicio de transporte público mantener el funcionamiento de la misma. Como se mencionó anteriormente, en el presente Proyecto se dará mayor prioridad al costo de los pasajeros, por lo cual se tomó el componente de costo de operación como una restricción del algoritmo, es decir que el número de unidades necesarias no podrá exceder un valor asignado, de lo contrario se considera a la solución como una solución no válida. Esta decisión se basa en que la variable que diferencia el costo de operación entre las soluciones es el número de unidades que se usara en la red, ya que los demás costos de operación se mantendrán igual sin importar el valor de la frecuencia.

El segundo componente del costo en el problema de definición de frecuencias es el costo del pasajero, este costo no es monetario sino un costo temporal, es decir el tiempo que les toma a los pasajeros llegar hasta el paradero destino. Este costo está dividido en costo de espera en paradero y un costo de viaje. En el caso del Metro y Metropolitano que presentan velocidad de viaje constante, ambos poseen vías exclusivas para ellas, el costo de viaje es el mismo sin importar la frecuencias de las unidades en una ruta, a una persona le tomará el mismo tiempo viajar del paradero1 al paradero2 sin importar que tome el bus a las 5 a.m. o 10 p.m. y por lo tanto este costo no es relevante para la función objetivo del problema. El otro componente del costo de pasajero, tiempo de espera en paradero, es el costo que

buscaremos minimizar, ya que se encuentra directamente ligado a la frecuencia de unidades en cada ruta.

5.1.1 Función objetivo para la definición de frecuencias

En la Formula 5.1 se muestra la función objetivo:

$$\sum_{i=0}^{ruteNum} Te(i) * C(i)$$

Sujeto a:

1. $ruteNum \in N: 0 \leq ruteNum$

Figura 5.1 Función Objetivo de Frecuencia

El costo total de la solución F, el cual es un conjunto de números enteros que representan la frecuencia de las rutas donde F(1) es la frecuencia de la ruta 1, es el número de pasajero atendidos en cada ruta. La función Te (i) utiliza la frecuencia F(i) para calcular el número de pasajeros que pueden ser atendidos. El valor de C(i) es un coeficiente propio de cada ruta, el cual es utilizado para dar mayor paso al número de pasajeros atendidos en rutas con menos paradas (tiempos de viajes más cortos). El número de rutas debe ser un valor entero y positivo.

5.2 Restricciones del algoritmo de definición de frecuencias.

A continuación se presenta las restricciones bajo las que se encuentra la solución del problema:

1. El número total de unidades deberá ser menor o igual al máximo número de unidades establecido.
2. El número de pasajeros que lleva cada unidad debe ser igual o menor a la capacidad establecida.
3. El valor de frecuencia no deberá ser menor a 0 o mayor a 60. Este rango fue elegido para limitar el número de soluciones a explorar por los algoritmos.

5.3 Estructura de datos del algoritmo de definición de frecuencias.

A continuación se presenta la estructura de los datos que se empleó en el algoritmo utilizado para la definición de frecuencias:

5.3.1 Paradero

Representa un paradero de la cual se recogen y dejan pasajeros

- id: El identificador del paradero.
- name: El nombre del paradero.

5.3.2 Camino

Representa un tramo que une un paradero con otro

- id: El identificador del camino.
- stop1: El id del primer paradero
- stop2: El id del segundo paradero
- trafficSpeed: La velocidad en km/h en la que se mueve la unidad en el camino.
- distance: la distancia en km del camino

5.3.3 Ruta

Representa una de las rutas de la red de transporte público

- id: Identificador de la ruta.
- nombre: nombre de la ruta
- stops: Una lista de paradas de la ruta, estas se encuentran en orden en un tramo de ida.
- roads: Una lista de caminos que une cada una de los paraderos de la ruta, estas también se encuentran en orden en un tramo de ida.
- demand: la matriz de demanda de la ruta.

5.3.4 Red de transporte

Representa la red de transporte público

- routes: Es una lista de todas las rutas que componen la red
- routeNum: El número de rutas en la red
- unitNum: El máximo número de unidades que se pueden utilizar en la red.

5.3.5 Abeja

Representa una abeja que se encargara de explorar las posibles soluciones del problema.

- solution: Contiene la solución que está siendo explorada actualmente por la abeja.
- solutionValue: Es el costo de la solución actual.
- type: El tipo de la abeja, esta afecta la manera en la que la abeja modifica la soluciones.
- fidelity: El porcentaje de fidelidad de la abeja, una abeja fiel conservara su solución en el siguiente paso del algoritmo.
- beeHive: Una referencia a una clase que representa la colmena de abejas.

5.3.6 Colmena de abejas

Representa una colmena de abeja, la cual contiene el algoritmo que buscará la solución.

- beeNumber: El número de abejas que se utilizaran para buscar la respuesta.
- iterationNumber: El número de iteraciones que realizará el algoritmo.
- passNumber: El número de pasos que se realizará en cada iteración.
- changesNumber: Número de cambios que se realizara en cada paso.
- network: Una referencia a la red de transporte público.
- bees: Lista de abejas que estan explorando la solución.
- bestSolution: La mejor solución encontrada hasta el momento.
- solutionValue: El costo de la solución actual.

5.4 Función objetivo para el algoritmo de definición de horarios.

El objetivo de la función objetivo en la definición de horarios es la de maximizar las sincronizaciones entre las rutas, es decir, que las unidades de las distintas rutas lleguen a los paraderos de manera simultánea o en corto tiempo entre ellas.

Para ellos se tomó una hora inicial de salida y la frecuencia de cada ruta para calcular las llegadas de cada unidad a cada uno de los paraderos, utilizando estos tiempos se calculó el margen de tiempo de las unidades entre las rutas. Estos tiempos se usaran para contabilizar el número de sincronizaciones tomando un

valor límite que definirá si existe sincronización entre las unidades, este valor será una entrada del algoritmo. Adicionalmente se tomó el tiempo promedio de espera en las sincronizaciones para escoger una mejor solución entre dos soluciones con el mismo número de sincronizaciones.

Cabe acotar que el tiempo de espera de las unidades en cada paradero no afecta a las sincronizaciones ya que estas miden el tiempo de transbordo, el cual es únicamente el tiempo que transcurre desde que un pasajero baja de una unidad hasta el momento en el que este se sube a la otra unidad.

5.4.1 Función objetivo para la definición de horarios

En la fórmula 5.2 se muestra la función objetivo:

$$\sum_{i=0}^{ruteNum} Sy(i)$$

Sujeto a:

1. $ruteNum \in N: 0 \leq ruteNum$

Figura 5.2 Función Objetivo de Horarios

El costo total de la solución H, el cual es un conjunto de tiempos en horas y minutos que representan la hora inicial de salida de las unidades de las rutas, donde H(1) es la hora de salida de la primera unidad de la ruta 1, es la suma de las sincronizaciones que se dan en cada una de las rutas con las demás rutas. La función $Sy(i, A)$ utiliza la hora H(i) y F(i), frecuencia de la ruta i, para calcular el número de sincronizaciones con las demás rutas, el número de sincronizaciones debe ser un número entero. Adicionalmente se calculó también el promedio del tiempo entre las unidades en las sincronizaciones para hallar la mejor solución entre soluciones con el mismo número de sincronizaciones.

5.5 Restricciones del algoritmo de definición de horarios.

A continuación se presenta las restricciones bajo las que se encuentra la solución del problema:

1. El rango de tiempo entre las unidades no debe sobrepasar un valor establecido para ser considerado una sincronización.
2. El tiempo inicial de las salidas en cada ruta debe cumplir con el horario de funcionamiento de la ruta, es decir si una ruta funciona desde las 6 a.m. la hora de salida de la primera unidad no podrá ser después de las 6 a.m.

5.6 Estructura de datos del algoritmo de definición de horarios.

La estructura de datos empleados para los paraderos, caminos, rutas y red de transporte son las mismas que las utilizadas en los algoritmos para la definición de frecuencias. A continuación se presenta la estructura de los datos definida en el algoritmo utilizado en la definición de horarios:

5.6.1 Individuo

Representa un individuo dentro de la población, este contiene una solución del problema.

- solution: Contiene la solución que posee el individuo.
- solutionValue: Es el valor de la solución actual.
- population: Una referencia a una clase que representa la población actual.

5.6.2 Population

Representa la población actual que está siendo explorado por el algoritmo genético.

- indNumber: El número de individuos que se utilizaran para buscar la respuesta.
- iterationNumber: El número de iteraciones que realizará el algoritmo.
- mutationChance: La probabilidad de mutacion cuando se crea una nueva descendencia.
- network: Una referencia a la red de transporte público.
- population: Lista de individuos de la población actual.
- bestSolution: La mejor solución encontrada hasta el momento
- solutionValue: El costo de la mejor solución actual

CAPÍTULO 6: IMPLEMENTACIÓN DE LOS ALGORITMOS

En este capítulo se presenta la implementación de los algoritmos y de sus componentes utilizados para la definición de frecuencias como en la definición de horarios.

6.1 Algoritmo para definición de frecuencias

A continuación se presentan las funciones más relevantes implementadas para la definición de las frecuencias.

6.1.1 Creación de una solución inicial

Para generar una solución inicial se tomó como entrada el número de rutas y el rango posible de la frecuencia. Para cada una de las rutas se toma un valor al azar en el rango de frecuencias. Luego se valida si la solución es una solución posible al problema (En el caso de la frecuencia se utiliza el número de unidades necesario para ver si una solución es posible o no). Si la solución no es válida se genera una nueva solución hasta que se encuentre una que sea válida.

6.1.2 Simulación del comportamiento de las unidades

Tomando como entrada una solución (un conjunto de frecuencias), esta función realiza una simulación de un día y genera un registro de las horas de llegada de cada unidad a cada estación a través del día. Este registro se utiliza posteriormente para calcular el valor de la función objetivo. En la figura 6.1 se puede apreciar una parte el registro generado.

```
06:19 | 26-RutaA-Los Jazmines-C  
06:19 | 10-RutaA-Uni-G  
06:19 | 31-RutaA-Uni-C  
06:19 | 15-RutaA-Los Jazmines-G  
06:19 | 35-RutaA-Ramon Castilla-C  
06:19 | 16-RutaA-Independencia-G  
06:19 | 36-RutaA-Tacna-C  
06:19 | 17-RutaA-Pacifico-G  
06:19 | 5-RutaB-Canada-C  
06:19 | 1-RutaB-Parque del Trabajo-G  
06:19 | 6-RutaB-Benavides-C  
06:19 | 5-RutaC-Canada-C  
06:19 | 1-RutaC-Aramburu-G  
06:20 | 10-Ruta2-Canaval y Moreyra-C  
06:20 | 0-Ruta3M-Javier Prado-G
```

Figura 6.1 Registro de unidades

6.1.3 Cálculo del valor de la función objetivo

Utilizando el registro generado en la simulación, se simula el embarque y desembarque de los usuarios en cada una de las estaciones, al final de la simulación se utiliza el número de usuarios atendidos como el valor de la función objetivo. En caso que varias soluciones tengan el mismo valor, se utilizará el número de unidades necesarias para diferenciar a la mejor solución, las soluciones que necesiten menos unidades son consideradas mejores.

6.2 Algoritmo para la definición de horarios

A continuación se presentan las principales funciones empleadas para la definición de horarios

6.2.1 Creación de una solución inicial

Para generar una solución inicial se tomó como entrada el número de rutas y el rango horas de salida posible. Se genera un conjunto de horas de salidas iniciales.

6.2.2 Simulación del comportamiento de las unidades

Tomando como entradas las horas iniciales de salida y la frecuencia, se realiza una simulación de un día y genera un registro de las horas de llegada de cada unidad a cada estación a lo largo del día. Este registro se utiliza posteriormente para calcular el valor de la función objetivo. El registro resultante es similar a la generada en la simulación utilizada en la definición de frecuencias.

6.2.3 Cálculo del valor de la función objetivo

Con el registro generado en la simulación y utilizando un valor máximo de tiempo para las sincronizaciones, calcula el número de sincronizaciones que se da a lo largo del día. Por cada entrada en el registro se calcula el número de sincronizaciones que se da con las unidades de las otras rutas. Las soluciones que posean un mayor número de sincronizaciones a lo largo del día se consideran mejores. En caso se tenga dos soluciones con el mismo valor, se tomara el tiempo promedio entre las unidades para definir cuál de las dos soluciones es la mejor.

6.3 Algoritmo enjambre de abejas

A continuación se presenta los principales métodos implementados para el algoritmo de enjambre de abejas. En el código 6.1 se muestra el pseudocódigo del algoritmo.

```

procedimiento BCO (B, IT, NP, NC) retorna S
  Hallar una solución inicial.
  S ← solución inicial.
  for j=1 to IT do
    for i=1 to B do
      solución de abeja i ← S
    end for
    for k=1 to NP do
      for r=1 to NC do
        for i=1 to B do
          Realizar una modificación a la solución de la abeja i.
          Evaluar la función objetivo de la solución de la abeja i.
          if la solución de la abeja i es mejor que S then
            S ← solución de abeja i.
          end if
        end for
      end for
    end for
    for i=1 to B do
      Decidir si la abeja i es fiel a su solución.
      if abeja i no es fiel a su solución then
        solución de abeja i ← solución de otra abeja
      end if
    end for
  end for
end procedimiento

```

Código 6.1 Pseudocódigo del algoritmo enjambre de abejas

6.3.1 Modificar solución de la abeja

A cada abeja se le asigna un tipo al momento de su creación, el cual define la forma en la que la solución será modificada. Se selecciona un valor dentro de la solución y a esta se le restará o sumará, dependiendo del tipo de abeja, una unidad. Luego se evaluará la solución con la función objetivo. En el código 6.2 se muestra el pseudocódigo del método.

```

procedimiento modificarSolucion(abeja)
  indice ← generar numero al azar.
  tipo ← tipo de abeja
  if tipo == suma do
    solución[indice] ← solución[indice] + 1
  end if
  if tipo == resta do
    solución[indice] ← solución[indice] - 1
  end if
  abeja ← evaluar solución
end procedimiento

```

Código 6.2 Pseudocódigo del método de modificación de solución

6.3.2 Definir fidelidad de abeja

Al final de cada paso se decide la fidelidad de las abejas, las abejas fieles mantendrán sus soluciones, mientras que las que no, tomarán la solución de una de las abejas fieles. En el código 6.3 se muestra el pseudocódigo del método.

```

procedimiento pasoAtraz(B)
  for i = 1 to B do
    abeja i ← es fiel?
  end for
  for i = 1 to B do
    if abeja i no es fiel do
      abeja i ← solución de abeja fiel
    end if
  end for
end procedimiento

```

Código 6.3 Pseudocódigo de la definición de fidelidad

6.4 Algoritmo genético

A continuación se explican los métodos más importantes implementados para el algoritmo genético. En el código 6.4 se muestra el pseudocódigo del algoritmo genético.

```
procedimiento GA(I, IT) retorna S  
  P ← generar población inicial  
  for j = 1 to IT do  
    P ← generar descendencia  
    P ← identificar mejores individuos(P)  
    S ← mejor solución de P  
  end for  
end procedimiento
```

Código 6.4 Pseudocódigo del algoritmo genético

6.4.1 Generación de descendencia

En cada iteración se genera una nueva descendencia juntado a cada individuo con cada uno de los individuos. La descendencia hereda valores de los padres. Adicionalmente existe una probabilidad de mutación que asigna un valor aleatorio en la descendencia. En el código 6.5 se muestra el pseudocódigo de la generación de la descendencia.

```
procedimiento generaDescendencia(P) retorna P  
  for i = 1 to P do  
    for j = 1 to P do  
      descendencia ← reproducir P[i] y P[j]  
      if hay Mutacion do  
        index ← generar al azar  
        descendencia[index] ← generar al azar  
      end if  
      D ← descendencia  
    end for  
  end for  
  unir D a P  
  identificar mejores en P  
end procedimiento
```

Código 6.5 Pseudocódigo de la generación de descendencia

6.5 Comparación de los algoritmos

Una vez implementados los algoritmos se realizó una comparación de su desempeño. Los resultados se pueden ver en el Anexo 2.

En los resultados se puede apreciar que para la definición de frecuencias ambos algoritmos dan valores para la función objetivo bastante similares, sin embargo el algoritmo genético tiene tiempos mucho más bajos. Esto se debe a la condición de parada, el cual indica que si una solución se mantiene como mejor solución por varias iteraciones el algoritmo se detiene y toma esa solución, y el corto rango de valores posibles para la frecuencia. El algoritmo genético tiene mayor probabilidad de encontrar una buena solución en las primeras iteraciones, debido a que este utiliza un número de individuos iniciales a diferencia de la colonia de abeja que solo utiliza 1.

Para la definición de horarios se observa que el algoritmo genético da mejores resultados pero también le toma un poco más de tiempo. Esto se debe a que el rango de valores de los horarios es mucho mayor que el de las frecuencias y que en cada iteración tiene más probabilidades de encontrar una nueva mejor solución debido a la naturaleza más aleatoria que el algoritmo posee en comparación al algoritmo colmena de abeja.

Con esto se puede concluir que el algoritmo genético se desempeña mejor tanto para la definición de frecuencias como para la definición de horarios porque presenta menores tiempos y mejores resultados respectivamente.

CAPÍTULO 7: IMPLEMENTACIÓN DEL PROTOTIPO

En el siguiente capítulo se muestra la información y la aplicación que contiene los algoritmos.

7.1 Formulario para la ejecución de la aplicación

Se creó un conjunto formularios para la aplicación para que los usuarios puedan interactuar con el programa utilizando una interfaz gráfica. En la Figura 7.1 se muestra la interfaz para ejecutar el programa.

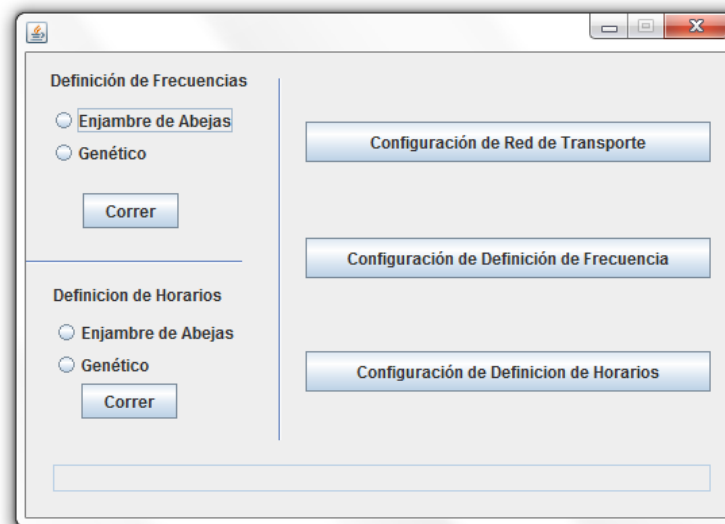


Figura 7.1 Interfaz para la ejecución del programa

En el formulario se puede elegir ejecutar el algoritmo para la definición de las frecuencias o el algoritmo de definición de horarios. Adicionalmente se puede escoger si se quiere utilizar el algoritmo colmena de abejas o el algoritmo genético. El formulario también presenta botones que abren formularios adicionales que permiten cambiar la configuración de los algoritmos.

7.2 Formularios de configuraciones

El programa cuenta con un conjunto de interfaces que facilitan la modificación de las configuraciones de los diferentes algoritmos. En la Figura 7.2 se muestra la interfaz gráfica para la configuración del algoritmo de definición de frecuencias.

Definición de Frecuencias: Configuraciones

General

Maximo de unidades: 300

Capacidad maxima de unidades: 120

Condicion de parada (Misma solución): 10

Frecuencia máxima (minutos): 30

Frecuencia mínima (minutos): 5

Ubicacion del reporte: D:/Tesis/Programs/TesisProgram/Reports

Generar Reporte: NO

Abejas

Número de iteraciones: 100

Número de abejas: 4

Número de pases: 3

Número de cambios por pase: 2

Fidelidad por defecto: 0.5

Fidelidad para mejor solución: 0.9

Genetico

Número de iteraciones: 100

Número de individuos: 4

Probabilidad de mutacion: 0.01

Aplicar Cancelar

Figura 7.2 Interfaz de configuración para la frecuencia

En la interfaz se muestra todos los campos y sus valores actuales, los campos pueden ser cambiados individualmente y se guardaran al presionar el boto “Aplicar” en caso se no se desea realizar modificaciones se puede cerrar la ventana o presionar el boto “Cancelar”. La interfaz para la configuración del algoritmo de definición de horarios es similar a la presentada, en la Figura 7.2 se muestra el interfaz para la configuración de los algoritmos para definición de horarios.

Figura 7.3 Interfaz de configuración para los horarios

También se cuenta con una interfaz para configuraciones generales, el cual se muestra en la Figura 7.3.

Figura 7.4 Interfaz de configuraciones generales

La solución cuenta también con reportes que pueden ser habilitados en las configuraciones, los ejemplos de los reportes se encuentran en el Anexo 3.

CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En la sección de recomendación y trabajos futuros se presentaran posibles mejoras que se pueden aplicar en el futuro, los cuales mejorar tanto el desempeño como la presentación de la aplicación.

En la segunda parte del capítulo se presentan las conclusiones obtenidas luego de finalizado el proyecto y de todos los objetivos planteados en ellas.

8.1 Conclusiones

Si bien obtener la información necesaria para el Proyecto fue simple y rápida. Esta no se encuentra almacenada de forma ordenada y no se cuenta con un medio para acceder a ella, a pesar que todo usuario tiene derecho a poder acceder a esta información. Un ejemplo de esto es la información de las validaciones, estas se encuentran en archivos Excel, las cuales no tiene ningún tipo de documentación, incluso la información de las validaciones del Metro y Metropolitano presentan diferencia en su formato, a pesar de que ambos servicios son administrados por la misma entidad. La información de la demanda tuvo que ser deducida en base a las validaciones ya que no se contó con la información exacta de la demanda de pasajeros.

Tanto la definición de frecuencias como la definición de horarios presentan muchas posibles restricciones y diversos componentes en sus costos. Por ello fue necesario basarse en la literatura actual sobre el tema para identificar los diversos componentes para la función objetivo e identificar que componentes eran las más relevantes y que representen mejor el objetivo deseado.

Durante la implementación de la definición de frecuencias y de horarios se tuvo que tener en cuenta que estos deben ser suficientemente versátiles como para poder ser ejecutados utilizando diferentes algoritmos de optimización, por lo cual tanto la estructura de los datos como los métodos implementados deben ser altamente reutilizables.

Por último se tuvo en cuenta la necesidad de poder modificar la configuración de los distintos algoritmos de forma fácil, por lo cual se implementó una interfaz que permite modificarla de forma intuitiva.

8.2 Recomendaciones y trabajos futuros

En primer lugar, para el cálculo de la demanda de pasajeros en el caso del Metropolitano se emplearon las validaciones de las tarjetas, sin embargo estas

validaciones no registran las salidas de los pasajeros, por lo cual se tuvo que realizar un seguimiento del uso de la tarjeta de cada usuario para poder deducir las salidas de cada pasajero. Debido a que no es posible saber el destino de los pasajeros que solo realizan un viaje al día, esto genera que la demanda calculada pierda exactitud. Por ello se recomienda en el futuro registrar también los destinos de cada pasajero, con el fin de tener una demanda más exacta.

Este proyecto se enfoca en dos pasos del diseño de una red de transporte público tomando como entrada el paso 1 del diseño, definición de rutas, por lo cual el resultado del presente Proyecto puede ser utilizado como entrada de los siguientes pasos del diseño de una red de transporte público, los cuales serían la asignación de unidades y la asignación de choferes. Adicionalmente el registro generado en la definición de horarios puede ser utilizado para definir controles en cada estación y controlar que las unidades se encuentren dentro del horario, también puede ser utilizado para indicar a los pasajeros las horas de llegada de las unidades a cada estación.

En el futuro es posible realizar modificaciones a los algoritmos para optimizar su desempeño y reducir el tiempo de ejecución. También es posible la implementación de un tercer algoritmo para brindar mayor información a la experimentación numérica y a la comparación del desempeño de entre los algoritmos.

También se propone mejorar la interacción de los algoritmos de definición de frecuencia y el algoritmo de definición de horarios, de forma que estas puedan ser ejecutadas al mismo tiempo y que la interacción en tiempo real entre ellas permita hallar mejores soluciones.

BIBLIOGRAFIA

América Noticia (2015). "Metropolitano: Municipalidad de Lima administraría mal frecuencia de buses" consulta: 18 de abril del 2015. <http://www.americatv.com.pe/noticias/actualidad/acusan-municipalidad-lima-administrar-mal-frecuencia-buses-metropolitano-n177547>

Ceder, A. (2001). "Operational objective functions in designing public transport routes." J. Adv. Transp.

Costa, G. (2015). El Comercio. "Transporte público: ¿continuidad o ruptura?" consulta: 18 de abril del 2015. <http://elcomercio.pe/lima/transporte/transporte-publico-continuidad-ruptura-gino-costa-noticia-1788679>

Coswig, B (2012) "Exact and metaheuristic algorithm for the UTRP". Universidade Federal do Rio Grande Do SUL.

Giudici, R. (1997). "Introducción a la Teoría de los grafo".

Guihaire, V., Hao, J.-K. (2008). "Transit network design and scheduling: A Global Review". Transportation Research. Part A 42.

JICA (2013). "Encuesta de recolección de información básica del transporte urbano en el área metropolitana de Lima y Callao".

Hyndman R. (2009). "Moving averages". International Encyclopedia of Statistical Science.

IBM (2011). "Rational Unified Process: Best Practices for Software Development Teams".

Lima Cómo Vamos (2014) "Quinto Informe de percepción sobre la calidad de vida".

Kepaptsoglou K., Karlaftis M. (2009). "Transit route network design problema: Review".

Mandl, J. (1980) Evaluation and optimization of urban public transportation networks. Euro-pean Journal of Operational Research, [S.I.], v.5, n.6.

Mazlomi E., Mesbah M., Ceder A., Moridpour S., Currie G. (2011) "Efficient transit schedule design".

Metro de Lima (2015) "Página Principal". Consultado 04 de Setiembre. <http://www.lineauno.pe/>

Metropolitano (2013). "Ruta troncal". Consulta 18 de Abril del 2015. <http://www.metropolitano.com/index.php/como-usar-el-metropolitano/rutas/ruta-troncal>

Metropolitano (2013). "Ruta alimentadora". Consulta 18 de Abril del 2015. <http://www.metropolitano.com/index.php/como-usar-el-metropolitano/rutas/ruta-alimentadora>

Metropolitano (2013). "Servicio Regular". Consulta 18 de Abril del 2015. <http://www.metropolitano.com/index.php/como-usar-el-metropolitano/servicios/servicio-regular>

Metropolitano (2013). "Servicio Expreso". Consulta 18 de Abril del 2015. <http://www.metropolitano.com/index.php/como-usar-el-metropolitano/servicios/servicio-expreso>

Mikolic, M., Teodorovic D. (2014) "A simultaneous transit network design and frequency setting computing with bees". University of Belgrade, Servia.

MTC, JICA (2004). "Plan maestro de transporte urbano para el área metropolitana de Lima y Callao en la República del Perú". Consulta: 2 de abril 2015. <http://www.protransporte.gob.pe/pdf/info/publi2/Resumen%20Plan%20Maestro.pdf>

Muñoz J., Giesen R., Knapp P., Ibarra-Rojas Omar (2015) "Scheduling synchronized public transport systems considering holding times and demand assignment". Elsevier B.V.

RPP Noticias (2015). "Metropolitano: Aumentan 8 buses en ruta troncal debido a mayor demanda" consulta: 18 de abril del 2015. <http://www.rpp.com.pe/2015-04-09->

metropolitano-aumentan-8-buses-en-ruta-troncal-debido-a-mayor-demanda-
noticia_785804.html

Talbi, E. (2009) "Metaheuristics from design to implementation". Jhon Wiley & Son

