

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

IMPLEMENTACIÓN DE UN ALGORITMO GENÉTICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE FLUJO VEHICULAR APLICADO A LA FASE DE TIEMPOS EN LAS INTERSECCIONES DE UN CORREDOR VIAL

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

Javier Denis Medina Nolazco

Asesor: Ing. Rony Cueva Moscoso

Lima, noviembre del 2015

A mi madre, por su amor infinito
A mi padre, por heredarme su alegría
A Diana y David, que no dejaron de apoyarme
Al Ing. Cueva, a quien admiro y respeto mucho
A Roxana y a mis amigos, por haber hecho de estos años
los mejores de mi vida.

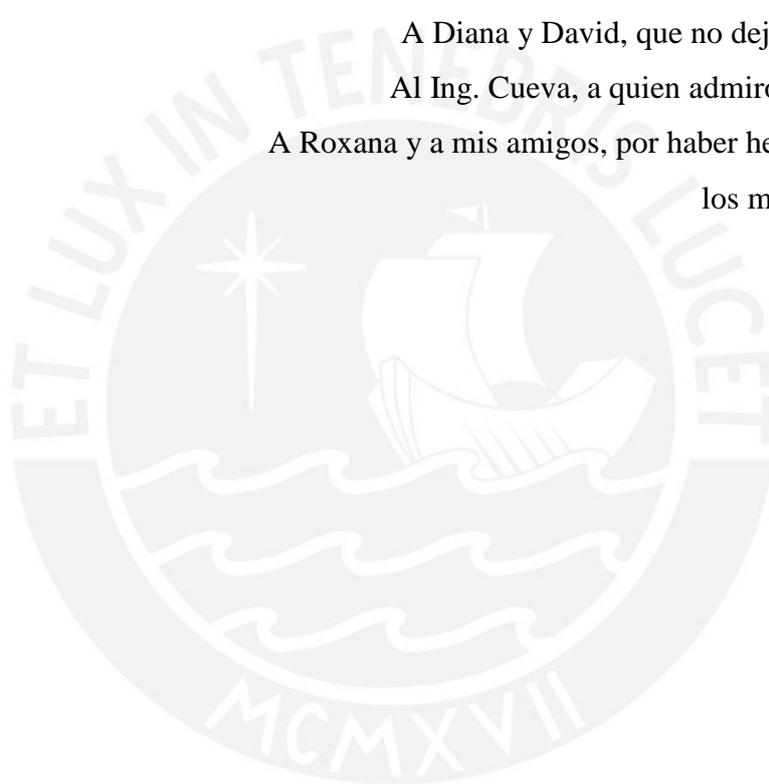


TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1: PROBLEMÁTICA	9
1.1 OBJETIVO GENERAL	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
1.3 RESULTADOS ESPERADOS.....	13
CAPÍTULO 2: HERRAMIENTAS, MÉTODOS, METODOLOGÍAS Y PROCEDIMIENTOS.....	15
2.1 INTRODUCCIÓN	15
2.2 HERRAMIENTAS	16
2.3 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	17
2.4 METODOLOGÍAS	17
2.5 ALCANCE.....	20
2.6 LIMITACIONES	21
2.7 RIESGOS.....	22
2.8 JUSTIFICATIVA Y VIABILIDAD DEL PROYECTO	24
2.8.1 <i>Justificativa</i>	24
CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO	25
3.1 MARCO CONCEPTUAL	25
3.1.1 <i>Introducción</i>	25
3.1.2 <i>Objetivo del marco conceptual</i>	25
3.1.3 <i>Semáforo</i> :	25
3.1.4 <i>Unidad de Control</i>	29
3.1.5 <i>Detectores</i>	29
3.1.6 <i>Flujo Vehicular</i>	32
3.1.7 <i>Ecuación Fundamental del Tráfico</i>	35
3.1.8 <i>Meta heurística</i>	37
3.1.9 <i>Algoritmo genético</i>	39
3.2 MARCO REGULATORIO / LEGAL	39
CAPÍTULO 4: ESTADO DEL ARTE.....	40
4.1 INTRODUCCIÓN	40
4.2 OBJETIVOS DE LA REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	40
4.3 SISTEMA COORDINADO ADAPTATIVO DE TRÁFICO DE SYDNEY (SCATS)	40
4.3.1 <i>Historia de desarrollo del sistema</i>	40
4.3.2 <i>Prueba de su efectividad</i>	41
4.3.3 <i>Descripción del funcionamiento</i>	42

4.3.4	<i>Otras ventajas del sistema</i>	43
4.4	SOCIEDAD IBÉRICA DE CONSTRUCCIONES ELÉCTRICAS – ADIMOT	44
4.4.1	<i>Descripción de su funcionamiento</i>	45
4.5	CONCLUSIONES SOBRE EL ESTADO DEL ARTE	45
CAPÍTULO 5: DISEÑO DE ESTRUCTURA DE DATOS DE ENTRADA PARA EL ALGORITMO GENÉTICO..		46
5.1	INTRODUCCIÓN	46
5.2	PARÁMETROS BÁSICOS DE LAS SEÑALES TRÁFICO A UTILIZAR	46
5.3	VARIABLES NECESARIAS PARA EL DESARROLLO DEL ALGORITMO GENÉTICO:	47
5.4	RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS BÁSICOS DE LAS SEÑALES DE TRÁFICO Y SU REPRESENTACIÓN COMO VARIABLE:	47
5.5	FUNCIÓN DE FITNESS	48
CAPÍTULO 6: IMPLEMENTACIÓN DE MÓDULO PARA LA GENERACIÓN DE JUEGOS DE DATOS DE ENTRADA SIMULADOS.		54
6.1	INTRODUCCIÓN	54
6.2	OBJETIVO	54
6.3	DESCRIPCIÓN DEL SUBSISTEMA	55
CAPÍTULO 7: DISEÑO DE ALGORITMO GENÉTICO		60
7.1	INTRODUCCIÓN	60
7.2	APLICACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO	60
7.2.1	<i>Descripción de estructura de datos</i>	60
7.2.2	<i>Pseudocódigo principal:</i>	64
7.2.3	<i>Operadores del algoritmo genético:</i>	66
7.2.4	<i>Calibración del porcentaje de mutación</i>	72
CAPÍTULO 8: EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA		74
8.1	INTRODUCCIÓN	74
8.2	PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV	74
8.3	PRUEBA DE FISHER	76
8.4	PRUEBA Z	77
CAPÍTULO 9: PROTOTIPO FUNCIONAL		81
9.1	EJECUTABLE RED SEMAFÓRICA	81
9.2	EJECUTABLE SIMULADOR DE TRÁFICO	82
9.3	EJECUTABLE DEL ALGORITMO GENÉTICO	83
9.4	EJECUTABLE DE PLAN DE TRÁFICO FIJO	84
CAPÍTULO 10: CONCLUSIONES		85

10.1	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS A FUTURO.....	87
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
	CAPÍTULO 12: ANEXOS	91.
	ANEXO A	91
	TRANSCRIPCIÓN DE LA ENTREVISTA REALIZADA CON FUNCIONARIO DE LA GERENCIA DE TRANSPORTE DE LA MML.....	91.
	ANEXO B	97.
	PLANES DE TRÁFICO ESTÁTICOS EN CORREDOR VIAL	97.
	FLUJO DE TRÁFICO HISTÓRICO EN CORREDOR VIAL	97.
	ANEXO C	98.
	VIABILIDAD Y PLAN DE PROYECTO	98.
	ANEXO D.....	102.
	CALIBRACIÓN DE PORCENTAJE DE MUTACIÓN.....	102.
	ANEXO E.....	118.
	RESULTADOS INDICE DE RENDIMIENTO	118.
	ANEXO F.....	121.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Relación de resultados, herramientas y métodos	15
Tabla 2. Relación de riesgos identificados en el proyecto	22
Tabla 3. Parámetros básicos del tráfico en corredor vial	46
Tabla 4. Variables algoritmo genético	47
Tabla 5. Relación parámetros del tráfico y variables del algoritmo genético	48
Tabla 6. Componentes de la función fitness	48
Tabla 7. Componentes de la tasa de demora total en una red vial	49
Tabla 8. Ejemplo de aplicación de función fitness (índice de rendimiento).....	51
Tabla 9. Estructura de la simulación de parámetros de tráfico para una intersección	58
Tabla 10. Descripción y detalle estructura de datos para el algoritmo genético	61
Tabla 11. Resumen de estructura de algoritmo genético	62
Tabla 12. Ejemplo de aplicación de la estructura de algoritmo genético.....	63
Tabla 13. Calibración porcentaje de mutación.....	72
Tabla 14. Resumen de resultados de la prueba de Kolmogorov	75
Tabla 15.- Resumen de resultados de la prueba de Fisher	77
Tabla 16. Resumen de resultados de la prueba Z – diferencia medias	78
Tabla 17. Resumen de resultados de la prueba Z - mejor media	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. La congestión e inseguridad en el sistema de circulación de vehículos y peatones.....	12
Figura 2. Definición de variables entre vehículos.....	35
Figura 3. Distribución de velocidades.....	35
Figura 4. Ejemplo de cálculo de Índice de Rendimiento	50
Figura 5. Relación de sistemas del proyecto	55
Figura 6. Diagrama de casos de uso del simulador de flujo vehicular.....	56
Figura 7. Diagrama de actividades del módulo generador de datos	57
Figura 8. Detalle del archivo de simulación.....	57
Figura 9. Sentido del flujo de tráfico en una intersección.....	59
Figura 10. Cálculo de tasa de mutación	73
Figura 11. Plan de proyecto detallado por resultados esperados.....	99

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

ADIMOT	Adaptative Multialgorithmic Optimization Technology, Tecnología Mulitalgorítmica Adaptativa de Optimización.
CCT	Centro de Control de Transporte.
CDDL	Common Development and Distribution License.
FPH	Factor Peak Hour, Factor de Hora Pico.
GPL	General Public License.
GTU	Gerencia de Transporte Urbano.
HCM	Highway Capacity Manual, Manual de Capacidad de Carreteras.
IBM	International Business Machines Corp.
IDE	Integrated Development Enviroment, Entorno de Desarrollo Integrado.
ITS, SIT	Intelligent Trasportation System, Sistema Inteligente de Transporte.
MTC	Ministerio de Transporte y Comunicaciones.
RMI	Remote Method Invocation, Invocación Remota de Métodos
RTA	Roads and Traffic Authority, Autoridad General de Tráfico y Carreteras.
RUP	Rational Unified Process, Proceso Unificado de Rational.
SCATS	Sydney Coordinated Adaptive Traffic System.
SICE	Sociedad Ibérica de Construcciones Eléctricas.
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences, Paquete Estadístico para las Ciencias Sociales.
SUTRAN	Superintendencia de Trasporte Terrestre de Personas, Carga y Mercancías.



CAPÍTULO 1: PROBLEMÁTICA

Después del problema de la percepción de inseguridad que aqueja a los ciudadanos capitalinos, uno de los mayores problemas en la ciudad de Lima es la congestión vehicular en las redes viales urbanas. En la encuesta realizada en enero del 2014 por el Instituto de Opinión Pública de la Pontificia Universidad Católica del Perú se reflejó que, en percepción del 40.3% de los ciudadanos, ahora les toma más tiempo llegar a su trabajo o a su centro de estudios que en años anteriores (Perú, 2014).

Las causas de este problema son muchas y tienen diferente orígenes. Por un lado, el crecimiento demográfico y económico en nuestro país ha derivado en lo que se ha convertido una de las principales causas del congestionamiento vehicular: el crecimiento constante del parque automotor en Lima. Según Edwin Derteano, presidente de la Asociación Automotriz del Perú, la venta de automóviles creció un 9% en el 2013 con respecto del año anterior (alcanzado a venderse 190 000 mil autos nuevos), durante el 2014 la estadística de ventas creció al 15%; es decir, la cantidad de automóviles que se sumaron a la red vial fueron 210 000 unidades nuevas (Derteano & Garrido, 2014). El informe del BBVA señala que este año 2015 se proyecta un crecimiento del 12%, lo que significa la venta de 202 000 unidades nuevas (Económica, 2015). Todas ellas se sumarán al ya saturado parque automotor que cuenta con más de 2 999 223 vehículos registrados, de los cuales, más del 65% de ellos circula en la ciudad de Lima (INEI, 2012).

En la misma encuesta de opinión de inicios de año también se reflejó que otra causal al problema del transporte es la falta de educación vial y el irrespeto que se tiene con la señalización y hacia la autoridad policial de tránsito. En la mencionada investigación los ciudadanos refieren que la corrupción entre autoridades e infractores, que es iniciada y aceptada en ambos sentidos, favorece la impunidad, permitiendo a la informalidad perpetuarse como uno de los motivos más importantes en la generación de tráfico vehicular.

La falta de infraestructura, el mal estado y la mala utilización de la que ya se tiene ocupa el tercer lugar en el universo de causas que motivan la inadecuada gestión del

tráfico vehicular. Esto comprende tanto la falta de mantenimiento de veredas y pistas, como el mal estado de los mecanismos de control de tráfico, de semáforos y de señalización para el flujo vehicular. Los resultados son contundentes, dos de cada tres limeños se encuentra insatisfecho con la infraestructura vial.

Si bien hay factores cuyo control excede las posibilidades de solución ingenieril, hay otro problema intrínseco pocas veces mencionado como es el procedimiento de estimación para el comportamiento de intersecciones semaforizadas empleado en el país. Localmente se usan las herramientas metodológicas de análisis HCM 2000 y Synchro 7 para el estudio de la saturación de vías y generación de planes de tráfico estáticos para la gestión de flujo vehicular en algunos corredores viales de Lima. Sin embargo, para condiciones altas de saturación, como los experimentados en la capital, los resultados de estas herramientas no serían confiables, pues sobreestimarían excesivamente las demoras y colas en el tránsito (Lino, 2012). Por otro lado, es posible apreciar la precariedad del procedimiento de asignación de tiempos para las vías que convergen en una intersección especificado en el Manual de Dispositivos de Control de Tránsito Automotor para Calles y Carreteras, resuelta en mayo del año 2000 y empleado hasta la actualidad. En él, la asignación de tiempo de fase en luz verde para cada sentido que concurre en una intersección será proporcional a la cantidad de vehículos en cola en dicho corredor, con respecto al número de vehículos en cola de la vía transversal. No se considera el ancho de la vía, las velocidades promedio, la importancia de los corredores, las velocidades máximas permitidas para los corredores, ni los tipos de vehículos que por allí transitan.

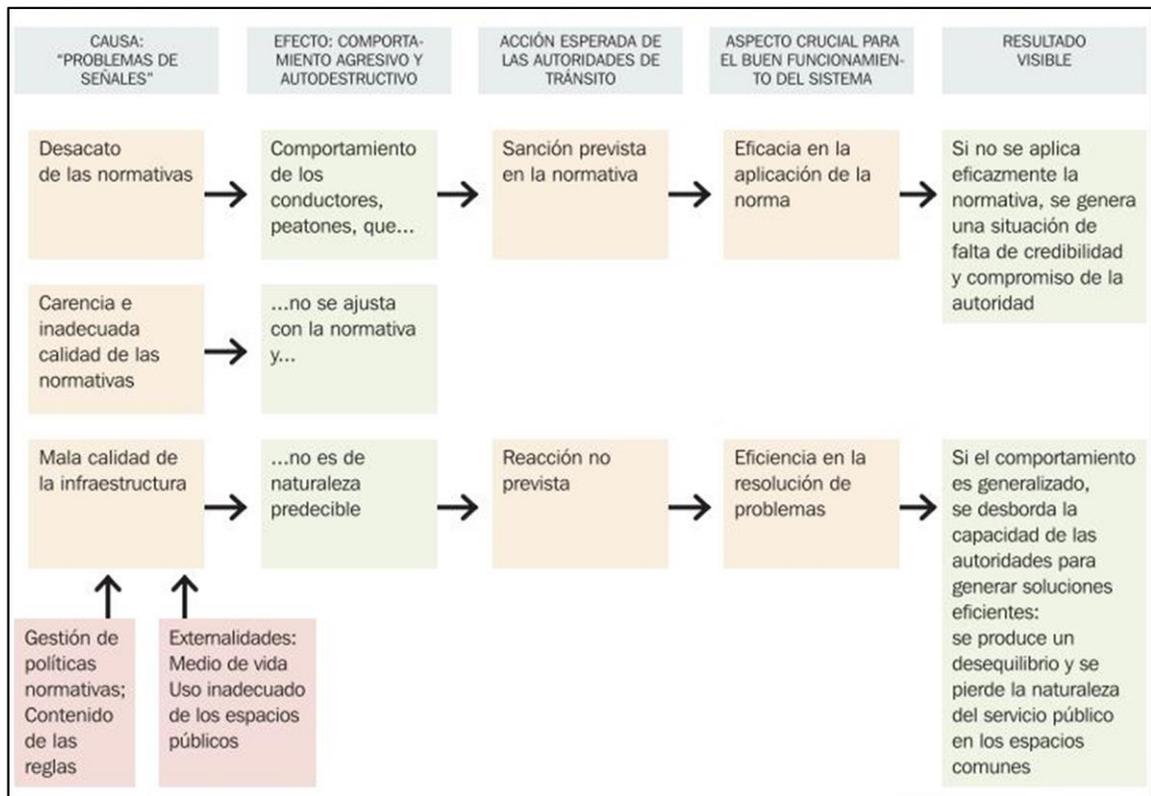
En el mismo manual se recomienda utilizar diversos tipos de semáforos de acuerdo a las necesidades de las intersecciones según su nivel de congestión. Lamentablemente, en la ciudad de Lima no se hace uso de toda la infraestructura recomendada. En la mayoría de las intersecciones de la capital, los semáforos empleados son del tipo no accionados es decir, están pre-sincronizados en sus tiempos, y no utilizan un mecanismo de medición que ajuste estos tiempos de acuerdo a la demanda, sobre todo en las horas en las que ocurre gran congestión.

Según el estudio de Pro Expansión, el impacto financiero causado por el tiempo perdido en el tráfico se calcula como una pérdida económica de aproximadamente 6.6 millones de dólares anuales (ProExpansión, 2010). Dinero equivalente al 40% de la inversión extranjera directa o al 42% del Fondo Privado de Pensiones. Dinero que fácilmente podría invertirse en otros sectores urgentes como educación o salud, se pierde en las rutinarias demoras en el tráfico.

Y esa tediosa demora cataliza la rivalidad tácita que existe entre el transporte público, el transporte privado y los peatones. La mayoría de vías de Lima son mercantilizadas por consorcios a los que la Municipalidad de Lima les ha brindado la buena pro. Estos consorcios suelen ser agrupaciones de modestas empresas que cuentan con pocos recursos y por ende, estos consorcios se ven obligados a sub-arrendar el derecho de circulación por ‘sus’ corredores a cualquier propietario de vehículos de transporte público. A su vez, estos propietarios alquilan sus combis o coasters a quién esté dispuesto a invertir en ellas. Es de esperarse que aquel chofer y cobrador que se embarquen en el último eslabón del negocio busquen recuperar su inversión y generar ganancias a toda costa (de existir alguna). Debido a que nadie los avala, no tienen derechos laborales, y en su menester, sortean el derecho ajeno. Esta situación explicaría el aumento explosivo del número de accidentes vehiculares en los últimos años, sumando un total de 1.7 millones de accidentes de tránsito desde 1990 hasta la actualidad (Consejo Nacional de Seguridad Vial, 2015).

Como se puede apreciar en el gráfico del estudio de Pro Expansión, el problema del tráfico es mucho más complicado y extenso de lo que aparenta. La solución ante tamaña problemática deberá ser la suma de grandes esfuerzos multidisciplinarios con un objetivo común. Aun así, parte significativa de la solución resulta la contribución que el Gobierno haga en materia de modificación de normativas y control del cumplimiento de las mismas. Si bien la Municipalidad de Lima tiene en marcha varios proyectos independientes para la mejora en el transporte, poco se ha aventurado a experimentar con la infraestructura que ya se dispone.

Figura 1. La congestión e inseguridad en el sistema de circulación de vehículos y peatones



Fuente (ProExpansión, 2010) "Antídotos contra la congestión y la Inseguridad en el tránsito." Pro Expansión, Lima, Perú, 2010.

Este proyecto de fin de carrera busca aportar una posible solución al problema del tráfico en las principales vías de Lima. Aprovechando la infraestructura de semaforización, este trabajo se enfocará en modificar y optimizar los tiempos de fases de los semáforos para un adecuado flujo de tráfico. Se experimentará el comportamiento del flujo de tránsito en las intersecciones en un corredor vial y se propondrá un algoritmo genético para la adaptabilidad estos tiempos de fase de modo que contribuya con reducir el tiempo perdido en el tráfico.

1.1 Objetivo general

Implementar un algoritmo genético para la minimización del tiempo de demora total en un corredor vial a través de la optimización de los ciclos de los semáforos en sus intersecciones.

1.2 Objetivos específicos

- I. Definir las estructuras de datos para la simulación de flujo vehicular en un corredor vial.
- II. Desarrollar una herramienta para la generación de juegos de datos a utilizarse en la simulación.
- III. Definir las estructuras de datos necesarias para las operaciones algorítmicas.
- IV. Definir la función objetivo y las condiciones de término del algoritmo genético.
- V. Definir y diseñar los operadores genéticos que actúan sobre los tiempos de fase de las intersecciones semaforizadas.
- VI. Definir y desarrollar una experimentación numérica para comprobar el desempeño del algoritmo genético contra o versus el método actual.
- VII. Implementar una herramienta de simulación que permita realizar el análisis de capacidad de intersección para diferentes juegos de datos de simulación de tráfico.

1.3 Resultados esperados

- I. Resultado esperado 1 para el objetivo específico 1: Documento de diseño describiendo las estructuras de datos necesarias para la simulación de flujo vehicular.
- II. Resultado esperado 2 para el objetivo específico 2: Implementación de módulo para la generación de juegos de datos de entrada simulados.

-
- III. Resultado esperado 3 para el objetivo específico 3, 4 y 5 : Documento de diseño de la adaptación del algoritmo genético al problema planteado, describiendo las estructuras de datos, sus operadores genéticos, función de selección y función objetivo.
- IV. Resultado esperado 4 para el objetivo específico 6: Documento de experimentación numérica interpretando resultados.
- V. Resultado esperado 5 para el objetivo específico 7: Prototipo funcional que permita analizar el comportamiento del flujo de tránsito en un corredor vial bajo condiciones simuladas de flujo de tráfico.



CAPÍTULO 2: HERRAMIENTAS, MÉTODOS, METODOLOGÍAS Y PROCEDIMIENTOS

2.1 Introducción

Durante la realización de este proyecto se identificó que se harán uso de las siguientes herramientas, métodos y procedimientos para la obtención de su correspondiente resultado esperado.

Tabla 1. Relación de resultados, herramientas y métodos

Resultado esperado	Herramientas	Método / procedimiento
Documento de diseño describiendo las estructuras de datos de entrada necesarias para el algoritmo genético.	-	Metodología: Revisión sistemática. Metodología: Entrevista no estructurada y dirigida de investigación.
Implementación de módulo para la generación de juegos de datos de entrada simulados.	IDE: Netbeans 8.0 Lenguaje de Programación: Java Manejador de versiones: Github	Metodología de desarrollo: Mejores prácticas de análisis y diseño.
Documento de diseño de la adaptación del algoritmo genético al problema planteado, describiendo las estructuras de datos, sus operadores genéticos, función de selección y función objetivo.	IDE: Netbeans 8.0 Programación: Java Manejador de versiones: Github	-
Documento de experimentación numérica interpretando resultados.	Paquete estadístico: Statistical Package for the Social Sciences.	Método: Experimentación numérica

Prototipo funcional que permita analizar el comportamiento del flujo de tránsito en un corredor vial bajo condiciones simuladas de flujo de tráfico.	IDE: Netbeans 8.0 Lenguaje de Programación: Java Manejador de versiones: Github	Metodología de desarrollo: Mejores prácticas de análisis y diseño.
--	---	--

2.2 Herramientas

La justificación del uso de las herramientas seleccionadas se describe a continuación:

Statistical Package for the Social Sciences (SPSS): Software estadístico creado en 1967 por Norman Nie (actualmente propiedad de IBM) muy potente para el análisis de datos. Con este se puede realizar el volcado de muestras, diseño de bases de datos, validación de datos, gráficos, tablas e informes, facilitando un análisis integral de información (IBM, 2015).

Debido a que este paquete permite analizar modelos multivariable con relaciones complejas, esta herramienta será trascendental para el análisis de la experimentación numérica y la comparativa de los resultados tras la ejecución del algoritmo.

Lenguaje de programación Java e IDE Netbeans 8.0: Se utilizará el mencionado IDE debido a que es un entorno de desarrollo ligero y potente para el desarrollo de aplicaciones con lenguaje de programación Java. Este entorno posibilita el trabajo colaborativo para el desarrollador, de modo que puede completarse la implementación del proyecto desde múltiples conexiones con la ayuda de un manejador de versiones (Netbeans, 2015). La elección del lenguaje de programación se debe a la versatilidad que tiene Java para ser ejecutado en múltiples plataformas y a la experiencia de programación con el mencionado IDE.

Github: Con casi cuatro millones de usuarios en el mundo, Github se ha convertido en una plataforma importante para el desarrollo de proyectos. Esta plataforma no solo permite un desarrollo colaborativo, sino que además guarda un registro de lo que

implementado hasta el momento y gestiona los cambios realizados en diferentes versiones de la implementación (McMillan, 2013).

Por lo expuesto, se utilizará Github para llevar un adecuado control de versiones del desarrollo del algoritmo genético, pudiendo revertir cambios, publicar versiones y continuar con la implementación desde cualquier plataforma disponible.

Otras herramientas adicionales:

Microsoft Word: Con más de veinticinco años en el mercado, Microsoft Word es el procesador de textos más estable y utilizado a nivel mundial. Este software permite la edición de texto desde casi cualquier dispositivo, e incluso facilita la revisión del mismo mediante notas de revisión. Además, permite manejar objetos de tipos numéricos (Office, 2015). Esta funcionalidad en particular será aprovechada para la elaboración del documento de diseño de la experimentación numérica.

Vim: Es un editor de textos muy potente y altamente configurable. La elección de este software se debe principalmente a las facilidades de formato que esta herramienta brinda: sus modos visual, editor y de bloque permiten la manipulación de cadenas de texto por columnas, con un registro de acciones prácticamente ilimitado y portabilidad para ser ejecutado en diversas plataformas (VIM, 2015). Estas características lo convierten en la herramienta ideal para definir y manipular la estructura de datos de entrada y las estructuras de datos necesarias para las operaciones algorítmicas.

2.3 Métodos y Procedimientos

2.4 Metodologías

MI: Revisión sistemática

Esta metodología de investigación está bien establecida y estandarizada, permitiendo integrar una amplia gama de información existente y proporcionar datos fidedignos para la toma de decisiones. Con esta metodología se puede determinar si los hallazgos pueden ser generalizados ampliamente o si corresponden a un subconjunto particular

de un campo de estudio. En palabras de Mulrow: “*La revisión sistemática separa lo conocido de lo desconocido y resguarda a los investigadores de conocer menos de lo que ya ha sido probado*”.

En lo que refiere a este proyecto, se utilizará esta metodología para la exploración de fuentes primarias en estudios de ingeniería del tráfico, ciencias de la computación y los resultados de la aplicación de la optimización (Branke, Goldate, & Prothmann, 2010) y reordenamiento de flujo de tráfico en otros países con el uso de sistemas como ADIMOT y SCATS.

M2: Experimentación numérica:

Se realizarán las pruebas estadísticas necesarias para determinar el grado de optimalidad alcanzado con la propuesta en esta tesis versus la actual metodología empleada en el manejo de flujo de tráfico.

Esta sección se dividirá en tres fases: la primera buscará verificar si las muestras simuladas cumplen con una distribución normal, la segunda verificará si dichas muestras tienen un nivel de varianza similar, y la tercera buscará determinar cuál de las dos muestras presenta una mejor media para la función objetivo definida.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov: Esta prueba se realiza para determinar la bondad de ajuste de un conjunto de observaciones a una distribución dada. Es decir, esta prueba será útil para aseverar o rechazar la hipótesis la cual propone que la variable dependiente de la muestra ocurre con una distribución de probabilidad conocida. Para este proyecto, usaremos esta prueba K-S para corroborar que las muestras obtenidas del flujo de tráfico del corredor vial se ajustan a una distribución normal.

Prueba de Fisher: Esta prueba buscará determinar si las muestras tienen un nivel de varianza similar. Para ello, es necesario garantizar que las pruebas tengan una distribución normal, condición que se analizará previamente con la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Para esta prueba se propondrá como hipótesis nula que las varianzas de ambas muestras sean significativamente similares, mientras que la

hipótesis alterna planteará que las varianzas de las muestras son significativamente diferentes.

Prueba Z: Esta prueba sirve para determinar si existe una diferencia significativa entre las medias de dos muestras. Destinaremos como grupo de control una primera muestra con los resultados del índice rendimiento que se obtienen con la configuración de semáforos actual y como segunda muestra, los datos del índice rendimiento obtenidos tras la optimización, para un mismo flujo de tráfico. De esta forma se puede confirmar si esta propuesta realmente representa una mejora para el flujo de tráfico en el corredor vial, en términos de la reducción de tiempos de demoras totales.

Debido a que el tamaño de la muestra es importante para obtener una media más estable y representativa, se tomará particular énfasis en obtener el mayor tamaño de muestra posible para ambos universos de datos.

M3: Mejores prácticas de análisis y diseño.

Debido a que parte de este proyecto incurre en la implementación de algunos módulos tanto para la simulación como para la ejecución del algoritmo, se utilizará las mejores prácticas de desarrollo de software con la finalidad de completar todas las actividades críticas en la implementación del proyecto. Estas mejores prácticas a emplear serán puestas en práctica de la siguiente manera:

- En el análisis y diseño: Se definirán con antelación el universo de funcionalidades a implementar para la consecución del proyecto.
- Implementación: Se escribirá el código de las clases y objetos organizándolos en código fuente, ejecutables y archivos de entrada y salida.
- Despliegue: Se presentará la versión final del producto que incluye la integración de los módulos de simulación y optimización.

2.5 Alcance

Este proyecto de investigación propondrá un algoritmo genético como alternativa de solución al problema del tráfico vehicular en Lima. Centralizándose en el flujo de vehículos de un corredor vial, este proyecto propone la adaptabilidad de los tiempos de fases de los semáforos de acuerdo a la carga de afluencia en cada una de sus intersecciones.

Para ello, en este proyecto se implementará un aplicativo con tres módulos complementarios interconectados con invocación remota de métodos (RMI): el primero de ellos será un simulador de datos el cual generará flujos de tráfico aleatorios para el corredor vial. Estos flujos serán almacenados en archivos temporales de modo que los mismos datos puedan ser usados en la simulación de la red vial con planes de tráfico estáticos y en la red vial con el algoritmo genético propuesto. El segundo módulo tendrá como objetivo controlar la red de semáforos del corredor vial, con dos modos de funcionamiento: el primero funcionará con planes de tráfico estáticos y el segundo se adaptará a la cantidad de flujo recibido en sus intersecciones con las soluciones que el algoritmo genético determine. El tercer y último módulo a implementar será el gestor del algoritmo genético, que considerando el flujo de tráfico simulado presente en la red vial, pueda determinar cuál es la mejor configuración de ciclos de semáforo, de modo que se logre optimizar el flujo vehicular reduciendo el tiempo total de tránsito.

También se realizará una experimentación numérica para analizar y cuantificar en qué grado se mejora el índice de rendimiento con la propuesta de solución usando el algoritmo genético sobre la actual configuración estática de los tiempos de fase en los semáforos.

2.6 Limitaciones

Respecto a las limitaciones de infraestructura no aplica al presente proyecto de tesis, debido a que al tratarse de la prueba de un algoritmo sobre datos simulados, no hay compra de activos ni dependencia de infraestructura.

La principal limitación del proyecto es que al tratarse de la utilización de un algoritmo heurístico, la solución alcanzada un valor aproximado muy cercano al óptimo para el objetivo que se desea alcanzar. Esto se debe a que el algoritmo genético explora un grupo de soluciones con cierto grado de aleatoriedad.

Una segunda limitante proviene de los datos del flujo vehicular que se simulan en el proyecto. Aunque se utiliza el mismo número de parámetros de tráfico que usan los sistemas inteligentes de transporte, estos provienen de una fuente simulada, y aunque guarda relación con la realidad, no representa fidedignamente los datos del tráfico real.

Una última limitación corresponde al tiempo de funcionamiento del algoritmo de optimización, pues este debe restringirse a un cierto número de iteraciones, lo que es implica que deberá buscar en un cierto espacio de soluciones con un tiempo menor que el ciclo de semáforo común para la red vial simulada.

2.7 Riesgos

Tabla 2. Relación de riesgos identificados en el proyecto

*I = Impacto, P = probabilidad de ocurrencia, S = Severidad (I*P)

Riesgo identificado		*I	*P	*S	Mitigación	Plan Contingencia
R1	Cambio de representantes del gobierno municipal, renuencia a la colaboración con la información pertinente.	7	5	35	Evitar la dependencia a un solo proveedor de información en el gobierno municipal. Utilizar otros medios de información.	Reunir toda la documentación necesaria y actualizada antes de la entrega parcial del proyecto.
R2	Pérdida del código fuente o entregables del proyecto	5	6	30	Llevar un adecuado control de versiones del código fuente, así como también de los documentos. Hacer copias de respaldo del código fuente, bases de datos y documentación. Utilizar repositorio web compartido con el asesor del proyecto.	Utilizar las copias de respaldo que se debieron hacer como plan de mitigación.
R3	Demora en la presentación de entregables	7	8	56	Establecer un plan de proyecto que considere un tiempo de holgura a la estimación de horas para las tareas críticas de cada entregable.	Asignar más horas de investigación/desarrollo del recurso autor del proyecto.

Capítulo 2

Riesgos del proyecto

R4	Cambios en los requisitos a poco tiempo de la entrega final	9	5	45	Realiza un exhaustivo análisis de los requisitos del sistema, comprobando que las funcionalidades a implementar son definitivas.	Sobrecargar el recurso autor del proyecto con horas extras para completar la implementación del cambio.
R5	Dificultades en la fase de implementación para el desarrollo del software	7	4	28	Haber realizado una correcta estimación de tareas la cual incluya un tiempo prudente de auto-capacitación que brinde una holgura previa a las tareas donde fuera necesaria.	Reasignar los tiempos de fase para el desarrollo de cada tarea a fin de priorizar aquellas con mayor dificultad asignándoles mayor duración sin que esto altere los tiempos totales de los entregables.
R6	Pérdida parcial o total de los recursos en donde se almacena información y se desarrolla el proyecto	7	5	30	Utilizar medios de almacenamiento alternativos como memoria flash, o servicio de almacenamiento en nube.	Utilizar los más recientes documentos y/o prototipos de desarrollo para reiniciar el proyecto desde la versión más reciente disponible.
R7	Los algoritmos empleados no logran los objetivos que se han propuesto	9	4	36	Conducir una investigación sobre experimentación numérica en casos similares y escoger los algoritmos que fueron empleados en tales soluciones como punto de partida a la problemática que se intenta resolver.	Implementar algoritmos diferentes a los que fueron escogidos durante la fase de investigación, pero esta vez, pre-procesar datos que aseguren resultados positivos para la hipótesis planteada (que de acuerdo al objetivo del proyecto, reduciría el tiempo perdido por los vehículos en las intersecciones).

2.8 Justificativa y viabilidad del proyecto

2.8.1 *Justificativa*

La conveniencia del desarrollo del proyecto puede ser explicado desde dos perspectivas. Por un lado, el tema del transporte es un problema que aqueja a toda la ciudadanía, sin distinción entre transporte público y privado, generando fatiga, estrés y malestar general entre todos los usuarios que se involucran en el tránsito urbano de Lima. El desarrollo de este proyecto busca reducir el tiempo perdido en la cola de las intersecciones, y con ello reducir simultáneamente estos problemas derivados que incomodan a los ciudadanos. Aunque la simulación no pueda dar respuesta cualitativa de la opinión de los usuarios del corredor vial con respecto a la mejora del servicio, sí se podría realizar un análisis cuantitativo del tiempo economizado tras la optimización de la atención de los semáforos.

Pero visto desde una perspectiva global, el desarrollo de este proyecto tendría un gran impacto económico pues, en teoría, se lograría un ahorro de 6.6 millones de dólares anuales de extrapolar el alcance de este proyecto a nivel nacional. Este dinero podría ser invertido en otros temas urgentes de índole social prioritarios en nuestro país.

Por último, contar con una herramienta de simulación permitiría a las municipalidades y al MTC evaluar el impacto que tendría alguna modificación de las señalizaciones en los diversos corredores donde se quisiera poner en marcha este proyecto.

CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO

3.1 Marco conceptual

3.1.1 Introducción

El desarrollo del presente documento brinda una posible solución a la congestión automotriz en la ciudad de Lima. Como ya se describió en el capítulo anterior, la problemática está influenciada por factores económicos, de educación y de regulación; por lo tanto, el alcance de este trabajo se limita a proponer una nueva forma de gestionar el flujo del tránsito a través de un solo mecanismo de control: el semáforo.

3.1.2 *Objetivo del marco conceptual*

En esta sección se busca precisar la terminología usada a lo largo de este documento. La definición de estos términos son recogidos principalmente de la Resolución Ministerial 210-2000-MTC/15.02. Dicha resolución aprueba el Manual de Dispositivos del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras (Ministerio de Transportes, 2010).

Dada la relevancia que tendrán los mecanismos de control de tránsito de vehículos, se hará un especial énfasis en la manipulación de los tiempos de los semáforos, particularmente en los accionados por el tránsito y el uso de detectores como datos de entrada para los ajustes de intervalo.

Además, se explicará la terminología usada y otros conceptos a emplearse en los posteriores capítulos para la implementación del algoritmos genético.

3.1.3 **Semáforo:**

Según el Manual de Dispositivos del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras, “los semáforos son dispositivos de control mediante los cuales se regula el movimiento de

vehículos y peatones en calles y carreteras, por medio de luces de color rojo, amarillo y verde, operadas por una unidad de control” (Ministerio de Transportes, 2010).

3.1.3.1 Clasificación

1. Semáforos para el control del tránsito de vehículos:

a. Semáforos no accionados:

Este tipo de semáforo es un dispositivo de control pre-sincronizado que regula el tráfico haciéndolo detener y proseguir de acuerdo a las características de operación (duración del ciclo, intervalo, secuencia, desfasamiento) en una secuencia de tiempo previamente determinada.

A pesar de no adaptarse según la demanda de la intersección, el tiempo pre definido para sus fases pueden ajustarse según la hora del día (según estudios previos del comportamiento de la demanda). A este tipo de semáforo se le conoce como semáforo no accionado por el tránsito con sincronización progresiva flexible.

Por reglamentación, se debe considerar que los otros semáforos no accionados ubicados en un radio menor de 400 metros que controlan el mismo flujo de tránsito deberán funcionar coordinadamente. Si están ubicados a mayor distancia, será opcional y recomendable coordinar su funcionamiento.

Características del diseño:

- i. Ciclo: Tiempo total requerido para una secuencia completa de indicaciones de un semáforo.

-
- ii. Intervalo: Cualquiera de las divisiones de ciclo correspondiente a las indicaciones de colores del semáforo.
 - iii. Fase: Parte del ciclo correspondiente a cualquier movimiento de vehículos o combinación de movimientos simultáneos que reciben el derecho de paso durante uno o más intervalos.
 - iv. Desfasamiento: Número de segundos que tarda en aparecer la indicación de luz verde en un semáforo después de un instante dado, que se toma como punto de referencia de tiempo. Suele ser expresado en tanto por ciento del ciclo. Se usa para fines de coordinación y para referirse al tiempo necesario para despejar intersecciones complejas.
- b. Semáforos accionados:

Estos semáforos alteran las características de operación de acuerdo al volumen de tráfico que recibe la intersección. Debido a que un semáforo controla el flujo vehicular y el flujo de peatones, su comportamiento se determina de acuerdo a las pulsaciones manuales realizadas por los peatones como a las señales recibidas por los detectores de vehículos sobre la calzada (Ministerio de Transportes, 2010).

Son más eficientes en los cruces de calles principales con calles secundarias debido a que interrumpen el flujo preponderante de la calzada principal en un tiempo calculado según las condiciones de la intersección.

- i. Totalmente accionados

Estos semáforos atienden a las solicitudes de todos los accesos que convergen en la intersección. Recomendables en intersecciones donde los volúmenes son altos, tanto en la calle principal, como en la secundaria. Los intervalos de tiempo asignados para cada fase en verde varían desde un mínimo de veinte segundos hasta un límite máximo equitativo en ambas vías de la intersección (asemejándose a un semáforo no accionado cuando existe alta demanda).

ii. Parcialmente accionados

Estos semáforos obedecen tan solo a algunas vías que convergen en la intersección. Se recomienda en intersecciones con altos volúmenes de carros y en vías de alta velocidad.

iii. Adaptable a la densidad del tránsito

Estos semáforos son completamente accionados por la medición de los detectores instalados en todos los accesos a la intersección y permiten que los intervalos que exceden el tiempo preestablecido para cada calle disminuyan en cada fase. Con este mecanismo se logran las ventajas de los semáforos accionados por el tránsito como de los semáforos no accionados por el tránsito con sincronización progresiva flexible.

2. Semáforos para el paso peatonal

- a. En zonas de alto volumen peatonal
- b. En zonas escolares

3. Semáforos especiales

- a. Semáforos de destello
- b. Semáforos para regular el uso de carriles
- c. Semáforos para puentes levadizos
- d. Semáforos para maniobras de vehículos de emergencia
- e. Semáforos y barreras para aproximación de trenes

3.1.4 Unidad de Control

Es un mecanismo electromecánico o electrónico que regula los cambios de luces en los semáforos. De acuerdo al tipo de semáforo empleado en la intersección, se adapta una unidad de control diferente para dicho semáforo (Ministerio de Transportes, 2010).

3.1.5 Detectores

Son los dispositivos capaces de registrar y transmitir los cambios que se producen o los valores que alcanzan en una determinada corriente de tránsito.

3.1.5.1 Clasificación

1. Para el tránsito de vehículos
 - a. Detectores de presión

Este detector se instala sobre la calzada y contabiliza la cantidad de autos rodando sobre ella. Tiene múltiples aplicaciones industriales y es conocido como tubo neumático. Tiene como desventaja que tan solo puede ser accionado por vehículos que transiten a una velocidad menor a los cien kilómetros por hora y resulta inoperante si el vehículo se detiene sobre el detector. Lamentablemente, su uso tiene un límite temporal y un riesgo de

seguridad, pues puede quedarse enganchado en un vehículo o romperse por desgaste (Ministerio de Transportes, 2010).

b. Detectores magnéticos

Son detectores que son accionados por el paso de vehículos sobre la calzada. Aprovecha la alteración que produce los elementos metálicos del vehículo sobre el campo magnético del detector. Como es de esperar, se vuelven inoperantes cuando hay vehículos estacionados sobre el detector o cuando algún objeto metálico se encuentra dentro de su zona de influencia.

i. Detectores compensados

Su funcionamiento está diseñado para que su sensibilidad no se vea afectada por influencias extrañas electromagnéticas. Están construidas para instalarse en el pavimento y tienen bien definida su zona de influencia que se extiende hasta 15 centímetros de distancia del detector. Es recomendable su uso en calles angostas debido a su alto grado de sensibilidad.

ii. Detectores no compensados

Su zona de influencia va hasta los tres metros, más allá de este límite solo registrará vehículos que se desplacen a más de veinte kilómetros por hora. Son inapropiados donde existe alta influencia electromagnética, como cruces de ferrocarriles, tranvías o existan líneas de corriente eléctricas.

c. Detectores de radar

Estos detectores normalmente se encuentran ubicados aéreamente sobre la calzada. Tienen capacidad limitada para el registro de vehículos en tránsito, pues solo registran los que se desplazan a una velocidad mayor a los tres kilómetros por hora. Ventajosamente, no se ven afectados por influencias electromagnéticas ni autos estacionados. Su influencia transversal puede ser ajustable entre 3 y 10 metros (ancho de la calzada).

d. Detectores Ópticos

Son detectores que van incrustados sobre la calzada. Tiene un amplio uso industrial y tienen dos utilidades principales: 1) clasificación de vehículos, 2) contabilidad de vehículos. La primera utilidad se explota en condiciones de arranque-parada, como los presentes en las casetas de control y peso en carreteras de la SUTRAN. La segunda utilidad se advierte en condiciones ‘de vuelta de rueda’ (vehículos en movimiento), como las utilizadas en los ingresos de los estacionamientos o circulación de calles en ciudades.

2. Para el tránsito de peatones

Más que un detector propiamente dicho, es un mecanismo de control de pulsaciones realizadas manualmente por los peatones. Permite contabilizar el flujo de tránsito peatonal a través de pulsaciones realizadas y usarlo como valor de medición para los semáforos accionados por el tránsito.

3. Para el tránsito de vehículos de emergencia

Son detectores especiales que solo responden al accionar de vehículos de emergencia. Ellos actúan con la recepción de ondas de radio de alta frecuencia y un dispositivo que convierte estas ondas en pulsaciones eléctricas capaz de remitirlas a la unidad de control. Es necesario que este detector este acompañado con uno o más filtros que eviten la interferencia.

4. Para el tránsito de trenes

Generalmente son del tipo magnético y se ubican a una distancia próxima a la intersección y es accionado solamente por el ferrocarril.

3.1.6 *Flujo Vehicular*

Los parámetros que definen el flujo vehicular se dividen en dos categorías:

Parámetros macroscópicos:

Son aquellos parámetros que derivan de una observación espacial (Fernández A., 2011b). Estos parámetros describen al conjunto de vehículos que transitan por una vía en un mismo sentido y dirección.

1. Flujo o volumen: es la contabilidad del número de vehículos que pasan por una posición en un periodo de tiempo determinado. Normalmente se encuentra expresado en número de vehículos por hora (veh/h).

$$q = \frac{n}{T}$$

Tasa de flujo: es el número de vehículos que pasan por un punto durante un intervalo de tiempo menor de una hora. Comúnmente este intervalo no excede los 15 minutos, sin embargo esta tasa se expresa en una tasa equivalente a una hora.

Factor de hora pico: es la relación proporcional del volumen total de vehículos entre la tasa de flujo máxima en obtenida en esa misma hora.

FPH = volumen horario / Tasa de flujo pico (dentro de la hora)

2. Velocidad media temporal: Relación entre el espacio recorrido en un periodo de tiempo fijo, tomado como el promedio aritmético de las velocidades instantáneas de los n vehículos que pasaron por s_0 durante el periodo T . Normalmente se expresa en kilómetros por hora.

$$v_t = \frac{1}{n} \sum_i v_i$$

3. Densidad o concentración: Es el equivalente espacial del flujo. Es el número de vehículos por unidad de longitud de vía. Se expresa en vehículos por kilómetros.

$$k = \frac{n'}{L}$$

Parámetros microscópicos:

Son aquellos parámetros que derivan de una observación espacial (Fernández A., 2011b). Estos parámetros describen características internas del conjunto de vehículos que transitan por una vía en un mismo sentido y dirección.

1. Headway o intervalo medio: Es el promedio de los intervalos de tiempo (h_i) (medido en segundos) que tarda n -vehículos consecutivos de un vía en cruzar con un mismo de referencia en ellos (por lo general el eje delantero) un punto de control en la vía. Puede notarse que el intervalo medio equivale al inverso del flujo que pasa por un punto de una vía en un periodo T .

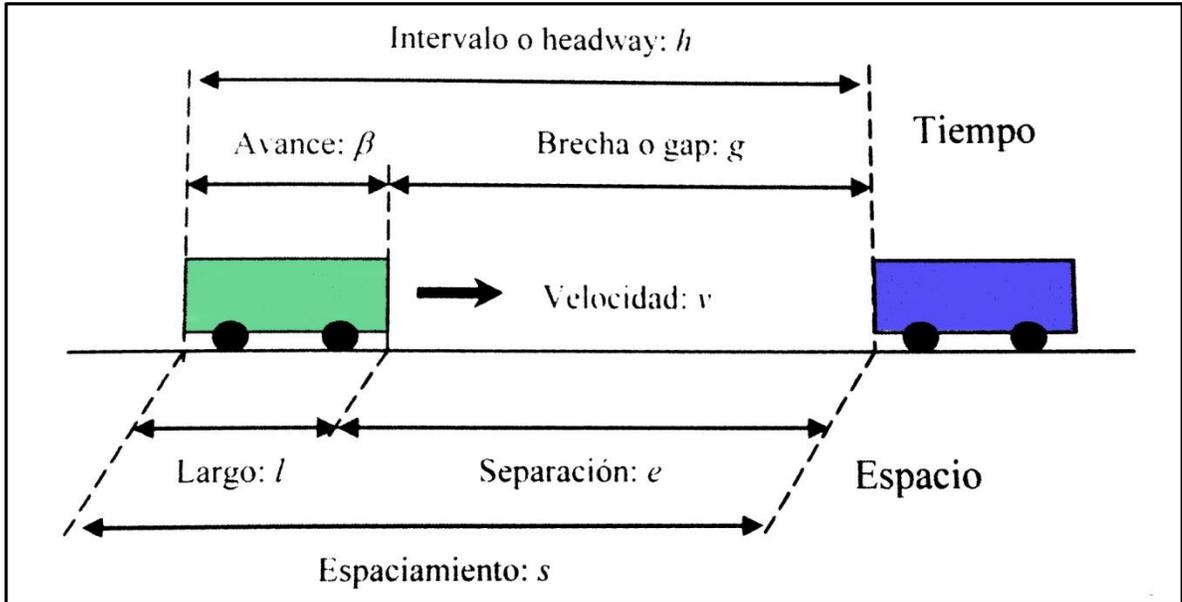
$$h = \frac{1}{n} \sum_i h_i = \frac{T}{n} = \frac{1}{q}$$

2. Espaciamiento: Es la distancia (s_i) (en metros) entre dos puntos de referencia entre dos vehículos consecutivos (por lo general el eje delantero). Se define el espaciamiento promedio como el promedio de espaciamientos entre vehículos en un tramo de longitud L . Por lo tanto, el espaciamiento promedio es el inverso de la concentración de vehículos en un tramo L .

$$s = \frac{1}{n} \sum_i s_i = \frac{L}{n'} = \frac{1}{k}$$

Se definen otros parámetros microscópicos en el siguiente gráfico.

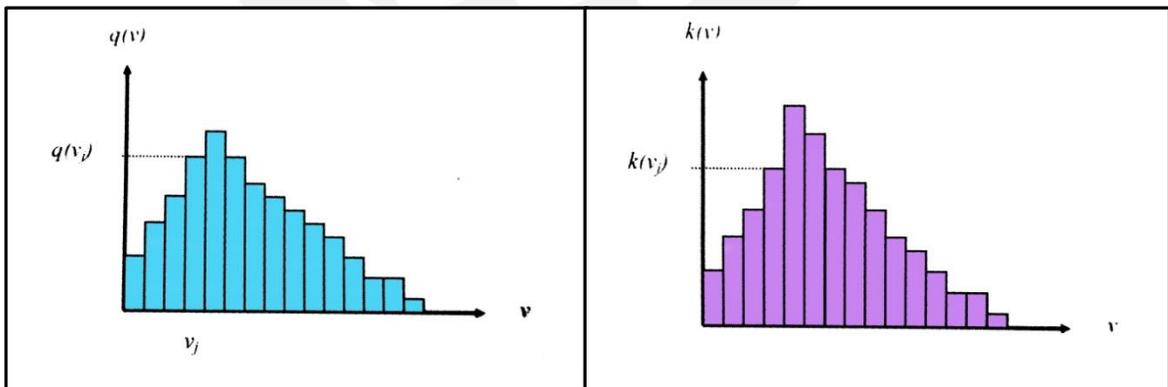
Figura 2. Definición de variables entre vehículos



Fuente (Fernández A., 2011a): "Elementos de la teoría del tráfico vehicular", Fernández A, Rodrigo. Lima, 2011.

3.1.7 Ecuación Fundamental del Tráfico

Figura 3. Distribución de velocidades



Fuente (Fernández A., 2011a): "Elementos de la teoría del tráfico vehicular", Fernández A, Rodrigo. Lima, 2011

En la Figura 3. Distribución de velocidades, $k(v_j)$ es el número de vehículos avistados a lo largo de un tramo que tienen velocidad v_j . Del mismo modo, $q(v_j)$ es la cantidad de vehículos observados en un periodo que llevan velocidad v_j . Luego:

$$q = \sum_j q(v_j) \Rightarrow \sum_j \frac{q(v_j)}{q} = 1$$

$$k = \sum_j k(v_j) \Rightarrow \sum_j \frac{k(v_j)}{k} = 1$$

Sea $p(v_j)$ la proporción de vehículos observados con velocidad v_j . Entonces:

$$p_t(v_j) = \frac{q(v_j)}{q} \Rightarrow \sum_j p_t(v_j) = 1; \quad p_t(v_j) \geq 0, \forall j$$

$$p_s(v_j) = \frac{k(v_j)}{k} \Rightarrow \sum_j p_s(v_j) = 1; \quad p_s(v_j) \geq 0, \forall j$$

Es decir, $p_t(v_j)$ es la distribución temporal de velocidades y $p_s(v_j)$ es la distribución espacial de velocidades, ya que cumplen las condiciones de una función de distribución de probabilidades. En consecuencia, la velocidad media espacial y temporal se pueden estimar como la esperanza de las respectivas distribuciones:

$$v_t = \sum_j v_j p_t(v_j)$$

$$v_s = \sum_j v_j p_s(v_j)$$

Se sabe además que:

$$v_j = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}} = \frac{s_j}{h_j}$$

Como el espaciamiento es el inverso del flujo y el intervalo es el inverso de la concentración, entonces:

$$v_j = \frac{q(v_j)}{k(v_j)} \Rightarrow k(v_j) = \frac{q(v_j)}{v_j}$$

Reemplazando esta expresión en la esperanza de la distribución espacial de velocidades y aplicando las definiciones anteriores:

$$v_s = \sum_j v_j p_s(v_j) = \sum_j v_j \frac{k(v_j)}{k} = \frac{1}{k} \sum_j v_j \frac{q(v_j)}{q} = \frac{1}{k} \sum_j q(v_j) = \frac{q}{k}$$

Obteniéndose así la ecuación fundamental del tráfico, que se expresa como:

$$q = k v_s$$

Lo que es equivalente a señalar que:

$$\text{Volumen} = \text{densidad} \cdot \text{velocidad_media_espacial}$$

3.1.8 Meta heurística

En ciertas ocasiones encontramos problemas con soluciones de fácil hallazgo, para ellos nos centramos en conocer un valor óptimo (máximo o mínimo) que nos brinde la mejor solución al problema dadas algunas restricciones. Sin embargo, existen problemas más complejos debido a un sin número de operaciones combinatorias haciendo muy costosa

su solución computacional. Para ello se hace uso de algoritmos aproximados que proporcionan soluciones de alta calidad en un tiempo computacional breve. Estos algoritmos incluyen técnicas heurísticas y meta-heurísticas (De Antonio Suárez, 2011). Melián define como heurístico como al procedimiento para el que se tiene un alto grado de confianza en que encuentra soluciones de alta calidad con un coste computacional razonable, aunque no se garantice su optimalidad o su factibilidad, e incluso, en algunos casos, no se llegue a establecer lo cerca que se está de dicha situación. Se usa el calificativo heurístico en contraposición a exacto (Melián & Pérez, 2003).

Incluso algunos autores afirman que estos algoritmos están inspirados en otras ciencias y su aplicabilidad depende del problema que se intenta resolver. Para Melián, estos se pueden clasificar en (Melián & Pérez, 2003) :

Meta heurística inspirada en la física: Ejemplo: Algoritmo Recocido Simulado. Inspirado en el proceso de calentamiento y posterior enfriamiento de un metal, para obtener estados de baja energía en un sólido.

Meta heurística inspirada en la evolución: Métodos que van construyendo un universo de soluciones, de los cuales se seleccionan aquellos que representan un mejor aporte a la optimalidad para generar un nuevo universo de soluciones a partir de la combinación de los seleccionados. Ejemplo: Algoritmo Genético.

Meta heurística inspirada en la biología: Ejemplo: Algoritmo Colonia de Hormigas. El método consiste en simular computacionalmente la comunicación indirecta que utilizan las hormigas para establecer el camino más corto, guardando la información aprendida en una matriz de feromonas.

3.1.9 Algoritmo genético

Es un algoritmo meta heurístico inspirado en la evolución. El término fue acuñado en la década de los 60's por el investigador John Holland y fue ampliamente conocido tras la publicación de su libro en 1975.

Esta técnica se basa en los mecanismos de selección que utiliza la naturaleza, de acuerdo a los cuales los individuos más aptos de una población son los que sobreviven, al adaptarse más fácilmente a los cambios que se producen en su entorno. Hoy en día se sabe que estos cambios se efectúan en los genes de un individuo (unidad básica de codificación de cada uno de los atributos de un ser vivo), y que sus atributos más deseables (por ejemplo, los que le permiten adaptarse mejor a su entorno) se transmiten a sus descendientes cuando este se reproduce sexualmente.

3.2 Marco regulatorio / legal

Ley N°2718: Esta ley establece los lineamientos generales y reglamentarios del transporte y tránsito terrestre y rige en todo el territorio de la República. Por lo tanto, este proyecto no trasgredirá las limitaciones de esta ley, y por el contrario, se especificará aquellas que se ajusten a dicho documento.

Decreto Supremo N°033-2001-MTC: este decreto aprueba el Reglamento Nacional de Tránsito y brinda las bases en cuanto a legalidad del accionar de los diversos componentes de la infraestructura vial en la República. Esta tesina cumplirá todos los aspectos legales relacionados al tránsito.

Resolución Ministerial 210-2000 MTC en su versión 15.02: Esta resolución aprueba el Manual de Dispositivos de Control de Tránsito Automotor para Calles y Carreteras donde se detalla con profundidad cuáles son las especificaciones que los dispositivos deberán cumplir. En el desarrollo de este proyecto se utilizarán estas recomendaciones para brindar una posible solución al problema del tráfico.

CAPÍTULO 4: ESTADO DEL ARTE

4.1 Introducción

El incremento exponencial del número de autos que circulan en las urbes no es exclusivo de la ciudad de Lima y son muchas las ciudades que han tenido que hacer frente a esta situación. Una de las primeras ciudades en realizar investigaciones para la optimización de flujos vehiculares fue Sydney en 1970.

En este capítulo se enfocará en describir dos Sistemas Inteligentes de Transporte (SIT) muy conocidos: SCATS y ADIMOT. La relevancia del primer sistema es la presencia que tiene a nivel internacional, pues ha sido implementado en 154 ciudades desde su creación hace más de cuatro décadas. El segundo sistema cobra relevancia al ser el sistema español que se implantó en la ciudad de Lima durante el último quinquenio.

4.2 Objetivos de la revisión del estado del arte

Describir el funcionamiento de los sistemas de gestión de tráfico, particularmente aquellos sistemas que son usados en la ciudad de Lima. En este capítulo se intenta dilucidar los parámetros que determinan los cambios en los juegos de luces semafóricos y cómo estos repercuten en la adaptabilidad de los ciclos semafóricos ante los cambios de flujos de tráfico.

4.3 Sistema Coordinado Adaptativo de Tráfico de Sydney (SCATS)

4.3.1 *Historia de desarrollo del sistema*

El sistema fue desarrollado en la década de 1980 por la RTA (Roads and Traffic Authority) en Australia. Fue evaluado empíricamente en las vías de Sydney mediante el experimento denominado “Parramatta Experiment”. En dicho estudio se evaluó el funcionamiento del sistema tanto en redes viales abiertas como en redes de circuito cerrado. El experimento

evaluaría el desempeño del sistema y las mejoras logradas con la adaptación del lapso del ciclo en la red semafórica. Los resultados indicaron que SCATS mejoraba el índice de rendimiento de la red urbana de la ciudad australiana.

Su fácil integración ha llevado a que veintisiete países hayan incorporado este sistema como parte de sus métodos de control de tráfico urbano (SCATS, 2014). Esto se debe principalmente a que SCATS ha sido desarrollado modularmente, por lo que puede fácilmente integrarse con una amplia variedad de sistemas de información de tráfico (ITS – Intelligent Transportation System), tomando de ellas un conjunto de datos de entrada y retornando una configuración de la red que se acerca mucho al óptimo para el flujo vehicular presente.

En la actualidad, SCATS forma parte de los sistemas de transporte en más de 37000 intersecciones en los siguientes países: Australia, Bangladesh, Brasil, Brunei, Chile, China, Ecuador, Fiji, Indonesia, India, Irán, Irlanda, Jordania, Laos, Malasia, México, Nueva Zelanda, Pakistán, Filipinas, Polonia, Qatar, Arabia Saudita, Singapur, Sudáfrica, Tailandia, Estados Unidos y Vietnam.

4.3.2 Prueba de su efectividad

Se han realizado múltiples estudios de la eficiencia de SCATS y en todos los casos ha representado una mejoría significativa del índice de rendimiento de la red urbana. La variación de su eficacia entre los diversos lugares donde el sistema fue aplicado se debe a las particularidades de las vías y a la cultura vial de los conductores.

En el estudio realizado por el Departamento de Transporte de Utah, el Doctor Martin concluye que la implementación de SCATS en Park City ha mejorado las operaciones viales en términos del tiempo de viaje, tiempo por detenciones y número de paradas (Martin, 2008). En todos los casos, los viajes realizados usando la vía principal tuvieron una duración menor que los planes de tráfico estáticos. La optimización resulta aún más

significativa durante los picos de tráfico presentes en horas de la mañana durante los días laborables. Sin embargo, durante los fines de semana, esta optimización no muestra mejoría significativa con respecto al método tradicional de planes de tráfico estáticos. El método tradicional sólo logra superar el tiempo total de viaje a SCATS cuando existen varios flujos de tráfico que realizan giros a la izquierda (cuando uno de los flujos de tráfico con una misma dirección y sentido contrario cruza flujo para cambiar de dirección a la vía que intersecta). Sin embargo, para el caso de Park City, estos flujos son excepcionales y la proporción de beneficiarios en la vía principal no representan una gran desventaja para la implementación de SCATS.

4.3.3 Descripción del funcionamiento

Este sistema aborda la gestión de las señales semafóricas adaptándose a las condiciones temporales de tráfico. Estos ajustes son realizados mediante la adaptación de:

1. Tiempo de ciclo.
2. Splits (duraciones de fase)
3. Off set (equivalente al desfaseamiento del tiempo de sincronía necesario para la generación de olas verdes).

SCATS usa la información obtenida mediante los detectores de vehículos localizados próximos a los semáforos de la intersección para ajustar los temporizadores de los semáforos en respuesta a la variación de la demanda de tráfico y la capacidad de la vía. Decimos entonces que SCATS actúa como una retroalimentación heurística activa de ajuste a los ciclos semafóricos según el flujo vehicular.

El sistema utiliza como datos de entrada el grado de saturación y el flujo de tráfico (volumen y velocidad promedio). La medición de estas variables se realiza en un lapso con duración igual a la duración del ciclo. El algoritmo interno entonces calcula la nueva duración de los ciclos, los splits y el offset para el siguiente juego de luces. SCATS asume

que a mayor longitud de ciclo se incrementa la capacidad la capacidad de la intersección, que se debe incrementar los splits proporcionalmente a la llegada de la demanda y se debe proveer de mayor tiempo de offset a mayor flujo de tráfico. Sin embargo, para niveles de saturación o sobre saturación, el sistema abandona el concepto de splits proporcionales cediendo más tiempo de fase verde a la vía de mayor relevancia o de mayor envergadura (de mayor capacidad).

Estos datos obtenidos en cada intersección, son enviados en tiempo real por un controlador a un computador central donde se procesa y se ejecutan los ajustes según la data recibida. Como resultado de este procesamiento, el computador envía a los controladores de las señales de tráfico la nueva secuencia de tiempos que deberá establecer para cada una de sus fases.

El proceso general de la adaptación de las señales de control se realiza modularmente en el siguiente orden:

1. Se calcula la duración óptima del ciclo.
2. Se divide la duración óptima de los splits para cada fase.
3. Se determina la combinación de fases.
4. Se revisa el cumplimiento de los umbrales de tiempo para cada fase.
5. Se envía la configuración a los controladores de semáforos en cada intersección.

4.3.4 Otras ventajas del sistema

SCATS también tiene un impacto positivo en los costos de operación, pues el sistema puede auto-calibrarse realizando ajustes de manera automática lo cual minimiza la cantidad de operadores encargados de la gestión y control del tráfico. La intervención manual es casi nula.

4.4 Sociedad Ibérica de Construcciones Eléctricas – ADIMOT

La empresa SICE (Sociedad Ibérica de Construcciones Eléctricas) se dedica a brindar soluciones tecnológicas en varias líneas de negocio. En la prestación de sus servicios integra diferentes tecnologías y sistemas (propios y de terceros) en las siguientes líneas de negocio: sistemas inteligentes de tráfico, sistemas inteligentes de transporte, medio ambiente y eficiencia energética, ciudades inteligentes, infraestructura de comunicaciones, sistemas de seguridad y control de procesos.

Una de sus herramientas vastamente conocida es ADIMOT (Adaptative Multialgorithmic Optimization Technology). Esta herramienta permite afrontar los problemas de congestión vehicular mediante la adaptación de planes de tráfico fijos en función de las horas del día. Esta gestión la realiza concentrando la información recogida de los diversos puntos de control (próximos a las intersecciones de las avenidas) en un centro de control donde es necesario determinar la priorización del paso de transporte para que el sistema encuentre la configuración más adecuada según los datos procesados.

En ADIMOT pueden establecerse diferentes estrategias de funcionamiento tales como: planes horarios, selección dinámica, adaptativo y micro regulación. SICE ha implementado sistemas inteligentes de tráfico en Moscú, Madrid, en varios países de la región y entre ellos, el Perú. El 25 de octubre del 2014 se inauguró el Centro de Control del Sistema Centralizado e Integrado de Semaforización de Lima Metropolitana, ubicado en el décimo primer piso del edificio de Protransporte. En aquel entonces la gestión municipal inauguró la nueva red semafórica que comprendía la gestión de 311 intersecciones viales. La información que recopila este sistema es del tipo macroscópico capturando datos de densidad vehicular. Dicha información permite determinar los picos de tránsito presentes y ajustar los planes de tráfico que corresponda según los patrones observados. El Centro de Control de Tráfico de Lima utiliza ADIMOT para gestionar el flujo vehicular en las siguientes vías:

- Av. Tacna – Garcilazo de la Vega
- Av. Arenales
- Av. Petit Thouars
- Av. Arequipa
- Red Semafórica A: Damero de Pizarro
- Red Semafórica B: Manco Cápac e Iquitos.
- Red Semafórica C: Av. Javier Prado, Sánchez Carrión (Pershing) y Av. La Marina

4.4.1 Descripción de su funcionamiento

En la aproximación a cada intersección, a una distancia entre 40 y 70 metros se ubica un sensor óptico que contabiliza el número de vehículos que se aproxima a un cruce vial. Esta información es derivada al controlador del tráfico de dicha intersección para la luego se enviado vía fibra óptica al Centro de Control de Tránsito (CCT). Luego la CCT realiza el plan de tránsito para cada intersección, determinando la utilización de olas verdes en los sectores de las vías donde más tráfico exista.

En la actualidad existen siete planes de tráfico para el día y uno para la noche, todos ellos son re-ajustados cada cuatro meses debido al incremento constante del parque automotor en Lima.

4.5 Conclusiones sobre el estado del arte

Tanto en el sistema ADIMOT de SICE como SCATS los únicos datos necesarios para ejecutar los algoritmos de adaptabilidad y/u optimización es el volumen de autos y la velocidad media de vehículos en el flujo. En ambos casos estos datos son procesados en un servidor central que determinan un plan adecuado al tráfico que discurre por la vía principal.

CAPÍTULO 5: DISEÑO DE ESTRUCTURA DE DATOS DE ENTRADA PARA EL ALGORITMO GENÉTICO

5.1 Introducción

En este capítulo se describirán las principales estructuras que representen los parámetros vehiculares de un corredor vial. Se considerarán los parámetros básicos de tráfico que manipulan los Sistemas Integrados de Transporte (SIT), particularmente el sistema ADIMOT que ha sido implementado recientemente en la ciudad de Lima. Estas estructuras serán necesarias para el desarrollo del algoritmo genético.

5.2 Parámetros básicos de las señales tráfico a utilizar

Tabla 3. Parámetros básicos del tráfico en corredor vial

Parámetro	Descripción
t_r	Tiempo de señal roja para el semáforo
t_v	Tiempo de señal verde para el semáforo
t_c	Tiempo del ciclo para una intersección = $t_r + t_v$. La reglamentación peruana limita que el tiempo de ciclo deberá estar en el rango [15,300] (Ministerio de Transportes, 2010)
t_o	Tiempo de offset o desfasamiento
q	Flujo vehicular en la intersección.
v_m	Velocidad media del flujo vehicular.

5.3 Variables necesarias para el desarrollo del algoritmo genético:

Se define el individuo (o cromosoma) como la configuración del ciclo de fase semafórica para todas las intersecciones del corredor vial. Para el caso donde la vía principal tiene n intersecciones.

$$C = \langle C_1, C_2, C_3, \dots, C_n \rangle$$

Donde la configuración de luces de una intersección está definida de la siguiente manera:

$$C_i = \langle b, c_1, c_2, c_3 \rangle$$

Tabla 4. Variables algoritmo genético

Variable	Descripción
b	Fase inicial correspondiente al corredor vial. Valores: falso=rojo y verdadero=verde.
c_1	Tiempo de desfasamiento.
c_2	Tiempo para la segunda fase.
c_3	Tiempo para la primera fase (sin considerar desfasamiento).

5.4 Relación entre los parámetros básicos de las señales de tráfico y su representación como variable:

Tabla 5. Relación parámetros del tráfico y variables del algoritmo genético

Parámetros	Variables	
	$b = \text{verdadero}$	$b = \text{falso}$
t_r	c_2	$c_1 + c_3$
t_v	$c_1 + c_3$	c_2
t_c	$c_1 + c_2 + c_3$	$c_1 + c_2 + c_3$
t_o	c_1	c_1

5.5 Función de Fitness

Para evaluar el impacto de la configuración de la red semafórica, se usará una versión simplificada del Índice de Rendimiento (IR) de una red urbana. El IR es una medida para calcular el impacto económico (cuantificado como tiempo) que tiene el transitar por un corredor vial. El cálculo de este índice está sujeto al número de detenciones y al tiempo total acumulado en estas detenciones debido a las interrupciones de flujo de tráfico. Debido a que el enfoque de nuestro algoritmo es minimizar el tiempo de detenciones, dejaremos sin efecto el costo social correspondiente al número de paradas en el recorrido vehicular.

$$IR = \sum_{j=1}^L (D_j)$$

Dónde:

Tabla 6. Componentes de la función fitness

Variable	Descripción
L	Número de secciones del corredor vial
D_j	Tasa de la demora total en la sección j del corredor vial.

Para la modelación de tráfico de las redes urbanas, la tasa de la demora total es calculada utilizando la expresión : (Fernández A., 2011a)

$$D_j = N_{0j}x_j$$

Dónde N_{0j} es la longitud de la cola y x_j el grado de saturación de una sección de la vía, respectivamente. Para el cálculo de N_{0j} :

$$N_{0j} = \frac{Q_j\tau}{4} \left[(x_j - 1) + \sqrt{(x_j - 1)^2 + \frac{12(x_j - x_{0j})}{Q_j\tau}} \right]$$

Dónde:

$$x_j = \frac{q_j}{Q_j}, \quad Q_j = \frac{v_{ej}}{c} S_j, \quad x_{0j} = 0,67 + \frac{S_j v_{ej}}{600}$$

Tabla 7. Componentes de la tasa de demora total en una red vial

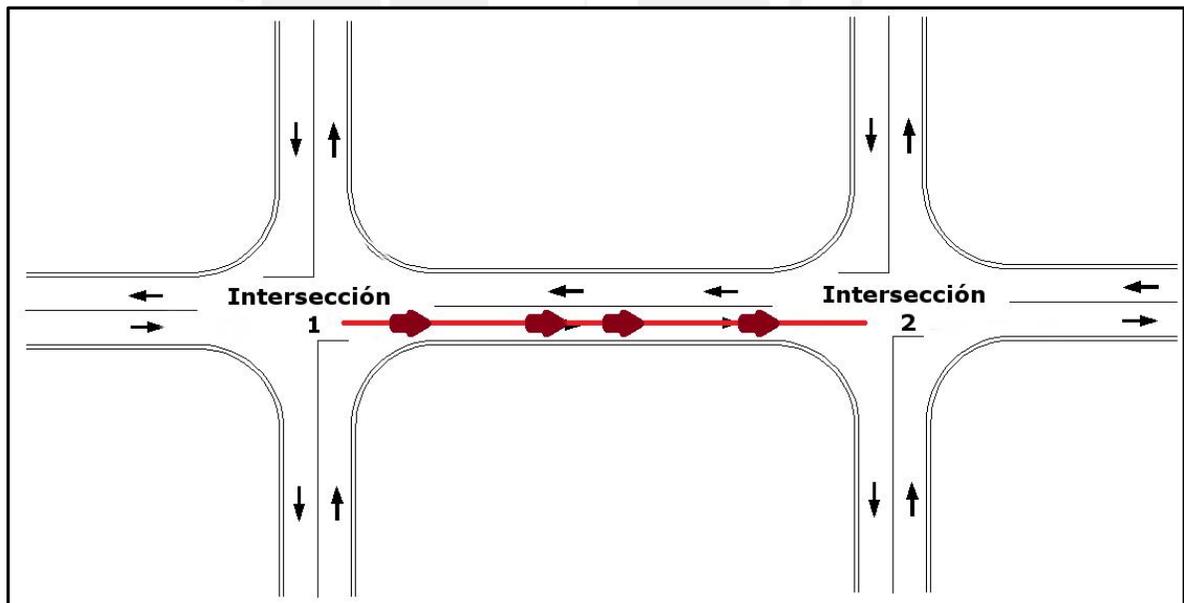
Variable	Descripción
N_{0j}	Longitud de la cola en la sección j de la vía.
q_j	Flujo de vehículos en la sección j de la vía.
Q_j	Capacidad de la sección j de la vía.
v_{ej}	Tiempo de verde efectivo de la sección j de la vía.
S_j	Flujo de saturación de la sección j de la vía.
x_j	Grado de saturación de la sección j de la vía.
C	Ciclo común de la red.
τ	Longitud de periodo en el cual se realiza el muestreo.

Ejemplo de aplicación:

Supóngase el segmento de un corredor vial representado en la Figura 4. Para este segmento se tienen los siguientes datos: las demoras son uniformes en el segmento de vía que va desde la intersección 1 a la intersección 2 con un valor de 0,55 [veh-s/s]. Se sabe que el flujo de saturación de su línea de detención es de 1800 v/h y que la red opera un ciclo de 60 segundos.

Asumiendo que del simulador en 12 minutos se ha obtenido un flujo promedio de **600 v/h** y que el individuo del algoritmo genético brinda **50 segundos** de verde efectivo. Calculamos el índice de rendimiento de la red.

Figura 4. Ejemplo de cálculo de Índice de Rendimiento



Fuente: Elaboración propia

Solución:

Intentamos hallar el Índice de Rendimiento considerando 50 segundos de verde efectivo con un flujo de 600 veh/h.

$$IR = \sum_{j=1}^1 (D_j) = D_{12}$$

Dado que en este ejemplo solo hay un flujo de vehículos que transita por un sector del corredor vial, dirigiéndose de la intersección 1 a la intersección 2, el Índice de Rendimiento viene acotado a la tasa de demora total en este tramo (D_{12}).

Usando la fórmula para la tasa de demora:

$$D_j = N_{0j} x_j$$

El índice de rendimiento para este tramo del corredor se puede expresar en función de la longitud de la cola de vehículos (N_{012}) y el grado de saturación en la vía (x_{12}).

$$IR = \sum_{j=1}^1 (D_j) = D_{12} = N_{012} x_{12}$$

Interpretando los datos en el problema:

Tabla 8. Ejemplo de aplicación de función fitness (índice de rendimiento)

Variable	Interpretación	Valor de la variable
C	“la red opera un ciclo de 60 segundos”	$C = 60$
τ	“del simulador en 12 minutos se ha obtenido un flujo promedio”	$\tau = 12 \left[\frac{min}{min} \right] \left[\frac{60 seg}{min} \right] = 720 s$

S_{12}	“flujo de saturación de su línea de detención es de 1800 v/h”	$S_{12} = 1800 \left[\frac{veh}{h} \right] \left[\frac{h}{3600s} \right] = 0,5 \left[\frac{veh}{s} \right]$
q_{12}	“flujo promedio de 600 v/h” (dato del simulador)	$q_{12} = 600 \left[\frac{veh}{h} \right] \left[\frac{h}{3600s} \right] = 0,167 \left[\frac{veh}{s} \right]$
v_{ej}	“50 segundos de verde efectivo” (propuesta del algoritmo genético)	$v_{ej} = 50 s$
Q_j	Se obtiene de los datos anteriores.	$Q_j = \frac{v_{ej}}{c} S_j$ entonces $Q_j = \frac{50}{60} * 0,5 = 0,416$

El grado de saturación de la vía se expresa como el número de vehículos contabilizados en el flujo sobre la capacidad de dicho sector. Reemplazamos los valores de las variables para obtener el grado de saturación:

$$x_{12} = \frac{q_{12}}{Q_{12}} = \frac{q_{12}c}{v_{e12}S_{12}} = \frac{0,167 \left[\frac{veh}{s} \right] * 60[s]}{50[s] * 0,5 \left[\frac{veh}{s} \right]} = 0,4008$$

$$x_{012} = 0,67 + \frac{S_{12}v_{e12}}{600} = 0,67 + \frac{0,5 \left[\frac{veh}{s} \right] * 50[s]}{600} = 0,71167$$

Reemplazamos los valores obtenidos para obtener la longitud de la cola en la sección 1-2 de la vía.

$$N_{0j} = \frac{0,416 \left[\frac{ADE}{s} \right] * (720)[s]}{4} \left| (0,4 - 1) + \sqrt{(0,4 - 1)^2 + \frac{12(0,4 - 0,7)}{0,41 \left[\frac{ADE}{s} \right] * (720)[s]}} \right| = .2967$$

De modo tal que la tasa de demora total por unidad de tiempo es

$$D_{12} = N_{012}x_{12} = 0,2967 * 0,408 \Rightarrow R = 0,1210$$

Por lo tanto, el Índice de Rendimiento, para un flujo de 600 vehículos por hora, y concediéndole 50 segundos de fase verde, se obtiene un índice de rendimiento:

$$IR = \sum_{j=1}^L (D_j) = D_{12} = 0,1210$$

Como es de suponerse, el índice de rendimiento de la red está íntimamente relacionado con el volumen de vehículos contabilizados que ingresan a la intersección y con el tiempo en el que el semáforo se encuentra en fase verde. La exploración de esta relación se realiza mediante el algoritmo genético propuesto en el la sección 5.4.

CAPÍTULO 6: IMPLEMENTACIÓN DE MÓDULO PARA LA GENERACIÓN DE JUEGOS DE DATOS DE ENTRADA SIMULADOS.

6.1 Introducción

Como se ha revisado en el estado del arte y se ha confirmado con la entrevista realizada en la GTU, los datos recolectados mediante los mecanismos detectores de tráfico en las principales arterias de Lima se realizan mediante las cámaras de visión artificial que capturan variables macroscópicas del flujo que transita por la vía.

En este capítulo se definirán las estructuras de datos que simulen los datos que se registran en cada una de las intersecciones del corredor vial. Estas variables son:

- Volumen de tráfico vehicular: número de vehículos.
- Velocidad media: dato derivado del volumen de tráfico.

Estos datos serán generados siguiendo patrones de flujo vehicular según datos históricos registrados en los puntos de control del estudio realizado por la Municipalidad de Lima desde el año 2011 hasta la actualidad.

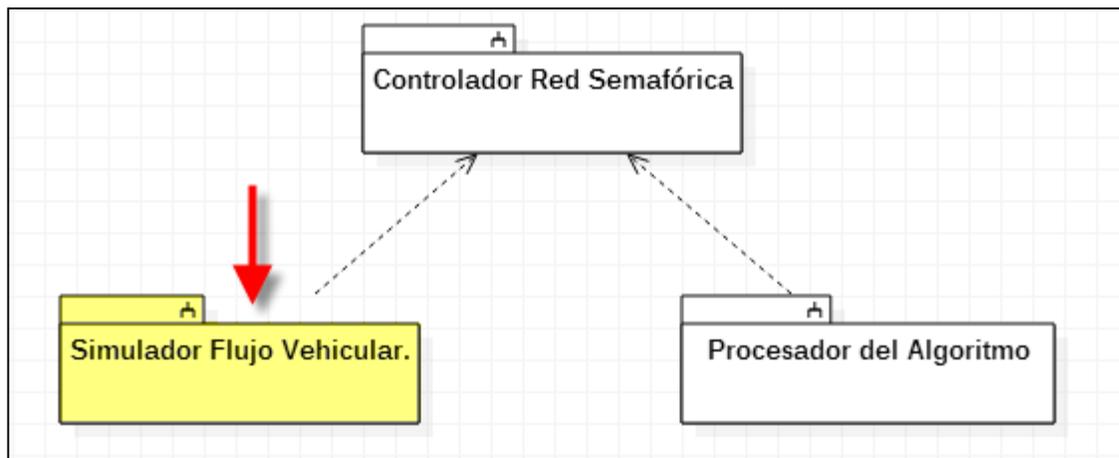
6.2 Objetivo

Diseñar la estructura de datos y el formato de archivo que simula el flujo vehicular que transitan por los puntos de control.

6.3 Descripción del subsistema

En la figura 5 se puede apreciar la relación que guarda el subsistema “Simulador de tráfico vehicular” con los demás subsistemas del proyecto. En este capítulo explicaremos el detalle del funcionamiento del primer subsistema.

Figura 5. Relación de sistemas del proyecto

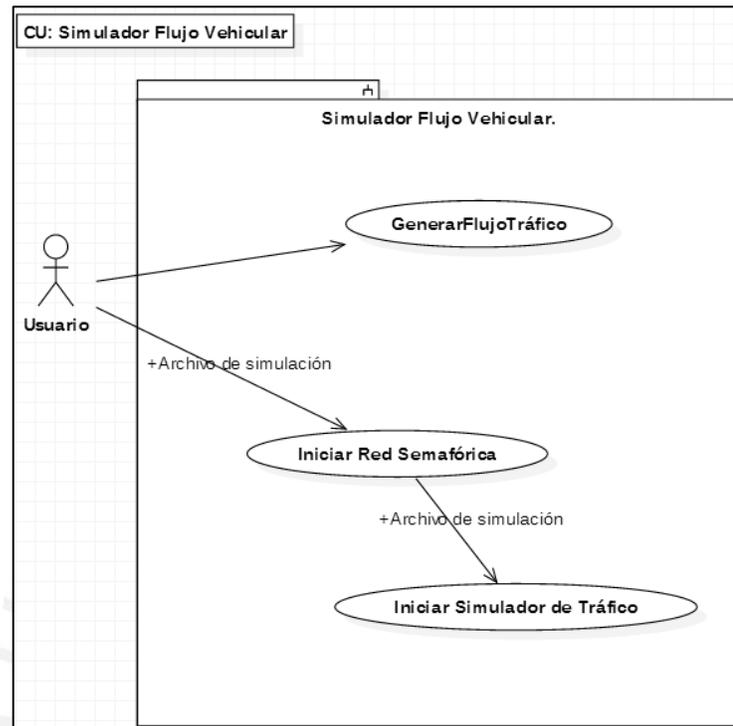


Fuente: Elaboración propia.

6.3.1 Generación de datos de entrada para el simulador.

Internamente, en la figura 6 se presenta el diagrama de casos de uso correspondientes al simulador de flujo vehicular.

Figura 6. Diagrama de casos de uso del simulador de flujo vehicular



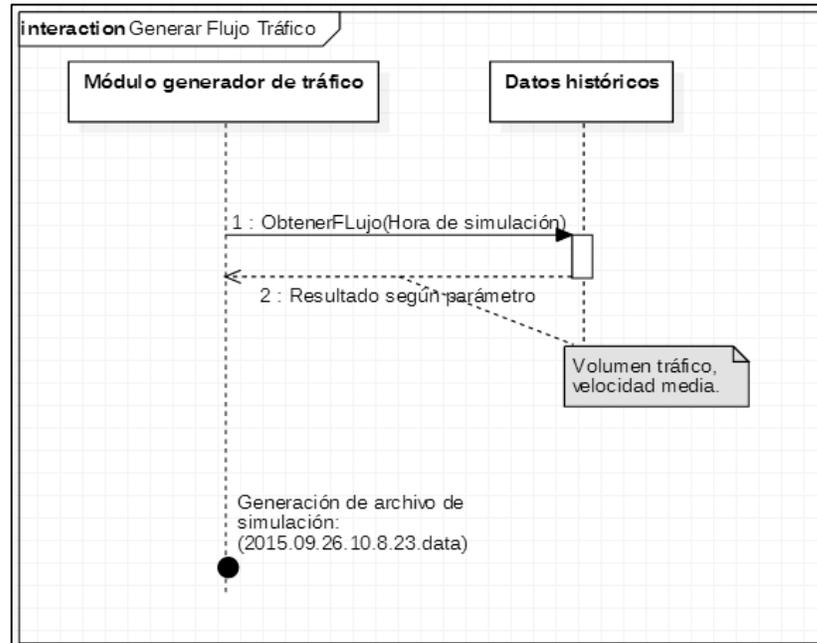
Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 6 notamos que es necesario proveer el archivo de simulación para iniciar el funcionamiento de la red semafórica y éste, cuando se encuentre, permita iniciar el simulador del tráfico que procesa el archivo de simulación.

El archivo que se genera depende de los parámetros de tiempo en los que se quiera realizar la simulación. De acuerdo a los datos históricos de flujos de tráfico correspondientes al corredor materia de estudio, se obtiene un archivo con un flujo simulado de tráfico para cada intersección.

En el gráfico 7 se muestra el diagrama de secuencia detalla lo explicado:

Figura 7. Diagrama de actividades del módulo generador de datos



Fuente: Elaboración propia

El archivo generado por el simulador guardará el registro del número de autos que son contabilizados por las cámaras de cada una de las intersecciones. En la figura 8 se puede ver el detalle. El archivo tendrá la siguiente estructura:

Figura 8. Detalle del archivo de simulación

```

x - 2015.9.26.10.8.23...uladorTrafico) - VIM
*****
10:20:0
M00: (NV,VP)(NV,VP)(NV,VP)(NV,VP)
M01: (NV,VP)(NV,VP)(NV,VP)(NV,VP)
M02: (NV,VP)(NV,VP)(NV,VP)(NV,VP)
M03: (NV,VP)(NV,VP)(NV,VP)(NV,VP)
M04: (NV,VP)(NV,VP)(NV,VP)(NV,VP)
M05: (NV,VP)(NV,VP)(NV,VP)(NV,VP)
M06: (NV,VP)(NV,VP)(NV,VP)(NV,VP)
M07: (NV,VP)(NV,VP)(NV,VP)(NV,VP)
M08: (NV,VP)(NV,VP)(NV,VP)(NV,VP)
M09: (NV,VP)(NV,VP)(NV,VP)(NV,VP)
*****
    
```

Fuente: Elaboración propia

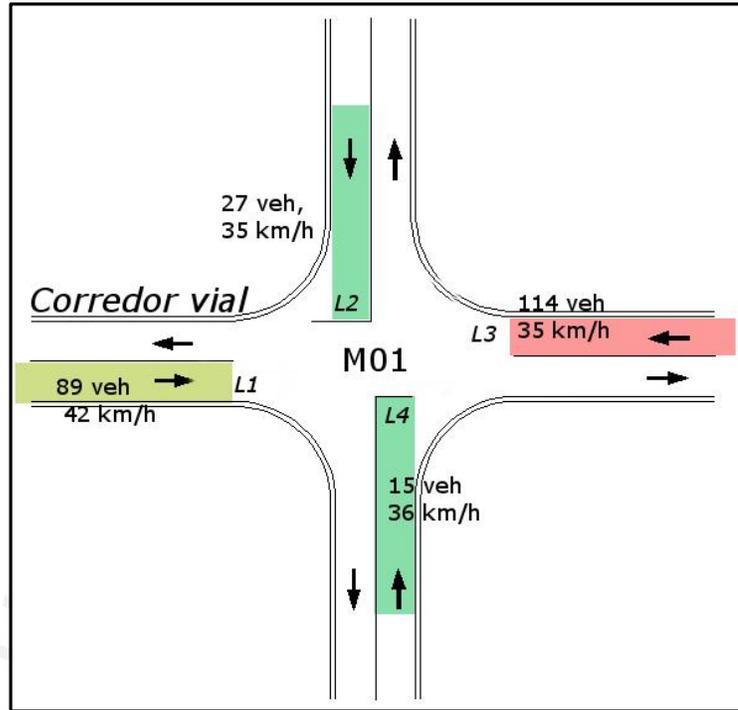
Cada fila representa los datos de una intersección. Cada intersección tendrá cuatro pares ordenados donde cada par indica el número de vehículos que atravesó el punto de control y la velocidad de promedio de los vehículos contabilizados (en kilómetros por hora). Como se ve en la Figura 8. Detalle del archivo de simulación, el primer par de números corresponde al número y velocidad promedio de vehículos que van por la avenida principal con sentido de oeste a este del corredor vial, el segundo par corresponde a la calle o avenida que intersecta a la avenida principal y que va en sentido de norte a sur, el tercer par corresponde al número de vehículos y velocidad promedio de aquellos que transitan por la avenida principal y van en sentido de este a oeste, y el cuarto par corresponde a los datos de aquellos vehículos que circulan por la calle o avenida que intersecta el corredor vial y van en sentido de sur a norte.

Así, la representación de los datos simulados queda estructurado de la siguiente manera:

Tabla 9. Estructura de la simulación de parámetros de tráfico para una intersección

Intersección	Sentido		Sentido		Sentido		Sentido	
	Oeste - Este		Norte - Sur		Oeste - Este		Sur - Norte	
	N° vehículos	Velocidad promedio	N° vehículos	Velocidad promedio	N° vehículos	Velocidad promedio	N° vehículos	Velocidad promedio
M01	89	42	27	35	114	35	15	36

Figura 9. Sentido del flujo de tráfico en una intersección



Fuente: adaptado de (Kalganova, Russel, & Cumming, 1999) "Multiple Traffic Signal Control Using a Genetic Algorithm"

CAPÍTULO 7: DISEÑO DE ALGORITMO GENÉTICO

7.1 Introducción

En este capítulo se explicará el funcionamiento de la implementación del algoritmo genético propuesto para el problema expuesto. La solución propuesta se describe como sigue:

- Los tiempos determinados para las señales de tráfico para la red semafórica serán generadas como resultado del algoritmo genético. A la definición de estos tiempos para la red le denominaremos ‘configuración de red’. Los sistemas inteligentes de tráfico denominan a esta configuración como ‘plan de tráfico vehicular’.
- El módulo de simulación usará la configuración de red semafórica que el algoritmo genético establezca para los ciclos de las señales de tráfico en cada una de sus intersecciones.
- La simulación permitirá tener una medida de la eficacia (índice de rendimiento) como retroalimentación para el algoritmo genético.

Este proceso continuará hasta que el algoritmo genético se detenga. Esto ocurrirá al llegar al tiempo máximo de ejecución para la simulación o cuando se alcance una configuración óptima para la red semafórica.

7.2 Aplicación del algoritmo genético

7.2.1 Descripción de estructura de datos

Tabla 10. Descripción y detalle estructura de datos para el algoritmo genético

Variable	Detalle	Descripción
n	Número de intersecciones semaforizadas del corredor vial.	Número de intersecciones de la red vial.
RS	Arreglo de intersecciones del corredor vial con tamaño = n.	Red semafórica.
CR	Estructura de datos que comprende los campos: <ul style="list-style-type: none"> • contador • fase • $q_{EO}, q_{OE}, q_{NS}, q_{SN}$ • $vm_{EO}, vm_{OE}, vm_{NS}, vm_{SN}$ • l_{EO}, l_{OE} • configuración : Estructura de datos que comprende los campos <ul style="list-style-type: none"> ○ b ○ c1,c2,c3 	Cruce o Intersección.
P	Arreglo de individuos $\langle IND_1, IND_2, \dots, IND_{tp} \rangle$	Población
IND_i	Datos de configuración para RS. <ul style="list-style-type: none"> • $\langle CR_1, CR_2, \dots, CR_n \rangle$ • IR = Índice de Rendimiento 	Individuo
Ps	Arreglo de individuos seleccionados resultante tras el método de selección.	Población seleccionada
Tts	Tiempo total de simulación	Tiempo transcurrido en simulación

tp	Número de individuos que conforma la población	Tamaño de población
NP	Población que almacena los nuevos individuos	Nueva población
TM	Es la probabilidad calibrada con la que se obtiene una mejora considerable de la solución del algoritmo genético	Tasa de mutación

De este modo, el gen, el individuo y la población quedan definidos como se muestra en la tabla 10:

Tabla 11. Resumen de estructura de algoritmo genético

Gen	Individuo	Población
$CR_i = \langle b, c_1, c_2, c_3 \rangle$	$IND_i = \langle CR_1, CR_2 \dots CR_n \rangle$	$P = \langle IND_1, IND_2 \dots IND_{tp} \rangle$
Configuración de tiempos de fase para la intersección <i>i</i> -ésima.	Configuración de fases para todas las intersecciones involucradas en el corredor vial	Generación de individuos participantes en el algoritmo genético.

En el siguiente ejemplo se modela un corredor vial que cuenta con cinco intersecciones ($n=5$). Se desea utilizar el algoritmo genético con un tamaño de población de 50 individuos ($tp=50$).

Tabla 12. Ejemplo de aplicación de la estructura de algoritmo genético

Gen		
$CR_1 = \langle 0,10,50,20 \rangle$	Configuración de tiempos de fase para la primera intersección.	El ciclo inicia con fase roja para el corredor vial con 10 segundos (de desfaseamiento). La siguiente fase brindará 50 segundos de verde efectivo, para finalmente culminar con 20 segundos de fase roja. Los colores para la avenida que interseca tiene los mismos tiempos de fase pero con juego de luces antagónico. Detalle de la estructura ver sección 5.4.
Individuo		
$IND_i = \langle CR_1, CR_2, CR_3, CR_4, CR_5 \rangle$ Dónde: $CR_1 = \langle 0,10,50,20 \rangle$ $CR_2 = \langle 0,8,50,22 \rangle$ $CR_3 = \langle 0,10,50,20 \rangle$ $CR_4 = \langle 0,12,50,18 \rangle$ $CR_5 = \langle 0,16,50,14 \rangle$	Un individuo posee un arreglo de cinco configuraciones correspondientes a las cinco intersecciones en el corredor vial.	Estas configuraciones de las intersecciones del corredor vial permiten calcular un índice de rendimiento (IR) para el flujo de tráfico presente (dato del simulador). Las diferentes poblaciones conservan aquellas configuraciones con mejores IR.
Población		
$P = \langle IND_1, IND_2 \dots IND_{tp} \rangle$ Dónde: $P = \langle IND_1, IND_2 \dots IND_{50} \rangle$	El arreglo de la población contiene 50 individuos, cada uno de ellos con un IR.	En cada generación se producen nuevas poblaciones utilizando los operadores genéticos. Esta población refiere al fenotipo o campo de soluciones explorado.

7.2.2 Pseudocódigo principal:

```

INICIO AG
1   P = Generar una población inicial (tp).
2   Calcular Índice de Rendimiento de cada individuo (P).
3   MIENTRAS (Condición de parada = Falso) HACER
3.1   PARA índice = 1 HASTA tp/2 HACER
3.1.1   ind_h1,ind_h2 = CASAMIENTO de dos individuos obteniendo dos descendientes.
3.1.2   MUTACIÓN de los dos descendientes con cierta probabilidad (ind_h1,ind_h2).
3.1.3   Calcular el Índice de Rendimiento de los dos descendientes mutados (ind_h1,ind_h2).
3.1.4   Insertar los dos descendientes mutados en la nueva generación (NP).
      FIN PARA
3.2   PS = Seleccionar los mejores individuos (P,NP).
3.3   P = Actualizar población (PS).
3.4   SI (población converge(PS) ) ENTONCES
3.4.5   Condición de parada = verdadero
      FIN SI
FIN MIENTRAS
FIN GA

```

Explicación del algoritmo principal

- Línea 1 Se genera una población inicial P con tp individuos, donde cada individuo tiene una determinada configuración para la intersección que representa.
- Línea 2 Se realiza la evaluación de la función fitness descrita en la sección 5.5, para cada uno de los individuos en la población P creada.
- Línea 3 Se inicia la iteración del algoritmo genético. Este bucle finalizará cuando se cumplan las condiciones de fin de iteración. Esto ocurrirá cuando se haya alcanzado un número máximo de poblaciones o

cuando se haya alcanzado un máximo número de iteraciones en las que no se mejora la mejor solución temporal. Logradas las condiciones de fin de iteración, se considera haber encontrado al mejor individuo que permite minimizar el Índice de Rendimiento del corredor vial.

- Línea 3.1.1 Para esta recombinación genética se realiza el casamiento o cruzamiento entre dos individuos de la población, obteniendo dos nuevos individuos hijos (ind_h1, ind_h2). Para ello se utilizará el método de un punto de corte. El detalle de este procedimiento se encuentra en la sección del operador de casamiento, sección 7.2.3.1.
- Línea 3.1.2 Para esta recombinación genética se realiza la mutación de los individuos (ind_h1, ind_h2) con una probabilidad correspondiente a la tasa de mutación. La recombinación se realizará con una tasa de mutación calculada en la sección 0.
- Línea 3.1.3 Para los nuevos individuos creados se registra el resultado de la función fitness mediante el cálculo de su IR.
- Línea 3.1.4 Estos descendientes (ind_h1, ind_h2) son guardados en un nuevo arreglo poblacional.
- Línea 3.2 Para el mecanismo de selección entre ambas poblaciones (la de padres e hijos) se realizará una selección por torneo (sección 7.2.3.3), actualizando los individuos seleccionados en la nueva población (PS).
- Línea 3.3 La población seleccionada se convierte en la nueva generación o población del algoritmo genético $P = PS$.

Línea 3.4 Por último se analiza la convergencia de la solución para determinar la condición de parada. Ésta permitirá detener el bucle principal del algoritmo cuando el primer individuo de la población actual tenga un Índice de Rendimiento (IR) igual o menor que el primer individuo de la población anterior.

7.2.3 Operadores del algoritmo genético:

En este apartado definiremos los operadores básicos involucrados en el desarrollo del algoritmo genético:

- 1) El mecanismo de selección: Se definirá la función fitness que evalúa la mejora que aporta el individuo en la optimización de la función objetivo del problema. Se realizará una selección por torneo para determinar cuáles individuos sobrevivirán y continuarán con la reproducción o recombinación genética.
- 2) Recombinación genética: La recombinación genética se realizará a partir de los individuos seleccionados en el paso anterior. Esta recombinación está afectada por dos operadores a) operador de cruzamiento y b) operador de mutación. Para las operaciones de cruzamiento se utilizará un punto de corte o división del cromosoma (individuo) y para la tasa de mutación se calibrará en la sección 0.

7.2.3.1 Pseudocódigo del operador de casamiento o cruzamiento

INICIO CASAMIENTO (Índice)

- 1 ind_p, ind_m = Selección de dos individuos de la población para realizar el cruce (P, índice)
- 2 ind_h1 = CASAR segmento (pc, ind_p, 1, ind_m, 2)

```

3      ind_h2 = CASAR segmento (pc,ind_p,2,ind_m,1)
4      SI es abominación(ind_h1)
4.1    ind_h1 = ind_p
        FIN SI
5      SI es abominación(ind_h2)
5.1    ind_h2 = ind_m
        FIN SI
6      RETORNAR(ind_h1,ind_h2)
        FIN CASAMIENTO
  
```

Explicación del operador de casamiento

Línea 1 Se seleccionan dos individuos (ind_p, ind_m) de la población (P) según su posición (i) en la población. Para evitar una rápida convergencia y explorar un mayor número de alternativas de solución, se escogen individuos con posición complementaria en la población, es decir, aquellos individuos que tengan una alta y baja calificación fitness para realizar el casamiento. El proceso de selección filtrará los individuos que aporten una mejor solución al problema.

Línea 2 Se realiza un cruzamiento con los individuos previamente seleccionados. El cruce se realiza dividiendo al individuo padre y madre (ind_p, ind_m) en un punto de corte. Se realiza la conjunción de la sección 1 del ind_p con la sección 2 del ind_m para formar un nuevo individuo: ind_{h1} .

Línea 3 De la misma manera, se realiza un cruzamiento de los individuos previamente seleccionados. El cruce se realiza dividiendo al individuo padre y madre (ind_p, ind_m) en un punto de corte. Se realiza la conjunción de la sección 2 del ind_p con la sección 1 del ind_m para formar un nuevo individuo: ind_{h2} .

Línea 4.1 Se valida que el individuo ind_h1 no es abominación, es decir, que su composición de $\langle b, c1, c2, c3 \rangle$ no sugiera una configuración que no cumpla con la reglamentación de fase en una intersección. De ser este el caso, se replicaría el valor del individuo ind_p para esta variable.

Línea 5.1 De la misma manera, se valida que el individuo ind_h2 no es abominación, es decir, que su composición de $\langle b, c1, c2, c3 \rangle$ no sugiera una configuración que no cumpla con la reglamentación de fase en una intersección. De ser este el caso, se replicaría el valor del individuo ind_m para esta variable.

Línea 6 La función retorna el par de individuos ind_h1, ind_h2.

7.2.3.2 Pseudocódigo del operador de mutación

```

INICIO MUTACION (ind_h1, ind_h2)
1   TM = XX
2   probabilidad = Generar numero aleatorio (0,1)
3   SI (probabilidad < TM) ENTONCES
3.1   pos_aleatorio = Generar numero aleatorio (0, long_individuo(ind_h1))
3.2   c_ind_h1 = ind_h1
3.3   Modificar individuo (pos_aleatorio)
3.4   SI es abominacion (ind_h1)
3.4.1   ind_h1 = c_ind_h1
      FIN SI
      FIN SI
4   probabilidad = Generar numero aleatorio (0,1)
5   SI (probabilidad < TM) ENTONCES
5.1   pos_aleatorio = Generar numero aleatorio (0, long_individuo(ind_h2))
5.2   c_ind_h2 = ind_h2
  
```

```

5.3      Modificar individuo (pos_aleatorio)
5.4      SI es abominacion (ind_h2)
5.4.1    ind_h2 = c_ind_h2
          FIN SI
          FIN SI
          FIN MUTACION

```

Explicación del operador de mutación

- Línea 1** El valor de la tasa de mutación TM se asigna según el resultado de la calibración obtenida en la sección 0
- Línea 2** Se evalúa si el número aleatorio [0,1] es menor que el valor de la tasa de mutación. De ser el caso, dicho individuo deberá mutar.
- Línea 3.1** Se escoge un número aleatorio entre cero y el número de intersecciones que represente el individuo a mutar (long_individuo(ind_h1))
- Línea 3.2** Se guarda una réplica del individuo original.
- Línea 3.3** Se realiza la mutación del individuo (ind_h1) en la intersección seleccionada previamente (pos_aleatorio).
- Línea 3.4.1** Se valida que el individuo ind_h1 no es abominación, es decir, que su composición de $\langle b, c_1, c_2, c_3 \rangle$ no sugiera una configuración que no cumpla con la reglamentación de fase en una intersección. De ser este el caso, la mutación no se realizaría, regresando al valor original de la variable guardada en la copia c_ind_h1.

Línea 5 Se evalúa si el nuevo número aleatorio con valores entre 0 y 1 es menor que el valor de la tasa de mutación. De ser el caso, dicho individuo deberá mutar.

Línea 5.1 Se escoge un número aleatorio entre cero y el número de intersecciones que represente el individuo a mutar (long_individuo(ind_h2)))

Línea 5.2 Se guarda una réplica del individuo original.

Línea 5.3 Se realiza la mutación del individuo (ind_h2) en la intersección seleccionada previamente (pos_aleatorio).

Línea 5.4.1 Se valida que el individuo ind_h2 no es abominación, es decir, que su composición de $\langle b, c_1, c_2, c_3 \rangle$ no sugiera una configuración que no cumpla con la reglamentación de fase en una intersección. De ser este el caso, la mutación no se realizaría, regresando al valor original de la variable guardada en la copia c_ind_h2.

7.2.3.3 Pseudocódigo del mecanismo de selección

INICIO TORNEO (P, NP)

```

1  MIENTRAS ( tamaño(PS) < tamaño(P) ) HACER
2    participante_1 = Selección aleatoria individuo en población (P)
3    participante_2 = Selección aleatoria individuo en población (NP)
4    SI (IR (participante_2) >= IR (participante_1) ) ENTONCES
4.1    Insertar en población seleccionada (PS, participante_1)
5    SINO
5.1    Insertar en población seleccionada (PS, participante_2)
    FIN SI
  FIN MIENTRAS

```

6 RETORNAR (PS)
FIN TORNEO

Explicación del mecanismo de selección por torneo:

- Línea 2** Se selecciona un individuo (participante_1) de la población original (P) de manera aleatoria.
- Línea 3** De la misma manera, se selecciona un individuo (participante_2) de la nueva población (NP) (donde se han guardado los hijos).
- Línea 4** La función de fitness (IR) evaluará cuál de los dos individuos participante_1 o participante_2 contribuye más con la reducción de Índice de Rendimiento (en término de demoras totales) del corredor vial.
- Línea 4.1** Si el individuo participante_1 tiene una configuración de ciclos de semáforo que permite tener un menor tiempo de demora total, este individuo es insertado en una población seleccionada.
- Línea 4.2** Sino, el individuo participante_2 es quien tiene una mejor configuración de ciclos de semáforo en términos de IR, por lo este individuo es insertado en una población seleccionada.
- Línea 6** Esta iteración se realizará tantas veces como sea necesario hasta obtener una población seleccionada (PS) que tenga el mismo número de individuos que la población inicial.

7.2.4 Calibración del porcentaje de mutación

El procedimiento de mutación es aquella operación por la que ciertos individuos sufren alteraciones de los valores que los definen. Esta calibración se realiza mediante el análisis de resultados considerando variación en la tasa de mutación en un rango desde el 4% hasta 13% en intervalo de 1% en cada iteración. Para cada valor de tasa de mutación se emplea un muestreo de 50 pruebas con la finalidad de conocer el comportamiento de la función fitness en promedio del algoritmo genético. Para ello, se realizan pruebas de las tasas de mutación con el objetivo de definir con que ratio de mutación se consigue un mejor resultado para la función fitness del algoritmo. El detalle se puede revisar el **Error! Reference source not found. - Error! Reference source not found.**

En la Tabla 13 se muestra el resumen de los resultados de este proceso.

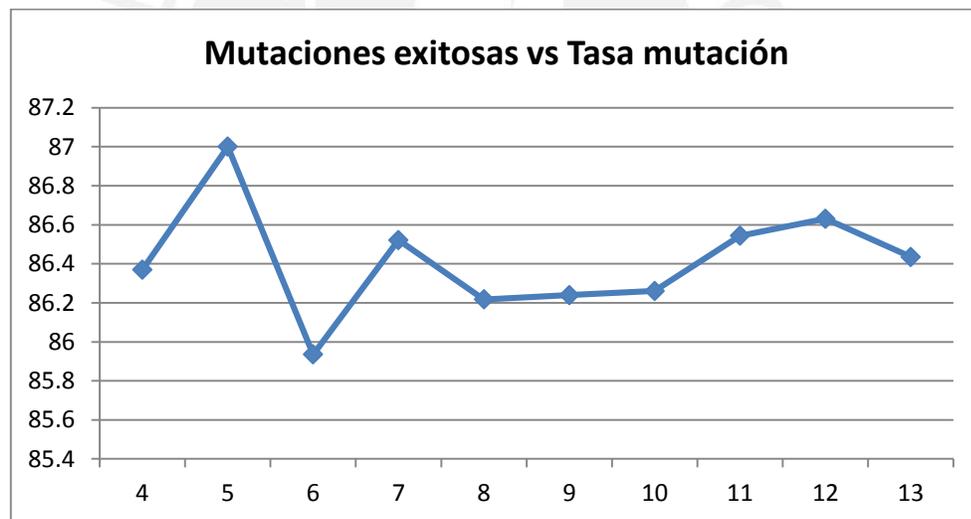
Tabla 13. Calibración porcentaje de mutación

% mutación	Promedio IR Alg Genético	Promedio de mutación exitoso	Mutación mínima exitosa	Mutación máxima exitosa	Desviación Estándar
4	193781.96	86.370	80	91	2.235
5	193785.445	87.000	82	91	2.394
6	193767.15	85.935	83	90	1.914
7	193762.556	86.522	83	90	1.871
8	193757.275	86.217	83	91	1.788
9	193749.745	86.239	83	89	1.417
10	93720.026	86.261	82	89	1.652
11	193757.338	86.543	84	89	1.277
12	193719.026	86.630	82	91	3.127
13	193712.651	86.435	84	89	1.167

Los datos de la Tabla 13 muestran el comportamiento que ha tenido el algoritmo genético con diversas tasas de mutación para los individuos. Se puede apreciar que se logra mejores resultados de mutación cuando ésta alteración se realiza con una tasa del 5%. Por lo tanto, se puede afirmar que cuando se produce la mutación con una tasa del 5% sobre los individuos de una población, se logra la convergencia a un mejor resultado del algoritmo recorriendo un espacio de soluciones de mayor tamaño.

En la Figura 10 podemos apreciar gráficamente que para las múltiples ejecuciones del algoritmo, se abarca un mayor espectro de soluciones cuando se emplea una tasa de mutación de 5%. Se confirma entonces que para el desarrollo del algoritmo genético se utilizará esta tasa de mutación.

Figura 10. Cálculo de tasa de mutación



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 8: EXPERIMENTACIÓN NUMÉRICA

8.1 Introducción

En este capítulo se realizará la comparación entre Índice de Rendimiento (IR) de un corredor vial mediante la solución propuesta, es decir, mediante la adaptabilidad de ciclos de semáforo según el flujo vehicular y mediante la configuración vigente de planes estáticos de tráfico. Para este último caso, se utilizará los ocho planes de tráfico empleados por el municipio de Lima, listados en el **Error! Reference source not found.**

Para las siguientes secciones se usará el siguiente orden:

- Muestra 1: Muestreo del Índice de Rendimiento usando planes estáticos de tráfico.
- Muestra 2: Muestreo del Índice de Rendimiento usando el algoritmo genético.

8.2 Prueba de Kolmogorov-Smirnov

En esta prueba será útil para describir la distribución de los resultados del índice de rendimiento, en particular, si estas variables estudiadas obtenidas con la ejecución de planes fijos de tráfico y con la ejecución del algoritmo genético tienen una distribución conocida.

El objetivo de esta prueba es determinar la bondad de ajuste que tienen ambas muestras a una distribución normal. El corroborar este objetivo resulta necesario para el posterior análisis de varianza y media, realizadas mediante la prueba de Fisher y prueba Z, respectivamente.

Esta prueba será útil para aseverar o rechazar la hipótesis la cual propone que el índice de rendimiento de ambas muestras ocurre con una distribución normal.

Por lo tanto, de las muestras obtenidas tras la ejecución del simulador siguiendo planes estáticos de tráfico (muestra 1) y con la utilización del algoritmo genético propuesto en el capítulo anterior (muestra 2), se plantean las siguientes hipótesis para ambas muestras:

H_0 : La muestra sigue una distribución normal.

H_1 : La muestra NO sigue una distribución normal.

Luego de realizar el procedimiento para la prueba de Kolmogorov sobre ambas muestras se obtienen los resultados, resumidos en la Tabla 14:

Tabla 14. Resumen de resultados de la prueba de Kolmogorov

Prueba de Kolmogorov		
	Muestra 1	Muestra 2
Estimador estadístico	0.15	0.15
Significancia	0.05	0.05
Valor crítico	0.0771	0.0713

De la tabla anterior, se puede observar que el valor del estimador obtenido (0.15) es mayor al valor crítico (0.0771) por lo que el valor estimado de la muestra se encuentra fuera del rango de la zona crítica. De este modo, se acepta la hipótesis nula y se concluye que la muestra 1 correspondiente a los Índice de Rendimiento obtenidos siguiendo planes fijos de tráfico sigue una **distribución normal**. Mayor detalle de los resultados se encuentra en el anexo E.

Asimismo, se puede observar que el valor del estimador obtenido (0.15) es mayor al valor crítico (0.0713) por lo que el valor estimado de la muestra se encuentra fuera del rango de la zona crítica. De este modo, se acepta la hipótesis nula y se concluye que la muestra 2 correspondiente a los Índice de Rendimiento obtenidos tras la ejecución del algoritmo genético propuesto sigue una **distribución normal**. Mayor detalle de los resultados se encuentra en el anexo F.

8.3 Prueba de Fisher

La prueba de Fisher se emplea para determinar la relación que guardan las varianzas de las muestras recogidas. Sin embargo, para realizar este análisis sobre ambas muestras, se requiere que tengan una distribución normal. Afortunadamente, este requerimiento ya ha sido garantizado con la prueba de Kolmogorov preliminar. Por lo tanto, procedemos a analizar el nivel de homogeneidad que guardan las varianzas de ambas muestras.

$H_0: \sigma_{m1}^2 = \sigma_{m2}^2$ (Las varianzas de la muestras son significativamente homogéneas)

$H_1: \sigma_{m1}^2 \neq \sigma_{m2}^2$ (Las varianzas de la muestras no son homogéneas)

Luego de realizar el procedimiento para la prueba de Fisher para ambas muestras se obtienen los resultados:

Tabla 15.- Resumen de resultados de la prueba de Fisher

Prueba de Fisher		
	Muestra 1	Muestra 2
Media muestral	313542.606	193797.713
Desviación estándar	8.556	11.578
Observaciones	50	50
F	0.208	0.6621
Valor crítico F (una cola)	1.96	1.96

De la tabla anterior se puede apreciar que en ambas muestras los valores de F (0.208 y 0.6621) son menores al valor crítico F. De este modo se acepta la hipótesis nula reconociendo que los datos de las variables en ambas muestras poseen varianzas significativamente homogéneas. Para finalizar el análisis de los valores de los Índices de Rendimiento (IR) obtenidos, se procede a realizar la prueba Z con la cual se determina cuál de las muestras tiene una mejor media para el IR.

8.4 Prueba Z

Esta prueba permitirá comparar las medias de dos muestras obtenidas y determinar si una es significativamente ‘mejor’ que la otra. Con esta prueba se verificará si el actual uso de planes estáticos de tráfico o las fases de tiempos semafóricos propuestos del algoritmo genético posee una mejor media en términos de su IR.

Dado que el objetivo de la función fitness (Índice de Rendimiento) del algoritmo genético es cuantificar el tiempo total perdido en detenciones del flujo de tráfico, utilizaremos la prueba estadística Z para evaluar la efectividad conseguida con la solución propuesta.

Utilizamos esta prueba para determinar si existe una diferencia significativa entre las medias de ambas muestras con el objetivo de confirmar si esta propuesta

realmente representa una mejora para el flujo de tráfico en el corredor vial, en términos de la reducción de tiempos de demoras totales.

Para analizar lo anterior, planteamos las siguientes hipótesis:

$$H_0: \mu_{m1} = \mu_{m2}$$

$$H_1: \mu_{m1} \neq \mu_{m2}$$

La hipótesis nula plantea la igualdad entre las medias de las muestras obtenidas, mientras que la hipótesis alternativa plantea una diferencia significativa entre los resultados de ambas muestras. Se utilizará una prueba de dos colas para determinar la aceptación o la negación de las hipótesis, con un nivel de significancia de 5% (0.05).

A continuación, en la Tabla 16 se resume el resultado de la prueba Z para ambas muestras.

- Muestra 1: Muestreo del Índice de Rendimiento usando planes estáticos de tráfico.
- Muestra 2: Muestreo del Índice de Rendimiento usando el algoritmo genético.

Tabla 16. Resumen de resultados de la prueba Z – diferencia medias

	Prueba Z	
	Muestra 1	Muestra 2
Media	313542.606	193797.8059
Desviación estándar	15902.2196	103.4170506
Tamaño muestra	50	50
Z	-0.00035014	
Valor crítico z (dos colas)	+-1.95	

De la tabla anterior se puede observar que el valor de Z (0.00035) cae en la zona crítica de la distribución por lo que se rechaza la hipótesis nula, es decir, se puede concluir que las medias obtenidas en ambas muestras son significativamente diferentes.

Por lo tanto, se procede a probar cuál de las muestras obtenidas tiene un menor valor de media muestral. En otras palabras, con cuál de los métodos se obtiene un mejor índice de rendimiento. Como hipótesis nula se plantea que la media de IR con los planes de tráfico estáticos es más óptima que los obtenidos con el algoritmo genético. En contraposición, la hipótesis alternativa plantea que los IR resultados del algoritmo genéticos obtiene soluciones más óptimas.

$$H_0: \mu_{m1} < \mu_{m2}$$

$$H_1: \mu_{m1} \geq \mu_{m2}$$

Para las hipótesis planteadas se intenta analizar cuál de las muestras tienen un valor medio menor para el índice de rendimiento de una red vial (calculado como tiempo de demora total).

Tabla 17. Resumen de resultados de la prueba Z - mejor media

	Prueba Z	
	Muestra 1	Muestra 2
Media	313542.606	193797.8059
Desviación estándar	15902.2196	103.4170506
Tamaño muestra	50	50
Z	-0.000175072	
Valor crítico z (una cola)	1.645	

Los resultados nos permiten apreciar que el valor de z cae dentro de la región crítica planteada, por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, concluyéndose, con un nivel de significancia del 5%, que la media obtenida de la muestra 2 para el cálculo del IR es menor que el obtenido usando planes estáticos de tráfico, correspondiente a la muestra 1.

A partir de los resultados obtenidos en la experimentación numérica, se puede aseverar que los resultados obtenidos con el uso del algoritmo genético propuesto presentan un mejor resultado promedio de la función de fitness que los obtenidos con uso de planes estáticos de tráfico.

Por último, debido a que el objetivo principal del presente proyecto era minimizar el tiempo de demora total en un corredor vial, calculado a partir del índice de rendimiento de esta vía (IR), se puede concluir que el uso del algoritmo genético logra el objetivo tras el cálculo de las fases de ciclos semafóricos más adecuadas para cada una de sus intersecciones.

CAPÍTULO 9: PROTOTIPO FUNCIONAL

En la siguiente sección se mostrará el funcionamiento del prototipo funcional desarrollado y su ejecución desde línea de comandos.

9.1 Ejecutable Red Semafórica

Este programa es el controlador de los semáforos en todas las intersecciones del corredor vial. Dispone de métodos publicados en el registry para que puedan ser utilizados por otros programas. Es dependiente de la iniciación del rmiregistry de Java para la publicación de servicios.

```
> java rmiregistry
> javac RedSemaforica.java
> java RedSemaforica
```

```
javier@jvrdns:~/Dropbox/PUCP2015-2/Tesis2/Sem 12-Experimentacion/TodoTesis2$ java RedSemaforica

Semaforo 0(false):3    <100 100 100 100>
Semaforo 1(false):0    <108 108 108 108>
Semaforo 2(false):8    <110 110 110 110>
Semaforo 3(false):3    <109 109 109 109>
Semaforo 4(false):1    <101 101 101 101>
Semaforo 5(false):2    <107 107 107 107>
Semaforo 6(false):5    <109 109 109 109>
Semaforo 7(false):4    <107 107 107 107>
Semaforo 8(false):7    <102 102 102 102>
Semaforo 9(false):0    <100 100 100 100>
```

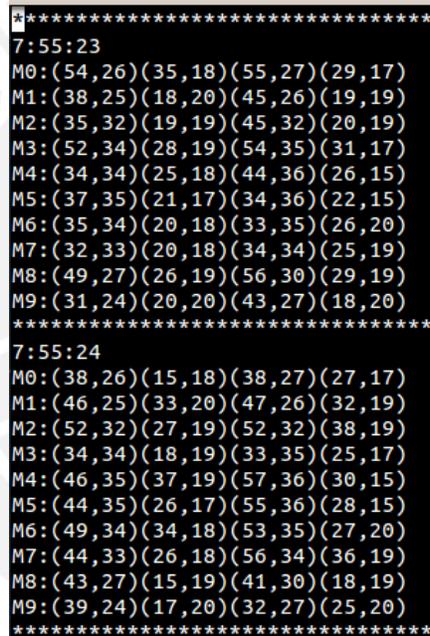
Se aprecia en la imagen la lista actualizada por segundo de los semáforos presentes en el corredor vial. Se detalla la fase (false = rojo / true = verde) en la que se encuentra el sentido del corredor vial y el flujo de autos actualizado en cada una de las vías que confluyen (el cuarteto indica el flujo proveniente en los sentidos oeste-este, norte-sur, este-oeste y sur-norte, respectivamente).

9.2 Ejecutable Simulador de tráfico

Este programa genera el archivo de simulación de tráfico y los utiliza para actualizar los flujos en la red semafórica. Estos flujos serán posteriormente empleados por el algoritmo genético para optimizar los ciclos semafóricos.

```
>javac SimuladorTrafico.java
```

```
>java SimuladorTrafico
```



```
*****  
7:55:23  
M0: (54,26)(35,18)(55,27)(29,17)  
M1: (38,25)(18,20)(45,26)(19,19)  
M2: (35,32)(19,19)(45,32)(20,19)  
M3: (52,34)(28,19)(54,35)(31,17)  
M4: (34,34)(25,18)(44,36)(26,15)  
M5: (37,35)(21,17)(34,36)(22,15)  
M6: (35,34)(20,18)(33,35)(26,20)  
M7: (32,33)(20,18)(34,34)(25,19)  
M8: (49,27)(26,19)(56,30)(29,19)  
M9: (31,24)(20,20)(43,27)(18,20)  
*****  
7:55:24  
M0: (38,26)(15,18)(38,27)(27,17)  
M1: (46,25)(33,20)(47,26)(32,19)  
M2: (52,32)(27,19)(52,32)(38,19)  
M3: (34,34)(18,19)(33,35)(25,17)  
M4: (46,35)(37,19)(57,36)(30,15)  
M5: (44,35)(26,17)(55,36)(28,15)  
M6: (49,34)(34,18)(53,35)(27,20)  
M7: (44,33)(26,18)(56,34)(36,19)  
M8: (43,27)(15,19)(41,30)(18,19)  
M9: (39,24)(17,20)(32,27)(25,20)  
*****
```

Se aprecia en la imagen la generación del archivo “2015.11.23.7.55.23”, perteneciente a una simulación de tráfico del 2015/11/23 a las 07:55:23 horas.

```
javier@jvrdns:~/Dropbox/PUCP2015-2/Tesis2/Sem 12-Experimentacion/ToDoTesis2$ java SimuladorTráfico
Nombre de archivo = 2015.11.23.7.55.23
7:55:23
1: M0
2: 32
4: 24
6: 34
8: 17

1: M1
2: 38
4: 24
6: 44
8: 18
```

Inmediatamente después de la generación del archivo, se inicia la carga de los datos del archivo (mediante RMI) al flujo de tráfico que es mantenido por el programa RedSemaforica.

9.3 Ejecutable del Algoritmo Genético

Este programa consulta del programa RedSemaforica la cantidad de flujo vehicular recibido en cada una de sus intersecciones e inicia el ciclo evolutivo hasta hallar una configuración de ciclos semafóricos que optimice el Índice de Rendimiento vehicular en el corredor vial. Para su invocación también puede realizarse con parámetros donde el primero de ellos es la tasa de mutación y el segundo es el archivo de simulación con la carga vehicular que recibirán cada una de las intersecciones. Este último método es ventajoso para realizar múltiples ejecuciones y realizar la calibración de la tasa de mutación como también la experimentación numérica del IR alcanzado con un flujo de autos simulado determinado.

```
>javac AlgoritmoGenetico.java
```

```
>java AlgoritmoGenetico
```

```
>java AlgoritmoGenetico 5 2015.11.23.7.55.23
```

```
javier@jvrdns:~/Dropbox/PUCP2015-2/Tesis2/Sem 12-Experimentacion/ToDoTesis2$ java AlgoritmoGenetico 5 2015.11.22.7.55.23
%mut: 0.05 TamPob: 50 IR: 193791.0255460271 Exitosas/Totales : 202/237(85.0)
```

Se aprecia en la imagen el resultado del algoritmo genético cuando recibe un archivo de flujo de tráfico simulado. El resultado de su ejecución muestra el Índice de Rendimiento alcanzado con la nueva configuración propuesta. Mediante invocación remota de métodos actualiza los planes de tráfico mantenidos por el programa RedSemaforica.

9.4 Ejecutable de plan de tráfico fijo

Este programa utiliza los planes de tráfico fijo y un archivo de simulación como dato de entrada para calcular el IR alcanzado con dicha configuración de tiempos de fase de los semáforos en las intersecciones del corredor vial. Aunque este programa no es parte del alcance del proyecto, resultó útil para la experimentación numérica obteniendo el IR alcanzado con el uso de planes de tráfico estáticos.

```
>javac Fijo.java
```

```
>java Fijo 2015.11.23.7.55.23
```

```
javier@jvrdns:~/Dropbox/PUCP2015-2/Tesis2/Sem 12-Experimentacion/ToDoTesis2$ java Fijo 2015.11.22.7.55.23  
INDIVIDUO / IR: 301965.0065609501
```

CAPÍTULO 10: CONCLUSIONES

Tras el logro de los objetivos planteados al inicio del proyecto se concluye lo siguiente:

Sobre el diseño del algoritmo genético:

Tal como lo indica Rodrigo Fernández en su libro ‘Elementos de la Teoría del Tráfico Vehicular’, la elección del Índice de Rendimiento (IR) resulta útil para replicar o simular lo que ocurre en una red de tráfico urbano. Esta forma de modelación fue desarrollada para coordinar la programación de semáforos en redes, y en la falta de soluciones analíticas eficientes, el uso de procedimientos heurísticos para minimizar el uso de recursos de la red vial resulta una buena alternativa (Fernández A., 2011b).

Si bien el Índice de Rendimiento permite modelar tres variables de tráfico (demora de usuarios, detenciones de vehículos y demora de vehículos), el enfoque que se le ha dado sobre esta última, nos permite concluir que el objetivo del algoritmo propuesto contribuye a minimizar el tiempo de demora total de los vehículos que transitan por un corredor vial.

Con esta consideración, minimizar el IR, sujeto a las restricciones de operación de los semáforos, resulta una apropiada elección como función fitness para el desarrollo de algoritmo genético.

Sobre la experimentación numérica:

Con la finalidad de obtener resultados más cercanos al óptimo del algoritmo genético y previo a la ejecución del mismo, se realizó la calibración del operador de mutación, en la cual se encontró que la tasa de mutación que permitía explorar un mayor rango de soluciones para el problema era del cinco por ciento.

De este modo, las distintas generaciones del algoritmo no se concentrarían en un mínimo local, sino que exploraría alternativas de solución en un espectro de búsqueda mucho más amplio. Así, como resultado de la exploración (en 5000 poblaciones por ejecución), se obtuvo que el Índice de Rendimiento (IR) puede ser ampliamente mejorado con el uso del algoritmo genético, llegando en algunos casos a mejorarse hasta en un veintisiete por ciento sobre el IR alcanzado con planes de tráfico estáticos.

Esto último confirma que el Índice de Rendimiento en el corredor vial es menor empleando el algoritmo genético propuesto que el logrado usando planes estáticos de tráfico. Dicho esto, se concluye que el uso de esta propuesta heurística, en el contexto de un corredor vial, resulta una alternativa auspiciosa para minimizar el tiempo de demora de los vehículos en la red vial.

Sobre el desarrollo del proyecto:

A pesar de la existencia de variables sociales que influyen directamente sobre el problema del tráfico en la capital, la utilización de soluciones heurísticas para el optimizar el flujo vehicular en redes viales resulta un paliativo importante ante la problemática presente.

Como bien expone Lino, el uso de la herramienta Synchro 7 para la generación de planes de tráfico estáticos no resulta el método más apropiado para administrar los flujos vehiculares en el contexto limeño (Lino, 2012). Como se ha revisado en el presente proyecto, con el uso del algoritmo genético se logran mejores planes de tráfico que se adaptan al flujo vehicular presentes en el corredor vial.

Esta adaptabilidad de ciclos semafóricos al flujo vehicular presente resulta relevante en situaciones extraordinarias que no se ajustan a un patrón de tráfico conocido, pues el algoritmo está en las condiciones de apremiar el flujo en la vía donde exista mayor

saturación vehicular, restableciendo su ajuste a medida que el volumen se vaya normalizando.

Además, esta adaptabilidad tiene otro beneficio. En contraposición a los planes estáticos de tráfico que quedan obsoletos cada tres meses debido al constante crecimiento del flujo vehicular en las vías, el empleo de este modelo heurístico permitiría adaptarse a estas variaciones temporales, economizando así los procedimientos de actualización de planes estáticos realizados cada trimestre.

10.1 Recomendaciones y trabajos a futuro

En este proyecto la utilización de la algoritmia evolutiva ha permitido encontrar una buena solución para la optimización del tráfico urbano reduciendo el tiempo de demora de los vehículos perdido en detenciones. Sin embargo, en el corredor vial se ha utilizado una ponderación común para todas las secciones de vía que son evaluadas en el algoritmo genético. Si desea utilizarse el algoritmo genético propuesto, en la función de fitness para el Índice de Rendimiento se recomienda utilizar diferentes ponderaciones según la relevancia y/o características de cada sección de las vías. Esto permitiría un cálculo más exacto del índice de rendimiento urbano que se logra con la adaptación de ciclos de semáforo.

Para la realización de un trabajo a futuro utilizando algoritmos heurísticos para la optimización del tráfico se recomienda tener en cuenta lo sugerido por los autores Zilu y Wakahara. En su artículo proponen que la predicción del flujo de tráfico basado en la medición del flujo en tiempo real contribuirían a que los algoritmos de optimización suministren soluciones aún mejores, pudiendo anticiparse al tráfico que se avecina, incrementado así su efectividad (Zilu & Wakahara, 2013). Para trabajos futuros puede utilizarse cualquiera de los modelos propuestos para la predicción y posterior optimización del tráfico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Branke, J., Goldate, P., & Prothmann, H. (2010). Actuated traffic signal optimization using evolutionary algorithms, 8. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/similar;jsessionid=9F7AF0E48FA679C7862880AADD0BA9E?doi=10.1.1.128.8683&type=ab>
- Consejo Nacional de Seguridad Vial. (2015). *Plan Nacional de Seguridad Vial 2015-2024*. Lima.
- De Antonio Suárez, O. (2011). Una aproximación a la heurística y metaheurísticas. *Universidad Antonio Nariño*, 8.
- Derteano, E., & Garrido, J. J. (2014). Ventas sector automotor del 2013. (P. 21, Ed.). Lima, Perú: Perú 21. Retrieved from <http://peru21.pe/economia/se-venderan-210-mil-vehiculos-nuevos-2164276>
- Económica, S. (2015). Mercado automotor: ¿Se recuperarán las ventas en el 2015? Retrieved from <http://semanaeconomica.com/article/servicios/comercio/152362-mercado-automotriz-se-recuperaran-las-ventas-en-el-2015/>
- Fernández A., R. (2011a). *Elementos de la teoría de tráfico vehicular* (Fondo Edit).
- Fernández A., R. (2011b). *Elementos de la teoría del tráfico vehicular*. (J. C. Dextre, Ed.) (PUCP). Lima: Fondo Editorial PUCP.
- IBM. (2015). SPSS Software. Retrieved from <http://www-01.ibm.com/software/analytics/spss/>
- INEI, I. N. de E. e I. (2012). Estadística Sectorial Transportes y Comunicaciones: Parque Automotor Nacional. Lima, Perú. Retrieved from <http://www.inei.gob.pe/estadisticas/indice-tematico/economia/>
-

- Kalzanova, T., Russel, G., & Cumming, A. (1999). *Multiple Traffic Signal Control Using a Genetic Algorithm*. Edinburgh.
- Lino, F. J. V. (2012). *Aplicabilidad de las metodologías del HCM 2000 y Synchro 7.0 para analizar intersecciones semaforizadas en Lima*. Facultad de Ciencias e Ingeniería. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Martin, D. P. (2008). *Adaptative Signal Control V*. Utah.
- McMillan, R. (2013). The GitHub Way. Retrieved from <http://www.wired.co.uk/news/archive/2013-09/02/github-mainstream>
- Melián, B., & Pérez, J. A. (2003). Metaheurísticas: una visión global. *Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, 19. Retrieved from www.aepia.org
- Ministerio de Transportes, C. y V. del P. (2010). Manual de Dispositivos De Control del Tránsito Automotor para Calles y Carreteras. Lima: Diario Oficial El Peruano. Retrieved from [http://www.mtc.gob.pe/cnsv/area_legal/Normas Tecnicas/Manual_de_Dispositivos_de_Control_de_Transito_Automotor_para_Calles_y_Carreteras.pdf](http://www.mtc.gob.pe/cnsv/area_legal/Normas_Tecnicas/Manual_de_Dispositivos_de_Control_de_Transito_Automotor_para_Calles_y_Carreteras.pdf)
- Netbeans. (2015). Top Reasons to Switch to the NetBeans IDE. Retrieved from <https://netbeans.org/switch/why.html>
- Office, M. (2015). Word when and where you need it. Retrieved from <https://products.office.com/en-us/word>
- Perú, I. de O. P. de la P. U. C. del. (2014). *Informe de Percepción sobre la calidad de vida* (Primera Ed). Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú. Retrieved from <http://www.limacomovamos.org/cm/wp-content/uploads/2012/01/EncuestaLimaComoVamos-2011.pdf>

Process, R. U. (1998). Best Practice for Software Development Teams. Retrieved from http://www.ibm.com/developerworks/rational/library/content/03July/1000/1251/1251_bestpractices_TP026B.pdf

ProExpansión. (2010). Antídotos contra la congestión y la Inseguridad en el tránsito 2. (ProExpansión, Ed.). Lima, Perú.

Rational Software Corporation. (1998). Rational Introduces the Rational Unified Process, 1. Retrieved from <http://search.proquest.com/printviewfile?accountid=28391>

SCATS. (2014). SCATS Backwards compatibility. Retrieved March 1, 2014, from <http://www.scats.com.au/why-choose-scats-features.html>

VIM. (2015). Vim The Editor. Retrieved from <http://vim.wikia.com/wiki/Special:WikiActivity>

Zilu, L., & Wakahara, Y. (2013). City traffic prediction based on real-time traffic information for Intelligent Transport Systems. In *ITS Telecommunications (ITST), 2013 13th International Conference on* (pp. 378–383). doi:10.1109/ITST.2013.6685576