

**METODOLOGÍA PARA LA ÓPTIMA COORDINACIÓN DE CORREDORES
VIALES SEMAFORIZADOS UTILIZANDO SOFTWARE ESPECIALIZADO**
Implementado en el Corredor Vial Avenida Sexta Norte de la Ciudad de Santiago de Cali

**ALEXANDER CHAVEZ TABARES
JACKELINE MURILLO HOYOS
CARMEN DELIA VEGA OROZCO**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
SANTIAGO DE CALI
2002**

**METODOLOGÍA PARA LA ÓPTIMA COORDINACIÓN DE CORREDORES
VIALES SEMAFORIZADOS UTILIZANDO SOFTWARE ESPECIALIZADO**
Implementado en el Corredor Vial Avenida Sexta Norte de la Ciudad de Santiago de Cali

**ALEXANDER CHAVEZ TABARES
JACKELINE MURILLO HOYOS
CARMEN DELIA VEGA OROZCO**

**Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Topográfico**

**Director
JAMES CÁRDENAS GRISALES**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA
SANTIAGO DE CALI
2002**

CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN	1
1. OBJETIVOS	4
1.1 Objetivo General	4
1.2 Objetivos Específicos	4
2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	6
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
4. MARCO TEÓRICO	12
4.1 LA INGENIERÍA DE TRÁNSITO	12
4.1.1 Conceptos Generales	13
4.1.2 Ajuste del Volumen de Tránsito	17
4.2 METODOLOGÍA HCM (Highway Capacity Manual)	18
4.2.1 Generalidades	18
4.2.2 Capacidad y Nivel de Servicio	19
4.2.2.1 Capacidad y Nivel de Servicio en Intersecciones Semaforizadas	22

4.2.2.2	Capacidad y Nivel de Servicio en Arterias Semaforizadas	26
4.2.3	Metodología de Análisis Operacional	29
4.3	SEMÁFORO	38
4.3.1	Control de Tránsito en Vías Urbanas	38
4.3.1.1	Sistemas de Control de Semáforos	39
4.3.1.2	Tipos de Sistemas de Control de Semáforos	40
4.3.1.3	Ventajas de un Sistema de Semáforos	41
4.3.2	Sistemas Coordinados de Semáforos	42
4.3.3	Planes de Tiempos	44
4.3.4	Progresión de Semáforos en Calles de un solo Sentido	47
4.3.5	Datos para la Restricción del Ancho de Banda	49
4.3.6	Concepto de Maximización del Ancho de Banda y de la Eficiencia de la Progresión	49
4.3.7	Coordinación de Sistemas de Semáforos en Tiempo Fijo	52
4.4	PASSER IV – 96	54
5.	METODOLOGÍA GENERAL	
5.1	ESTUDIO DEL SOFTWARE ESPECIALIZADO	57
5.2	CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	57
5.3	ESTUDIO DE TRÁNSITO	59
5.3.1	Aforo de Volúmenes	60
5.3.2	Aforo de Velocidades	62
5.4	ANÁLISIS DE CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO DE LA SITUACIÓN ACTUAL (Metodología HCM - Highway Capacity Manual)	65
5.5	OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA RED SEMAFÓRICA (Metodología PASSER IV – 96)	66
5.6	ANÁLISIS DE RESULTADOS	68
5.7	DEFINICIÓN DE PLANES DE TIEMPOS PARA EL PERÍODO DE DISEÑO	69
6.	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ÓPTIMA COORDINACIÓN DE CORREDORES VIALES SEMAFORIZADOS	71
6.1	ESTUDIO DEL SOFTWARE ESPECIALIZADO	71

6.2	CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	72
6.2.1	Ubicación del Corredor	72
6.2.2	Descripción Geométrica y Señalización	76
6.2.3	Semaforización	77
6.2.4	Usos del Suelo	78
6.2.5	Problemas Ambientales	79
6.3	ESTUDIO DE TRÁNSITO	81
6.3.1	Aforo de Volúmenes	81
6.3.2	Aforo de Velocidades	84
6.4	ANÁLISIS DE CAPACIDAD Y NIVELES DE SERVICIO DE LA SITUACIÓN ACTUAL (Metodología HCM - Highway Capacity Manual)	87
6.5	OPTIMIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE LA RED SEMAFÓRICA (Metodología PASSER IV – 96)	90
6.6	ANÁLISIS DE RESULTADOS	99
6.7	DEFINICIÓN DE PLANES DE TIEMPOS PARA EL PERÍODO DE DISEÑO	111
7.	CONCLUSIONES	128
	BIBLIOGRAFÍA	132

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Rangos de Niveles de Servicio.	25
Tabla 2. Formato de Campo. Aforo de Volúmenes Vehiculares en Intersecciones Semaforzadas.	63
Tabla 3. Formato de Campo. Aforo de Velocidades de Recorrido en un Corredor Vial Semaforzado.	64
Tabla 4. Descripción General de Geometría y Señalización del Corredor Vial Avenida Sexta Norte.	76
Tabla 5. Tiempo de Verde por Intersección para cada Plan.	77
Tabla 6. Programas de Semáforos Actuales.	78
Tabla 7. Volumen Horario por Intervalos. Intersección Av. 6N – Calle 23N.	82
Tabla 8. Volumen Horas Pico A.M. Corredor Vial Avenida Sexta Norte.	83

Tabla 9. Volumen Horario Total (veh/hr) en cada Intersección del Corredor Vial de la Avenida Sexta Norte.	85
Tabla 10. Velocidades de Recorrido. Corredor Vial de la Avenida Sexta Norte.	86
Tabla 11. Resumen Resultados HCS. Corredor Vial de la Avenida Sexta Norte.	88
Tabla 12. Flujo de Saturación Ajustado por Movimiento.	91
Tabla 13. Resultados PASSER IV – 96, Velocidad = 30km/hr.	94
Tabla 14. Desfases calculados por PASSER IV – 96, Velocidad = 30km/hr.	97
Tabla 15. Resultados PASSER IV – 96, Velocidades 30-40-60-80 km/hr, (07:15 - 19:15).	100
Tabla 16. Demora PASSER IV – 96 en seg/veh por Intersección.	102
Tabla 17. Comparación PASSER IV – 96 y HCS.	106
Tabla 18. Porcentaje de Eficiencia, Coordinación PASSER IV – 96. Corredor Vial Av. 6N.	108
Tabla 19. Vehículos Satisfechos (veh/hr) en cada Intersección del Corredor Vial Avenida Sexta Norte.	110
Tabla 20. Tiempo de Verde por Intersección en cada Plan.	111

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Esquema de la Metodología General.	56
Figura 2. Esquema General de Localización Avenida Sexta Norte.	74
Figura 3. Esquema General Corredor Vial Avenida Sexta Norte.	75
Figura 4. Esquema de Niveles de Servicio, Corredor Vial Avenida Sexta Norte (07:15 – 08:15).	87
Figura 5. Diagrama Espacio - Tiempo, Corredor Vial Avenida Sexta Norte (07:15 – 08:15).	98
Fotografía 1. Avenida Sexta Norte – Calle 26N.	79
Fotografía 2. Avenida Sexta Norte – Calle 23N.	80

LISTA DE GRÁFICAS

	Página
Gráfica 1. Volumen Horario Intersección Av. 6N – CII 23N.	81
Gráfica 2. Volumen Horas Pico A.M. Corredor Vial Avenida Sexta Norte.	83
Gráfica 3. Volumen Horario Total (veh/hr) en cada Intersección del Corredor Vial de la Avenida Sexta Norte.	85
Gráfica 4. Eficiencia Corredor Vial Avenida Sexta Norte.	108

ANEXOS

Anexo A. Manual de Usuario PASSER IV – 96.

Anexo B. Cartografía del Corredor Vial de la Avenida Sexta.

Anexo C. Esquemas Detallados por Intersección.

Anexo D. Semaforización Actual.

Anexo E. Volúmenes Vehiculares Aforados.

Anexo F. Volúmenes Vehiculares Ajustados.

Anexo G. Resultados Parciales HCS.

Anexo H. Ajuste Tasa de Flujo de Saturación por Movimiento.

Anexo I. Resultados PASSER IV – 96.

Anexo J. Comparación de demoras de PASSER IV – 96 con respecto a HCS.

INTRODUCCIÓN

Las exigencias del mundo actual y el acelerado desarrollo de la ciencia y la tecnología, obligan a las ciudades a reestructurar constantemente las metodologías de operación de los sistemas viales, adaptándolos a las condiciones del medio, siendo éste un campo de interés que ha presentado un gran desarrollo con la ayuda de las computadoras y su aplicación en la ingeniería.

Un elemento fundamental para la movilización en las grandes ciudades es la calle, los sistemas de calles ofrecen servicios de transporte, como factor prioritario para la comunicación dentro de las mismas. Lo anterior genera una gran dependencia del desarrollo de las ciudades a la capacidad de operación de los sistemas viales para satisfacer los incrementos de demanda de los usuarios por los servicios ofrecidos por dichas redes; con lo que una deficiencia en la operación de estos sistemas viales origina problemas de tránsito, que hacen necesario desarrollar modelos matemáticos sofisticados capaces de generar soluciones viales adecuadas a las características del flujo del tránsito, para comodidad de los usuarios, reducción en el número de accidentes, prevención del congestionamiento de vías y obtención de un tránsito eficiente y seguro.

La coordinación de los semáforos es una de las soluciones viales de más bajo costo, al aprovechar al máximo las condiciones existentes, siendo efectiva para el control del tránsito y su optimización en el funcionamiento de las redes urbanas, al disminuir el

número de paradas, permitir al conductor transitar a una velocidad constante, ofrecer a los usuarios mayor seguridad y comodidad al conducir y minimizar el tiempo de viaje y consumo de combustible.

Por lo anterior y con el propósito de satisfacer la necesidad de mejorar el funcionamiento de las redes urbanas; mediante el presente proyecto se ha seleccionado el Corredor Vial de la Avenida Sexta Norte de la ciudad de Santiago de Cali a efectos de lograr una adecuada y óptima coordinación de todos los semáforos del corredor, con apoyo en programas computacionales, en este caso la implementación del software especializado PASSER IV – 96.

Este corredor se encuentra ubicado en el noroccidente de la ciudad y constituye una de las principales arterias que conecta el centro con el norte y caracterizada por presentar en todo su recorrido espacios de diversión y comercio. El corredor elegido funciona coordinado por la red que maneja el Centro de Control de la Secretaría de Tránsito y Transporte Municipal, esto facilita que los resultados obtenidos pueden ser incorporados al computador controlador central, permitiendo observar el buen funcionamiento de la coordinación de semáforos al utilizar un programa de cómputo como metodología para la Optimización del Corredor Vial Semaforizado.

Este proyecto se ha realizado en tres etapas, las cuales fueron desarrolladas de acuerdo al cronograma de actividades planeado. La primera etapa fue de recolección de datos, para la cual se determinó el tipo, nivel de detalle, cantidad y tiempo de recolección requeridos para el desarrollo del proyecto. En esta etapa se utilizó información primaria y secundaria. La información primaria consistió en aforos y tomas de datos en campo, los cuales permitieron realizar el diagnóstico de la situación actual del Corredor Vial de la Avenida Sexta Norte. La información secundaria como la cartografía e información histórica, de la cual fue necesario corroborar su veracidad realizando visitas directamente en la zona de estudio. Paralelo a esta actividad, se adelantó el aprendizaje del software PASSER IV – 96 para lograr una correcta adaptación e implementación de esta herramienta en dicho corredor.

La segunda etapa consistió en el procesamiento de los datos obtenidos en la primera etapa. Durante ésta se implementaron los dos software requeridos en el proyecto, el software HCS (Highway Capacity Software), con el cual se evaluó la situación actual del corredor vial de la Avenida Sexta Norte. Seguidamente se implementó el PASSER IV – 96, software usado para proponer planes de tiempos de semáforo adecuados para optimizar la fluidez sobre la arteria semaforizada en estudio. Además, se calculó y ajustó los desfases entre intersecciones y los tiempos de luces verdes para mejorar las oportunidades de progresión; logrando así, la coordinación óptima para reducir paradas y/o demoras y disminuir el consumo de combustible.

La tercera y última etapa, fue el análisis de los resultados y propuesta de soluciones acorde a los objetivos del proyecto, en el cual se modeló el comportamiento de la arteria variando la velocidad de recorrido, para establecer comparaciones operacionales de las diferentes alternativas con el fin de tomar la decisión más precisa e implementar el mejor diseño para la óptima coordinación del corredor vial en estudio.

El proyecto pretende implementar una nueva metodología de trabajo que facilite a las entidades encargadas del control de los semáforos y el tránsito la actualización de los planes de semáforo que funcionan en un corredor vial para optimizar el funcionamiento del mismo y satisfacer la demanda de usuarios que al incrementar anualmente requieren un mejor nivel de servicio vial.

OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología de aplicación de un modelo para Optimizar la Coordinación Semaforizada del Corredor Vial de la Avenida Sexta Norte utilizando el diagrama espacio-tiempo generado a partir del programa de computo PASSER IV – 96 (Progression Analysis and Signal System Evaluation Routine: Rutinas de Evaluación para el Análisis de Progresión y Sistemas de Semáforos).

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las condiciones de aplicación del programa PASSER IV-96 en la red vial de Santiago de Cali, el cual tras implementarlo en el corredor vial de la Avenida Sexta Norte permitirá una posterior aplicación a otros corredores viales en la ciudad.
- Elaborar una base de datos de volúmenes de tránsito considerando una estación maestra durante todo el período de diseño.

- Traducir el Manual de Usuario PASSER IV – 96 como suministro de referencia bibliográfica.
- Determinar la sensibilidad de los resultados de PASSER IV – 96 frente a la variación de la velocidad de recorrido en el corredor vial de la Avenida Sexta Norte.
- Comparar la estimación de las demoras calculadas por los métodos HCS y PASSER IV – 96.
- Diseñar la mejor programación operacional del tránsito en el corredor vial de la Avenida Sexta Norte en un período determinado estableciendo la coordinación de la red semafórica lográndose un mejor funcionamiento al enfatizar en velocidades más uniformes, menor número de paradas, menores demoras en el sistema, reducción de consumo de combustible y de emisiones contaminantes.

ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Como respuesta al desarrollo de las grandes ciudades surgen altos volúmenes de tránsito que deterioran la calidad del servicio, aumentan el congestionamiento y el número de accidentes, entre otros. Para enfrentar estos problemas se ha alcanzado un notable desarrollo en cuanto a tecnología que permite generar diversas alternativas de solución apoyadas en conocimientos matemáticos y científicos. En este aspecto se destaca el avance alcanzado por países como Estados Unidos, Canadá, Alemania, Inglaterra, Francia y España, quienes han desarrollado tecnología que es adoptada por muchos países, entre ellos Colombia, con lo que hoy día se exige que el manejo y control de la circulación vial se efectúe a través de los sistemas más avanzados de control, por medio de computadoras que permiten la automatización y optimización de los sistemas de tránsito.

En Colombia las Secretarías de Tránsito y Transporte Municipal, entidades encargadas del manejo del sistema vial urbano, realizan la evaluación y planeación de los sistemas viales. Particularmente en Santiago de Cali se emplea la tecnología alemana –SIEMENS– que funciona desde 1987 y opera de forma semiautomática, siendo un sistema bondadoso que permite diversas aplicaciones. Esta tecnología posibilita ingresar planes de tiempos a los semáforos, los cuales serían más efectivos si se contara con el software apropiado que procese los datos de tránsito y genere planes de tiempos coordinados.

En nuestro contexto la sincronización de los corredores viales se realiza de forma manual reduciendo los beneficios de los sistemas viales a través del tiempo a medida que aumenta la demanda del tránsito dentro de la ciudad, puesto que el procesamiento y actualización de la información requiere tiempo y personal capacitado para la generación de soluciones a los conflictos que se generan con el crecimiento del tránsito.

Generalmente es difícil contar con grandes inversiones en recursos económicos y humanos necesarios para llevar a cabo proyectos, afectando directamente a los usuarios del sistema y por tanto al desarrollo de la zona de influencia de un corredor vial al no poder satisfacer las necesidades de comunicación de las personas.

Estos problemas se ven reflejados en las calles de la ciudad donde actualmente la sincronización de los semáforos no es óptima o no satisface la necesidad de los usuarios de tener un sistema vial más eficiente, que permita desplazarse a mayor velocidad, sin demasiadas demoras por paradas y por espera de paso en las intersecciones semaforizadas.

A través de los años los automóviles e incluso los vehículos pesados, han ejercido, con mayor fuerza cada día, influencia en el estilo de vida de una ciudad, llegando hasta el punto en el cual se requiere de éstos como una necesidad para el desarrollo de las regiones, interviniendo en la economía de todo un país y convirtiéndose en un factor muy influyente en la Planeación Territorial. A medida que esto sucede en el mundo contemporáneo, ha sido necesario que los diseñadores de carreteras solucionen problemas inherentes al aumento de la cantidad y velocidad de los vehículos, lo cual cambió los criterios de diseño vial urbano, teniendo en cuenta los vehículos de gran tamaño, como los buses, siendo actualmente en Colombia, el principal medio de transporte masivo.

El sistema de transporte afecta la dinámica del sistema socioeconómico, y éste a su vez, genera cambios en el comportamiento del sistema de transporte a través del tiempo. El sistema de transporte es una interacción entre los usuarios y sus necesidades de desplazarse de un lugar a otro; esta interacción hace que dicho sistema atienda la demanda de servicio. Se debe mantener equilibrio entre demanda y oferta, y si alguno de estos dos componentes falla o se satura, el sistema se desequilibra y funciona mal,

afectando negativamente a todos los sistemas que dependen de él, como los sistemas social, económico y político. Por ello es necesario mantener el sistema de transporte controlado, a cargo de entidades que revisen constantemente la funcionalidad de los dispositivos de control de tránsito utilizados y para ello deben apoyarse en las diferentes herramientas actualmente existentes o las nuevas que se generan, como los software y equipos especializados, para solucionar, monitorear y controlar los diferentes problemas de tránsito presentes.

Una de las soluciones actuales comúnmente implementadas son los sistemas de semáforos en las calles, debido a su bajo costo, y al máximo aprovechamiento de las condiciones existentes, permitiendo la buena regulación funcional del tránsito, a través de la disciplina y educación por parte del usuario. Los sistemas de semáforos deben estar administrados por una entidad encargada de su control – en Colombia las Secretarías de Tránsito y Transporte Municipal –, ya que estos requieren un continuo mantenimiento y evaluación operacional para desarrollar características de control del tránsito acorde a las condiciones prevalecientes. La funcionalidad de los sistemas de semáforos coordinados debe permitir a los usuarios de las vías circular con pocas demoras por paradas al encontrar el semáforo en luz verde y conducir a una velocidad constante de tal forma que el vehículo no sufra aceleraciones fuertes por alcanzar el semáforo en verde o paradas repentinas por no alcanzarlo.

La implementación de la Metodología para la Optimización de Corredores Viales Semaforizados, con la aplicación del programa PASSER IV – 96, permite la coordinación de los semáforos de un corredor vial contribuyendo al mejoramiento de los niveles de servicio ofrecidos a los usuarios del sistema, la calidad del medio ambiente de la zona con la disminución de la contaminación atmosférica y niveles de ruido ocasionados por los vehículos en los momentos de parada y arranque y de la calidad de vida de usuarios y peatones.

Por lo anterior y con base en los antecedentes del manejo del tránsito en la ciudad de Santiago de Cali, se justifica la realización del presente proyecto puesto que introduce la implementación de programas de cómputo para el análisis y control vial contribuyendo al mejoramiento de los niveles de servicio ofrecidos por los sistemas viales locales y disminución del impacto social en la ciudad.

Se fundamenta la implementación de esta metodología en el empleo de una herramienta ágil, adecuada y de fácil utilización para los organismos técnicos del estado encargados de la supervisión del funcionamiento y planeación del tránsito en ciudades colombianas. Dicha implementación requiere del computador controlador central para programar los tiempos en los semáforos, además de la recolección de datos en campo, la cual debido a los recursos existentes debe hacerse de forma manual; con los datos recolectados se retroalimenta el modelo para generar los nuevos tiempos de semáforos acorde a las condiciones cambiantes en el sistema vial. También es necesario verificar el buen funcionamiento del sistema semaforizado realizando inspecciones periódicas del mismo.

Desde el punto de vista económico se requiere personal capacitado para las funciones de recolección de datos, implementación de los planes de tiempos y monitoreo del sistema para su constante retroalimentación. La factibilidad del proyecto como propuesta técnica depende de las autoridades competentes en función de su disponibilidad de los recursos necesarios en cuanto a equipos y personal.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El flujo vehicular es una característica esencial dentro del sistema vial de la ciudad, y es éste quien regula las condiciones prevalecientes dentro del mismo. Una característica propia del flujo es el grado de saturación que se presenta bajo determinadas condiciones y que puede contribuir a niveles de servicio deficientes debido al incremento de las demoras inducidas a los usuarios.

El deficiente control vial determinado por las escasas tecnologías empleadas para éste y para la generación de diversas alternativas de solución o propuestas de manejo; definiendo estas situaciones la necesidad de encontrar y utilizar mecanismos metodológicos que permitan una proyección futurista aprovechando los beneficios que pueden ofrecer hoy día los programas de cómputo utilizados como alternativas para el manejo y control del tráfico.

Actualmente la ciudad de Santiago de Cali presenta deficiencias de manejo y control de su red vial debido a la falta de un software especializado que permita de manera rápida, precisa y de bajo costo atender los problemas de tránsito que se presentan a medida que aumenta la demanda del uso de su sistema vial.

El sistema actual se está saturando, esto quiere decir que está desfasado no solo con respecto al crecimiento de los flujos vehiculares que entran y salen del sistema vial, sino también en relación con la tecnología que hoy día existe en el área del tránsito y el transporte.

Por lo anterior, se evidencia la falta de una metodología sistematizada que optimice el manejo y actualización de la información y posibilite la generación de alternativas de solución en un menor tiempo y apropiadas para las condiciones del tránsito presentes y futuras capaces de efectuar los cambios tecnológicos requeridos a través del tiempo.