

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

Escuela de Posgrado



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**SISTEMA AUTÓNOMO DE CONTROL DE TRÁFICO
VEHICULAR PARA INTERSECCIONES DE AVENIDAS**

Tesis para optar al grado de Magister en Ingeniería Mecatrónica

Presentado por:

DIEGO MARTIN ARCE CIGÜEÑAS

Asesorado por:

MSc. ERICKA PATRICIA MADRID RUIZ

Diciembre 2017

Lima - Perú



© 2017, Diego Martín Arce Cigüeñas

Se autoriza la reproducción total o parcial,
Con fines académicos a través de cualquier
Medio o procedimiento, incluyendo la cita
Bibliográfica del documento.

RESUMEN

Este trabajo plantea el desarrollo de un sistema autónomo de control de tránsito aplicable en intersecciones de avenidas. El sistema cuenta con un nivel de autonomía para determinar los tiempos de operación óptimos en cada intersección mediante la recopilación de información del tránsito en tiempo real. Además, otra de las características de este sistema es la capacidad de transmitir la información de forma inalámbrica hacia los sistemas aledaños y hacia una interfaz de monitoreo, a través de la cual es posible visualizar los estados de funcionamiento de cada sistema. La transmisión de datos es realizada a través de una base de datos compartida, a la cual acceden cada uno de los sistemas y también es posible acceder mediante un software desarrollado para cumplir la función de una interfaz de monitoreo.

El documento inicia una recopilación de información referente a la temática del sistema propuesto, presentando el estado del arte y el marco teórico. Luego, se realiza un estudio del tránsito vehicular, para lo cual se diseña y aplica una metodología que permite identificar los principales parámetros involucrados en el tránsito vehicular de la ciudad de Lima Metropolitana. Con toda esta información se procede a realizar el diseño del controlador, del algoritmo de control y de una interfaz de monitoreo considerando todas las características propuestas. Finalmente se presenta la integración del sistema propuesto considerando todos los componentes previamente diseñados.

Este trabajo sienta las bases para el desarrollo de trabajos futuros relacionados a la mejora del tránsito vehicular, dado que al contar con un sistema capaz de comunicar su información a sistemas aledaños es posible desarrollar nuevos algoritmos de control dando un enfoque cooperativo. De esta manera, este trabajo puede ser complementado por especialistas en temas de ingeniería de tránsito e ingeniería de sistemas con la finalidad de empoderar su funcionamiento.

MCMXVII



*Dedico este trabajo a mi esposa,
Jossibell, por su constante apoyo y
aliento para culminar esta tesis.
- Ego amare multum -*

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	i
Índice de Tablas.....	vi
Índice de Figuras	viii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1: ANTECEDENTES	4
1.1 Estado del Arte	5
1.1.1 Sistemas de semaforización	5
1.1.2 Mecanismos de control	6
1.1.3 Sistemas de semaforización inteligentes.....	11
1.1.4 Sistemas existentes.....	12
1.2 Marco Teórico	15
1.2.1 Parámetros involucrados en el tráfico vehicular	15
1.2.2 Transmisión inalámbrica de datos.....	19
1.2.3 Clasificación y estándares de transmisión inalámbrica.....	20
1.2.4 Protocolos de comunicación	23
CAPITULO 2: ESTUDIO DEL TRÁFICO VEHICULAR EN INTERSECCIONES DE AVENIDAS DE LIMA METROPOLITANA.....	25
2.1 Estado actual del tránsito el Lima Metropolitana.....	25
2.2 Identificación de principales avenidas con alta congestión vehicular.....	30
2.2.1 Metodología	30
2.2.2 Aplicación	31
2.3 Identificación de factores involucrados en el tráfico vehicular en intersecciones ...	36
2.3.1 Metodología	36
2.3.2 Aplicación	37
2.4 Validación de factores involucrados en el tránsito vehicular	40
2.4.1 Comportamiento regular del tráfico con semáforo temporizado	41
2.4.2 Comportamiento intenso del tráfico con semáforo temporizado	43
CAPITULO 3: SISTEMA AUTÓNOMO DE CONTROL DE TRAFICO	46
3.1 Objetivos del trabajo	46

3.2	Características principales del sistema	48
3.3	Comunicación entre sistemas	53
CAPITULO 4: DISEÑO DEL CONTROLADOR DEL SISTEMA.....		56
4.1	Requerimientos del controlador	56
4.2	Descripción del funcionamiento del controlador	58
4.3	Definición del sistema de comunicación inalámbrico.....	63
4.4	Definición de los componentes del controlador y subcontrolador	65
4.5	Diseño de la tarjeta electrónica del controlador y subcontrolador	74
4.5.1	Tarjeta de control	76
4.5.2	Borneras	77
4.5.3	Tarjeta electrónica.....	78
4.5.4	Diagrama de conexiones	79
4.6	Diseño mecánico del controlador y subcontrolador	80
4.6.1	Cubierta del sistema	80
4.6.2	Ensamblaje del sistema	82
4.6.3	Planos del sistema	83
4.6.4	Diseño Final del Sistema.....	83
4.7	Instalación del controlador al sistema integrado	84
CAPITULO 5: DISEÑO DEL ALGORITMO DE CONTROL DEL SISTEMA.....		87
5.1	Análisis y planteamiento de la solución	87
5.2	Estados de funcionamiento.....	93
5.3	Diagramas de flujo del algoritmo	97
5.4	Pseudocódigo del algoritmo	101
CAPITULO 6: INTERFAZ DE MONITOREO		102
6.1	Descripción de la interfaz de monitoreo.....	102
6.2	Monitoreo del sistema	104
6.2.1	Mapa de identificación de sistemas.....	104
6.2.2	Interfaz de monitoreo	105
6.3	Manejo de datos de la interfaz de monitoreo.....	110
6.4	Algoritmo de operación de interfaz de monitoreo.....	112
6.5	Pruebas de funcionamiento	115
6.5.1	Lectura de información	115
6.5.2	Registro de información.....	117
6.5.3	Monitoreo de sistema	119
CAPITULO 7: PRESUPUESTO.....		121
7.1	Presupuesto del sistema	121

CONCLUSIONES.....	125
OBSERVACIONES Y COMENTARIOS	126
TRABAJO FUTURO	127
BIBLIOGRAFÍA.....	128
ANEXOS.....	A1
Anexo 1: Análisis de tráfico vehicular	A1
Anexo 2: Análisis de tráfico vehicular	A11
Anexo 3: Levantamiento de información.....	A19
Anexo 4: Análisis de la información.....	A23
Anexo 5: Características de la intersección definida en software Vissim.....	A31
Anexo 6: Simulación del comportamiento de una intersección con tráfico regular	A36
Anexo 7: Simulación del comportamiento de una intersección con tráfico intenso.....	A38
Anexo 8: Consumo de corriente del sistema	A40
Anexo 9: Esquemático y Tarjeta Electrónica	A42
Anexo 10: Planos de despiece	A45
Anexo 11: Planos de soldadura	A47
Anexo 12: Planos de ensamblaje.....	A49
Anexo 13: Planos de despiece – Sistema Integrado	A51
Anexo 14: Planos de ensamblaje – Sistema Integrado.....	A52
Anexo 15: Pseudocódigos del sistema	A53

Índice de Tablas

	Pág.
Tabla 1.1: Ajustes para controles accionados por el tránsito. Adaptado de (Ministerio de Transportes 2000).....	9
Tabla 1.2: Ajustes para controles adaptables a la densidad del tránsito. Adaptado de (Ministerio de Transportes 2000).....	10
Tabla 1.3: Principales estándares de redes inalámbricos definidos por la IEEE	22
Tabla 1.4: Características de los principales estándares de transmisión inalámbricos ...	22
Tabla 1.5: Listado de protocolos de comunicación principales	24
Tabla 2.1: Registro de avenidas con alto nivel de tránsito vehicular en 10 distritos de Lima Metropolitana.....	35
Tabla 2.2: Parámetros considerados para la simulación del comportamiento del tráfico	42
Tabla 4.1: Características de data recibida y transmitida por el controlador	63
Tabla 4.2: Características de los principales estándares de transmisión inalámbricos (Frenzel 2012).....	64
Tabla 4.3: Opciones seleccionadas de tarjetas con procesador integrado.....	66
Tabla 4.4: Opciones seleccionadas de router WiFi.....	67
Tabla 4.5: Principales especificaciones del Router inalámbrico Tp-Link Archer C20 (TP-Link 2017a).....	68
Tabla 4.6: Principales especificaciones de la Antena Tp-Link ANT2412D (TP-Link 2017b)	68
Tabla 4.7: Opciones seleccionadas de router 3G/4G	69
Tabla 4.8: Principales especificaciones del Router 3G/4G Tp-Link TL-MR3020 (TP-Link 2017c).....	70
Tabla 4.9: Principales características del optoacoplador MOC3021 (Motorola 2017)...	71
Tabla 4.10: Principales características del TRIAC BTA08 (ON Semiconductor 2017).	71
Tabla 4.11: Principales características del medidor de corriente ASC712 (Allegro 2017)	72
Tabla 4.12: Principales características de las fuentes de energía (XP Power 2017).....	73

Tabla 4.13: Principales características del interruptor termomagnético	74
Tabla 4.14: Asignación de pines de salida del controlador.....	76
Tabla 4.15: Asignación de pines de entrada del controlador	76
Tabla 4.16: Principales características de los planos del sistema	83
Tabla 5.1: Descripción de los modos de operación del sistema.....	97
Tabla 6.1: Datos de identificación de la intersección	110
Tabla 6.2: Datos de configuración proporcionados por la interfaz.....	111
Tabla 6.3: Datos de operación proporcionados por los sistemas de control de tránsito	112
Tabla 6.4: Información de un sistema de prueba para ser registrado en un archivo CSV mediante la prueba de registro de información	117
Tabla 7.1: Costos de componentes mecánicos del controlador y subcontrolador.....	122
Tabla 7.2: Costos de componentes electrónicos del controlador y subcontrolador	122
Tabla 7.3: Costos de fabricación y ensamblaje de un controlador y subcontrolador....	123
Tabla 7.4: Costo final de un controlador y subcontrolador.....	123
Tabla 7.5: Presupuesto estimado de la implementación de un sistema integrado para una intersección	124

Índice de Figuras

	Pág.
Figura 1.1: Diagrama de clasificación de los sistemas de semaforización	5
Figura 1.2: Diagrama de los mecanismos de control utilizados para el control de sistemas de semaforización. Adaptado de (Abeijón Monjas 2007)	7
Figura 1.3: Diagrama de clasificación de los sensores para detección del tránsito vehicular. Adaptado de (Abeijón Monjas 2007)	11
Figura 1.4: Esquema de funcionamiento del sistema SCOOT (Ming 2015)	13
Figura 1.5. Esquema de funcionamiento del sistema de semaforización inteligente implementado en Barranquilla (Alcaldía de Barranquilla 2016)	14
Figura 1.6: Sistema de semaforización inteligente desarrollado por la Universidad de Waterloo (Tubaishat 2007)	15
Figura 1.7: Relación entre parámetros microscópicos del tránsito vehicular (Mozo Sanchez 2012)	18
Figura 1.8: Diagrama de frecuencias del espectro electromagnético (Cedrón 2011)	20
Figura 1.9: Clasificación de los sistemas inalámbricos (Zhang 2007).....	21
Figura 1.10: Formatos de envío de datos para diferentes protocolos.....	23
Figura 2.1: Congestión vehicular generada por el transporte público. [Fuente: El Comercio].....	26
Figura 2.2: Tránsito vehicular generado por taxis estacionados en paraderos no autorizados. [Fuente: El Comercio]	27
Figura 2.3: Tránsito vehicular generado por la saturación de las vías. [Fuente: La Prensa].....	28
Figura 2.4: Congestión vehicular generada en una intersección de avenidas. [Fuente: El comercio].....	28
Figura 2.5: Agente policial asignado para el ordenamiento del tránsito vehicular en una avenida principal. [Fuente: Publimetro].....	29
Figura 2.6: Interfaz de usuario de la herramienta Google Maps con visualización de tráfico	32
Figura 2.7: Opciones para la visualización de tráfico en Google Maps.....	33
Figura 2.8: Tráfico vehicular en Lima Metropolitana: (a) nivel de tráfico a las 06:00; (b) nivel de tráfico a las 8:00; y (c) nivel de tráfico a las 19:00	34

Figura 2.9: Intersecciones seleccionadas para el levantamiento de información: (a) Av. Arenales cruce con Jirón Domingo Cueto; y (b) Av. José Leal cruce con Av. Arequipa	39
Figura 2.10: Simulación del comportamiento de una intersección convencional con tráfico regular. a) Visualización 2D, y b) Visualización 3D.....	43
Figura 2.11: Simulación del comportamiento de una intersección convencional con tráfico intenso. a) Visualización 2D, y b) Visualización 3D.....	44
Figura 2.12: Factores de congestión identificados durante la simulación	45
Figura 3.1: Sistemas semafóricos convencionales en la ciudad de Lima Metropolitana: a) semáforo individual y b) semáforo doble	49
Figura 3.2: Componentes de un sistema integrado	50
Figura 3.3: Integración de un sistema para cada tipo de intersección: a) Tipo 1, b) Tipo 2 y c) Tipo 3	51
Figura 3.4: Diagrama de bloques del sistema para una intersección Tipo 3	52
Figura 3.5: Denominación de sistemas aledaños para intercomunicación.....	53
Figura 3.6: Diagrama de comunicaciones del sistema para intersecciones del Tipo 3 ..	55
Figura 4.1: Diagrama de entradas y salidas del controlador del sistema	57
Figura 4.2: Escenarios de funcionamiento del sistema. (a) Intersección de dos vías de un sentido, (b) intersección de una vía de un sentido y una vía de dos sentidos, y (c) intersección de dos vías de dos sentidos	59
Figura 4.3: Diagrama de transferencia de información del controlador del sistema	61
Figura 4.4: Estructura de funciones del controlador	62
Figura 4.5: Diagramas de bloque del controlador y subcontrolador del sistema	65
Figura 4.6: Tarjeta de control Raspberry Pi 3 model B (Raspberry Pi 2017)	66
Figura 4.7: Router inalámbrico Tp-Link Archer C20 (TP-Link 2017a)	67
Figura 4.8: Antena Tp-Link ANT2412D (TP-Link 2017b).....	68
Figura 4.9: Router 3G/4G Tp-Link TL-MR3020 (TP-Link 2017c).....	69
Figura 4.10: Circuito para controlar el encendido de luces de semáforo.....	70
Figura 4.11. Circuito para sensor corriente de las luces de semáforo	72
Figura 4.12: Fuente de energía de (a) 12V 5A y (b) 5V 2A (XP Power 2017)	73
Figura 4.13: Esquemático de la tarjeta electrónica del controlador	75

Figura 4.14: Esquemático de conexiones de la tarjeta de control	77
Figura 4.15: Esquemático de conexiones de las borneras de la tarjeta electrónica.....	77
Figura 4.16: Ruteado de la tarjeta electrónica del sistema.....	78
Figura 4.17: Capas de soldadura de la tarjeta electrónica: (a) capa superior y (b) capa inferior.....	79
Figura 4.18: Diagrama de conexiones del sistema.....	80
Figura 4.19: Diseño de la caja ensamblada del controlador	81
Figura 4.20: Ubicación de los componentes ensamblados en la caja del controlador	82
Figura 4.21: Diseño final del controlador ensamblado	84
Figura 4.22: Mecanismo para instalación del controlador	85
Figura 4.23: Ubicación del controlador instalado en un poste de semáforo	85
Figura 4.24: Diagrama de conexión eléctricas de los componentes del sistema integrado	86
Figura 5.1: Tipos de intersecciones características planteadas para el desarrollo del algoritmo de control	88
Figura 5.2: Diagrama de flujo general del algoritmo de control.....	91
Figura 5.3: Diagrama de flujo general de los subcontroladores	92
Figura 5.4: Estados de funcionamiento de los semáforos vehiculares y peatonales en una intersección Tipo 3	93
Figura 5.5: Diagrama de flujo de la función cíclica para el modo de operación temporizado.....	98
Figura 5.6: Diagrama de flujo de la función cíclica para el modo de operación local....	99
Figura 5.7: Diagrama de flujo de la función cíclica para el modo de operación integrado	100
Figura 6.1: Diagrama de interacción entre la interfaz de monitoreo y los sistemas de control de tráfico	103
Figura 6.2: Vista general del mapa personalizado para la identificación de sistemas ..	105
Figura 6.3: Detalle de las características de un sistema en el mapa personalizado	105
Figura 6.4: Interfaz del Sistema Integrado de Control de Tráfico	106
Figura 6.5: Interfaz para la configuración de un sistema	107

Figura 6.6: Interfaz para el monitoreo de un sistema de acuerdo al tipo de intersección: (a) Tipo 1, (b) Tipo 2 y (c) Tipo 3	109
Figura 6.7: Diagrama de flujo principal de la interfaz de monitoreo.....	113
Figura 6.8: Diagrama de flujo de la interrupción “Actualizar características”	114
Figura 6.9: Diagrama de flujo de la interrupción “Actualizar parámetros”	114
Figura 6.10: Diagrama de flujo de la interrupción “Monitoreo de sistema”.....	115
Figura 6.11: Resultado de prueba de funcionamiento para la lectura de información a través de la interfaz. (a) Información en archivo CSV, (b) resultados de prueba 1 y (c) resultados de prueba 2.....	116
Figura 6.12: Resultado de prueba de funcionamiento para el registro de información a través de la interfaz. (a) Información registrada en la interfaz, e información en archivo CSV (b) antes del registro de información y (c) después del registro de información .	118
Figura 6.13: Información de los tres sistemas de prueba utilizados para validar el monitoreo de sistemas en la interfaz	119
Figura 6.14: Resultado de prueba de funcionamiento del monitoreo de sistemas a través de la interfaz. (a) monitoreo de un sistema Tipo 1 (b) monitoreo de un sistema Tipo 2 y (c) monitoreo de un sistema Tipo 3.....	120

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe un creciente incremento del número de vehículos que circulan por las ciudades. Esto genera que las vías de tránsito se encuentren cada vez más congestionadas especialmente durante las horas de mayor flujo vehicular, comúnmente conocidas como “horas punta”. La congestión de las vías de tránsito provoca que el tráfico vehicular termine afectando toda una avenida principal y también a calles aledañas que convergen a las avenidas principales, lo cual genera que las personas tarden más del doble del tiempo en llegar a su destino. Además, hay estudios que demuestran que el tráfico vehicular provoca un mayor estrés a los conductores (Wickens 2005) y aumenta el nivel de contaminación al tener más tiempo a los vehículos detenidos (Han 2006).

El tráfico vehicular es generado por la gran cantidad de autos que existen, pero también muchas veces se ve agravado debido a que los semáforos existentes no cuentan con un nivel de inteligencia para determinar los tiempos óptimos que permitan la fluida circulación de los vehículos en las avenidas. La mayoría de semáforos existentes en la ciudad de Lima son programados con tiempo fijos que además brindan la posibilidad de ser configurados para variar sus tiempos a determinadas horas del día, pero no cuentan con un nivel de autonomía como para decidir en tiempo real los tiempos óptimos de flujo vehicular. Por esta razón, en el caso particular de Lima Metropolitana, los policías de tránsito buscan la manera de organizar el tráfico vehicular en las avenidas principales variando los tiempos de circulación en cada vía de acuerdo a la prioridad de las avenidas y de acuerdo a la información que pueden ver *in situ* en caso esté congestionada alguna de las vías.

En la ciudad, también existen semáforos llamados “inteligentes” los cuales son equipados con detectores que permiten captar información del flujo vehicular en las vías de interés (Kanungo 2014). Esta información es enviada a una central de monitoreo en donde mediante un controlador y operarios que supervisan los sistemas se pueden modificar los parámetros en tiempo real de acuerdo a la data recolectada. Mediante estos sistemas “inteligentes” lo que se busca es generar un tránsito vehicular fluido y sin interrupciones en las avenidas principales, que también se denomina como “olas verdes”. La limitante de estos sistemas es que no analizan las posibles congestiones vehiculares directamente en las intersecciones, en donde muchas veces debido al tráfico vehicular o al poco respeto de las normas de tráfico se llegan a atascar las vías, provocando que los autos no puedan avanzar por ninguna de las vías y esto se extienda a lo largo de otras vías aledañas.

En la presente tesis se plantea desarrollar un sistema de control de tránsito que posea un nivel de autonomía capaz de determinar tiempos óptimos de circulación en las vías de una intersección mediante información proporcionada en tiempo real del tránsito vehicular. El nivel de autonomía que tendrá el sistema permitirá que éste pueda tomar decisiones en tiempo real sobre los tiempos óptimos de operación de los semáforos sin necesidad de la intervención humana, y solo utilizando la información recopilada en cada una de las intersecciones. Este sistema se enfocará en tratar de manera puntual la congestión en una determinada intersección, pero a su vez contará con un sistema de comunicación inalámbrica que permita enviar información a otras intersecciones cercanas con la finalidad de brindar la capacidad a los controladores aledaños para tomar decisiones óptimas.

La primera parte del documento, que está comprendida por el capítulo 1 y 2, abarca la recopilación de información necesaria para el desarrollo del sistema. El primer capítulo presenta una revisión del estado de arte y marco teórico referente al tema, a fin de poder recopilar información sobre sistemas de semaforización existentes, parámetros del tránsito vehicular y sistemas de transmisión inalámbricos. Luego, en el segundo capítulo se muestra un estudio realizado sobre el tráfico vehicular en la ciudad de Lima Metropolitana, en donde se evalúa el estado actual del tránsito, se identifican las principales avenidas de la ciudad con mayor congestión vehicular, y se

valida la información recolectada mediante una simulación a fin de obtener como resultados los factores más influyentes en la generación del tránsito vehicular y definir una estrategia de control para el algoritmo de operación del sistema.

Con toda la información recopilada en la primera parte del trabajo, se procede a realizar el diseño del sistema en los capítulos 3, 4, 5 y 6. En primer lugar, en el tercer capítulo se presenta de manera general los objetivos y características principales del sistema por desarrollar. En el cuarto capítulo se inicia a detalle el diseño del controlador del sistema, desarrollando solo las características mecánicas y electrónicas. Posteriormente, en el quinto capítulo se desarrolla el algoritmo de control que se usará para el sistema, presentando diagramas de estados, diagramas de flujo y el pseudocódigo de la lógica de control a fin de que pueda ser posteriormente implementado haciendo uso de cualquier lenguaje de programación. Finalmente, el sexto capítulo describe la operación de la central de monitoreo y muestra las características de la interfaz desarrollada para el uso del sistema.

La última parte del documento está constituida por el capítulo 7 y las conclusiones. En el séptimo capítulo se presenta un estimado de los costos de implementación, instalación y mantenimiento. Por último, se detallan las conclusiones del trabajo, las observaciones y comentarios referentes a lo presentado y el trabajo futuro que podría realizarse sobre la temática.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

En el presente capítulo se presenta el estado del arte y el marco teórico de los principales aspectos involucrados en el desarrollo del sistema propuesto con la finalidad de brindar una mayor comprensión de los mismos para un correcto diseño.

En una primera parte, se realiza una breve descripción de los sistemas de semaforización con la finalidad de dar una perspectiva inicial para el desarrollo del diseño planteado en la presente tesis. De manera general se definen y clasifican a los sistemas de semaforización y se presentan los mecanismos de control utilizados en la actualidad. Luego se describen a algunos de los sistemas de semaforización inteligentes existentes y se exponen a los principales sistemas implementados en diferentes partes del mundo.

En la segunda parte, se describen los parámetros involucrados en el tráfico vehicular, ahondando en los parámetros identificados a partir de los modelos macroscópicos y microscópicos; así como también la influencia del flujo vehicular. Finalmente se describen los conceptos teóricos de la transmisión inalámbrica de datos, abarcando conceptos de métodos de operación, estándares de transmisión inalámbrica y protocolos de comunicación

1.1 Estado del Arte

1.1.1 Sistemas de semaforización

Definición

Los sistemas de semaforización, o comúnmente denominados semáforos, son dispositivos de control utilizados para la regulación del tránsito vehicular en intersecciones viales de avenidas o carreteras. Estos dispositivos tienen como principal función el proporcionar un ordenamiento del tránsito mediante la interrupción del flujo vehicular o peatonal para permitir el paso de otra vía. Los semáforos son comúnmente utilizados en intersecciones que cuentan con dos o más vías de circulación (Ministerio de Transportes 2000).

Clasificación

Estos sistemas pueden ser clasificados de acuerdo a su funcionamiento como semáforos no accionados por el tránsito o pre sincronizados y semáforos accionados por el tránsito o adaptativos (Ministerio de Transportes 2000). La Figura 1.1 muestra un diagrama que describe brevemente las clases de sistemas de semaforización.

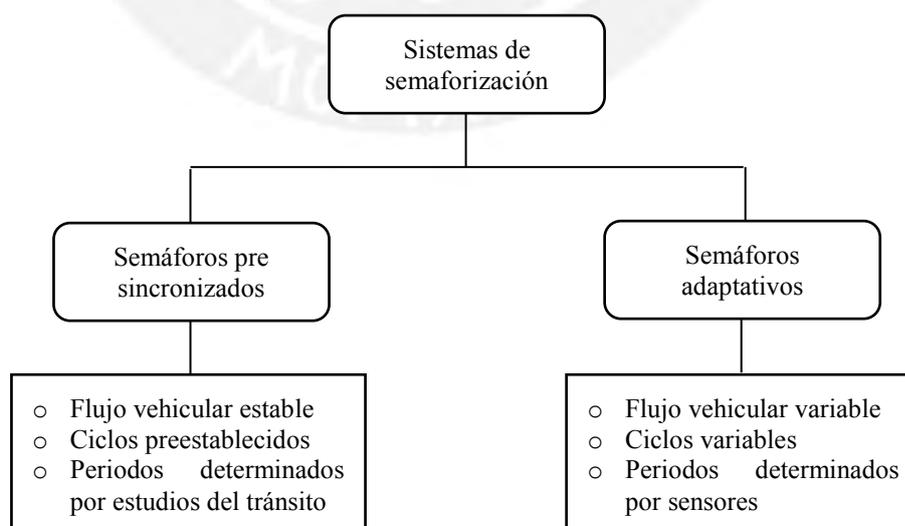


Figura 1.1: Diagrama de clasificación de los sistemas de semaforización

Los semáforos pre sincronizados o temporizados son aquellos que cambian sus estados de acuerdo a tiempo pre programado o a una serie de programaciones preestablecidas. El uso de esta clase de semáforos se aplica en intersecciones en donde el comportamiento y parámetros del tránsito son estables y constantes. En caso los patrones de tránsito se vean alterados estos semáforos no podrían optimizar su comportamiento, lo cual generaría incremento en el tráfico vehicular e incluso congestión vehicular. Comúnmente se observa que, en horas en donde el tránsito vehicular es mayor, estos semáforos no logran controlar correctamente el flujo de vehículos debido a que no cuentan con información *in situ*. Para definir los tiempos preestablecidos de estos semáforos se suelen realizar estudios del flujo vehicular con la finalidad de programar los más óptimos ciclos de operación.

Los semáforos accionados por el tránsito o dinámicos son aquellos que cambian sus estados en función de información registrada por detectores de vehículos o detectores de peatones instalados en la zona. Estos sistemas son comúnmente utilizados en las intersecciones en donde el flujo de tránsito varía de manera irregular y en aquellas intersecciones en donde las interrupciones del flujo vehicular en la vía principal deben ser mínimas. Estos sistemas utilizan detectores intrusivos o no intrusivos para suministrar información a un control maestro y éste pueda determinar los ciclos de funcionamiento óptimos de acuerdo al flujo vehicular. La ventaja que ofrecen estos sistemas es que se logra mejorar el control del tránsito por la información captada *in situ*, pero no siempre se llega a evitar las congestiones vehiculares debido a que se suele analizar información de manera conjunta de una vía principal y no se toma en cuenta de manera más puntual lo que pueda ocurrir en las propias intersecciones.

1.1.2 Mecanismos de control

El funcionamiento de los sistemas de semaforización está determinado de acuerdo a los mecanismos de control implementados y configurados en los controladores que cuenta cada semáforo. Tanto los elementos que componen el controlador como el mecanismo de control varía de acuerdo al tipo de semáforo que se utiliza (Ministerio de Transportes 2000). La Figura 1.2 presenta un diagrama con los mecanismos de

control que se utilizan para el control de sistemas de semaforización. A continuación, se describe las principales características del funcionamiento de ambos sistemas.

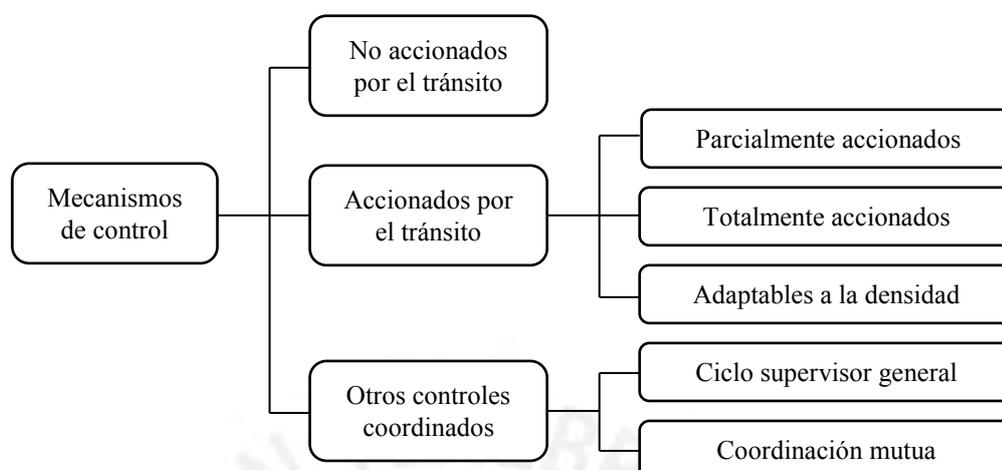


Figura 1.2: Diagrama de los mecanismos de control utilizados para el control de sistemas de semaforización. Adaptado de (Abeijón Monjas 2007)

A) Sistemas de semaforización no accionados por el tránsito

Esta clase de semáforos están compuestos generalmente por elementos electromecánicos que funcionan en conjunto con un controlador maestro para la activación de las luces correspondientes. Dado que no hay intervención de los parámetros del tránsito, estos sistemas no requieren de elementos de control muy complejos, ya que solo operan con secuencias pre programadas.

El mecanismo de control de los semáforos no accionados por el tránsito varía de acuerdo a las características del lugar en donde son instalados. Para intersecciones aisladas, no es necesario hacer uso de mecanismos de sincronización, a no ser que se requiera la coordinación con otros semáforos adyacentes o se tenga una supervisión de un controlador maestro. Por el contrario, cuando se decide instalar semáforos no accionados por el tránsito en intersecciones sucesivas, dentro de un radio de 400m, éstos deben contar con un control sincronizado. Para esto se hace uso de motores de sincronización o mediante la interconexión de los semáforos a un control maestro.

B) Sistemas de semaforización accionados por el tránsito

Los semáforos accionados por el tránsito generalmente están compuestos por elementos del tipo electrónicos dado que requieren de una tecnología más avanzada para su funcionamiento. Estos elementos forman tres principales módulos: módulo de poder, que cumple la función de alimentar a todos los circuitos; módulo de operación, que se encarga de indicar los tiempos de las fases; y módulo de control, que maneja las señales del sistema entre los detectores, controlador maestro y otros dispositivos del sistema.

Para estos sistemas de semaforización sus mecanismos de control ya no varían de acuerdo a su instalación, más bien dependen del nivel de preferencia que tienen las vías de la intersección y la cantidad de vehículos que circula por las vías. Los principales mecanismos de control utilizados son los parcialmente accionados por el tránsito, totalmente accionados por el tránsito y los adaptables a la densidad del tránsito.

Los controles parcialmente accionados por el tránsito son mayormente utilizados en avenidas con alto volumen de autos con intersecciones de calles con escasa circulación. Estos sistemas utilizan detectores ubicados en los accesos secundarios con la finalidad de que la avenida principal se encuentre en luz verde y solo cambie su estado cuando se detecte vehículos en las calles secundarias. De esta manera se busca dar prioridad de flujo en las avenidas principales, pero como no se tiene información de la avenida principal puede ocurrir momentos en los que se interrumpa de forma inoportuna la circulación para dar pase a las calles secundarias.

En el caso de los controles totalmente accionados por el tránsito, se utilizan detectores en todos los accesos de una intersección. De esta manera el sistema modifica los estados de los semáforos de acuerdo a la demanda de vehículos en cada vía. Así se busca permitir la circulación de vehículos en las vías que se encuentren autos esperando y se evita realizar cambios de estado innecesarios. Dado que existen tiempos mínimos y máximos de circulación en las vías se cuentan con ajustes establecidos para la configuración de estos sistemas tal como se muestran en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Ajustes para controles accionados por el tránsito. Adaptado de (Ministerio de Transportes 2000)

AJUSTES	Variación de los ajustes (segundos)	
	Parcialmente accionados por el tránsito	Totalmente accionados por el tránsito
Período mínimo en la calle principal	10 a 90	2 a 30
Fracción inicial en la calle secundaria	2 a 12	2 a 30
Extensión de tiempo en la calle principal		2 a 30
Extensión de tiempo en la calle secundaria	2 a 12	2 a 30
Extensión límite en la calle principal		10 a 60
Extensión límite en la calle secundaria	10 a 60	10 a 60
Intervalo para despeje de vehículos	hasta 10	hasta 10
Intervalo para cruce de peatones	5 a 35	5 a 35

Los controles adaptables a la densidad del tránsito tienen un comportamiento convencional a los semáforos temporizados, pero dado que se cuenta con la información de los detectores instalados en las vías de acceso pueden aumentar o disminuir los tiempos preestablecidos de acuerdo a los requerimientos del flujo vehicular. Los detectores utilizados son ubicados en lugares estratégicos para que permitan determinar a un control maestro la información de las vías y este analiza el mejor equilibrio de periodos de cada ciclo de acuerdo a las intensidades de circulación. Al igual que para el caso anterior, se cuentan con ajustes establecidos que son utilizados para determinar los tiempos óptimos de cada ciclo del semáforo. Los parámetros para los ajustes de estos sistemas se muestran en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2: Ajustes para controles adaptables a la densidad del tránsito. Adaptado de (Ministerio de Transportes 2000)

AJUSTES	Variación de los ajustes
Período mínimo de luz verde	5 a 60 segundos
Número de accionamientos antes de que el período mínimo de luz verde empiece a aumentar	5 a 35 accionamientos
Período adicional en luz verde para cada accionamiento	1 a 20 segundos
Tiempo de recorrido del detector a la línea de parada	5 a 15 segundos
Intervalo permitido entre accionamiento que es afectado por el tiempo de espera de vehículos en otra fase	10 a 1 segundo
Tiempo de espera que afecta al tiempo anterior	10 a 90 segundos
Intervalo permitido entre accionamientos que es afectado por el número de vehículos que esperan en otra fase	10 a 1 segundo
Número de vehículos detenidos que afecta al intervalo anterior	10 a 75 vehículos
Intervalo permitido entre accionamientos que es afectado por la separación entre vehículos al arrancar	10 a 1 segundo
Número de accionamientos que afecta el intervalo anterior por cada 10 segundos	10 a 75 accionamientos
Efecto de agrupamiento de vehículos	10 a 90%
Límite de extensión	10 a 90 segundos
Intervalo de despeje	Hasta 10 segundos

C) Sistemas de semaforización con otros controles coordinados

Adicionalmente se utilizan otros mecanismos de control para la coordinación de los estados en una serie de semáforos instalados en intersecciones continuas. Existen los sistemas de ciclo supervisor general, los cuales cuentan con un control maestro para semáforos parcialmente accionados por el tránsito con la finalidad de aumentar el tiempo de luz verde en las avenidas principales. También se utilizan los sistemas de coordinación mutua, con la finalidad de crear un desfase fijo entre los semáforos adyacentes o próximos de una avenida principal buscando evitar paradas innecesarias por semáforos rojos.

1.1.3 Sistemas de semaforización inteligentes

Los sistemas de semaforización inteligentes son sistemas de control de tránsito que integran los principios de funcionamiento de los semáforos convencionales con sensores y sistemas de control para modificar los estados de funcionamiento de acuerdo al flujo vehicular en tiempo real. Estos sistemas cuentan con controladores que permiten analizar la información del flujo vehicular y determinar los ciclos más convenientes para los semáforos en intersecciones o avenidas. Además, muchos de estos sistemas cuentan con sistemas de comunicación para transmitir los datos recolectados a una central de control desde la cual se monitorea el funcionamiento de todos los semáforos para evitar congestiones vehiculares.

El uso de sensores como detectores de flujo vehicular es variado debido a la existencia de diferentes dispositivos que utilizan diferentes principios de funcionamiento, los cuales tienen características únicas que brindan beneficios y desventajas distintas. Los detectores de flujo vehicular se pueden clasificar de acuerdo a su tipo de instalación en tres grupos: detectores intrusivos, no intrusivos y vehículo flotante; tal como se muestra en el diagrama mostrado en la Figura 1.3.

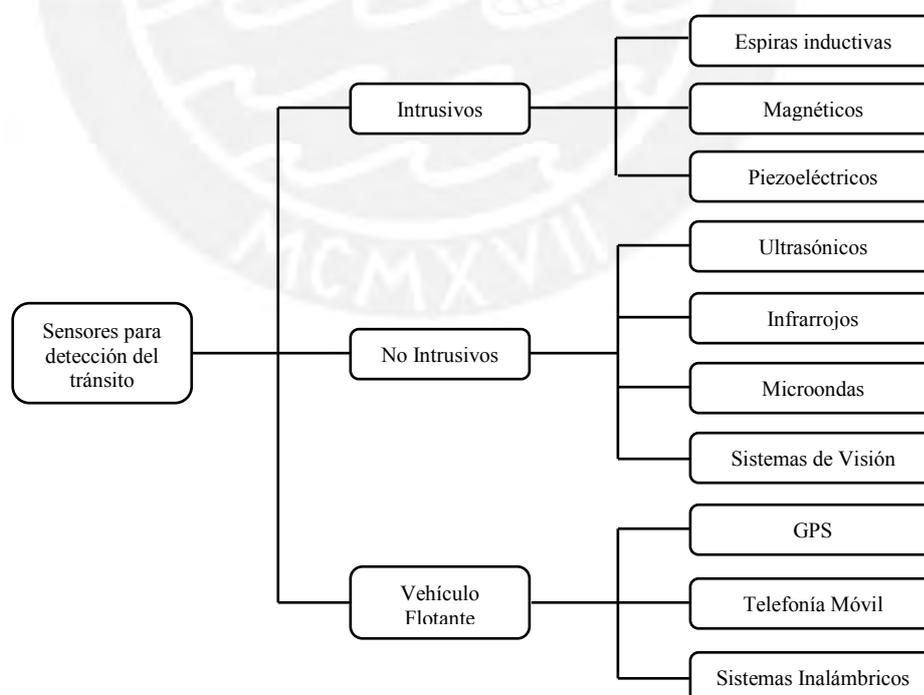


Figura 1.3: Diagrama de clasificación de los sensores para detección del tránsito vehicular. Adaptado de (Abeijón Monjas 2007)

Los sensores intrusivos son dispositivos que deben ser instalados dentro o sobre el pavimento por lo que su instalación y mantenimiento son costosos y complejos, además comúnmente se suelen dañar debido a la circulación de los vehículos. Dentro de este grupo se pueden catalogar a las espiras inductivas, sensores magnéticos y sensores piezoeléctricos. Por otra parte, los sensores no intrusivos son aquellos que son instalados sin estar en contacto directo con la calzada y para su ubicación suelen utilizarse estructuras propias o ya existentes, como postes o pórticos. En este grupo se encuentran los sensores ultrasónicos, infrarrojos, microondas y los detectores que utilizan sistemas de visión. Otros sensores utilizados son los denominados “vehículo flotante”, los cuales se encuentran ubicados dentro de un vehículo y brinda la información a los sistemas de semaforización mediante GPS, telefonía móvil o de manera inalámbrica (Abeijón Monjas 2007).

1.1.4 Sistemas existentes

Sistemas de semaforización inteligentes se han venido desarrollando desde hace varios años debido a la necesidad de regular el tráfico vehicular que incrementa cada año. En todo el mundo se han desarrollado e implementado gran variedad de sistemas, los cuales en su mayoría están enfocados en la generación de olas verdes que permitan evitar paradas innecesarias y reducir el tiempo de viaje de las personas.

Uno de los sistemas de semaforización inteligente desarrollados e implementados es el sistema SCOOT (Ming 2015). Este sistema hace uso de detectores intrusivos instalados al inicio de las calles de cada intersección con la finalidad de transmitir la información a una central de control para determinar y optimizar los cambios de ciclos en los semáforos, tal como se muestra en el esquema de la Figura 1.4. La determinación de los tiempos óptimos se realiza mediante el modelamiento del comportamiento del tránsito desde el detector hasta el semáforo tomando en consideración el estado del semáforo y las posibles colas en la vía. Este sistema es utilizado en diferentes ciudades de países a través del mundo, entre las cuales se encuentran Beijing, Londres, Los Ángeles, Toronto, Sao Paulo, Santiago y otros.

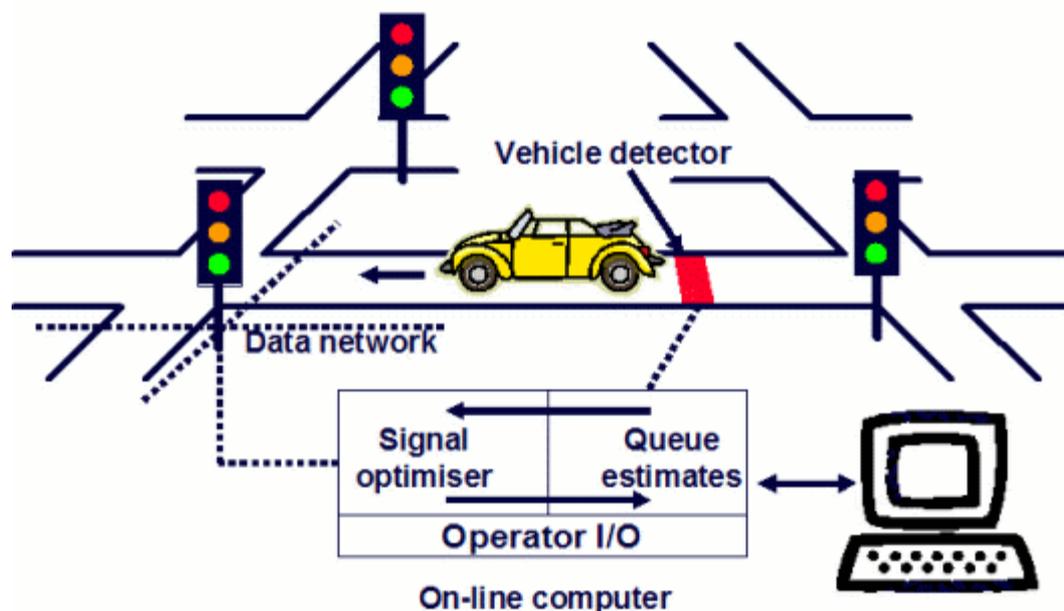


Figura 1.4: Esquema de funcionamiento del sistema SCOOT (Ming 2015)

Otro sistema de control adaptativo desarrollado e implementado es el denominado SCATS (por sus siglas en inglés de Sistema de Tráfico Adaptativo Coordinado de Sídney) (Chong-White 2012). Este es un sistema de control que funciona de manera similar al sistema SCOOT con la diferencia que utiliza datos de detectores instalados en cada intersección, los cuales son mayormente sensores invasivos inductivos. La información es procesada a través de los servidores del sistema con la finalidad de generar olas verdes en las vías y a la vez poder reducir la fase de estado verde a niveles normales. Este sistema ha sido implementado y se ha comprobado su buen funcionamiento en diferentes países como Australia, Bangladesh, Brasil, Chile, China, India, México, USA y muchos otros.

En Latinoamérica también se han instalado estos sistemas de semafORIZACIÓN inteligente. A parte de los sistemas SCOOT y SCATS, en la ciudad de Barranquilla, Ecuador se implementaron sistemas de tráfico adaptativos en dos de sus corredores viales principales (Alcaldía de Barranquilla 2016). A diferencia de los anteriores sistemas descritos, este hace uso de cámaras para la detección de vehículos mediante espiras virtuales, las cuales permiten conocer la presencia de los vehículos en la vía sin hacer uso de sensores intrusivos. Luego la información recopilada es enviada a un controlador principal, el cual se comunica con una central de tránsito de manera inalámbrica haciendo uso del protocolo TCP/IP, tal como se describe en el esquema

de la Figura 1.5. El sistema implementado tiene la capacidad de analizar la cantidad de autos esperando el cambio de semáforo en la intersección con la finalidad de ajustar la duración de los ciclos de semáforo ya sea alargando el estado de color verde o recortando el estado de color rojo.

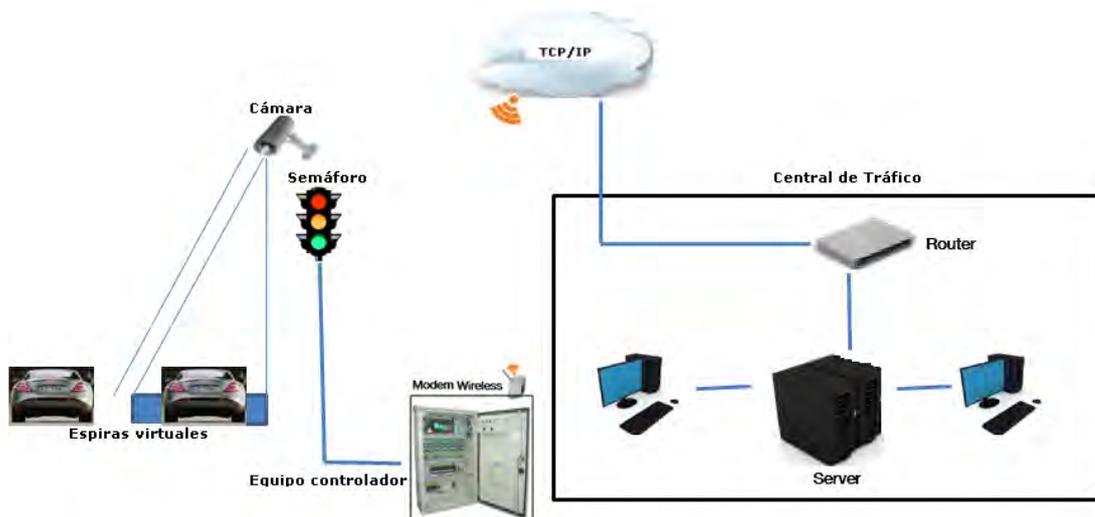


Figura 1.5. Esquema de funcionamiento del sistema de semaforización inteligente implementado en Barranquilla (Alcaldía de Barranquilla 2016)

El uso de sistemas de visión para la detección de vehículos ha sido desarrollado para diversos sistemas de semaforización inteligente dado que es uno de los sensores no intrusivos más efectivos y económicos. Por ejemplo la Universidad de Waterloo desarrolló un sistema de control de tránsito adaptativo para vías urbanas en base a información captada por video, que además cuenta con la capacidad de transmitir la información de las cámaras de manera inalámbrica (Tubaishat 2007). El sistema desarrollado se enfocó en poder identificar la cantidad de vehículos que circulan por cada vía de la intersección haciendo uso de la información de cámaras de videos y además se buscó crear un patrón de predicción del tráfico mediante el uso de modelos predictivos con la finalidad de mejorar y optimizar los ciclos de los semáforos en Canadá. En la Figura 1.6 se muestra un diagrama que describe la instalación y ubicación de los sensores planteados en el sistema desarrollado.



Figura 1.6: Sistema de semaforización inteligente desarrollado por la Universidad de Waterloo (Tubaishat 2007)

En el Perú, se implementó un sistema de control de tráfico en algunas avenidas principales de Lima Metropolitana (SICE 2016). Este sistema hace uso de cámaras de visión artificial, las cuales están conectadas a una central de monitoreo de tránsito a través de la cual se puede variar el tiempo de los ciclos de los semáforos con la finalidad de crear olas verdes en las avenidas principales. Además, el sistema implementado hace uso de un software de control de tráfico que permite captar la información de las cámaras mediante una red de comunicación de fibra óptica. La limitante de este sistema es que el control se realiza desde una central de monitoreo y está a cargo de personal capacitado sin intervención de sistemas autónomos. Adicionalmente, debido a la gran cantidad de tráfico vehicular durante las horas punta en la ciudad de Lima, estos sistemas no cuentan con la capacidad de funcionar de manera óptima para evitar la creación de congestiones vehiculares.

1.2 Marco Teórico

1.2.1 Parámetros involucrados en el tráfico vehicular

La ingeniería del tránsito es un área de estudio que permite comprender y analizar el comportamiento de la corriente vehicular en las vías. De esta manera, mediante los estudios realizados en esta área es posible identificar parámetros involucrados en el

tráfico vehicular a partir de los modelos macroscópicos y microscópicos planteados en la teoría del flujo vehicular (Mayor 2000). Los estudios realizados han logrado identificar relaciones matemáticas entre los principales parámetros involucrados en el flujo vehicular, los cuales son comúnmente utilizados para planificar y diseñar la operación de los sistemas viales.

Parámetros macroscópicos

Los modelos macroscópicos para el análisis del tránsito vehicular están enfocados en el comportamiento del flujo vehicular desde una perspectiva a gran escala, es decir analizan el comportamiento de los autos en conjunto global. Los parámetros involucrados para este nivel de análisis son la velocidad, el volumen y la densidad (Cal 1996).

De manera general, la velocidad de un vehículo se define como la relación entre un espacio recorrido y el tiempo empleado en recorrerlo. Las unidades utilizadas para determinar la velocidad son los km/h. En el estudio del tránsito vehicular también se definen parámetros más específicos relacionados con la velocidad como los que se presentan a continuación.

- Velocidad puntual: Es la velocidad de un auto al circular por un determinado punto.
- Velocidad promedio de viaje: Es la velocidad media de un auto conseguida al recorrer un tramo determinado
- Velocidad de circulación: Es la velocidad media de un auto calculada eliminando las paradas completas.
- Velocidad a flujo libre: Es la velocidad media de un auto en una vía con volumen bajo, conducido a una velocidad alta y sin demoras.

El volumen vehicular se define como la cantidad de autos que circulan por una ubicación determinada en un periodo de tiempo. Para determinar el volumen vehicular se utiliza como unidad los vehículos por unidad de tiempo. Dependiendo de la unidad de tiempo utilizado para determinar el volumen vehicular se logra obtener información relevante para realizar diferentes tipos de análisis. Para la

planificación de vías se suele utilizar a los días como intervalo de tiempo, mientras que para análisis de control tráfico y coordinación de semáforos se suelen utilizar a las horas como intervalos de tiempo. El volumen horario es muy variable ya que a diferentes horas del día se puede registrar mayor o menor flujo vehicular, y especialmente durante las horas pico es cuando se registran los valores más altos de volumen de autos.

La densidad vehicular se define como el número de autos en una determinada longitud de una vía y generalmente se representa utilizando las unidades de vehículos por kilómetro (veh/km). Esta medida es posible calcularla mediante el conteo de autos que se encuentran en una vía durante un instante determinado, pero esto no se suele realizar ya que es posible determinar el volumen utilizando los parámetros de la velocidad y el volumen. La relación utilizada para determinar la densidad vehicular se presenta en la ec. 2.1, donde v es el volumen vehicular (veh/h), S es la velocidad promedio de viaje (km/h) y D es la densidad vehicular (veh/km).

$$D = \frac{v}{S} \quad \text{ec. 2.1}$$

Parámetros microscópicos

Desde una perspectiva más detallada en los autos como individuos, se pueden identificar a los parámetros macroscópicos del tránsito vehicular. Entre estos se pueden definir a los parámetros temporales y los parámetros espaciales (Mozo Sanchez 2012). Los primeros son aquellos que pueden ser definidos en función del tiempo y se incluyen: intervalo, brecha y paso. Mientras que los segundos son aquellos parámetros definidos en función de la longitud o distancia y se encuentran: espaciamiento, separación y longitud del vehículo. En la Figura 1.7 se muestra un esquema que relaciona los parámetros microscópicos del tránsito vehicular.

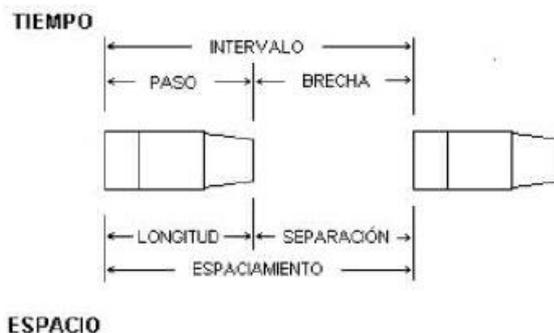


Figura 1.7: Relación entre parámetros microscópicos del tránsito vehicular (Mozo Sanchez 2012)

Para poder definir los parámetros microscópicos es necesario explicar primero los parámetros temporales. Entre estos, la longitud se define como el largo medido de un vehículo, la separación es la distancia entre los extremos de dos vehículos contiguos, y el espaciamiento es la suma de la longitud y de la separación. Entre los parámetros temporales, el paso se define como el tiempo que transcurre para recorrer la longitud de un vehículo, la brecha es el tiempo que demora en recorrer la separación entre vehículos y finalmente el intervalo es la suma de los tiempos del paso y la brecha. De esta manera pueden relacionar los parámetros microscópicos según la ec. 2.2, ec. 2.3 y ec. 2.4.

$$Paso = \frac{Longitud}{v} \quad \text{ec. 2.2}$$

$$Brecha = \frac{Separación}{v} \quad \text{ec. 2.3}$$

$$Intervalo = \frac{Espaciamiento}{v} \quad \text{ec. 2.4}$$

Flujos vehiculares

Los flujos vehiculares son otro aspecto importante que es necesario comprender y definir para poder realizar un correcto análisis del tránsito vehicular. Estos se clasifican en continuos o discontinuos, y están determinados por el tipo de vía por la cual se circula mas no por la fluidez de vehículos en un momento determinado (Garber 2005).

Las vías de flujo continuo son aquellos en los cuales los vehículos no se ven en la necesidad de detenerse por algún elemento de control como semáforos o señales de tránsito, más bien solo se detienen por factores inherentes a los propios vehículos y a la densidad presente. Entre estas se encuentran las carreteras o vías de alta circulación en las cuales pueden existir intersecciones, pero sin semaforización.

Por el contrario, las vías de flujo discontinuo o interrumpido son aquellas en las cuales se encuentran presentes elementos de control como semáforos u otros dispositivos que permiten el ordenamiento de los vehículos en las intersecciones. Entre estas vías se pueden incluir a las calles o autopistas con intersecciones semaforizadas, en donde se requiere regular el avance de las vías de una intersección.

1.2.2 Transmisión inalámbrica de datos

Los sistemas de transmisión inalámbricos llevan a cabo el envío y recepción de información entre dos o más puntos sin uso de conexiones físicas, haciendo uso de ondas electromagnéticas (Charych 2004). El uso de la transmisión inalámbrica permite otorgar mayor flexibilidad en los sistemas así como mayor facilidad en la implementación, pero se presentan algunos inconvenientes con respecto a la velocidad de transmisión, seguridad e interferencias (Akyildiz 2002).

Rangos de operación

Los sistemas inalámbricos hacen uso de ondas que se encuentran entre los 3KHz y 384 THz. Dentro de este rango es posible clasificar 3 diferentes rangos de ondas: ondas de radio, ondas microondas y ondas infrarrojas (Cedron 2011). La Figura 1.8Figura 1. presenta la distribución del espectro de frecuencia en donde se determina el rango de operación de las ondas que utilizan los sistemas inalámbricos.

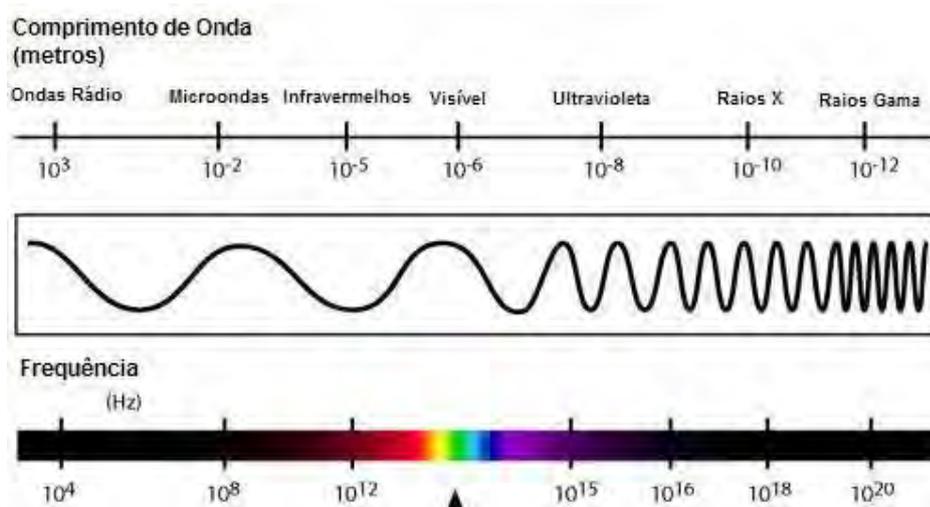


Figura 1.8: Diagrama de frecuencias del espectro electromagnético (Cedrón 2011)

Las ondas de radio operan entre los 10 KHz y los 100 MHz, y son muy utilizadas para sistemas de comunicación ya que poseen un largo alcance, pero suelen presentar interferencias. Las ondas microondas operan entre los rangos de 100MHz y 1 THz y se pueden subdividir en microondas terrestres y microondas por satélite. Las primeras hacen uso de antenas parabólicas alineadas entre sí para poder realizar la transmisión y son principalmente utilizadas para enlaces punto a punto entre distancias cortas; mientras que las ondas microondas por satélite hacen uso de satélites para amplificar las señales emitidas lo cual permite una transmisión de información a largas distancias sin interferencias. Por otra parte, las ondas infrarrojas operan entre 1 THz hasta 384 THz y son principalmente utilizadas para transmisiones de corta distancia sin obstáculos.

1.2.3 Clasificación y estándares de transmisión inalámbrica

Los sistemas inalámbricos o redes inalámbricas pueden ser clasificados de acuerdo al tamaño y cobertura en red inalámbrica de área personal (WPAN), red inalámbrica de área local (WLAN), red inalámbrica de área metropolitana (WMAN) y red inalámbrica de área extensa (WWAN) (Zhang 2007). En la Figura 1.9 se muestra la distribución de las clases de redes inalámbricas.

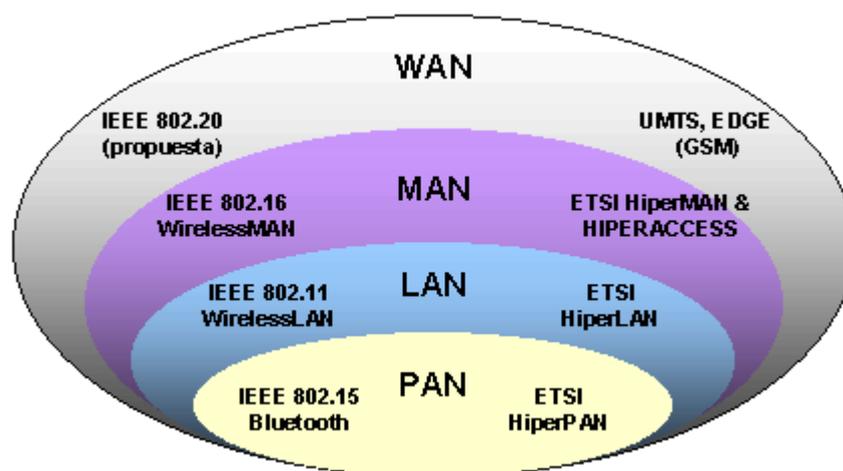


Figura 1.9: Clasificación de los sistemas inalámbricos (Zhang 2007)

Las redes WPAN operan bajo el estándar IEEE 802.15.x y son utilizadas para transmisión de datos en cortas distancias (decenas de metros). Las tecnologías WPAN más comunes son Bluetooth y Zigbee. Las redes WLAN operan bajo el estándar IEEE 802.11.x y son las más utilizadas para los sistemas inalámbricos domésticos, en donde la tecnología más usada es la WiFi. La ventaja de las redes WLAN es que ofrecen una alta velocidad de transmisión de datos con la limitante de la distancia. Las redes WAM operan bajo el estándar IEEE 802.16.x y entre estas se pueden encontrar las tecnologías WiMAX y LMDS. Por último, las redes WWAN operan bajo el estándar IEEE 802.20.x y hace uso de tecnologías de redes de comunicación móviles como GPRS, EDGE, GSM, 3G y otros.

Las redes inalámbricas son estandarizadas mediante diferentes protocolos, lo cuales se encuentran definidos por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) (Walke 2007). El comité IEEE 802 se encarga de estandarizar el uso de las redes inalámbricas. La Tabla 1.3 muestra las subdivisiones de los principales estándares definidos por la IEEE.

Tabla 1.3: Principales estándares de redes inalámbricas definidos por la IEEE

Estándar	Descripción
IEEE 802.1	Bridging & Management
IEEE 802.2	Logical Link Control
IEEE 802.3	CSMA/CD (Ethernet) Access Method
IEEE 802.11	Wireless
IEEE 802.15	Wireless Personal Area Networks
IEEE 802.16	Broadband Wireless MANs
IEEE 802.17	Resilient Packet Rings
IEEE 802.20	Mobile Broadband Wireless Access
IEEE 802.21	Media Independent Handover Services

En la Tabla 1.4 se muestran los principales estándares de transmisión inalámbricos comparando sus parámetros de velocidad de transmisión, frecuencia de operación y alcance (Ferro 2005). En esta tabla se puede observar que hay una gran variación de velocidades de transmisión entre los diferentes estándares, pero conforme mayor sea en alcance de transmisión la velocidad es menor. Además, los que tienen de mayor velocidad de transmisión son Wireless HD para estándares de corto alcance, 802.11n para estándares de medio alcance y LTE Advance para estándares de largo alcance.

Tabla 1.4: Características de los principales estándares de transmisión inalámbricos

Estándares inalámbricos	Velocidad de transmisión	Frecuencia (Portadora)	Alcance
ZigBee	< 250 kbps	915 MHz, 2.4 GHz	Corto
WiBree	< 1 Mbps	2.4 GHz	Corto
Bluetooth	< 1 Mbps	2.4 GHz	Corto
Wireless USB	< 480 Mbps	3.1 GHz - 10.6 GHz	Corto
WiGig	7 Gbps		Corto
Wireless HD	25 Gbps	60 GHz	Corto
802.11b	< 11Mbps	2.4 GHz	Medio
802.11a/g	54 Mbps	2.4 GHz / 5 GHz	Medio
802.11n	< 300 Mbps	2.4 GHz / 5 GHz	Medio
GSM	9.6 kbps	900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz	Largo
GPRS 2.5G	171.2 kbps	900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz	Largo
Edge 2.75G	473.6 kbps	900 MHz, 1800 MHz, 1900 MHz	Largo
UMTS (3G)	2 Mbps	1.8 GHz - 2.2 GHz	Largo
HSDPA 3.5G	14 Mbps	1900 MHz, 2100 MHz	Largo
HSPA+	42 Mbps	1700 MHz, 2100 MHz	Largo
WRAN	18 Mbps	54 MHz - 862 MHz	Largo
WiMAX	75 Mbps	2.3 GHz, 2.5 GHz, 3.5 GHz y 5 GHz	Largo
NBWA	80 Mbps	< 3.5 GHz	Largo
LTE 4G	< 144 Mbps	1900 MHz - 3600 MHz	Largo
LTE advanced	< 1 Gbps	1900 MHz - 3600 MHz	Largo

1.2.4 Protocolos de comunicación

La comunicación entre sistemas requiere hacer uso de normas que permiten identificar diferentes aspectos de la data enviada, como la velocidad de transmisión, el origen de envío, la existencia de errores y otros más. Para esto, los sistemas de comunicación hacen uso de protocolos de comunicación existentes, lo cuales tienen implementados diversos formatos para el envío de datos, a través de quienes es posible autenticar la data, detectar y corregir errores y además se puede conocer la sintaxis de la información transmitida.

De esta manera los protocolos de comunicación son utilizados para evitar la recepción de información errónea, para clasificar y priorizar la información recibida y para procesar alertas de errores en entre los dispositivos. Para esto, el modelo OSI clasifica a los sistemas de comunicación de acuerdo su uso. En la Figura 1.10 se muestra las 7 capas que usa el modelo OSI para la clasificación, así como también se puede apreciar el formato de envío de datos utilizados en cada una de las capas (Zimmermann 1980).

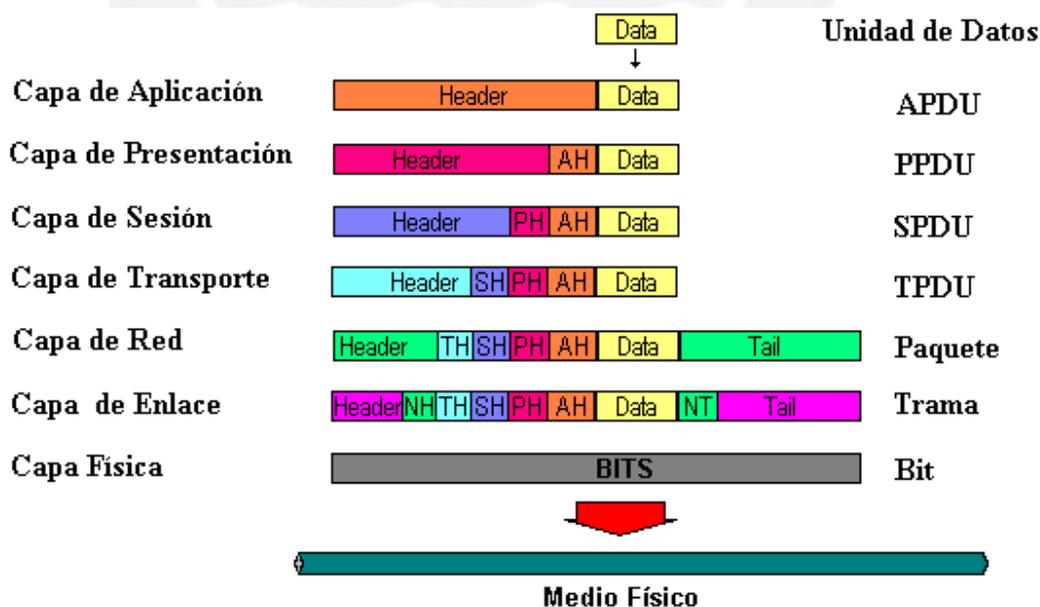


Figura 1.10: Formatos de envío de datos para diferentes protocolos.

Los protocolos de comunicación pueden ser implementados por software, por hardware y también mediante una combinación de ambos. Por esta razón, durante muchos años se han desarrollado diversos protocolos ante el desarrollo de nuevas tecnologías de comunicación. En la Tabla 1.5 se muestra una lista de los principales protocolos de comunicación existentes.

Tabla 1.5: Listado de protocolos de comunicación principales

Protocolos de comunicación

SSH - Secure Shell	TLS – Transport Layer Security
SMB - Server Message Block	E6 – Ethernet Globalization Protocols
FTP - File Transfer Protocol	NTP – Network Time Protocol
SMTP - Simple Mail Transfer Protocol	PPP – Point to Point Protocol
TCP - Transmission Control Protocol	NNTP – Network News Transfer Protocol
Telnet – Telephone Protocol	IMAP – Internet Message Access Protocol
HTTP – Hyper Text Transfer Protocol	Bitcoin Protocol
POP – Post Office Protocol	RTPS Protocol
MTP – Media Transfer Protocol	TCP/IP - Internet Protocol Suite
SFTP – Secure File Transfer Protocol	Bluetooth Protocol
SSL – Secure Socket Layer	WIFI/WIMAX Protocols

CAPÍTULO 2

ESTUDIO DEL TRÁFICO VEHICULAR EN INTERSECCIONES DE AVENIDAS DE LIMA METROPOLITANA

El presente capítulo tiene como finalidad identificar las intersecciones de avenidas con mayor carga vehicular en la ciudad de Lima Metropolitana y a partir esto reconocer los factores involucrados en la generación del tráfico vehicular en las intersecciones. Inicialmente se presenta de manera general el estado actual del tránsito en la ciudad haciendo uso de fotografías que muestran el nivel de congestión creado en las avenidas. Luego se realiza la identificación de las avenidas con mayor carga vehicular a partir del uso de Google Maps como herramienta para estudiar el nivel de tráfico en horas puntas. Finalmente, se presentan los resultados de un análisis que permite identificar los principales factores involucrados en la generación del tráfico en intersecciones de avenidas mediante el levantamiento de información en una de las avenidas previamente identificadas.

2.1 Estado actual del tránsito el Lima Metropolitana

El tránsito vehicular en la ciudad de Lima Metropolitana ha incrementado durante el paso de los años debido a diferentes factores. Especialmente durante las horas punta, una persona puede tardar en recorrer su ruta habitual en el doble de tiempo que le tomaría sin congestión vehicular. Para el ordenamiento del tránsito muchas veces se

instalan semáforos en las intersecciones de avenidas, por lo cual, actualmente se cuenta con 1200 intersecciones debidamente semaforizadas (Perú 21 2016), pero de las cuales solo el 27% se encuentran interconectadas a una central de monitoreo (La Republica 2014). Esto provoca que muchos de los semáforos operen con tiempos preestablecidos, los cuales no suelen funcionar correctamente durante las horas puntas y no aportan al ordenamiento del flujo vehicular. Por esta razón la Gerencia de Transporte Urbano (GTU) de la Municipalidad de Lima trabajan de manera coordinada con la Policía Nacional con la finalidad de que el personal policial apoye con el ordenamiento del tránsito específicamente en horas puntas (Perú 21 2016). Asimismo, existen otros factores que provocan las congestiones vehiculares, los cuales serán descritos a continuación.

En Lima Metropolitana, el transporte público es utilizado por más del 75% de personas, entre las cuales casi el 60% del total de personas hacen uso de buses y combis para transportarse (Lima Como Vamos 2015). Desafortunadamente, la gran mayoría de estos vehículos no respetan las normas de tránsito y muchas de sus acciones generan congestiones vehiculares. Por ejemplo, en la Figura 2.1 Figura 2. se puede observar la falta de organización de las combis al momento de recoger pasajeros, los cuales no respetan los paraderos autorizados y además suelen bloquear el paso de los vehículos que se encuentran en la parte posterior.



Figura 2.1: Congestión vehicular generada por el transporte público. [Fuente: El Comercio]

Asimismo, un 2% de personas hace uso de taxis como medio de transporte, pero el número de vehículos en la ciudad excede la demanda (Lima Como Vamos 2015). En gran parte, estos vehículos son otro factor que influye en la creación del tránsito vehicular. Esto se debe a que, en gran parte, no existen paraderos formales para el uso de taxis y estos se detienen en cualquier avenida para recoger pasajeros, lo cual provoca la interrupción del flujo de vehículos que se encuentran en la parte posterior. Además, en diferentes zonas de la ciudad es posible apreciar como gran número de taxis se estacionan en plenas avenidas esperando la llegada de pasajeros, tal como se muestra en la Figura 2.2. Esta situación aporta a la generación de tránsito debido a que los vehículos detenidos bloquean un carril de muchas de las avenidas, limitando la libre circulación.



Figura 2.2: Tránsito vehicular generado por taxis estacionados en paraderos no autorizados. [Fuente: El Comercio]

Otro factor que influye en el tránsito es la gran cantidad de vehículos que circulan por las vías de Lima Metropolitana. El número de automóviles en la ciudad ha llegado hasta los 2.6 millones en el 2016 y seguirá incrementando a una tasa mayor al 50% (Ministerio de Transportes y Comunicaciones 2013). Por esta razón, muchas veces las vías de transporte llegan a saturarse y no se cuentan con sistemas de semaforización o de ordenamiento que permitan la correcta circulación de los vehículos. Por ejemplo en la Figura 2.3 se muestra el estado de una avenida principal en donde se puede apreciar la cantidad de vehículos ocupando la totalidad de la vía.



Figura 2.3: Tránsito vehicular generado por la saturación de las vías. [Fuente: La Prensa]

La falta de educación vial que existe en gran parte de los conductores es otro factor que provoca la generación de tránsito en las vías. Esto se puede notar principalmente en las intersecciones en donde muchas veces la vía se encuentra congestionada y los vehículos avanzan hasta el punto de quedarse detenidos plena intersección. Esto genera que los autos que se encuentran en la vía perpendicular no puedan circular, creando muchas veces el inicio de las congestiones vehiculares. Por ejemplo en la Figura 2.4 se muestra un ejemplo de una congestión vehicular debido a que los automóviles quedan detenidos en mitad de la vía a pesar de la existencia de un semáforo en la intersección.



Figura 2.4: Congestión vehicular generada en una intersección de avenidas. [Fuente: El comercio]

A pesar de contar con intersecciones semaforizadas en muchas de las vías de la ciudad, durante las horas puntas estas no logran regular de manera eficiente el flujo de autos, ya que muchas veces a pesar de que la vía siguiente se encuentra congestionada el semáforo indica una luz verde para que sigan avanzando los automóviles. Aún con semáforos centralizados, estos no poseen un nivel de autonomía capaz de tomar decisiones en tiempo real para evitar que se permita la circulación por una vía congestionada. Por esta razón, durante las horas puntas se suelen asignar a agentes de la policía de tránsito en las principales avenidas para que pueda ordenar el flujo de vehículos, tal como se puede apreciar en la Figura 2.5.



Figura 2.5: Agente policial asignado para el ordenamiento del tránsito vehicular en una avenida principal. [Fuente: Publimetro]

Asimismo, existen otros factores que aportan en el incremento del tránsito vehicular en las avenidas. Por ejemplo, la ejecución de obras de construcción en muchas de las avenidas, el uso de las calles como estacionamientos y el tránsito de vehículos pesados en las vías principales (El Comercio 2014a) provocan que se reduzca la velocidad del flujo de vehículos para lo cual fueron diseñadas las vías y fueron programados los semáforos. Además, existen otros factores no previstos como la presencia de autos averiados o accidentes vehiculares que generan la interrupción del flujo vehicular, los cuales no pueden ser evitados, pero si pueden ser aliviados mediante la adquisición de información en tiempo real.

2.2 Identificación de principales avenidas con alta congestión vehicular

Una vez definido el estado actual del tránsito vehicular en la ciudad de Lima Metropolitana es necesario poder identificar las principales avenidas con alta congestión vehicular que tengan las características en donde podría ser utilizado el sistema a diseñar. Para esto se desarrolló una metodología que inicialmente defina las características de las vías de interés y que luego pueda analizar el estado del tránsito en horas punta e identificar las vías más congestionadas para ser posteriormente estudiadas.

Es necesaria la aplicación de esta metodología puesto que se cuenta con muy poca información actualizada sobre la congestión vehicular en las vías y especialmente porque se requiere identificar avenidas en donde pueda hacerse uso del sistema a desarrollar. El producto final de la aplicación de esta metodología permitió poder identificar avenidas con mayor congestión vehicular en diferentes distritos tal como se presentó en un informe de El Comercio desarrollado por la Policía de Tránsito en el año 2014 (El Comercio 2014b).

2.2.1 Metodología

La metodología que se aplicó para la identificación de avenidas con alta congestión vehicular fue desarrollada siguiendo los pasos descritos a continuación.

Paso 1: Definir las características de las vías en donde puede ser aplicado el sistema de control de tránsito. En este primer paso se busca definir todas las características necesarias para que el sistema a diseñar pueda ser aplicado correctamente.

Paso 2: Describir el uso de la herramienta Google Maps. En este paso se pretende describir las características de la herramienta que será utilizada para analizar el tráfico vehicular y las ventajas que se obtienen al usar la herramienta.

Paso 3: Analizar las vías con mayor congestión vehicular haciendo uso de Google Maps. Mediante este paso se busca observar y registrar la información del tráfico

vehicular en las diferentes avenidas ubicadas en los distritos de Lima Metropolitana durante las “horas puntas”.

Paso 4: Identificar las vías que pueden ser estudiadas para el diseño del sistema de control de tráfico. En el último paso se debe analizar la información recopilada anteriormente para poder identificar las vías con mayor congestión vehicular que cumplan con las características descritas inicialmente, dando como resultado final un listado de las vías identificadas en diferentes distritos.

2.2.2 Aplicación

De acuerdo a la metodología descrita previamente se ejecutó cada uno de los pasos para poder lograr la identificación de las avenidas con mayor congestión vehicular.

Paso 1. Definición de las características de las vías en donde puede ser aplicado el sistema de control de tránsito.

El sistema de control de tránsito que se plantea diseñar estará orientado a intersecciones de avenidas por lo que deberán tener las siguientes características:

- Intersección semaforizada.
- Intersección entre dos avenidas (de 1 o 2 sentidos) o entre una avenida de dos sentidos y una calle.
- Intersección de vías con flujo de vehículos particulares y públicos.
- Intersección con alto flujo vehicular.

Paso 2. Descripción del uso de la herramienta Google Maps.

La herramienta que se decidió utilizar para la identificación de las vías con mayor tráfico vehicular es Google Maps. Esta es una herramienta de libre acceso que puede ser utilizada desde internet y tiene la característica de mostrar el nivel de tráfico a diferentes horas y en diferentes días en todas las vías principales de la ciudad. Google Maps hace uso de información de GPS de los teléfonos celulares para poder

obtener la velocidad de desplazamiento de los vehículos y de esa manera es posible determinar el flujo de tránsito en las avenidas (Fan 2003) e incluso mostrar posibles incidentes en las vías (calles clausuradas, accidentes vehiculares, vías en construcción, etc.).

La Figura 2.6 muestra la interfaz de la herramienta Google Maps, la cual tiene activada la opción de tráfico. En esta interfaz se puede observar que todas las principales de la ciudad se encuentran identificadas con un código de colores los cuales se pueden observar en la Figura 2.7. Este código de colores tiene una escala que indica un color verde para un flujo vehicular rápido y color rojo oscuro para un flujo de vehicular lento, entre los cuales se encuentran dos colores adicionales (amarillo y rojo) para indicar flujos vehiculares intermedios.

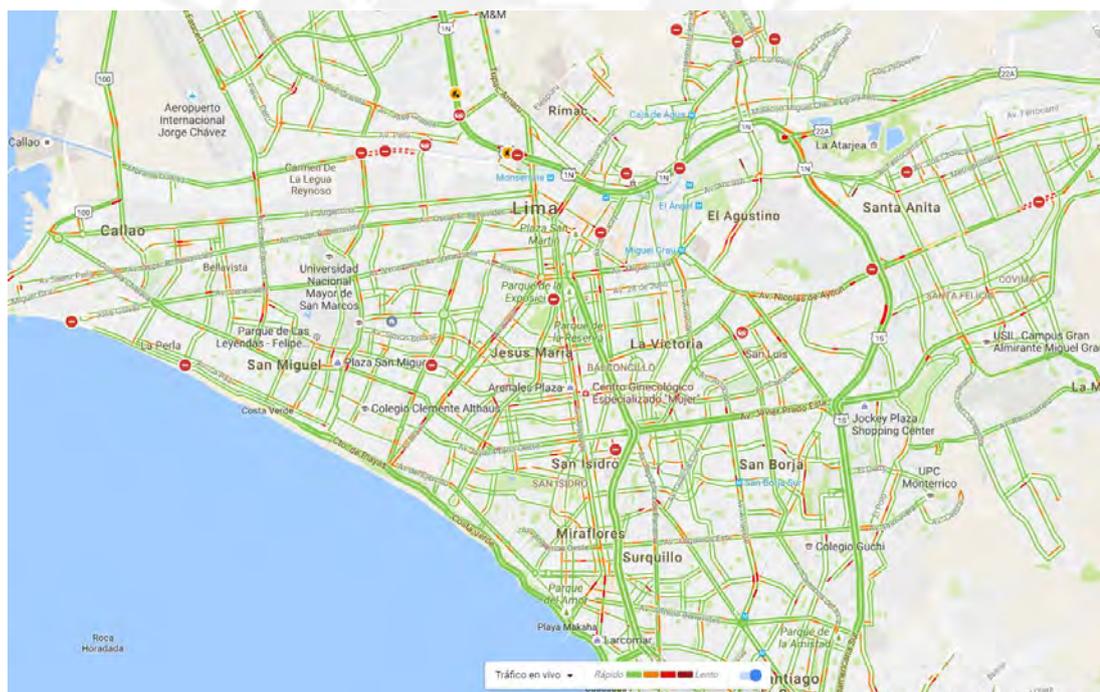


Figura 2.6: Interfaz de usuario de la herramienta Google Maps con visualización de tráfico

Además, la herramienta permite visualizar en tráfico en tiempo real (Figura 2.7.a) o visualizar el tráfico usual en diferentes horas de diferentes días de la semana (Figura 2.7.b). Esta característica es una de las principales razones por las que se decidió utilizar la herramienta de Google Maps, dado que haremos uso de la información del

tráfico usual durante diferentes días de la semana y en los horarios en los que hay mayor tráfico vehicular.

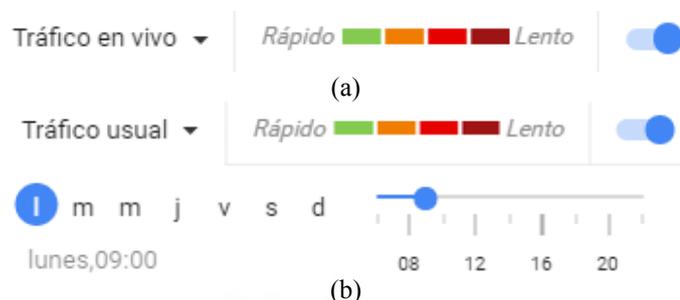
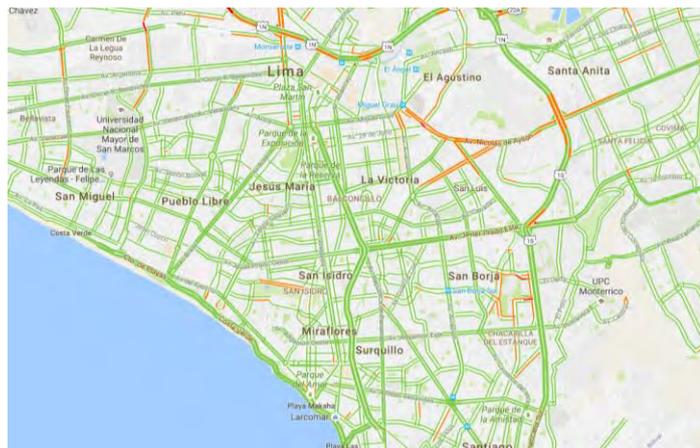


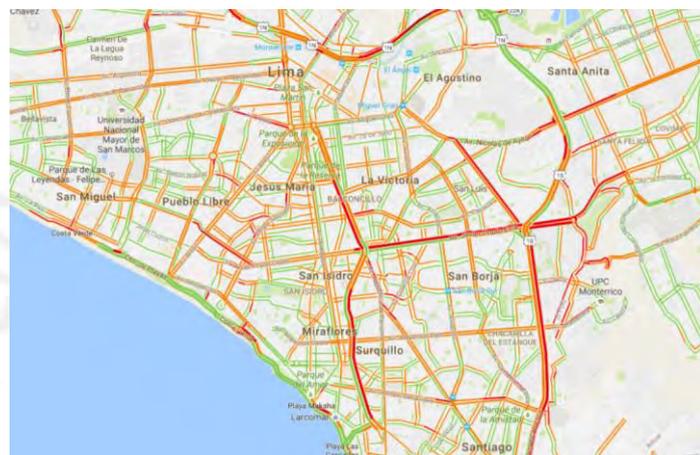
Figura 2.7: Opciones para la visualización de tráfico en Google Maps

Paso 3. Análisis de las vías con mayor congestión vehicular haciendo uso de Google Maps.

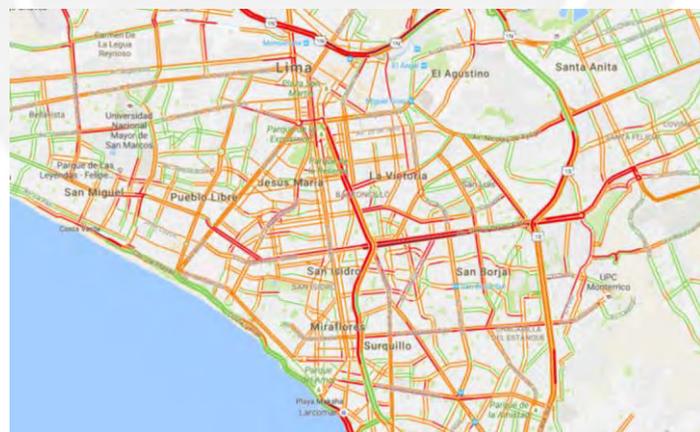
En primer lugar, es necesario poder determinar los rangos de horas en los cuales se presenta una mayor cantidad de tráfico vehicular. Para esto, haciendo uso de la herramienta Google Maps se analizó el estado de las avenidas a diferentes horas del día entre intervalos de 1 hora, tomando referencia el tránsito en un día viernes. El análisis realizado en detalle se muestra en el Anexo 1. Los resultados de este análisis determinaron que las horas con mayor congestión vehicular son entre las 08:00 – 10:00 y 18:00 – 20:00. En la Figura 2.8 se muestra la cantidad de flujo vehicular en horas con poco tráfico (Figura 2.8.a) y en horas con gran tráfico (Figura 2.8.b y Figura 2.8.c). En esta imagen es posible apreciar que durante las 19:00 horas el nivel de tráfico vehicular es aún mayor que durante las mañanas. Por esta razón para el posterior análisis se tomará como referencia este horario identificado.



(a)



(b)



(c)

Figura 2.8: Tráfico vehicular en Lima Metropolitana: (a) nivel de tráfico a las 06:00; (b) nivel de tráfico a las 8:00; y (c) nivel de tráfico a las 19:00

Paso 4. Identificación de las vías que pueden ser estudiadas para el diseño del sistema de control de tráfico.

Una vez identificado el horario con mayor congestión vehicular se procedió a analizar e identificar las intersecciones de avenidas con alto nivel de tráfico en 10 diferentes distritos de Lima Metropolitana. El análisis realizado en detalle se muestra en el Anexo 2. Los resultados obtenidos por este estudio se presentan en la Tabla 2.1. Esta tabla muestra un total de 43 intersecciones identificadas con alto nivel de tráfico en los distritos analizados. Estas 43 intersecciones cumplen con las características descritas en el paso 1 de esta metodología, por lo que cualquier de las opciones listadas en la tabla podrán ser analizadas para el diseño del sistema de control de tráfico.

Tabla 2.1: Registro de avenidas con alto nivel de tránsito vehicular en 10 distritos de Lima Metropolitana

Distrito	Intersecciones identificadas
Callao	Av. Oscar Benavides y Av. Elmer Faucett
	Av. Morales Duarez y Av. Elmer Faucett
	Av. Elmer Faucett y Av. Argentina
Jesús María	Av. Felipe Salaverry y Av. San Felipe
	Av. Felipe Salaverry y Av. F. Sanchez Carrión
	Av. F. Sanchez Carrión y Av. Gregorio Escobedo
La Victoria	Av. Miguel Grau y Av. Manco Cápac
	Av. Canadá y Av. Palermo
	Av. Canadá y Av. República de Panamá
	Av. Bausate y Meza y Jr. Huánuco
	Av. Argentina y Av. Alfonso Ugarte
	Av. Oscar Benavides y Av. Alfonso Ugarte
	Av. Bolivia y Jr. Washington
Lima	Av. 9 de Diciembre y Jr. Washington
	Av. 28 de Julio y Av. Brasil
	Av. Wilson (Av. Tacna) y Av. 9 de Diciembre
	Av. Wilson y Av. Bolivia
	Av. Wilson y Av. Nicolás de Piérola
	Av. 28 de Julio y Av. Paseo de la República
	Av. Paseo de la República y Av. Franklin D. Roosevelt
Lince	Av. Abancay y Av. Nicolás de Piérola
	Av. Felipe Salaverry y Av. Francisco Javier Mariátegui
	Av. Felipe Salaverry y Av. Cesar Canevaro
	Av. Arequipa y Calle Risso
Miraflores	Av. José Leal y Av. Arenales
	Av. Arenales y Jirón Domingo Cueto
	Av. Reducto y Av. 28 de Julio
Pueblo Libre	Av. José Larco y Calle Schell
	Av. Arequipa y Av. Angamos Este
	Av. Angamos Este y Av. Paseo de la República
San Borja	Av. La Marina y Av. Universitaria
	Av. Simón Bolívar y Av. Brasil
	Av. Guardia Civil y Av. Javier Prado Este
San Isidro	Av. San Luis y Av. Javier Prado Este
	Av. San Luis y Av. San Borja Norte
	Av. San Luis y Av. Primavera
	Av. Javier Prado Oeste y Av. F. Sánchez Carrión
	Av. Javier Prado Este y Av. Prolongación Iquitos

San Miguel
Av. Canaval y Moreyra y Av. Paseo de la República
Av. Elmer Faucett y Av. Venezuela
Av. La Marina y Av. José de la Riva Agüero
Av. Universitaria y Calle Mantaro
Av. Universitaria y Av. La Mar

2.3 Identificación de factores involucrados en el tráfico vehicular en intersecciones

Habiendo identificado las vías con mayor congestión vehicular en donde podría ser utilizado el sistema de control de tráfico, se debe seleccionar alguna de ellas para poder realizar un estudio de tránsito in situ con la finalidad de conocer el flujo vehicular e identificar los factores involucrados en la generación del tráfico. Los factores identificados mediante este análisis permitirán definir los requerimientos del sistema a diseñar por lo que es muy importante realizar este estudio para obtener un funcional diseño del sistema de control de tránsito.

2.3.1 Metodología

La metodología aplicada para la identificación de los factores involucrados en el tráfico vehicular en intersecciones será desarrollada siguiendo los pasos descritos a continuación.

Paso 1: Definir los parámetros a analizar. La aplicación del primer paso permitirá dar a conocer los parámetros que interesan analizar. De esta manera se podrá realizar de forma orientada la toma de información.

Paso 2: Tomar información en avenidas con congestión vehicular. En este paso se busca realizar un levantamiento de información de dos de las avenidas identificadas previamente en la Tabla 2.1. Para esto se tomarán fotografías y video del estado del tráfico de las avenidas, además de registrar la información que permita cuantificar los parámetros definidos previamente.

Paso 3: Analizar la información recolectada de las avenidas. Este siguiente paso permitirá procesar la información de las avenidas con el fin de obtener tablas con valores cuantitativos de los parámetros definidos en el paso 1. Además, se espera poder identificar parámetros cualitativos que influyen en la generación del tránsito vehicular.

Paso 4: Describir y definir las consideraciones para el diseño del sistema. Este último paso tiene como finalidad el lograr obtener las principales características que se deben considerar para el diseño del sistema desde el punto de vista de las características del tráfico vehicular.

2.3.2 Aplicación

De acuerdo a la metodología previamente descrita se ejecutó cada uno de los pasos a fin de identificar los factores involucrados en el tráfico vehicular en intersecciones.

Paso 1: Definición de los parámetros a analizar.

Los parámetros a analizar durante el levantamiento de información serán cuantitativos y cualitativos. Los parámetros cuantitativos serán aquellos que permitirán poder definir las características del flujo vehicular y de la intersección al momento de realizar las simulaciones para verificar el funcionamiento del sistema (Alcalá 2016). Por otra parte, los parámetros cualitativos, serán aquellos que permitirán definir las consideraciones del sistema ya que al no ser cuantificables podrán brindar una mejor perspectiva de los problemas que generan las congestiones vehiculares en las intersecciones.

Los parámetros cuantitativos que serán analizados se listan a continuación:

- **Fases de semáforos:** Se registran las fases de operación de todos los semáforos instalados en la intersección durante la hora de estudio.
- **Longitud de cola:** Se registran la longitud de cola generada por los autos detenidos en una vía durante la fase de semáforo rojo.
- **Aforo vehicular:** Se registran el número de autos que circular a través de la intersección y la dirección a la cual se dirigen.

Paso 2: *Levantamiento de información en avenidas con congestión vehicular*

Una vez que se conoce los parámetros que se deben analizar mediante el estudio, se procede a definir las avenidas que serán utilizadas como caso de estudio. Para esto, primero se seleccionarán dos de las avenidas identificadas en la Tabla 2.1, las cuales serán los casos de estudio. Por cuestiones de facilidad para el acceso y de levantamiento de información se decidió analizar dos intersecciones ubicadas en el distrito de Lince. Las intersecciones seleccionadas son Av. Arenales cruce con Jirón Domingo Cueto y Av. José Leal cruce con Av. Arequipa.

La Figura 2.9 muestra las dos intersecciones que serán estudiadas. En la primera de estas (Figura 2.9.a) se puede apreciar que se trata de una intersección de dos avenidas de un solo sentido, mientras que en la segunda (Figura 2.9.b) es una intersección de una avenida de doble sentido con una avenida de un sentido. El levantamiento de la información en ambas intersecciones se realizó durante los días 06 y 09 de diciembre del 2016 durante la hora de mayor tráfico vehicular definido en la sección anterior (19:00). Para la toma de datos se hizo uso de fotografías de la zona estudiada, videos de las vías en la intersección y registros manuales. El registro de información se realizó por un periodo de 30 minutos en cada intersección.

El registro fotográfico recopilado durante el levantamiento de información, así como también el detalle de la adquisición de los datos se muestra en el Anexo 3.

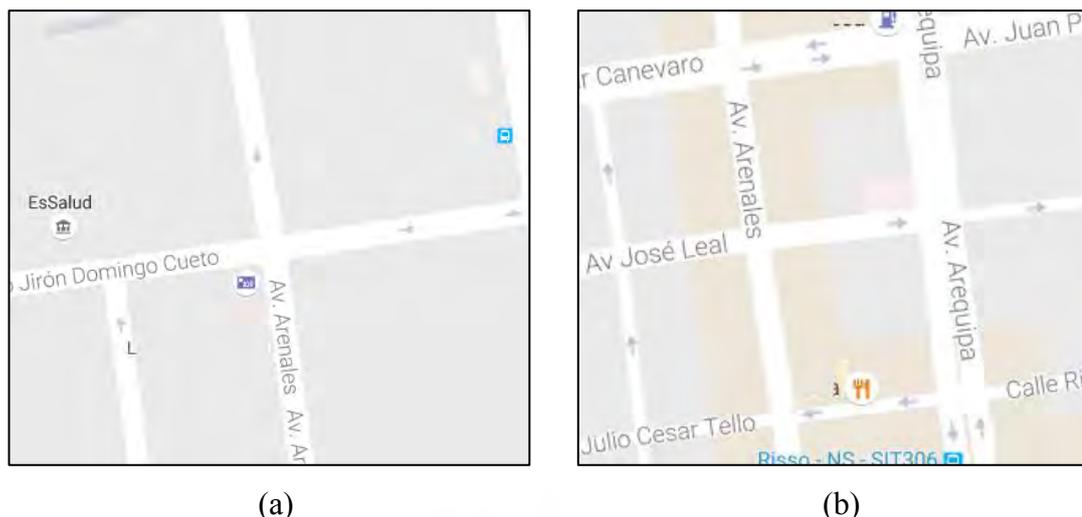


Figura 2.9: Intersecciones seleccionadas para el levantamiento de información: (a) Av. Arenales cruce con Jirón Domingo Cueto; y (b) Av. José Leal cruce con Av. Arequipa

Paso 3: Análisis de la información recolectada de las avenidas

La información adquirida en las dos intersecciones estudiadas fue analizada y procesada con la finalidad de cuantificar tres parámetros cuantitativos relacionados con el tránsito vehicular: fase de semáforos, longitud de cola y aforo vehicular. Estos parámetros fueron obtenidos con la finalidad de poder ser utilizados para posteriores simulaciones y tener una referencia de la cantidad de vehículos que circulan por una avenida en hora punta. En la primera intersección se logró observar que circularon un total de 1327 vehículos durante media hora y se logró registrar una longitud de cola máxima de 90 metros. Por otra parte, en la segunda intersección se registró un total de 1015 vehículos que circularon por intersección y se observó una longitud de cola máxima de 55 metros.

Además, durante el análisis de la información se buscó identificar algunos factores cualitativos (no cuantificables) que provocan la generación de tránsito vehicular en las intersecciones. Algunos de los factores principales factores identificados fueron: vehículos detenidos en lugares no autorizados, uso indebido de carriles al girar, semaforización incorrecta para el giro de avenidas principales, no se cuenta con fase de semáforo exclusiva para peatones y vehículos detenidos en medio de intersecciones.

El detalle del análisis de la información realizado en este paso se presenta en el Anexo 4, en donde se muestra cada uno de los parámetros estudiados.

Paso 4: Descripción de las principales consideraciones para el diseño del sistema

Luego de los resultados obtenidos por los factores y parámetros analizados es posible describir las principales consideraciones relacionadas con el tráfico que debe cumplir el sistema a diseñar. Estas consideraciones permitirán poder estructurar los requerimientos del sistema mecatrónico en el siguiente capítulo. A continuación, se listan y describen las principales consideraciones que se deben tomar en cuenta:

- ***Evitar autos detenidos en la intersección***: El sistema por diseñar debe ser capaz de poder determinar el tiempo óptimo el que debe cambiar el estado del semáforo con la finalidad de evitar que los vehículos queden detenidos en medio de la intersección.
- ***Dar prioridad a la vía con mayor longitud de cola***: El sistema debe poder determinar un tiempo de fase proporcional a la longitud de cola en cada vía con la finalidad de evitar la saturación de alguna de las vías en la intersección.
- ***Evitar cambios repentinos entre fases***: El sistema debe considerar un tiempo de retardo al realizar un cambio de las fases con la finalidad de evitar cambios bruscos que conlleven a posibles accidentes.
- ***Considerar fases para el giro de vehículos***: El sistema debe incluir fases adicionales para el giro de vehículos en caso de ser permitido en la intersección, ya que de esta manera se puede evitar la obstaculización de las vías por vehículos que desean girar.
- ***Brindar una fase exclusiva para peatones***: El sistema debe tomar en cuenta una fase exclusiva para la circulación de los peatones, durante la cual no circulen vehículos.

2.4 Validación de factores involucrados en el tránsito vehicular

La validación de los factores involucrados en el tránsito vehicular se realiza mediante el uso del software para el análisis del tráfico PTV Vissim. Se decidió utilizar el

software Vissim puesto a que ofrece la capacidad de modelar una intersección con características similares a las de una intersección real, es decir, permite modificar el número de carriles, la dirección de las vías, las rutas de movimiento de los autos (continuo o con giros), la velocidad de desplazamiento de autos y buses, los periodos de operación de semáforos y diseñar semáforos complejos con comportamiento específico. En ese software se simuló el comportamiento del tráfico con un sistema convencional con el fin de validar el planteamiento de operación del algoritmo de control, para lo cual se hace uso de la información recolectada en el estudio de tráfico vehicular.

Las simulaciones se realizaron en dos etapas. Primero, se simuló un sistema convencional con tráfico regular para verificar el funcionamiento del software y los parámetros recolectados en el estudio del tráfico. Luego, se puso a prueba un sistema convencional con tráfico intenso con el fin de identificar mediante software los principales factores de congestión generados en una intersección con un sistema de semáforos semafórico convencional.

2.4.1 Comportamiento regular del tráfico con semáforo temporizado

La primera simulación realizada se enfoca en verificar el comportamiento de un sistema de semáforos convencionales antes el tráfico regular. Para esto fue necesario implementar en el software Vissim el modelo virtual de una intersección ingresando las características físicas y los parámetros de tránsito vehicular. Se decidió hacer uso de la intersección de las Av. Arequipa y del Jr. Risso, la cual es una intersección Tipo 2 y se cuenta con toda la información requerida por el software.

Dado que el software ofrece la posibilidad de hacer uso de un mapa referencial de la zona de estudio, las distancias de las avenidas se tuvieron que definir. Solo se tuvo que ingresar que el jirón se trata de una vía de dos carriles en un solo sentido, mientras que la avenida es una vía dos carriles en un sentido y dos en sentido opuesto. Además en el software fue necesario indicar las rutas de ingreso de los vehículos y las rutas de dirección, en donde se debió definir si es los vehículos pueden solo avanzar en el cruce de las vías o si es posible su giro a la derecha o

izquierda. En el Anexo 5 se presenta las principales características de la intersección definidas en el software para la simulación desarrollada.

Con respecto a los parámetros del comportamiento de los vehículos y de los semáforos, se tuvo que hacer uso de la información recolectada en el estudio del tránsito vehicular que se presentó en la subsección anterior y en el Anexo 4. A partir de esta información fue posible definir los tiempos de operación de los semáforos verdes en cada una de las vías, la cantidad de flujo de vehículos y el porcentaje de vehículos que giran en la intersección. Además fue necesario definir la velocidad de desplazamiento de los vehículos, por lo que se tomó como referencia las velocidades máximas permitidas en las vías metropolitanas (SUTRAN 2014) considerando un factor de reducción del 50% debido a que durante el estudio de tránsito realizado se observó que los vehículos no llegaban a la velocidad máxima permitida debido a las constantes paradas que debían realizar. En la Tabla 2.2 se presentan los parámetros considerados para la simulación del comportamiento del tráfico vehicular regular.

Tabla 2.2: Parámetros considerados para la simulación del comportamiento del tráfico

Parámetros	En Avenida Arequipa	En Jirón Risso
Tiempo de semáforo verde (seg)	77	45
Flujo de automóviles (veh/h)	Norte a Sur: 515	756
	Sur a Norte: 580	
Flujo de buses (bus/h)	Norte a Sur: 33	48
	Sur a Norte 38	
Porcentaje de veh. que giran a la derecha (%)	20	13
Porcentaje de veh. que giran a la izquierda (%)	29	10
Velocidad de autos (km/h)	30	25
Velocidad de buses (km/h)	20	15

La simulación se ejecutó por un periodo de 600 segundos (con una aceleración x10) y se realizó una captura de pantalla para obtener un video del procedimiento. Los resultados obtenidos se pueden visualizar en la Figura 2.10 y en el Anexo 6¹. La figura muestra la circulación de los vehículos con tráfico regular a través de la intersección desde una perspectiva 2D (Figura 2.10.a) y una perspectiva 3D (Figura 2.10.b). En ambas imágenes se pueden apreciar que no se genera congestión en la

¹ El Anexo 6 presentan dos videos de la simulación, los cuales solo se pueden visualizar en el formato digital.

intersección y más bien los vehículos circulan de forma ordenada con el uso de los semáforos temporizados.

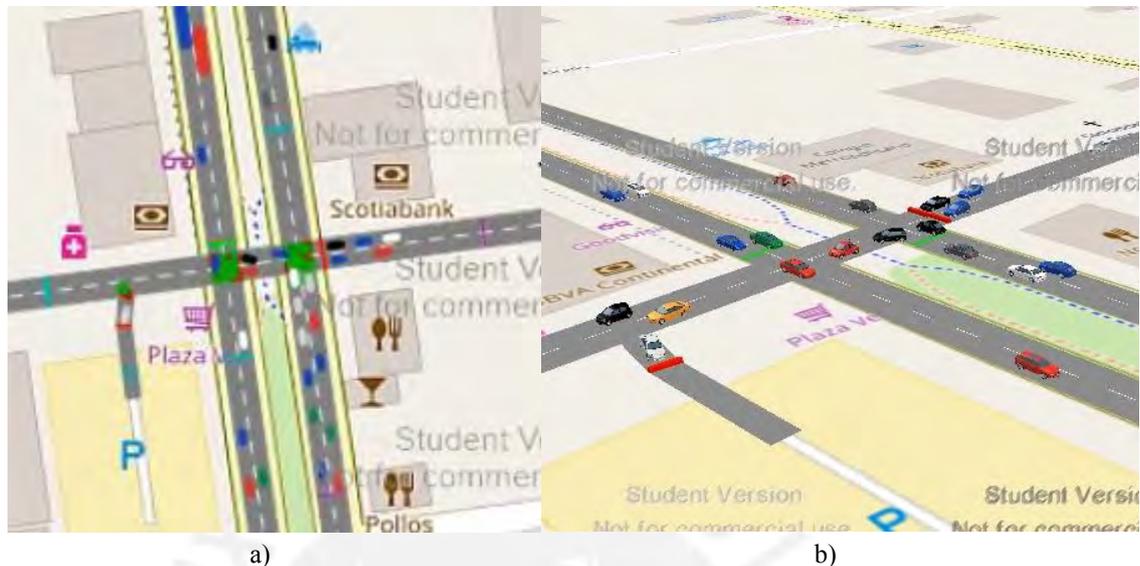


Figura 2.10: Simulación del comportamiento de una intersección convencional con tráfico regular. a) Visualización 2D, y b) Visualización 3D

2.4.2 Comportamiento intenso del tráfico con semáforo temporizado

La segunda simulación se realizó para identificar los factores de congestión generados por un sistema de semáforos temporizado. Para esto se utilizó el mismo modelo implementado en el software para la primera simulación pero aplicando un nivel de tráfico intenso. La diferencia fue que se modificó el parámetro de flujo de vehículos por un valor del doble del indicado en la Tabla 2.2, con la finalidad de poder apreciar las consecuencias provocadas en la intersección y en las vías aledañas. Al utilizar el doble de valor del flujo de vehículos se busca garantizar el congestionamiento de las vías, lo cual puede ocurrir en la vida real debido a factores no considerados en la simulación como paraderos de buses, paraderos de taxis, vehículos detenidos, carriles clausurados, reductores de velocidad, etc.



Figura 2.11: Simulación del comportamiento de una intersección convencional con tráfico intenso. a) Visualización 2D, y b) Visualización 3D

La simulación se ejecutó por un periodo de 1200 segundos (con una aceleración $\times 10$) y se realizó una captura de pantalla para obtener un video del procedimiento. Los resultados obtenidos se pueden visualizar en la Figura 2.11 y en el Anexo 7². La figura muestra la circulación de los vehículos con tráfico intenso a través de la intersección desde una perspectiva 2D (Figura 2.11.a) y una perspectiva 3D (Figura 2.11.b).

Los resultados de esta simulación demostraron que el uso de un sistema de semáforos temporizados en la provoca la generación de tráfico vehicular, llegando a afectar las intersecciones aledañas. En la Figura 2.12 se presenta un ejemplo de las consecuencias provocadas por el uso de semáforos temporizados. En la imagen se identifican 3 factores que provocan la congestión vehicular.

² El Anexo 7 presentan dos videos de la simulación, los cuales solo se pueden visualizar en el formato digital.

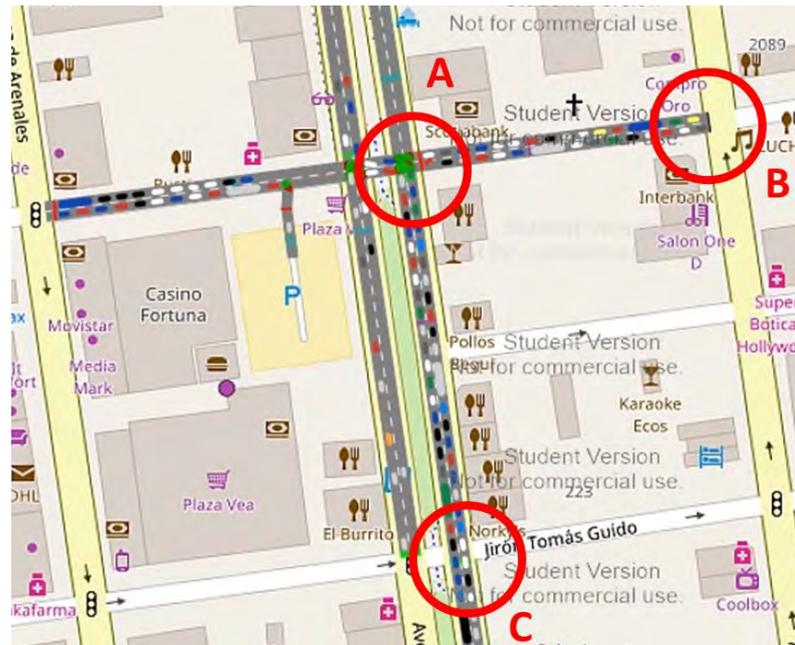


Figura 2.12: Factores de congestión identificados durante la simulación

El primer factor, identificado con la letra A, se trata de los vehículos que intentan girar hacia la izquierda en una vía de dos sentidos obstaculizan la circulación de los otros autos debido a que se quedan detenidos en plena intersección esperando tener oportunidad para cruzar la vía. Por consecuencia del primer factor, se puede observar que las intersecciones aledañas también se quedan obstruidas en las zonas identificadas con la letra B y C. Esto último se genera ya que los autos observan el semáforo en color verde, pero delante de ellos la vía está obstruida, lo cual provoca que de esta manera desde una intersección analizada se puede ir esparciendo la congestión vehicular hacia múltiples avenidas aledañas.

Estos factores identificados permiten definir la estrategia de control que será utilizada para el desarrollo del algoritmo del controlador, buscando principalmente evitar que vehículos queden detenidos en medio de una intersección. Para esto, el funcionamiento del algoritmo será planteado de tal manera que mediante la detección de la posibilidad de obstrucción de la intersección, el controlador modifique los estados de operación de los semáforos y a la vez envíe señales a las intersecciones inmediatamente aledañas para que puedan modificar sus estados y permitan el flujo de vehículos en las vías congestionadas. De esta manera el controlador tendría como finalidad evitar la ocurrencia de los tres factores de tránsito identificados en la Figura 2.12.

CAPÍTULO 3

SISTEMA AUTÓNOMO DE CONTROL DE TRAFICO

El tercer capítulo describe de manera general al sistema autónomo de control de tráfico que ha diseñado en la presente tesis. En primer lugar, se presentan los objetivos del trabajo, entre los que se encuentran los objetivos principales, objetivos secundarios, alcances, resultados esperados e impactos. Posteriormente, se realiza una descripción detallada de las principales características de un sistema de control de tráfico detallando todos los elementos que lo componen y la interacción entre cada uno de estos. Finalmente se describe la forma en cómo se realiza la comunicación entre cada uno de los sistemas.

3.1 Objetivos del trabajo

Objetivo General

Diseñar un sistema autónomo de control de tráfico vehicular para intersecciones de avenidas que cuente con un sistema de comunicación inalámbrico para la transmisión de información en tiempo real a sistemas ubicados en intersecciones aledañas

Objetivos Específicos

- o Identificar los principales parámetros involucrados que generan el tráfico vehicular en intersecciones de avenidas
- o Presentar el diseño integral considerando los componentes requeridos para la implementación del sistema de control de tráfico vehicular autónomo.
- o Desarrollar un algoritmo de control autónomo que utilice la información del tráfico de las intersecciones en tiempo real

Alcances

La presente tesis estará enfocada en el diseño de un sistema de control de tránsito vehicular autónomo, para el cual se estudiará el estado de congestión vehicular en intersecciones de avenidas en ciudades como Lima Metropolitana y que podrá ser replicado a ciudades Latinoamericanas con similares características. Además, el sistema tendrá en cuenta que el comportamiento de los conductores de la ciudad de Lima no siempre está de acuerdo a las normas de tránsito, por lo que se incluirá el efecto de estos comportamientos en la lógica de control. Asimismo, se pretende integrar un sistema de transmisión inalámbrico con el fin de enviar información en tiempo real a los sistemas inmediatamente aledaños aledaños para que la data sea considerada en la toma de decisiones del sistema de hasta 2 esquinas próximas (una antes y una después de la intersección).

Resultados Esperados

- o Estudio de identificación de los parámetros involucrados en el tráfico vehicular en intersecciones de avenidas
- o Diseño eléctrico y mecánico de un sistema de control de tránsito vehicular que contemple un sistema de comunicación inalámbrico, incluyendo la selección de componentes, planos de conexiones eléctricas y planos de ensamblaje mecánicos.
- o Algoritmo de control autónomo que utiliza información del tránsito en tiempo real de intersecciones de avenidas.

Impactos

Con la implementación del sistema planteado se espera aliviar y mejorar el estado actual del tráfico vehicular en las avenidas, especialmente en horas de mayor circulación de autos. En cuestiones de impactos económicos, mediante la implementación de estos sistemas se reduciría el tiempo que toma a las personas en trasladarse, lo cual incurriría directamente en la reducción de las horas hombre pérdidas durante las congestiones vehiculares y en el gasto de combustible de los automóviles. Asimismo, esto influiría directamente como un impacto ambiental al reducir las emisiones de los gases generados por los vehículos al acortar el tiempo de uso de los autos.

Por otra parte, como el sistema forma parte de una línea de investigación poco estudiada en el Perú, este trabajo marcaría un punto de inicio para un mayor desarrollo de temas relacionados con estudios del tráfico vehicular y el desarrollo de sistemas inteligentes que permitan aliviar el tráfico vehicular. Además, al agregar un sistema de comunicación inalámbrico se abre la posibilidad de poder desarrollar a futuro la integración de este sistema con vehículos autónomos para que puedan aportar información adicional para el establecimiento de los tiempos óptimos de los estados del semáforo.

3.2 Características principales del sistema

Para el sistema autónomo de control de tránsito a diseñar, se denomina “sistema integrado” a la unión del controlador y subcontrolador diseñado en la presente tesis con un sistema semafórico convencional y un sistema de adquisición de parámetros del tráfico (SAPT). El sistema semafórico convencional está conformado por un poste de semáforo para cada vía, un juego de cuatro lámparas LED vehiculares (verde, ámbar, rojo y direccional), un juego de tres lámparas LED vehiculares (verde, ámbar y rojo) y dos juegos de dos lámparas LED peatonales (ámbar y rojo). Los postes de semáforo pueden ser del tipo individual y del tipo doble, en los cuales los

primeros incluyen todos los componentes descritos anteriormente en un poste para la vía (ver Figura 3.1.a), mientras que los segundos contienen el doble de componentes y son utilizados para dos vías (ver Figura 3.1.b). Finalmente, el sistema de adquisición de parámetros del tráfico se trata de un dispositivo adicional diseñado de forma independiente que tiene como finalidad obtener información den tránsito en tiempo real. Este sistema es descrito a detalle posteriormente en esta sección.

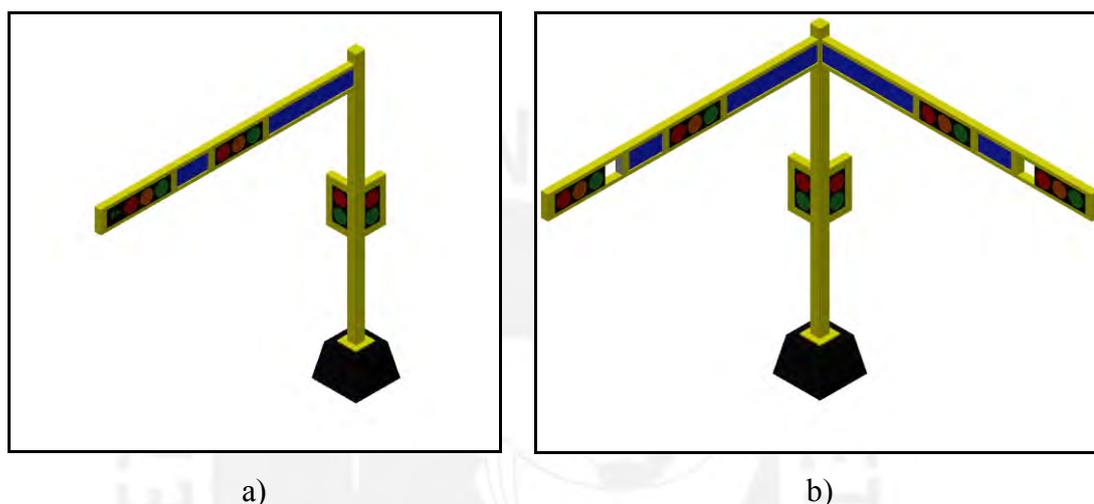


Figura 3.1: Sistemas semafóricos convencionales en la ciudad de Lima Metropolitana: a) semáforo individual y b) semáforo doble

De acuerdo a lo descrito anteriormente los principales componentes de un sistema integrado serían el controlador, el subcontrolador, el poste de semáforo, las lámparas vehiculares, las lámparas peatonales y el sistema de adquisición de parámetros del tráfico. En la Figura 3.2 se puede observar la disposición de estos componentes instalados en un sistema integrado. En el gráfico se puede observar que el controlador o subcontrolador se encuentra atornillado al poste del semáforo por encima de la ubicación de las lámparas peatonales, mientras que el sistema de adquisición de parámetros se ubica en la parte superior del poste del semáforo.

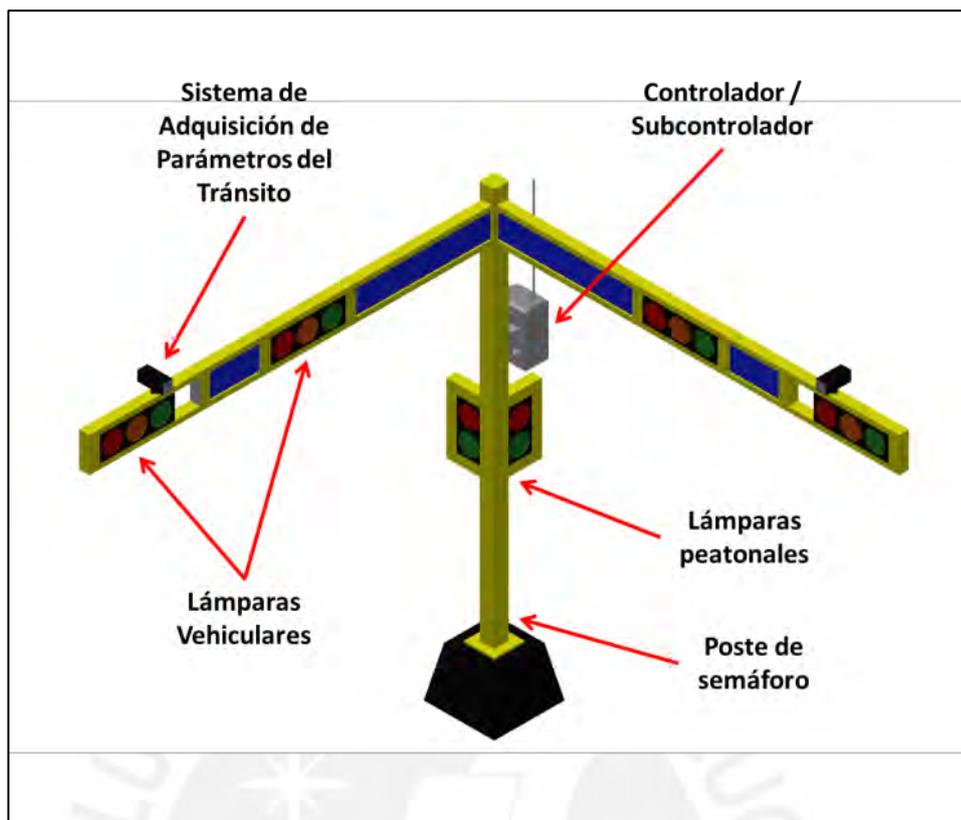


Figura 3.2: Componentes de un sistema integrado

De acuerdo al tipo de intersección también se cuenta con una diferente disposición de los componentes que conforman un sistema integrado. La intersección del Tipo 1 solo requieren de la instalación de un controlador a un poste semafórico doble y dos sistema de adquisición de parámetros, tal como se muestra en la Figura 3.3.a. Por otra parte, la intersección Tipo 2 requiere de la instalación de un controlador principal en un semáforo doble, un subcontrolador en un semáforo individual y tres sistemas de adquisición de parámetros, tal como se aprecia en la Figura 3.3.b. Finalmente, la intersección Tipo 3 requiere de la instalación de un controlador principal instalado en un semáforo individual, tres subcontroladores instalados en semáforos individual y cuatro sistemas de adquisición de parámetros en cada semáforo individual, tal como se puede observar en la Figura 3.3.c.

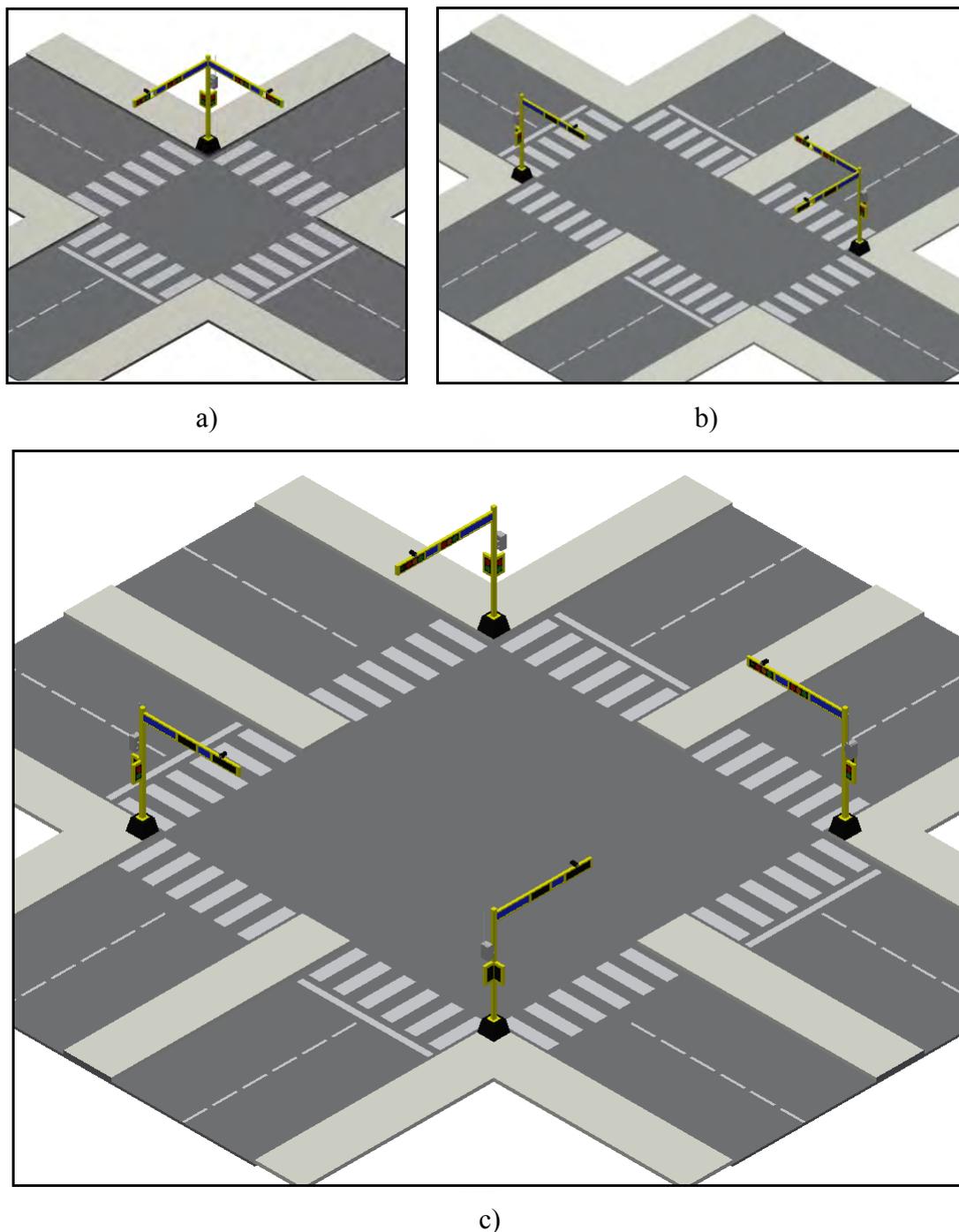


Figura 3.3: Integración de un sistema para cada tipo de intersección: a) Tipo 1, b) Tipo 2 y c) Tipo 3

El sistema de adquisición de parámetros del tránsito, el cual será denominado SAPT en lo que resta del documento, es un dispositivo que no se ha tratado en la presente tesis dado que ha sido diseñado de manera individual (Vilchez 2017). Este dispositivo ha sido diseñado con la finalidad de poder adquirir información del tráfico y ser procesada en tiempo real con la finalidad de obtener parámetros relevantes de la intersección, como lo son la presencia de vehículos en las vías, la

velocidad promedio de desplazamiento y el aforo vehicular. El sistema diseñado es instalado sobre la parte superior de un poste de semáforo y cuenta con dos cámaras que apuntan a los dos sentidos de cada vía con la finalidad de adquirir en tiempo real la señal de video de lo que ocurre en la intersección. Luego este video es procesado con un controlador interno a fin de obtener los parámetros del tráfico de cada vía y enviarlos mediante una red inalámbrica de WiFi al controlador principal o a los subcontroladores del sistema integrado.

A fin de poder representar la interacción de todos los elementos de un sistema autónomo de control de tráfico se presenta en la Figura 3.4 el diagrama de bloques del sistema para una intersección Tipo 3. En este diagrama se puede observar que cada controlador/subcontrolador recibe información de dos SAPTs, y recibe y envía señales eléctricas a los semáforos vehiculares y peatonales. Además los tres subcontroladores presentes en la intersección se comunican de forma inalámbrica con el controlador principal enviando y recibiendo data de manera bidireccional.

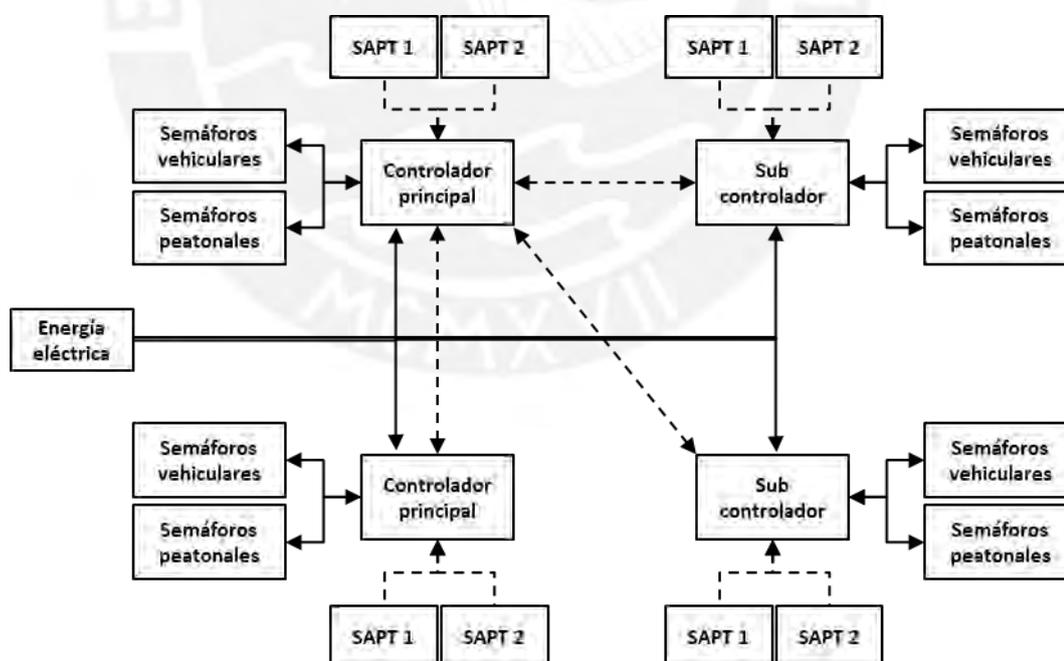


Figura 3.4: Diagrama de bloques del sistema para una intersección Tipo 3

3.3 Comunicación entre sistemas

Otro aspecto importante del sistema es que para su correcta operación requiere de información proporcionada por otros sistemas instalados en intersecciones aledañas. Por tal motivo es importante describir la denominación de los sistemas y la manera en cómo se tratará la información de los sistemas aledaños a fin de ser procesada en el sistema analizado. Toda la información compartida entre sistemas será obtenida a través de una base de datos.

Dado que la información de los sistemas aledaños estará disponible para cualquiera de los sistemas, es importante mencionar la denominación que se da a cada sistema aledaño. Por tal motivo, en la Figura 3.5 se muestra un diagrama que permite conocer la denominación de cada uno de estos. En esta figura es posible apreciar que al centro se encuentra el sistema analizado, el cual corresponde al controlador principal de cada una de las intersecciones que optimizará los tiempos del semáforo. Además se aprecian cuatro sistemas aledaños denominados de acuerdo a su ubicación (Este, Oeste, Norte y Sur), los cuales ofrecen información de interés para la operación del controlador principal.

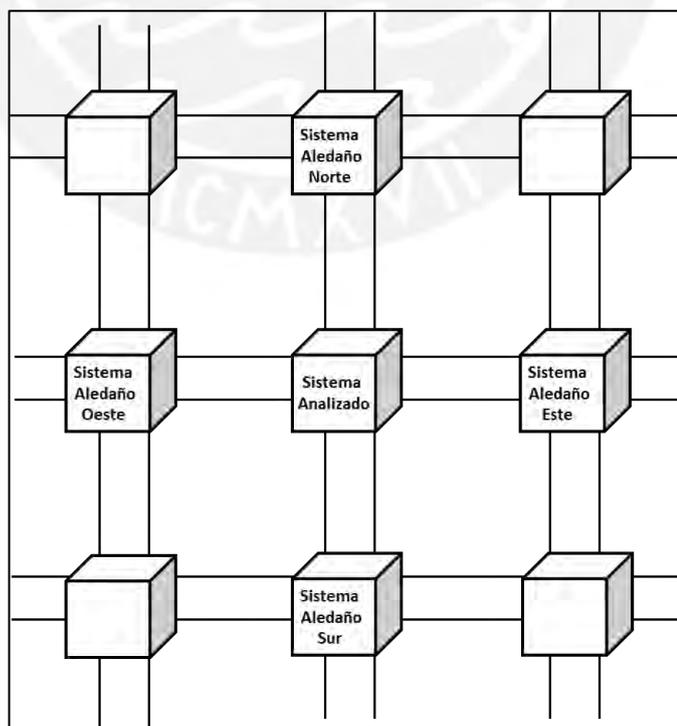


Figura 3.5: Denominación de sistemas aledaños para intercomunicación

La denominación de estos sistemas será considerada para el código de programación de cada controlador principal instalado en una intersección. En este código se tendrán cuatro variables definidas como: *Sistema_Norte*, *Sistema_Sur*, *Sistema_Este* y *Sistema_Oeste*. A estas variables se les asigna el código de identificación (ID) del sistema aledaño descrito en la sección 6.2.1 del Capítulo 6. De esta manera, el sistema podrá acceder a la base de datos a través del ID y leer la información de interés para la operación del semáforo.

La información proporcionada por los sistemas aledaños son los estados de operación de los semáforos instalados en la vía que se une con el sistema analizado. Además también se hace uso de la información proporcionada por los sistemas que permiten conocer la presencia de vehículos detenidos en las vías aledañas. Por otra parte, el sistema analizado también envía la información de sus estados de operación dado que ésta información es utilizada por algún otro sistema aledaño.

El diagrama de comunicaciones de los sistemas se presenta en la Figura 3.6. Este diagrama presenta los 5 sistemas que se tendrían en consideración para el análisis de una intersección Tipo 3. Cada sistema cuenta con un controlador principal y tres subcontroladores, tal como se observó en la subsección anterior, y estos se comunican entre sí mediante una red WiFi privada para cada sistema. El controlador principal del sistema analizado, se comunica con los controladores principales de los cuatro sistemas inmediatamente aledaños (Norte, Sur, Este y Oeste) vía conexión WiFi. Además se puede notar que todos los controladores principales se comunican de forma bidireccional con una Base de Datos general, mediante una comunicación del tipo 3G/4G. Por último, mediante una interfaz de monitoreo es posible acceder a la información de la Base de Datos a fin de poder visualizar los estados de operación de cada sistema y configurar la información necesaria para la operación.

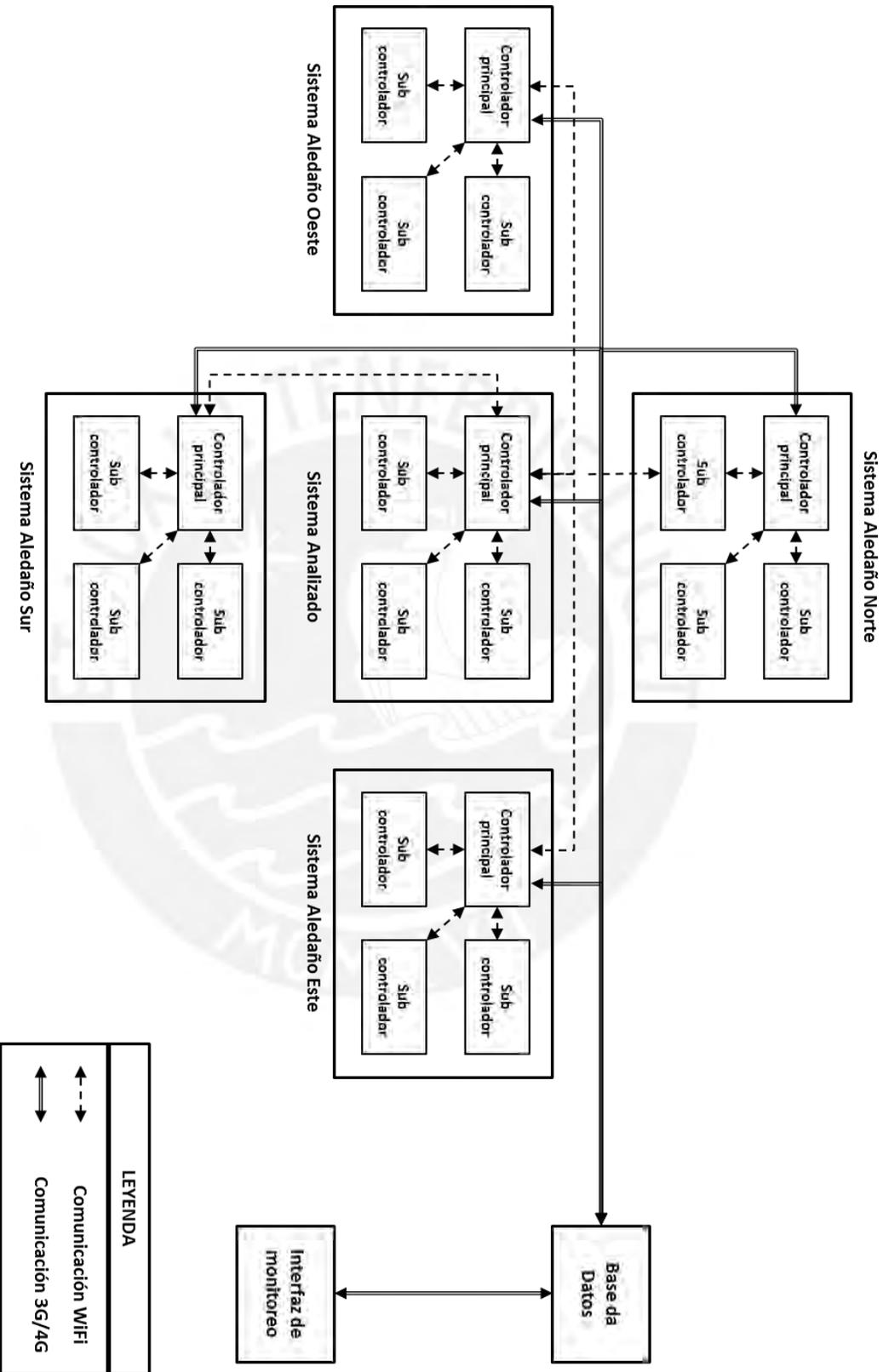


Figura 3.6: Diagrama de comunicaciones del sistema para intersecciones del Tipo 3

CAPÍTULO 4

DISEÑO DEL CONTROLADOR DEL SISTEMA

El cuarto capítulo está enfocado en el diseño del controlador a cargo del ordenamiento del tránsito vehicular en una intersección. Inicialmente se definen todos los requerimientos necesarios que serán utilizados para el diseño del sistema, incluyendo los componentes mecánicos, electrónicos y de control. Luego se procede a seleccionar el sistema de transmisión inalámbrico que será utilizado para intercomunicar los controladores y para poder recibir y transmitir la información necesaria de las vías de la intersección. Además, se seleccionan todos los componentes necesarios que serán incluidos en el controlador. Por último, se presenta el diseño electrónico y el diseño mecánico del controlador, lo cual incluye los planos eléctricos, esquemáticos, planos de despiece y planos de ensamblaje.

4.1 Requerimientos del controlador

En esta sección se describen todos los requerimientos que se deben tomar en cuenta para el diseño del controlador de sistema. Estos requerimientos son considerados a partir del análisis del estado actual del tránsito, de los resultados obtenidos por el estudio del tránsito realizado en el capítulo anterior y de la problemática que se desea

solucionar mediante el desarrollo de la tesis. Asimismo, en la Figura 4.1 se muestra un diagrama en donde se definen las entradas y salidas del controlador con la finalidad de brindar un mejor entendimiento del funcionamiento.

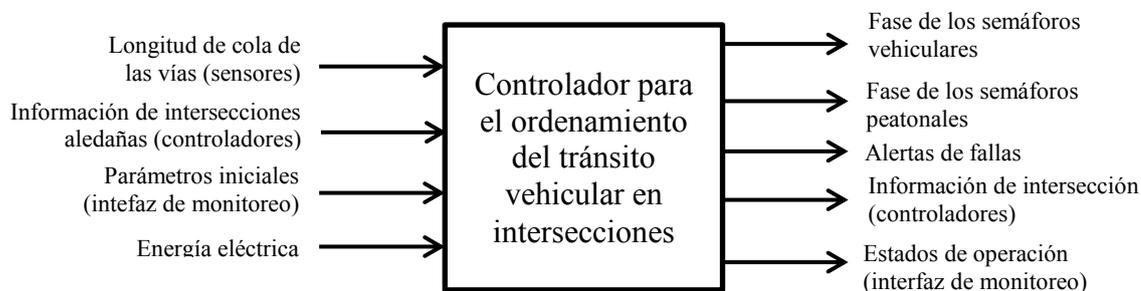


Figura 4.1: Diagrama de entradas y salidas del controlador del sistema

Requerimientos electrónicos

- Recibir de manera inalámbrica la información de dos sistemas SAPT determinando la longitud de cola de las vías.
- Transmitir y recibir de manera inalámbrica datos de otros controladores.
- Transmitir y recibir de manera inalámbrica información de una interfaz de monitoreo.
- Utilizar la red eléctrica (220V - 60Hz) para energizar el sistema.
- Contar con un sistema de detección de fallas de operación.
- Enviar alertas en caso de fallas en el sistema o cortes de energía a la interfaz de monitoreo.
- Contar con conexiones estandarizadas alámbricas y/o inalámbricas para la configuración del sistema.
- Enviar la señales de activación de las lámparas de los semáforos vehiculares y semáforos peatonales.

Requerimientos mecánicos

- Contar con cubierta resistente a condiciones ambientales (temperatura, humedad, polvo),
- Brindar fácil acceso para el mantenimiento de los componentes electrónicos.

- Contar con mecanismo para la protección del sistema ante robos.
- Incluir ranuras de ventilación para los componentes electrónicos (de ser necesario).

Requerimientos de control

- Tener autonomía para tomar decisiones en tiempo real (sistema autónomo).
- Mantener despejado el centro de la intersección.
- Dar prioridad a las vías con mayor longitud de cola.
- Evitar cambios repentinos entre fases de operación.
- Considerar fases para el giro de vehículos.
- Brindar una fase exclusiva para la circulación de peatones.
- Contar con la opción de poder modificar los estados manualmente desde la interfaz de monitoreo.
- Utilizar velocidades de transmisión menores a las fases de operación.
- Brindar fases de operación diferentes durante horarios de poca circulación de vehículos.

4.2 Descripción del funcionamiento del controlador

Con los requerimientos del controlador se plantea el concepto solución explicando a detalle su principio de funcionamiento. Para esto, primero se debe tomar en consideración todos los posibles escenarios en los cuales operará el sistema, tal como los que se presentan en la Figura 4.2. En esta Figura se puede apreciar los tres posibles escenarios de operación del controlador tomando en cuenta los tipos de vías que se unen en la intersección. Estos escenarios planteados son aquellos que fueron considerados en los alcances del sistema, por lo que se muestran intersecciones de dos vías de un sentido, de una vía de un sentido con una de dos sentidos, y de dos vías de dos sentidos.

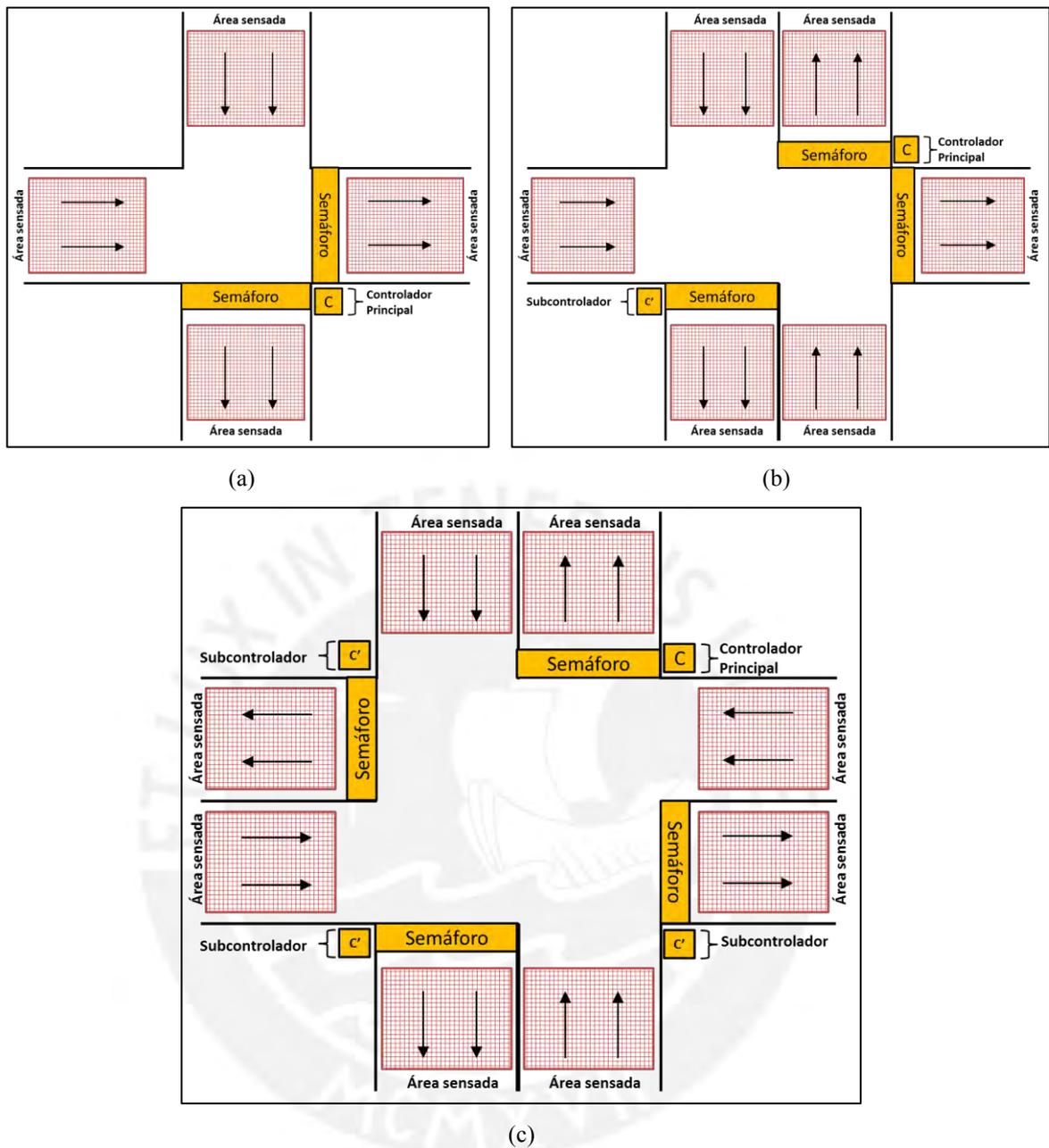


Figura 4.2: Escenarios de funcionamiento del sistema. (a) Intersección de dos vías de un sentido, (b) intersección de una vía de un sentido y una vía de dos sentidos, y (c) intersección de dos vías de dos sentidos

De manera general, los tres escenarios presentados en la Figura 4.2 muestran la presencia de un semáforo por cada vía presente en la intersección, un controlador principal por intersección y subcontroladores (en caso se requieran). La presencia de subcontroladores es debido a la ubicación de los semáforos, ya que el sistema planteado intercomunicará los semáforos de manera inalámbrica, por esta razón, cuando se requiere colocar un semáforo alejado al controlador principal es necesario incluir el uso de uno o más subcontroladores (ver Figura 4.2.b y Figura 4.2.c).

Además, en la misma figura se puede apreciar las áreas que serán sensadas para poder determinar los estados de operación del semáforo. Lo que se busca obtener con los sensores de los sistemas SAPT es poder determinar la cantidad de autos en las áreas indicadas y si es que los vehículos se encuentran detenidos o en movimiento, ya que de esta manera se podrá determinar de manera efectiva el cambio de los estados del semáforo. También es posible observar que en cada una de las vías se deben sensar las áreas que se encuentran inmediatamente antes y después de la intersección.

Por otra parte, el controlador del sistema deberá transferir de manera inalámbrica diferentes tipos de información. La Figura 4.3 muestra en detalle la transferencia de información que deberá realizar cada uno de los controladores. En esta figura se puede apreciar que: en primer lugar, el controlador principal recibirá la información de los sensores del sistema SAPT, ya sea de forma alámbrica o inalámbrica; en segundo lugar, el controlador principal se intercomunicará de manera inalámbrica con los cuatro controladores ubicados en intersecciones inmediatamente aledañas (Norte, Sur, Este y Oeste, de acuerdo a lo descrito la sección de comunicaciones del Capítulo 3) y con los subcontroladores ubicados en la misma intersección; y, por último, el controlador deberá enviar información sobre la operación del sistema hacia una interfaz de monitoreo.

La interfaz de monitoreo será utilizada solo para verificar el correcto funcionamiento de los sistemas implementados, ya que cada uno de los controladores contarán con autonomía para su operación por lo que no necesitarán de la intervención de un usuario. Desde la interfaz solo se modificarán los parámetros de operación del sistema en caso se requiera. Además, se implementará la opción de un modo temporizado y un modo manual para que se active en caso de fallas.

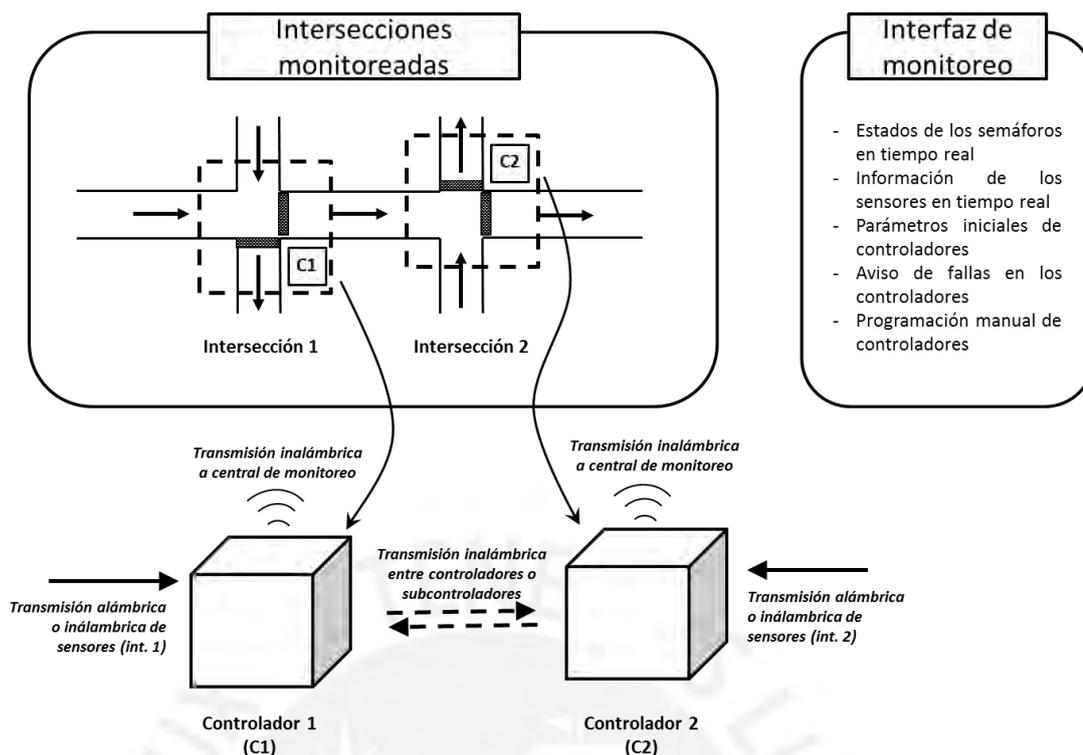


Figura 4.3: Diagrama de transferencia de información del controlador del sistema

Finalmente, habiendo descrito el funcionamiento del sistema es posible desarrollar y presentar el diagrama de estructura de funciones del controlador, el cual será de gran apoyo para el diseño y la selección de los componentes a utilizar. En base a las características anteriormente descritas el controlador debe cumplir con las siguientes funciones: en el aspecto mecánico, debe proteger los componentes y disipar el calor; en el aspecto eléctrico, debe energizar el sistema, energizar semáforos y monitorear la fallas en los semáforos; y en el aspecto de control, debe recibir información del estado del tránsito vehicular, recibir información de controladores, recibir información de subcontroladores, recibir información de la interfaz de monitoreo, procesar información del sistema, enviar información a controladores, enviar información a subcontroladores y enviar información a interfaz. En base a estas funciones en la Figura 4.4 se muestra la interacción entre ellas en el diagrama de estructura de funciones.

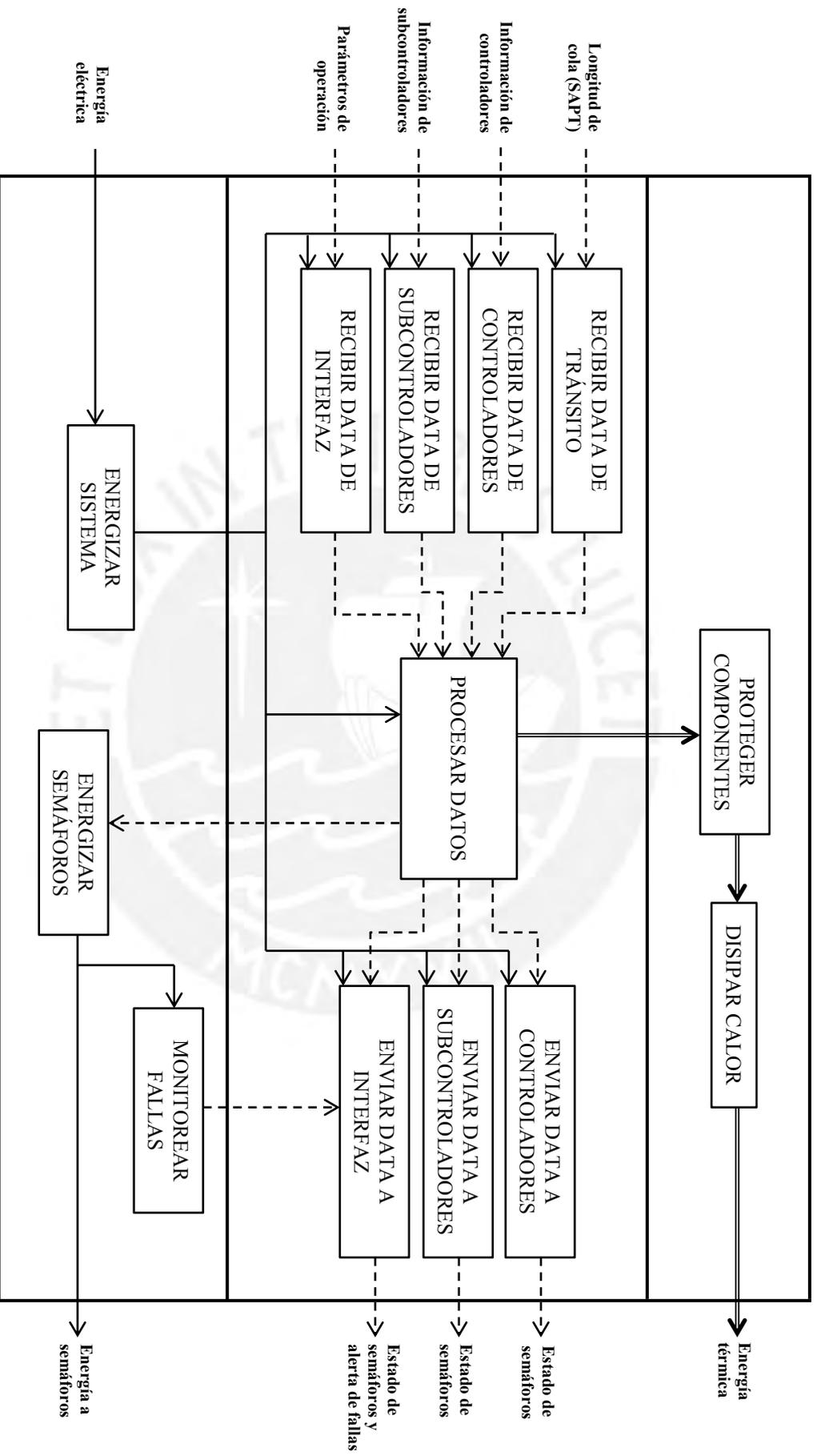


Figura 4.4: Estructura de funciones del controlador

4.3 Definición del sistema de comunicación inalámbrico

Tal como fue descrito en la sección anterior, el controlador deberá recibir y transmitir información desde y hacia diferentes fuentes. Por esta razón es necesario definir las características de cada una de las fuentes involucradas para la transmisión de datos. A continuación, la Tabla 4.1 muestra las distancias de transmisión y tipos de datos de transmisión definidos para el diseño.

Tabla 4.1: Características de data recibida y transmitida por el controlador

	Fuente	Distancia (m)	Datos
Recepción	SAPT	< 40	Información de las vías
	Controladores	< 150	Estado de semáforos
	Subcontroladores	< 40	Alertas de fallas
	Intefaz de monitoreo	< 10 000	Parámetros de operación
Transmisión	Controladores	< 150	Estado de semáforos
	Subcontroladores	< 40	Estado de semáforos
	Intefaz de monitoreo	< 10 000	Estado de semáforos y alertas de fallas

La información presentada en la Tabla 4.1 permite apreciar que será necesario utilizar dos sistemas diferentes de comunicación inalámbrica: comunicación de alcance medio (entre 10 y 200 metros), y comunicación de largo alcance (mayores a 200 metros). Para la comunicación a alcance medio se debe hacer uso de un sistema inalámbrico que permita transmitir datos hasta distancias de 150 metros. Por otra parte, el sistema de comunicación a largo alcance debe ser capaz de transmitir información a distancias de hasta 10 kilómetros.

Para la definición de los sistemas de comunicación a utilizar se hará uso de la Tabla 4.2, en donde se definen a detalle las características de los principales sistemas de comunicación inalámbrica y la información presentada en la Tabla 1. del Capítulo 2. De acuerdo a la información de ambas tablas se puede deducir que la tecnología de medio alcance que cumple con las características requeridas es la comunicación vía Wi-Fi por lo que se decidirá utilizar éste estándar de comunicación inalámbrica para la transmisión de datos con los sensores, controladores y subcontroladores. Para la

tecnología de largo rango, dado que la distancia de transferencia es muy grande y la velocidad de transmisión no debe ser muy veloz es conveniente hacer uso de la tecnología celular 3G o 4G para que la información pueda ser transmitida hacia las interfaces de monitoreo.

Tabla 4.2: Características de los principales estándares de transmisión inalámbricos (Frenzel 2012)

Technology or standard	Frequency	Range	Features	Common applications
ANT+	2.4 GHz	<10 m	Low power	Health, sports monitoring
Bluetooth	2.4 GHz	<10 m, up to 100 m with higher power	Low-power version available	Wireless headsets, audio apps
Cellular	Common cellular bands	Several km	Longer range	M2M
IEEE 802.15.4	2.4 GHz	<10 m	Multiple protocols available	Wireless networks
IEEE 802.22	470 to 768 MHz	Many miles	Designed for white spaces, cognitive radio	Broadband, backhaul, not yet used
ISA100a	2.4 GHz	<10 m	Extra security and reliability	Industrial monitoring and control
Infrared (IrDA)	800 to 1000 μ m	<1 m	Security, high speed	Remote control, data transfer
ISM band	Part 15 frequencies	<10 m	Low cost, simplicity	Monitoring and control
NFC	13.56 MHz	<30 cm	Security	Payment, access
RFID	125 kHz, 13.56 MHz, 902 to 928 MHz	<1 m	Low cost	Tracking, inventory, access
6LoWPAN	2.4 GHz	<10 m	Internet access	Monitor and control via Internet
UWB	3.1 to 10.6 GHz	<10 m	Low power, high-speed data	Video transfer
Wi-Fi	2.4 and 5 GHz	<100 m	High speed, ubiquity	Local networks, Internet access, broadband
Wireless HART	2.4 GHz	<10 m	HART protocol	Industrial monitoring and control
WirelessHD	60 GHz	<10 m	Very high speed	Video transfer
WirelessUSB	2.4 GHz	<10 m	Proprietary protocol	HID
ZigBee	2.4 GHz	<10 m	Mesh networks	Home, industry monitoring and control
Z-Wave	908.42 MHz	<30 m	Simple protocol	Home monitoring and control

4.4 Definición de los componentes del controlador y subcontrolador

En esta sección se procederá a seleccionar los componentes y dispositivos electrónicos que se utilizarán para el diseño del controlador y subcontrolador del sistema. Para esto, se presentan los diagramas de bloque mostrando todos los componentes requeridos en ambos sistemas y la interacción que tendrán cada uno de ellos (Figura 4.5). A partir de este diagrama será posible identificar todos los componentes necesarios y definir las características que estos deberán tener para poder realizar la selección de los mismos.

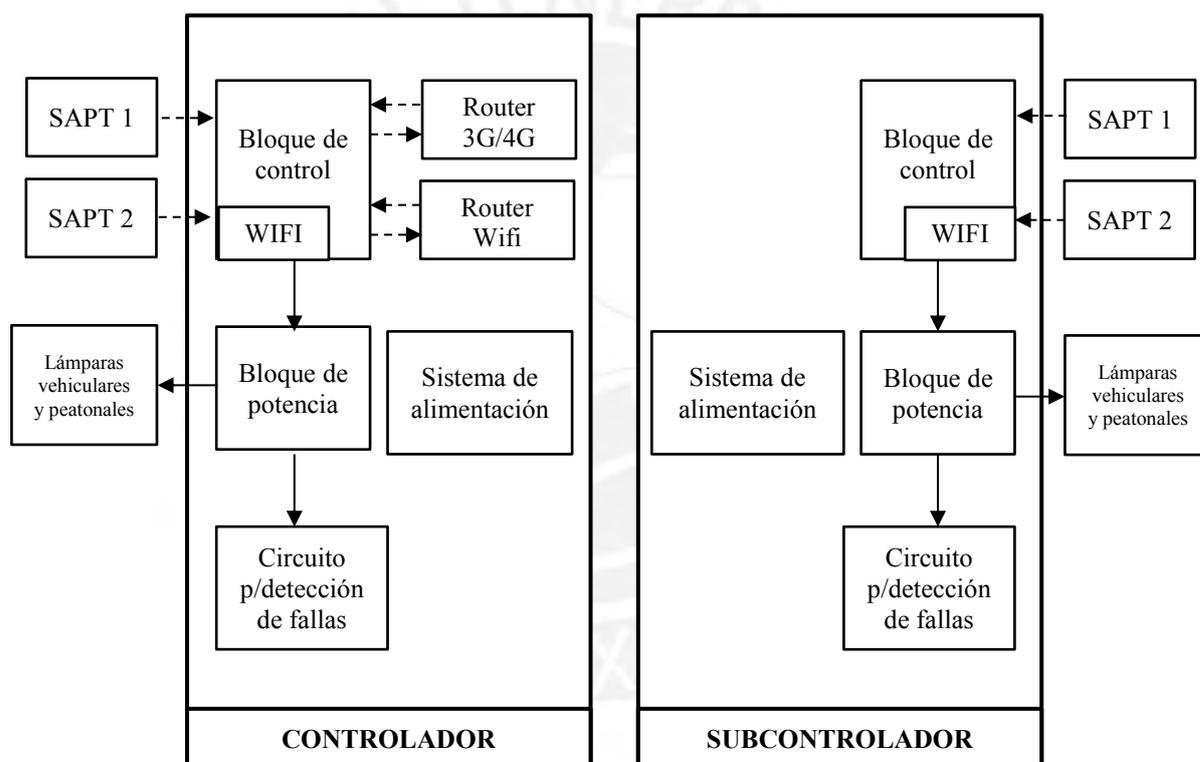


Figura 4.5: Diagramas de bloque del controlador y subcontrolador del sistema

A partir de la Figura 4.5 se puede determinar que para los controladores y subcontroladores se deben definir o diseñar los siguientes componentes:

Bloque de control (procesador) para el controlador y subcontrolador

Los requerimientos del bloque de control del sistema son los siguientes:

- Procesador integrado
- Memoria de almacenamiento que almacene datos
- Compatibilidad de conexión WiFi
- Compatibilidad de conexión 3G/4G
- Contar con un mínimo de 12 entradas y 12 salidas digitales (2 semáforos vehiculares de 4 estados y dos peatonales de dos estados)

Por esta razón se decide hacer uno de una tarjeta con procesador integrado ya existente. En la Tabla 4.3 se presentan dos opciones que cumplen con los requisitos antes mencionados.

Tabla 4.3: Opciones seleccionadas de tarjetas con procesador integrado

	Raspberry PI 3 modelo B	NanoPC – T3 Plus
<i>Vel. de procesamiento (GHz)</i>	1.2	1.4
<i>Memoria RAM (Gb)</i>	1	2
<i># entradas/salidas (pines)</i>	26	30
<i>Comunicación</i>	WiFi incorporado Puerto Ethernet	WiFi incorporado Puerto Ethernet
<i>Alimentación (VDC/A)</i>	12 / 2	5 / 2
<i>Dimensiones (mm)</i>	59 x 87	64 x 100
<i>Precio original (\$)</i>	36.00	75.00

De la tarjeta seleccionada se decidió utilizar la Raspberry Pi modelo 3 (Figura 4.6) debido a su menor costo, y además cumple con los requerimientos mínimo necesarios para el desarrollo del sistema propuesto.



Figura 4.6: Tarjeta de control Raspberry Pi 3 model B (Raspberry Pi 2017)

Router WiFi

Los requerimientos para la transmisión WiFi son los siguientes:

- Capacidad de operar a 5GHz y a 2.4GHz, dado que de esta manera se evita la interferencia de otros dispositivos y se logrará la transmisión de información a mayores velocidades.
- Alcance máximo de de 150 metros.
- Antena omnidireccional.

De acuerdo a los requerimientos, se puede hacer uso de un router WiFi de banda dual, por lo que en la Tabla 4.4 se presentan dos opciones que cumplen con los requisitos antes mencionados:

Tabla 4.4: Opciones seleccionadas de router WiFi

	TP-Link Archer C20	TP-Link Archer C2
<i>Banda de operación (GHz)</i>	2.4 / 5	2.4 / 5
<i>Antenas (número)</i>	3 desmontables	2 desmontables
<i>Ancho de banda (Mbps)</i>	900	733
<i>Precio original (S/)</i>	150	130

Se decidió utilizar el router inalámbrico Tp-Link modelo Archer C20 (TP-Link 2017a) debido a que es un dispositivo comercial en el mercado local y de bajo costo que cuenta con mayor ancho de banda y 3 antenas desmontables. En la Figura 4.7 se muestra una imagen del dispositivo y en la Tabla 4.5 se muestran las principales especificaciones del dispositivo.



Figura 4.7: Router inalámbrico Tp-Link Archer C20 (TP-Link 2017a)

Tabla 4.5: Principales especificaciones del Router inalámbrico Tp-Link Archer C20 (TP-Link 2017a)

Características de Hardware	
Dimensiones	230 x 144 x 35 mm
Fuente de alimentación	12 VDC / 1.5 A
Tipo de Antena	2 antenas desmontables
Temperatura de funcionamiento	0 °C ~ 40 °C
Humedad de funcionamiento	10% ~ 90% sin condensación
Características de inalámbricas	
Estándares inalámbricos	IEE 802.11ac/n/a 5GHz IEE 802.11.b/g/n 2.4 GHz
Frecuencia de operación	2.4 GHz y 5 GHz
Velocidad de transmisión	5GHZ: Hasta 433 Mbps 2.4 GHz: Hasta 450 Mbps

Además, con la finalidad de garantizar que la red inalámbrica tenga el alcance suficiente (150 metros, de acuerdo a lo descrito en la Tabla 4.1) se hará uso de una antena omnidireccional que permita obtener una señal de al menos 250 metros de radio. La antena seleccionada para el sistema es la Tp-Link modelo TL-ANT2412D (TP-Link 2017b), la cual es una antena para exteriores compatible con el router previamente descrito. En la Figura 4.8 se muestra una imagen de la antena para exteriores y en la Tabla 4.6 se muestran las principales especificaciones.



Figura 4.8: Antena Tp-Link ANT2412D (TP-Link 2017b)

Tabla 4.6: Principales especificaciones de la Antena Tp-Link ANT2412D (TP-Link 2017b)

Características	
Dimensiones	1200 mm
Peso	0.5 kg
Ganancia	12 dBi
Ancho de Haz	360 ° Horizontal / 12° Vertical
Tipo de conector	Hembra N
Temperatura de funcionamiento	40 °C ~ 65 °C
Humedad de funcionamiento	10% ~ 90% sin condensación

Router 3G/4G

Los requerimientos para la transmisión por 3G/4G son los siguientes:

- Router router inalámbrico 3G/4G
- Conexión USB a modem 3G/4G.

En la Tabla 4.7Tabla 4.3 se presentan dos opciones que cumplen con los requisitos antes mencionados.

Tabla 4.7: Opciones seleccionadas de router 3G/4G

	TP-Link TL-MR3020	TP-Link TL-MR3040
<i>Alimentación (VDC/A)</i>	5/1	5/1 (Batería interna)
<i>Dimensiones (mm)</i>	74x67x22	100x62x16
<i>Precio original (S/)</i>	90	130

El equipo seleccionado para la transmisión 3G/4G es el router inalámbrico Tp-Link modelo TL-MR3020 (TP-Link 2017c). En la Figura 4.9 se muestra una imagen del dispositivo y en la Tabla 4.8 se muestran las principales especificaciones del router. Además, el dispositivo funciona con un modem 3G/4G y un chip con internet inalámbrico para obtener conexión a internet.



Figura 4.9: Router 3G/4G Tp-Link TL-MR3020 (TP-Link 2017c)

Tabla 4.8: Principales especificaciones del Router 3G/4G Tp-Link TL-MR3020 (TP-Link 2017c)

Características de Hardware	
Dimensiones	74 x 67 x 22 mm
Fuente de alimentación	5 VDC / 1.0 A
Tipo de Antena	Antena interna
Temperatura de funcionamiento	-10 °C ~ 60 °C
Humedad de funcionamiento	10% ~ 90% sin condensación
Características de inalámbricas	
Estándares inalámbricos	IEEE 802.11.b/g/n
Frecuencia de operación	2.4 – 2.4835 GHz
Velocidad de transmisión	Hasta 150 Mbps

Bloque de potencia

El bloque de potencia hace uso de los componentes necesarios para poder activar los semáforos conectados al controlador de acuerdo a las señales recibidas por la tarjeta de control. Como los semáforos utilizados son energizados con 220 V es necesario seleccionar los componentes que permitan encender o apagar las luces de cada semáforo mediante el semáforo mediante el uso de una señal de control de 5V, la cual es recibida por la tarjeta de control, y a la vez aislar el circuito de potencia con el circuito de control. Por esta razón se decide hacer uso de opto acopladores para el aislamiento de ambos circuitos y TRIACs para controlar el encendido de las luces, mediante un circuito como el que se muestra en la

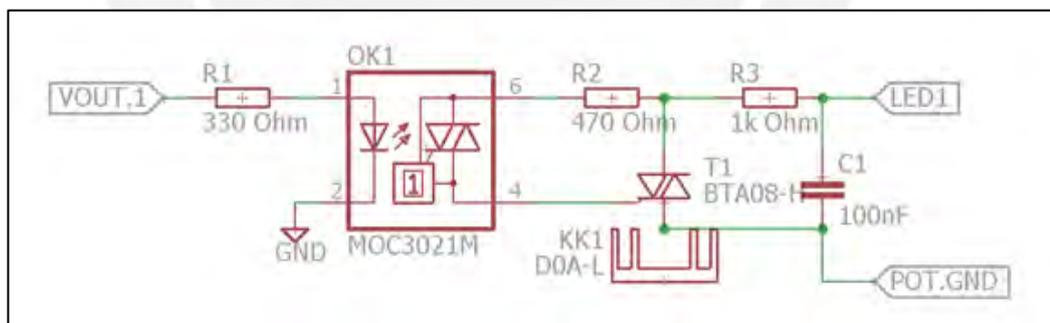


Figura 4.10. En este circuito se puede apreciar las conexiones realizadas con los pines del controlador y el uso de elementos adicionales como resistencias y capacitores.

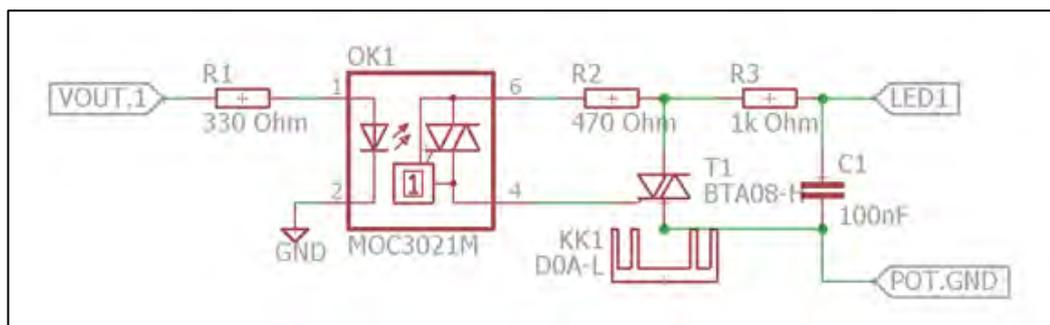


Figura 4.10: Circuito para controlar el encendido de luces de semáforo

El optoacoplador usado para la tarjeta de potencia será el MOC3021 debido a ser uno de los más comunes y fáciles de obtener en el mercado local. Este elemento recibirá como entrada una señal recibida por la tarjeta de control y su salida estará conectada con el TRIAC. Las características principales de este componente se presentan en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9: Principales características del optoacoplador MOC3021 (Motorola 2017)

Características	Valor	Unidad
Voltaje en terminal de salida	400	V
Corriente de consumo	50	mA
Temperatura de operación	-40 a +85	°C

El TRIAC usado en el circuito de potencia es el BTA08 debido a ser un componente común en el mercado local. Este elemento recibirá como entrada la señal del optoacoplador y permitirá activar o desactivar las luces del semáforo de acuerdo a su estado de operación. Las características principales de este componente se presentan en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10: Principales características del TRIAC BTA08 (ON Semiconductor 2017)

Características	Valor	Unidad
Voltaje pico de salida	600	V
Corriente pico de salida	8	A
Corriente de mínima de excitación	2.5	mA
Voltaje mínimo de excitación	0.5	V
Temperatura de operación	-40 a +125	°C

Sistema de detección de fallas

La finalidad de implementar un sistema de detección de fallas es poder monitorear el correcto funcionamiento de todas las luces de los semáforos y de esta manera tener conocimiento cuando alguna de las luces esté quemada o inoperativa. Por esta razón se plantea hacer uso de componentes que permitan medir la corriente consumida por las luces de manera individual durante su estado de operación, y así al detectar que la corriente consumida es menor a la indicada entonces se envía una alerta de falla.

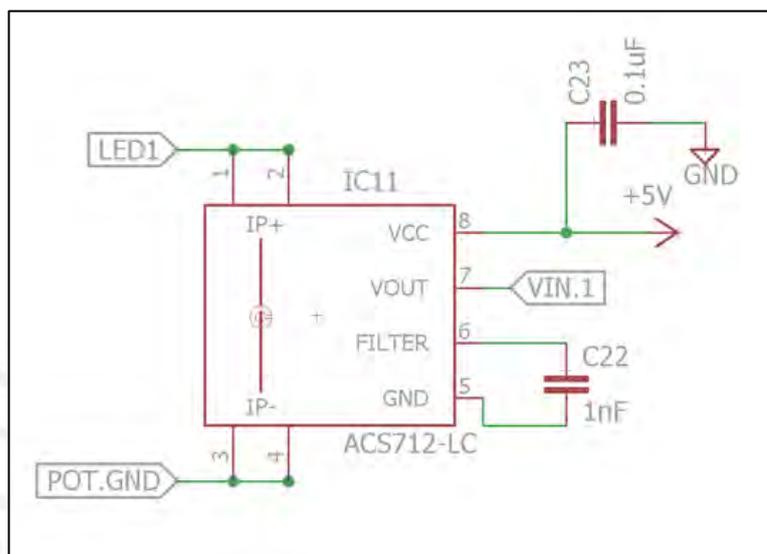


Figura 4.11. Circuito para sensar corriente de las luces de semáforo

El componente seleccionado para la medición de corriente es el ACS712. Este es un circuito integrado que permite sensar la corriente en los puertos de entrada y otorga una salida de voltaje proporcional a la entrada. En la Figura 4.11 se muestran las conexiones del circuito necesario para el sensado de corriente. Además, las principales especificaciones de este componente se presentan en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11: Principales características del medidor de corriente ASC712 (Allegro 2017)

Características	Valor	Unidad
Voltaje de alimentación	5	V
Corriente de alimentación	13	mA
Corriente máxima de entrada	-5 a +5	A
Voltaje de salida	0 a 5	V
Sensibilidad de lectura	185	mV/A
Temperatura de operación	-40 a +85	°C

Sistema de alimentación

El sistema será alimentado directamente por la red de energía eléctrica de la ciudad de Lima, por lo que la alimentación será con un voltaje de 220 V y frecuencia de 60 Hz. Por esta razón será necesario definir los componentes que permitan energizar el sistema (fuentes) y protegerlo ante sobrecargas indeseadas (interruptor térmico).

Se requiere del uso de dos fuentes de energía que generen 12 V y 5 V para poder energizar todos los componentes antes descritos. Las fuentes a utilizar deben ser energizadas por la red eléctrica de 220V. Asimismo, para poder determinar la cantidad de corriente consumida por los componentes del sistema se realizó un análisis del consumo total de corriente en el Anexo 8 el cuál determinó que la máxima corriente consumida sería 3.5 A para los componentes de 12 V y 1.26 A para los componentes de 5 V.

Las fuentes seleccionadas para el sistema son XP Power DNR60US12 y XP Power DNR10US05 ya que ambas cumplen las características descritas y además cuentan con tipo de montaje de riel DIN, lo cual será utilizado para el montaje en la carcasa del sistema. La Figura 4.12.a muestra la fuente de 12 V seleccionada para el sistema y la Figura 4.12.b muestra la fuente de 5 V seleccionada. Además, la Tabla 4.12 muestra las principales características de las fuentes mencionadas.

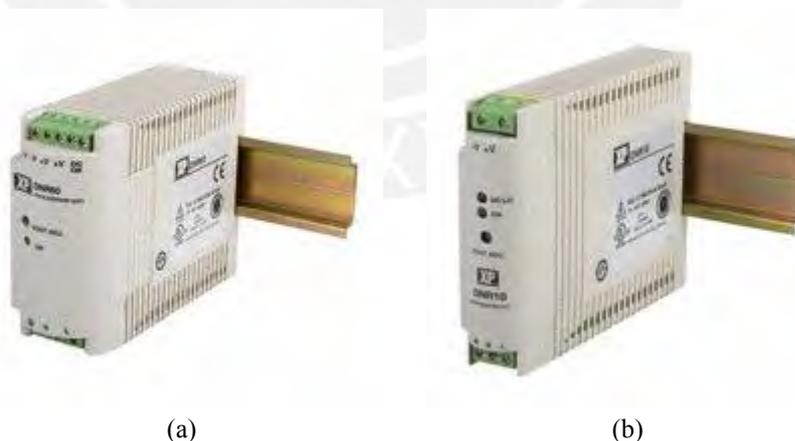


Figura 4.12: Fuente de energía de (a) 12V 5A y (b) 5V 2A (XP Power 2017)

Tabla 4.12: Principales características de las fuentes de energía (XP Power 2017)

Característica	DNR60US12	DNR10US05
Voltaje de entrada	90 a 264 V	90 a 264 V
Voltaje de salida	12 V	5 V
Corriente máxima	5 A	2 A

Potencia	60 W	10 W
Eficiencia	86%	69%
Tipo de montaje	Riel DIN	Riel DIN
Dimensiones	115 x 40.5 x 90 mm	115 x 22.5 x 88.5 mm
Temperatura de operación	-20 a 70 °C	-20 a 70 °C

Asimismo, es necesario hacer uso de un interruptor termomagnético que brinde protección al sistema en caso de alguna sobrecarga producida por una falla de los componentes. Este componente recibirá y entregará directamente la energía eléctrica de 220 V por lo que debe soportar la corriente máxima determinada en el Anexo 8 que fue de 5.26 A. Además, el componente debe contar con un tipo de montaje tipo DIN. Dado que estos componentes son comunes en el mercado local se decide seleccionar un interruptor de 10 A modelo 691006 de la marca General Electric. Las características principales de este componente se presentan en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13: Principales características del interruptor termomagnético

Características	Valor	Unidad
Dimensiones	2 x 10	cm
Voltaje máximo	415	V
Corriente máxima	10	A

4.5 Diseño de la tarjeta electrónica del controlador y subcontrolador

Esta sección presenta el diseño y las características de la tarjeta electrónica que será utilizada en el sistema. Esta tarjeta fue diseñada para poder integrar el uso de todos los componentes descritos en la sección anterior e incluye los siguientes elementos: tarjeta de control Raspberry Pi 3 modelo B (Raspberry Pi 2017), sensores de corriente ACS712 (Allegro 2017), optoacopladores MOC3021 (Motorola 2017), triacs BTA08 (ON Semiconductor 2017) y otros elementos electrónicos como borneras, resistencias, capacitancias y disipadores de calor. La tarjeta electrónica fue diseñada para ser utilizada en los controladores y en los subcontroladores ya que ambos solo difieren entre sí por sus dispositivos de comunicación inalámbrica.

La tarjeta de control fue diseñada haciendo uso del software Autodesk Eagle. En éste se diseñó el esquemático general y la disposición de los componentes en la tarjeta electrónica. La Figura 4.13 muestra el esquemático general de la tarjeta electrónica

(también se presenta en el Anexo 9). En esta imagen se puede apreciar las conexiones realizadas entre todos los componentes utilizados para la tarjeta electrónica. A continuación, se presentará a mayor detalle los circuitos y conexiones desarrolladas en el esquemático.



4.5.1 Tarjeta de control

La tarjeta de control seleccionada cuenta con un conector de 40 pines machos por lo que se decidió utilizar un conector equivalente para realizar la conexión física con la tarjeta electrónica. En la Tabla 4.14 y Tabla 4.15 se muestra la asignación de los pines de salida y entradas que se considerará para la programación del controlador y para el ruteado de la tarjeta electrónica. En la Figura 4.14, se puede apreciar que la tarjeta de control tendrá 13 conexiones que serán utilizadas como señales de entrada (VIN) y 13 conexiones utilizadas como señales de salida (VOUT). El número de entradas y salidas determina la capacidad máxima de lámparas led que podrán ser conectadas a un controlador o subcontrolador.

Tabla 4.14: Asignación de pines de salida del controlador

# Pin Controlador	Nombre de Pin	Asignación	# Pin Conector	Nombre de Conector
03	GPIO02	Lámpara LED Vehicular Verde 1	38	VOUT.1
05	GPIO03	Lámpara LED Vehicular Ámbar 1	36	VOUT.2
07	GPIO04	Lámpara LED Vehicular Roja 1	34	VOUT.3
11	GPIO17	Lámpara LED Vehicular Direccional 1	30	VOUT.4
13	GPIO27	Lámpara LED Vehicular Verde 2	28	VOUT.5
15	GPIO22	Lámpara LED Vehicular Ámbar 2	26	VOUT.6
19	GPIO10	Lámpara LED Vehicular Roja 2	22	VOUT.7
21	GPIO09	Lámpara LED Vehicular Direccional 2	20	VOUT.8
29	GPIO05	Lámpara LED Peatonal Verde 1	12	VOUT.10
31	GPIO06	Lámpara LED Peatonal Rojo 1	10	VOUT.11
33	GPIO13	Lámpara LED Peatonal Verde 1	08	VOUT.12
35	GPIO19	Lámpara LED Peatonal Rojo 1	06	VOUT.13
23	GPIO11	Lámpara LED uso múltiple	18	VOUT.9

Tabla 4.15: Asignación de pines de entrada del controlador

# Pin Controlador	Nombre de Pin	Asignación	# Pin Conector	Nombre de Conector
08	GPIO14	Sensor - LED Vehicular Verde 1	33	VIN.1
10	GPIO15	Sensor - LED Vehicular Ámbar 1	31	VIN.2
12	GPIO18	Sensor - LED Vehicular Roja 1	29	VIN.3
16	GPIO23	Sensor - LED Vehicular Direccional 1	25	VIN.4
18	GPIO24	Sensor - LED Vehicular Verde 2	23	VIN.5
22	GPIO25	Sensor - LED Vehicular Ámbar 2	19	VIN.6
24	GPIO08	Sensor - LED Vehicular Roja 2	17	VIN.7
26	GPIO07	Sensor - LED Vehicular Direccional 2	15	VIN.8
36	GPIO16	Sensor - LED Peatonal Verde 1	05	VIN.10
37	GPIO26	Sensor - LED Peatonal Rojo 1	04	VIN.11
40	GPIO21	Sensor - LED Peatonal Verde 1	01	VIN.12
38	GPIO20	Sensor - LED Peatonal Rojo 1	03	VIN.13
32	GPIO12	Sensor - LED uso múltiple	09	VIN.9

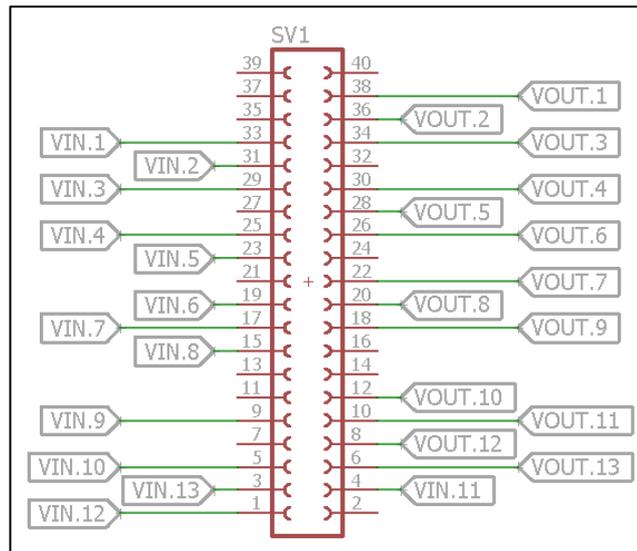


Figura 4.14: Esquemático de conexiones de la tarjeta de control

4.5.2 Borneras

Adicionalmente, la tarjeta electrónica cuenta con borneras para poder realizar las conexiones físicas de los cables de alimentación de las lámparas led y para las fuentes de voltaje de 12V y 5 V, tal como se muestra en la Figura 4.15.

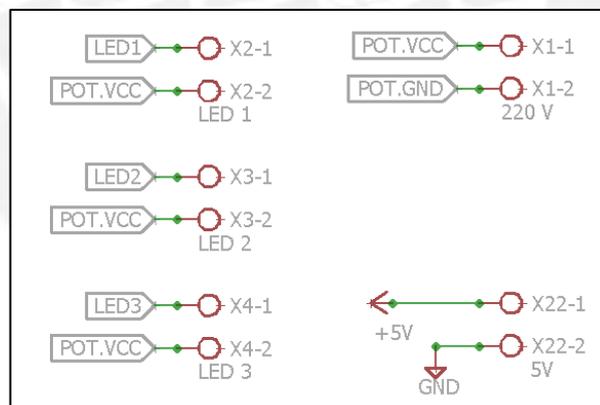


Figura 4.15: Esquemático de conexiones de las borneras de la tarjeta electrónica

4.5.3 Tarjeta electrónica

La tarjeta electrónica fue diseñada incluyendo todos los circuitos previamente descritos. La disposición de los componentes se realizó tomando en cuenta el tamaño de la tarjeta de control, que sería ubicada en la esquina inferior derecha y que las borneras estuvieran ubicadas en los bordes superior e inferior de la tarjeta. La Figura 4.16 muestra la organización final de los componentes de la tarjeta electrónica así como también las conexiones realizadas entre sí. La dimensión final de la tarjeta diseñada es de 25 x 20 cm.

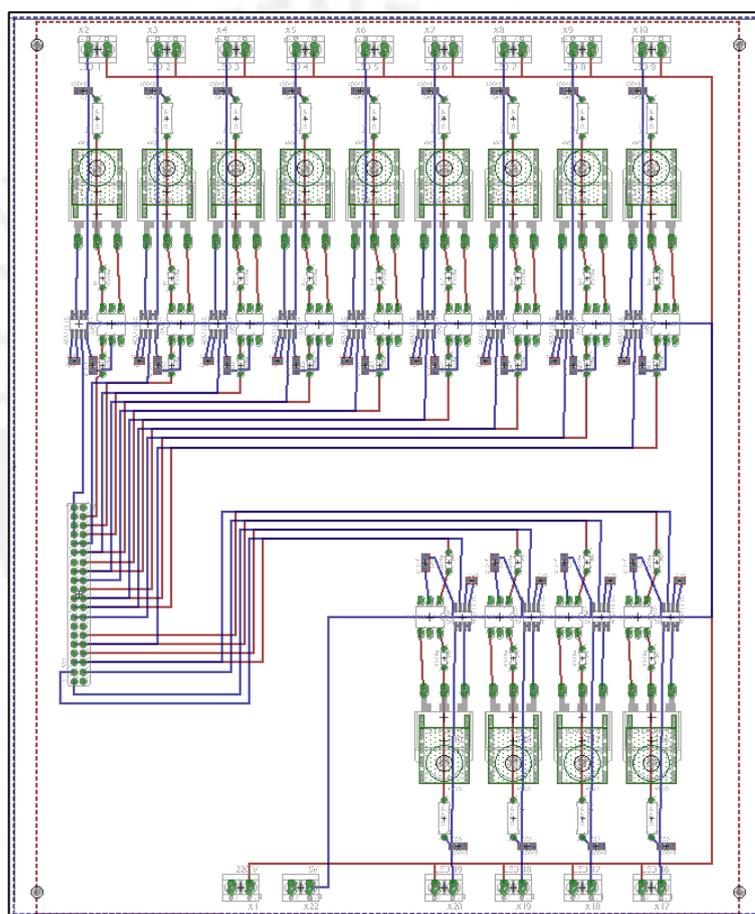


Figura 4.16: Ruteado de la tarjeta electrónica del sistema

Para el ruteado de los componentes electrónicos fue necesario hacer uso de dos capas de soldadura, en ambas caras de la tarjeta. En la Figura 4.17.a y Figura 4.17.b se muestran las dos capas de soldadura utilizadas para la conexión de los componentes. Además, el Anexo 9 se presenta a mayor escala el esquemático del sistema y la tarjeta electrónica diseñada con el detalle de ambas caras de soldadura.

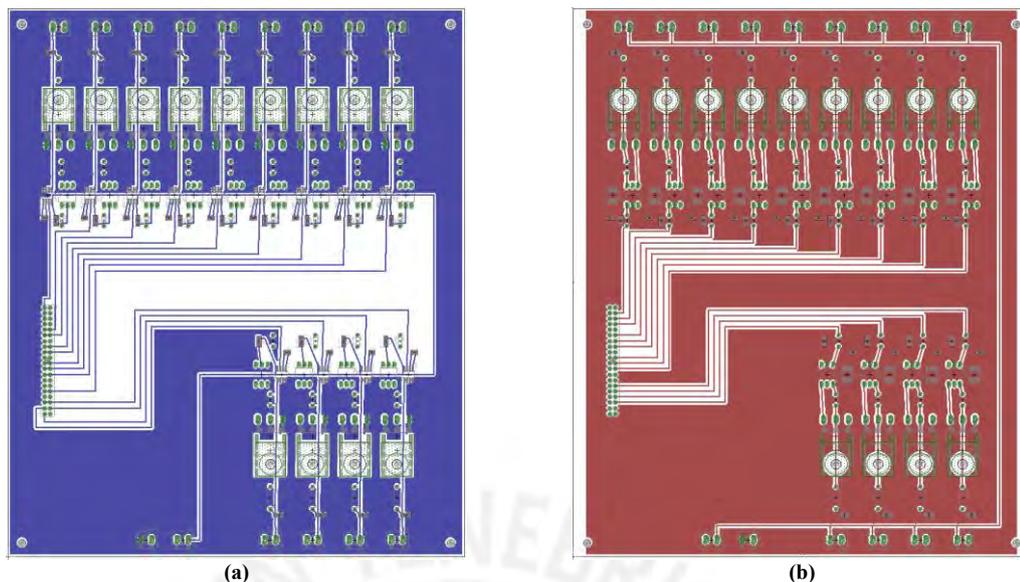


Figura 4.17: Capas de soldadura de la tarjeta electrónica: (a) capa superior y (b) capa inferior

4.5.4 Diagrama de conexiones

Finalmente, las conexiones físicas entre todos los componentes a utilizar incluida la tarjeta electrónica se presentan en la Figura 4.18. En esta Figura se puede observar que se recibe energía eléctrica a 220V la cual alimenta las dos fuentes de voltaje de 12V y 5 V. La fuente de 12V es utilizada para energizar el router Wifi, mientras que la fuente de 5V se utiliza para la tarjeta electrónica. El controlador va conectado sobre la tarjeta electrónica y éste se comunica con el router 3G/4G a través de un cable de Ethernet, el cual también es utilizado como fuente de alimentación. Por último, las lámparas led vehiculares y peatonales se conectan a cada uno de los conectores respectivos de la tarjeta electrónica.

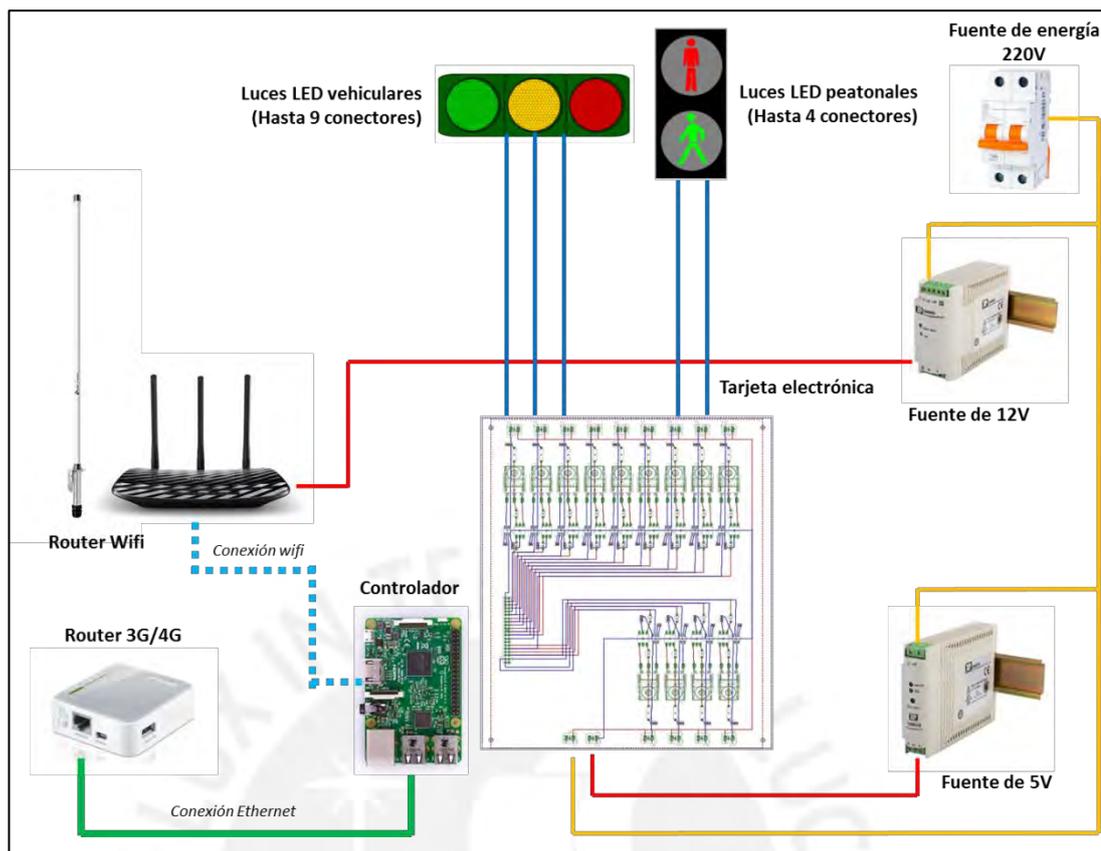


Figura 4.18: Diagrama de conexiones del sistema

4.6 Diseño mecánico del controlador y subcontrolador

En esta sección se presenta el diseño mecánico de la cubierta del controlador, para lo cual se tomó en consideración las dimensiones de todos los componentes utilizados en el sistema. También se describen con detalle las características de la estructura diseñada y las características del ensamblaje de cada uno de los componentes. Además, se presentan los planos requeridos para la fabricación y ensamblaje del sistema.

4.6.1 Cubierta del sistema

Con la finalidad de proteger el sistema se desarrolló una cubierta en forma de caja de acero inoxidable con una puerta en la cara frontal, con el fin de poder brindar fácil acceso a los componentes internos al momento del ensamblaje y al realizar algún mantenimiento necesario. La fabricación de la caja y de la puerta se realiza a partir

de planchas de acero inoxidable dobladas y soldadas, siguiendo los detalles de los planos de despiece presentados en el Anexo 10 y los planos de soldadura en el Anexo 11.

A partir de la caja soldada se realiza un sub ensamblaje con la puerta soldada haciendo uso de unas bisagras de acero inoxidable. Además, se sueldan rieles de norma DIN en las paredes laterales y la pared posterior de la caja, las cuales serán utilizadas para el posterior montaje de los componentes del sistema. Por último, se agrega una chapa redonda de 2 dm de diámetro, la cual estará fijada sobre la puerta de la caja. Los detalles del sub ensamblaje se presenta en el Anexo 12.

El sub ensamblaje de la caja con todos los componentes anteriormente descritos se muestra en la Figura 4.19. En esta imagen se puede apreciar la ubicación de los rieles DIN, de las bisagras y de la chapa de la caja. Asimismo, es posible observar en la cara superior e inferior de la caja se tienen dos agujeros, los cuales será utilizados para la antena y para los cables de alimentación hacia las lámparas de los semáforos, respectivamente.



Figura 4.19: Diseño de la caja ensamblada del controlador

4.6.2 Ensamblaje del sistema

El ensamblaje del sistema se lleva a cabo tomando como base la caja del controlador ensamblada previamente presentada. En el riel DIN ubicada en la cara derecha de la caja se colocan las fuentes de 5 V y 12 V en conjunto con el interruptor termomagnético. En el riel montado en la cara izquierda se colocan los routers WiFi y 3G/4G. Además, la antena que se conecta al router WiFi va montada sobre la cara izquierda de la caja haciendo uso de un soporte que es incluido como accesorio de la antena. Finalmente, el riel de la cara posterior es utilizado para montar la tarjeta electrónica.

En la Figura 4.20 se muestra la ubicación de todos los componentes del controlador dentro de la caja del sistema. En esta Figura también es posible notar que se cuenta con un agujero en la cara inferior de la caja. En este agujero se hace uso de un prensaestopa de 48 mm de norma IP68, a través del cual pasarán los cables utilizados para energizar la tarjeta de control y para energizar las lámparas LED vehiculares y peatonales.

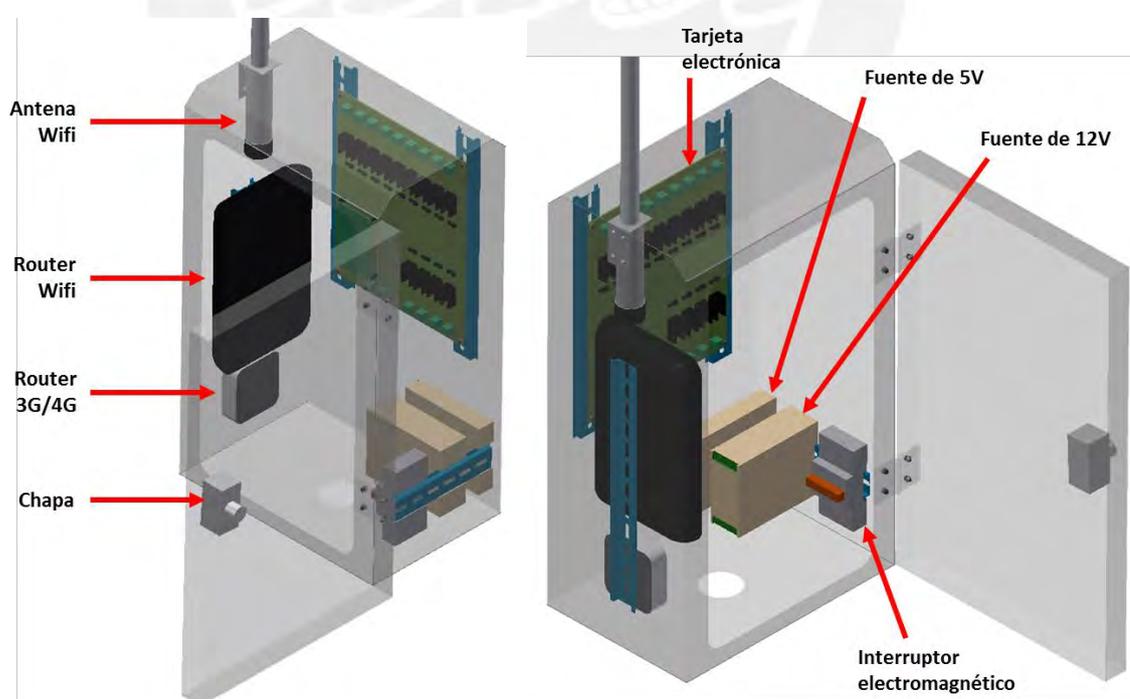


Figura 4.20: Ubicación de los componentes ensamblados en la caja del controlador

4.6.3 Planos del sistema

Los planos para la fabricación y ensamblaje de la cubierta del sistema se presentan en los Anexos 8, 9 y 10. Las características de estos planos se presentan en la Tabla 4.16, en donde se indican el tipo de plano, el nombre, el tamaño y la codificación de cada uno de estos.

Tabla 4.16: Principales características de los planos del sistema

Tipo	Nombre	Tamaño	Código	Anexo
Despiece	Puerta	A3	A3-D1	7
Despiece	Caja	A3	A3-D2	7
Soldadura	Puerta Soldada	A3	A3-S1	8
Soldadura	Caja Soldada	A3	A3-S2	8
Ensamblaje	Caja Ensamblada	A2	A2-E1	9
Ensamblaje	Controlador Ensamblado	A2	A2-E2	9

4.6.4 Diseño Final del Sistema

Por último, en la Figura 4.21 se muestra el diseño final del controlador ensamblado el cual fue realizado haciendo uso del software Autodesk Inventor. El diseño final muestra que el sistema cumple con los requerimientos mecánicos solicitados como la protección de los componentes, seguridad y fácil mantenimiento. La dimensión de la caja del controlador es de 52 x 30 x 20 cm, y tomando en consideración la antena del controlador se tendría una longitud total de 162 cm.



Figura 4.21: Diseño final del controlador ensamblado

4.7 Instalación del controlador al sistema integrado

La instalación del controlador o subcontrolador se realiza mediante una unión atornillada con el poste del semáforo, para lo cual se requiere del uso de un accesorio adicional que permite la fácil instalación y retiro de la caja del controlador en caso de ser necesario su reemplazo o algún mantenimiento. Este accesorio se trata de una pieza fabricada en acero de 5 mm de espesor con pliegues perpendiculares de manera que permita realizar la unión atornillada con la caja del controlador y una unión soldada con el poste del semáforo. En la Figura 4.22 se muestra una vista general de la pieza utilizada para el ensamblaje del sistema. En el Anexo 13 se presenta el plano de despiece en donde se aprecia con mayor detalle sus características para la fabricación.

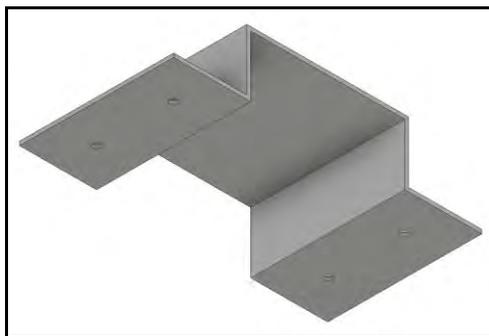


Figura 4.22: Mecanismo para instalación del controlador

Tal como se mencionó en el capítulo anterior, el controlador y subcontrolador están ubicados encima de los semáforos peatonales. Se recomienda que la altura a la cual se instale el controlador sea a 3 metros sobre el nivel del piso, con la finalidad de evitar daños o alteraciones generadas por alguna persona. En la Figura 4.23 se muestra la ubicación del controlador instalado en un poste de semáforo individual. En esta imagen también es posible apreciar que se requiere de un agujero ubicado por debajo del controlador con el fin de que a través de este se puedan colocar los cables de conexión que ingresan y salen del controlador. En el Anexo 14 se presenta los planos de ensamblaje del controlador a un poste de semáforo indicando con mayor detalle las distancias de los agujeros necesarios y los componentes requeridos para su instalación.

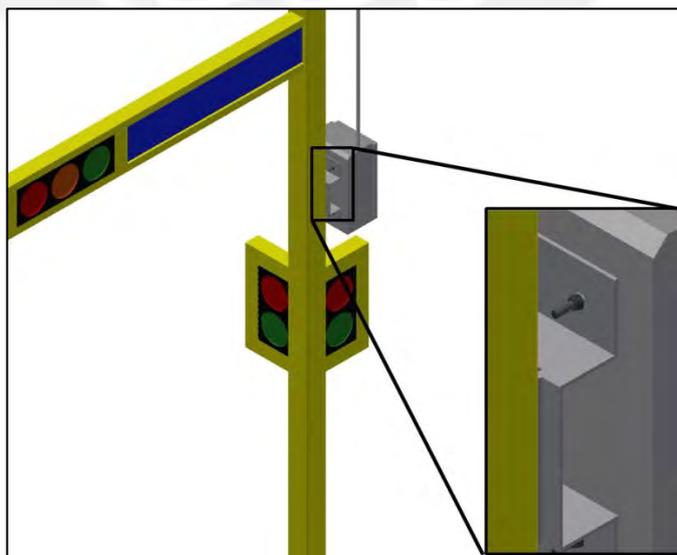


Figura 4.23: Ubicación del controlador instalado en un poste de semáforo

Por otra parte, las conexiones eléctricas que se deben realizar para la implementación del sistema integrado se pueden apreciar de manera general en el diagrama presentado en la Figura 4.24. En este diagrama se puede observar que el controlador se conecta con la red de energía eléctrica, las lámparas vehiculares y las lámparas peatonales, mientras que el sistema de adquisición solo necesita conectarse a la red de energía eléctrica.

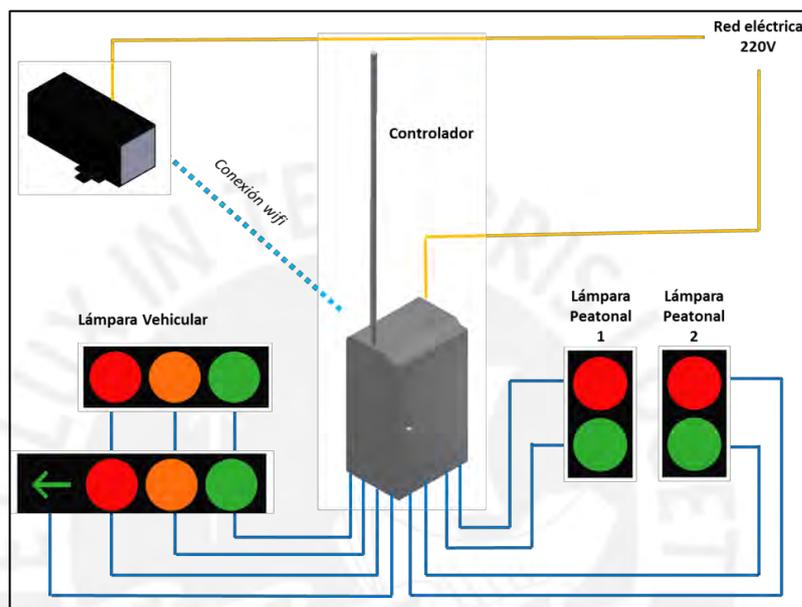


Figura 4.24: Diagrama de conexión eléctrica de los componentes del sistema integrado

CAPÍTULO 5

DISEÑO DEL ALGORITMO DE CONTROL DEL SISTEMA

El quinto capítulo está enfocado en el diseño del algoritmo de control para el ordenamiento del tránsito vehicular en una intersección. En primer lugar, se realiza un análisis del problema que se desea solucionar mediante el algoritmo de control y se presenta un planteamiento de la solución que se utilizará en el algoritmo. Luego se explica en detalle el funcionamiento de los estados planteados en el algoritmo de control, mediante el uso de diagramas de estados. Además, se presentan los diagramas de flujo a partir de los cuales se estructura el algoritmo de solución desarrollado. Finalmente, se muestra el pseudocódigo que luego podrá ser utilizado para la implementación del algoritmo desarrollado.

5.1 Análisis y planteamiento de la solución

El controlador desarrollado en la presente tesis busca optimizar el estado de operación de los semáforos en intersecciones de avenidas. Por este motivo, el algoritmo desarrollado para el controlador debe ser capaz de brindar un nivel de autonomía al sistema con el fin de que se puedan modificar los estados de operación de los semáforos en base a la información del tráfico en tiempo real y a las características de la intersección. El algoritmo debe utilizar como referencia los tiempos de operación predeterminados en cada intersección actualmente. Además, se asumirá la recepción de los parámetros del tránsito, los cuales serán obtenidos

mediante el sistema de adquisición de parámetros del tránsito (SAPT), descrito en el capítulo 3, el cual no está comprendido en el planteamiento de la presente tesis.

Se conoce que las intersecciones en las cuales se hace uso de semáforos no cuentan con las mismas características, por tal motivo se pretende desarrollar un algoritmo adaptativo. Este algoritmo usará como información las características de la intersección (que serán inicialmente predefinidas por el usuario) a fin de ejecutar una lógica de control específica para cada caso. Para el alcance de esta tesis se trabajará con tres tipos de intersecciones características: dos vías de un solo sentido (Tipo 1); una vía de doble sentidos y una vía de un sentido (Tipo 2); y dos vías de doble sentido (Tipo 3). En la Figura 5.1 se muestran las tres intersecciones características para las se plantean una lógica de control en el algoritmo.

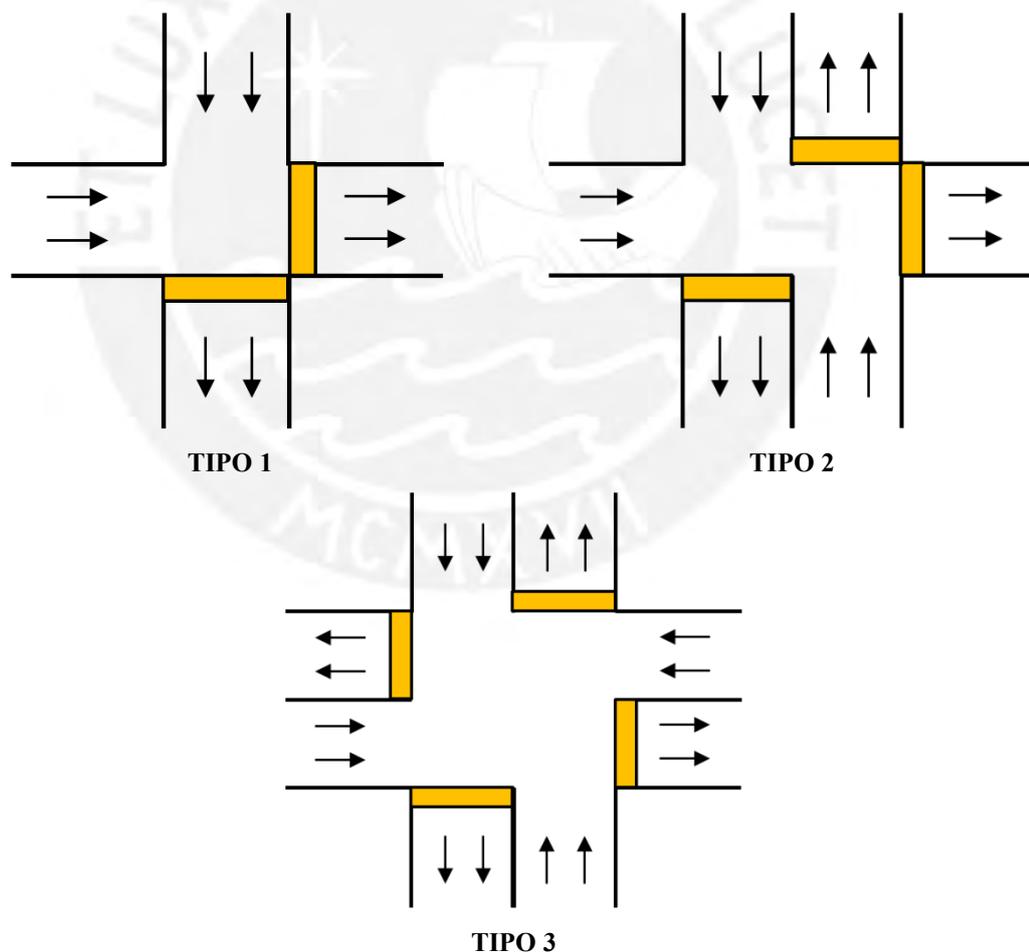


Figura 5.1: Tipos de intersecciones características planteadas para el desarrollo del algoritmo de control

Además de tener que determinar el tipo de intersección, se debe determinar algunos parámetros iniciales, los cuales son configurados al momento de la instalación del sistema. Asimismo, estos parámetros podrán ser configurados y modificados directamente desde la interfaz de monitoreo. Los siguientes parámetros iniciales definirán la lógica de control que utilizará el algoritmo:

- ***Sentido de circulación***: Este parámetro permite determinar el sentido en el cual circulan los vehículos en cada una de las intersecciones.
- ***Permiso de giro***: Este parámetro permite definir si en las vías de sobre sentido es posible el giro a la izquierda. De esta manera se tendrá que considerar estado independiente para el giro de vehículos.
- ***Tiempos de semáforos vehiculares***: Este parámetro permite definir los valores referenciales de los estados de operación de los semáforos. A partir de estos valores se optimizarán los tiempos en base a las variables de entrada.
- ***Prioridad de vías***: Este parámetro permite determinar las vías con mayor importancia de circulación. Esta información permitirá brindar mayor tiempo de circulación a las vías principales en lugar de las auxiliares.

El algoritmo de control también requiere de la información de algunas variables de entrada, las cuales permitirán determinar los estados de operación óptimos de los semáforos. A continuación se describen las variables de entrada usadas en el algoritmo de control:

- ***Presencia de vehículos***: Esta variable indica si se encuentran vehículos esperando al inicio de la intersección y si se encuentran vehículos detenidos al cruzar la intersección. La información de esta variable es obtenida mediante el sistema auxiliar SAPT, el cual no está considerado en la presente tesis. En caso no se cuente con la información de los sensores se asumirán estados de funcionamiento fijos, para lo cual se hace uso de los periodos de operación predeterminados en los parámetros iniciales.
- ***Velocidad de circulación***: Esta variable indica la velocidad en la cual los vehículos al cruzar la intersección se desplazan, con la finalidad de conocer si están en movimiento o detenidos. La información de esta variable es obtenida mediante el sistema auxiliar SAPT, el cual no está considerado en la presente

tesis. Además, esta información es utilizada por el algoritmo para determinar si el estado del tráfico de la vía es regular o intenso.

- ***Estado de semáforo aledaño***: Esta variable indica el estado en el que se encuentra el semáforo siguiente a la intersección. Esta información permitirá determinar si los vehículos detenidos luego de la intersección se desplazarán o no. En caso no se cuente con la información de los semáforos aledaños el sistema asumirá un estado de funcionamiento independiente, el cual no considerará la información de sistemas aledaños.
- ***Sensores de corriente***: Esta variable indica si las lámparas de los semáforos conectados al controlador y/o sub controlador se encuentran operativas.

Por otra parte, las variables de salida que otorgará el algoritmo de control son las siguientes:

- ***Estados de los semáforos vehiculares***: Estas variables determinan los estados de operación de los semáforos vehiculares, específicamente activan o desactivan las salidas del controlador para encender las lámparas led de los semáforos vehiculares.
- ***Estados de los semáforos peatonales***: Estas variables determinan los estados de operación de los semáforos peatonales, específicamente activan o desactivan las salidas del controlador para encender las lámparas led de los semáforos peatonales.
- ***Alertas de fallas***: Estas variables determinan las posibles fallas en el funcionamiento de las lámparas led de los semáforos vehiculares y peatonales.

En base al análisis y la información descrita en esta sección en la Figura 5.2 se presenta un diagrama de flujo general del funcionamiento del algoritmo de control. Este diagrama presenta de manera general los parámetros del sistema que se analizan antes de determinar los estados de funcionamiento de los semáforos vehiculares y peatonales y el ciclo de operación que del algoritmo de control.

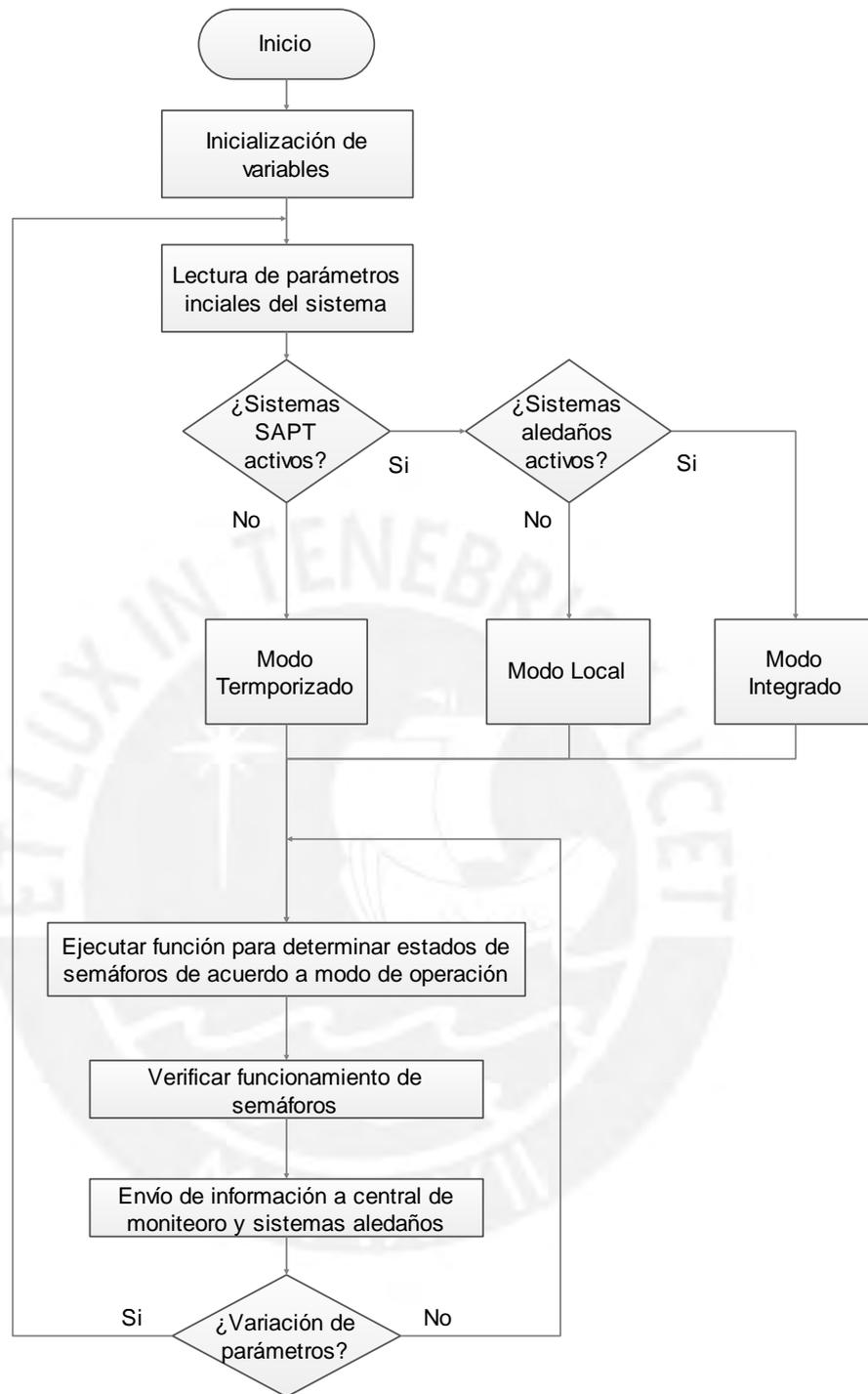


Figura 5.2: Diagrama de flujo general del algoritmo de control

La determinación de los estados de funcionamiento del sistema se realizará mediante funciones específicas dependiendo del modo de operación del sistema. Posteriormente en la sección 5.3 se describe con mayor detalle la lógica de operación de cada una de las funciones utilizadas para cada modo de operación.

Además, en la Figura 5.3 se presenta un diagrama de flujo general del funcionamiento de los subcontroladores, en donde se describe a grandes rasgos la función que cumplen los subcontroladores. En este diagrama se puede apreciar que la principal característica de los subcontroladores es leer la información de los sensores de corriente y asignar un estado de operación a los semáforos vehiculares y peatonales conectados al sistema. Además de manera repetitiva realiza la lectura de los parámetros del tráfico mediante el sistema SAPT.

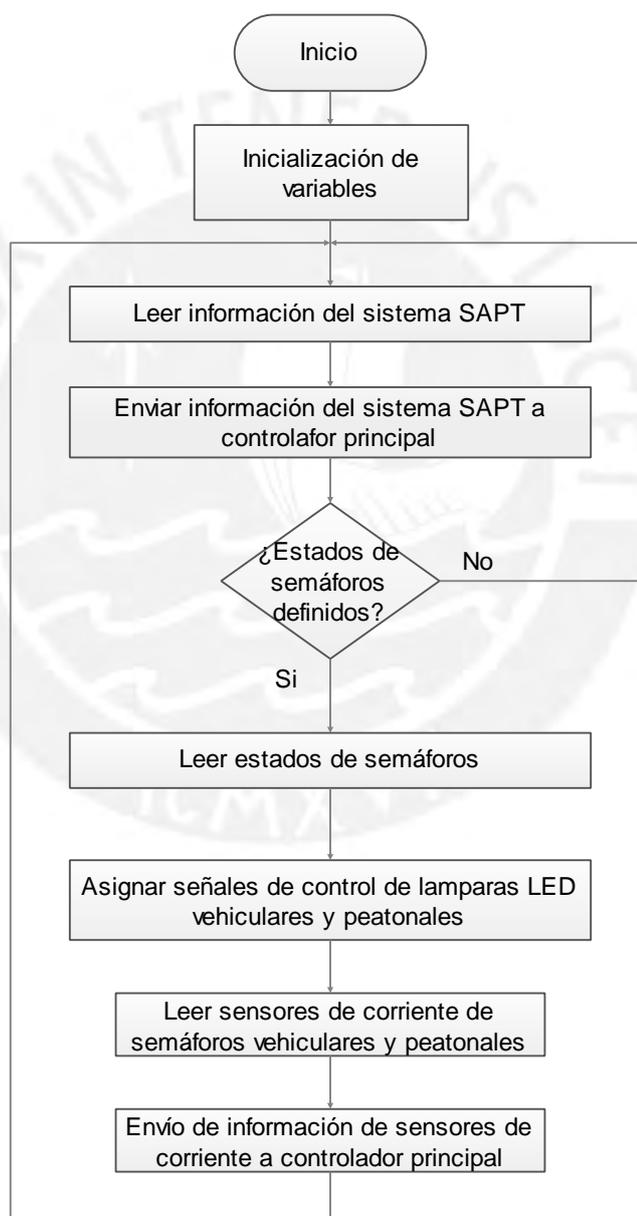


Figura 5.3: Diagrama de flujo general de los subcontroladores

5.2 Estados de funcionamiento

A partir de análisis del problema que se busca solucionar mediante la implementación del algoritmo, en esta sección se presente describir e identificar todos los posibles estados de funcionamiento del sistema. Para esto, en primer lugar, se analizó los estados de operación de los semáforos para el tipo de intersección más complejo (Tipo 3), considerando tanto los semáforos vehiculares como los peatonales. En la Figura 5.4 se muestran los estados de funcionamiento de los semáforos en la intersección, en donde se puede apreciar la manera en como alternan el funcionamiento los semáforos vehiculares ubicados en cada vía y los semáforos peatonales ubicados en las esquinas.

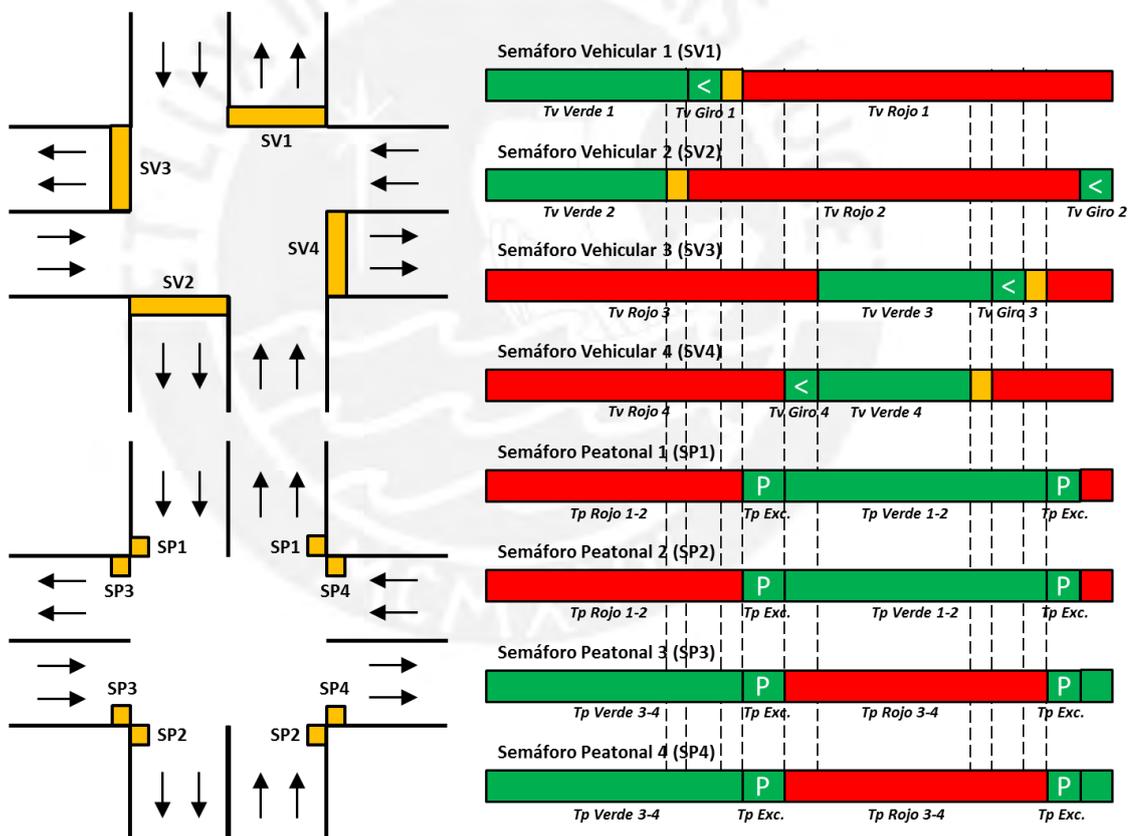


Figura 5.4: Estados de funcionamiento de los semáforos vehiculares y peatonales en una intersección Tipo 3

Como el análisis presentado en la Figura 5.4 se trata de un caso general, se consideró la existencia de estados exclusivos para el giro a la izquierda de vehículos, lo cual no está permitido en todo tipo de avenidas. Además, se ha considerado un tiempo

exclusivo (P) para el cruce de peatones luego de cada cambio de luz roja de un semáforo vehicular.

El análisis presentado también brinda una manera de relacionar los tiempos de operación de cada uno de los semáforos. Por este motivo, a continuación, se presentan las relaciones existentes para los tiempos de operación de los semáforos vehiculares y peatonales a partir de variables predefinidas al momento de configurar el sistema.

Variables definidas por la interfaz de monitoreo: Los valores de estas variables se obtienen de la configuración inicial realizada desde la interfaz de monitoreo al momento de configurar por primera vez el sistema. En esta sección se incluyen los tiempos de operación preestablecidos de los semáforos, los cuales serán tomados como referencia para la operación del sistema. También se definen variables booleanas que permiten describir la estructura de la intersección, es decir, permiten definir el número de vías que tiene la intersección y en cuál de estas vías se permite el giro a la izquierda. Además, se define el número de carriles de las cuatro vías que integran la intersección, dado que esta información será utilizada posteriormente para definir los tiempos de operación de los semáforos peatonales.

$$T_v \text{Verde } 1.2 = X \text{ segundos}$$

$$T_v \text{Verde } 3.4 = Y \text{ segundos}$$

$$\text{Vía } i = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \text{ (Booleano)}, \quad i = 1, \dots, 4$$

$$\text{Giro } i = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases} \text{ (Booleano)}, \quad i = 1, \dots, 4$$

$$\text{Carril } i = Z \text{ carriles}, \quad i = 1, \dots, 4$$

Variables fijas: Los valores de estas variables son fijos ya que son establecidos al momento de la programación del sistema y no pueden ser modificados por la interfaz. En estas variables se incluyen el tiempo exclusivo para los peatones, el tiempo de giro exclusivo y el tiempo de luz ámbar en los semáforos vehiculares.

$$T_p \text{Exc} = (5 * Z) \text{ segundos}, \quad Z = \text{máximo número de carriles}$$

$$T_v \text{Giro} = 10 \text{ segundos}$$

$$T_v \text{Ambar} = 3 \text{ segundos}$$

Variables definidas por el sistema: Los valores de estas variables son definidos durante la ejecución del algoritmo haciendo uso de las variables antes descritas. Estos valores permitirán establecer los tiempos de operación de cada uno de los estados de los semáforos vehiculares y peatonales.

Inicialmente se hace uso de las variables definidas por la interfaz para establecer si se tendrán tiempos de giro en los semáforos vehiculares.

$$T_vGiro SV1 = Giro 1 * T_vGiro$$

$$T_vGiro SV2 = Giro 2 * T_vGiro$$

$$T_vGiro SV3 = Giro 3 * T_vGiro$$

$$T_vGiro SV4 = Giro 4 * T_vGiro$$

Luego se definen los tiempos de operación de los semáforos vehiculares y peatonales haciendo uso de variables definidas por la interfaz y de variables fijas.

$$T_vVerde SV1 = T_vVerde 1.2 + T_vAmbar + T_vGiro 1$$

$$T_vVerde SV2 = T_vGiro 2 + T_vVerde 1.2$$

$$T_vVerde SV3 = T_vVerde 3.4 + T_vAmbar + T_vGiro 3$$

$$T_vVerde SV4 = T_vGiro 4 + T_vVerde 3.4$$

$$T_vAmbar SV1 = T_vAmbar SV2 = T_vAmbar SV3 = T_vAmbar SV4 = T_vAmbar$$

$$T_vRojo SV1 = T_pExc + T_vGiro 4 + T_vVerde 3.4 + T_vAmbar + T_vGiro 3 + T_vAmbar + T_pExc + T_vGiro 2$$

$$T_vRojo SV2 = T_vGiro 1 + T_vAmbar + T_pExc + T_vGiro 4 + T_vVerde 3.4 + T_vAmbar + T_vGiro 3 + T_vAmbar + T_pExc$$

$$T_vRojo SV3 = T_pExc + T_vGiro 2 + T_vVerde 1.2 + T_vAmbar + T_vGiro 1 + T_vAmbar + T_pExc + T_vGiro 4$$

$$T_vRojo SV4 = T_vGiro 3 + T_vAmbar + T_pExc + T_vGiro 2 + T_vVerde 1.2 + T_vAmbar + T_vGiro 1 + T_vAmbar + T_pExc$$

$$T_pVerde SP1 = T_pExc + T_vGiro 4 + T_vVerde 3.4 + T_vAmbar + T_vGiro 3 + T_vAmbar + T_pExc$$

$$T_pVerde SP2 = T_pExc + T_vGiro 4 + T_vVerde 3.4 + T_vAmbar + T_vGiro 3 + T_vAmbar + T_pExc$$

$$T_pVerde SP3 = T_pExc + T_vGiro 2 + T_vVerde 1.2 + T_vAmbar + T_vGiro 1 + T_vAmbar + T_pExc$$

$$T_pVerde SP4 = T_pExc + T_vGiro 2 + T_vVerde 1.2 + T_vAmbar + T_vGiro 1 + T_vAmbar + T_pExc$$

$$T_pRojo SP1 = T_vGiro 2 + T_vVerde 1.2 + T_vAmbar + T_vGiro 1 + T_vAmbar$$

$$T_pRojo SP2 = T_vGiro 2 + T_vVerde 1.2 + T_vAmbar + T_vGiro 1 + T_vAmbar$$

$$T_pRojo SP3 = T_vGiro 4 + T_vVerde 3.4 + T_vAmbar + T_vGiro 3 + T_vAmbar$$

$$T_pRojo SP4 = T_vGiro 4 + T_vVerde 3.4 + T_vAmbar + T_vGiro 3 + T_vAmbar$$

Finalmente se utiliza la información de las variables definidas por la interfaz para determinar los semáforos vehiculares que están operativos, de acuerdo al número de vías que tiene la intersección.

$$T_v\text{Verde SV1} = \text{Vía 1} * T_v\text{Verde SV1}$$

$$T_v\text{Verde SV2} = \text{Vía 2} * T_v\text{Verde SV2}$$

$$T_v\text{Verde SV3} = \text{Vía 3} * T_v\text{Verde SV3}$$

$$T_v\text{Verde SV4} = \text{Vía 4} * T_v\text{Verde SV4}$$

$$T_v\text{Ambar SV1} = \text{Vía 1} * T_v\text{Ambar SV1}$$

$$T_v\text{Ambar SV2} = \text{Vía 2} * T_v\text{Ambar SV2}$$

$$T_v\text{Ambar SV3} = \text{Vía 3} * T_v\text{Ambar SV3}$$

$$T_v\text{Ambar SV4} = \text{Vía 4} * T_v\text{Ambar SV4}$$

$$T_v\text{Rojo SV1} = \text{Vía 1} * T_v\text{Rojo SV1}$$

$$T_v\text{Rojo SV2} = \text{Vía 2} * T_v\text{Rojo SV2}$$

$$T_v\text{Rojo SV3} = \text{Vía 3} * T_v\text{Rojo SV3}$$

$$T_v\text{Rojo SV4} = \text{Vía 4} * T_v\text{Rojo SV4}$$

Por ejemplo, para una intersección del Tipo 1 en donde solo se tiene presente dos vías en la intersección, las variables definidas por la interfaz serían las siguientes:

$$\text{Vía 1} = 1, \quad \text{Vía 2} = 1, \quad \text{Vía 3} = 0, \quad \text{Vía 4} = 0$$

y las variables definidas por el sistema quedarían de la definidas de la siguiente manera:

$$T_v\text{Verde SV1} = T_v\text{Verde SV1}$$

$$T_v\text{Verde SV2} = T_v\text{Verde SV2}$$

$$T_v\text{Verde SV3} = 0, \quad T_v\text{Verde SV4} = 0$$

$$T_v\text{Ambar SV1} = T_v\text{Ambar SV1}$$

$$T_v\text{Ambar SV2} = T_v\text{Ambar SV2}$$

$$T_v\text{Ambar SV3} = 0, \quad T_v\text{Ambar SV4} = 0$$

$$T_v\text{Rojo SV1} = T_v\text{Rojo SV1}$$

$$T_v\text{Rojo SV2} = T_v\text{Rojo SV2}$$

$$T_v\text{Rojo SV3} = 0, \quad T_v\text{Rojo SV4} = 0$$

5.3 Diagramas de flujo del algoritmo

Esta sección presenta los diagramas de flujo que describen el funcionamiento de la lógica utilizada para el cálculo de los tiempos de operación de los sistemas. De acuerdo a modo de operación se hará uso de un algoritmo diferente para optimizar los tiempos de operación por lo que en esta sección se muestran 3 algoritmo, los cuales son más complejos con forme se cuente con mayor información del tráfico. Estos algoritmos serán ejecutados como una función cíclica ejecutada cada 1 segundo con la finalidad de optimizar los valores de los semáforos de manera periódica con forme se va adquiriendo nueva información.

La ejecución de cada algoritmo depende del modo de operación determinado por el diagrama de flujo presentado en la Figura 5.2. El sistema cuenta con los siguientes modos de operación: modo temporizado, modo local y modo integrado. Los tres modos de operación que serán ejecutados por el sistema se presentan en la Tabla 5.1 y estos dependen de la información de los sistemas SAPT y sistemas aledaños.

Tabla 5.1: Descripción de los modos de operación del sistema

Modo de operación	Requerimiento	Descripción
Temporizado	Ninguno	Modo de operación en caso no se cuente con información del tránsito vehicular
Local	Información de sensores	Modo de operación en donde se conoce solo la información del tránsito en la intersección
Integrado	Información de SAPT Información de sistemas aledaños	Modo de operación en donde se conoce la información del tránsito en la intersección y en intersecciones aledañas

En primer lugar, el modo de operación temporizado es el modo más básico implementado en el sistema, el cual se ejecuta cuando no se cuenta con información del estado del tránsito. Los tiempos de operación del sistema serán establecidos de acuerdo a la configuración de las características de la intersección y se mantendrán constantes hasta que haya un cambio en la configuración. Este modo solo hace uso de las fórmulas planteadas en la sección anterior para el cálculo de los tiempos de operación de cada semáforo y para determinar los estados de cada semáforo al

momento de la ejecución del programa. La Figura 5.5 muestra el diagrama de flujo del algoritmo implementado para el modo de operación temporizado.

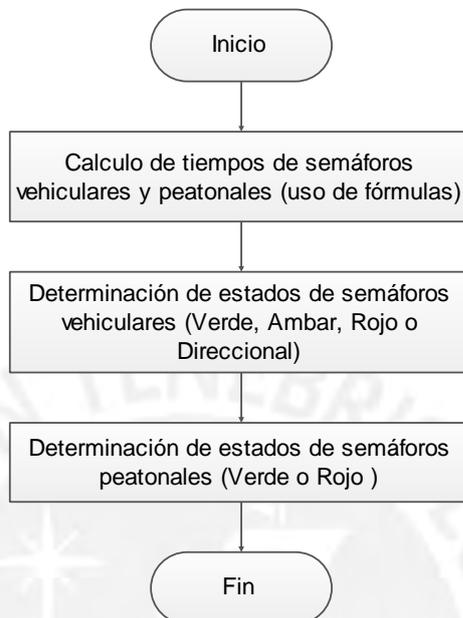


Figura 5.5: Diagrama de flujo de la función cíclica para el modo de operación temporizado

El siguiente modo de operación, modo local, se ejecuta cuando se cuenta con la información del tránsito vehicular de la intersección en donde se encuentra el sistema y opera de manera local sin tomar en cuenta información de otras intersecciones. En este caso los tiempos de operación se van variando de acuerdo a la información proporcionada por sensores ubicados en la intersección. La determinación de los tiempos de operación se calcula haciendo las mismas fórmulas que en el modo temporizado, pero los estados de los semáforos son determinados de acuerdo a la información de los sistemas SAPTs instalados en las intersecciones. Los sensores del SAPT utilizados en este modo permiten determinar si la vía de la intersección se encuentra congestionada, lo cual significa que hay vehículos detenidos en la vía inmediatamente después de la intersección. La Figura 5.6 muestra el diagrama de flujo del algoritmo implementado para el modo de operación local.

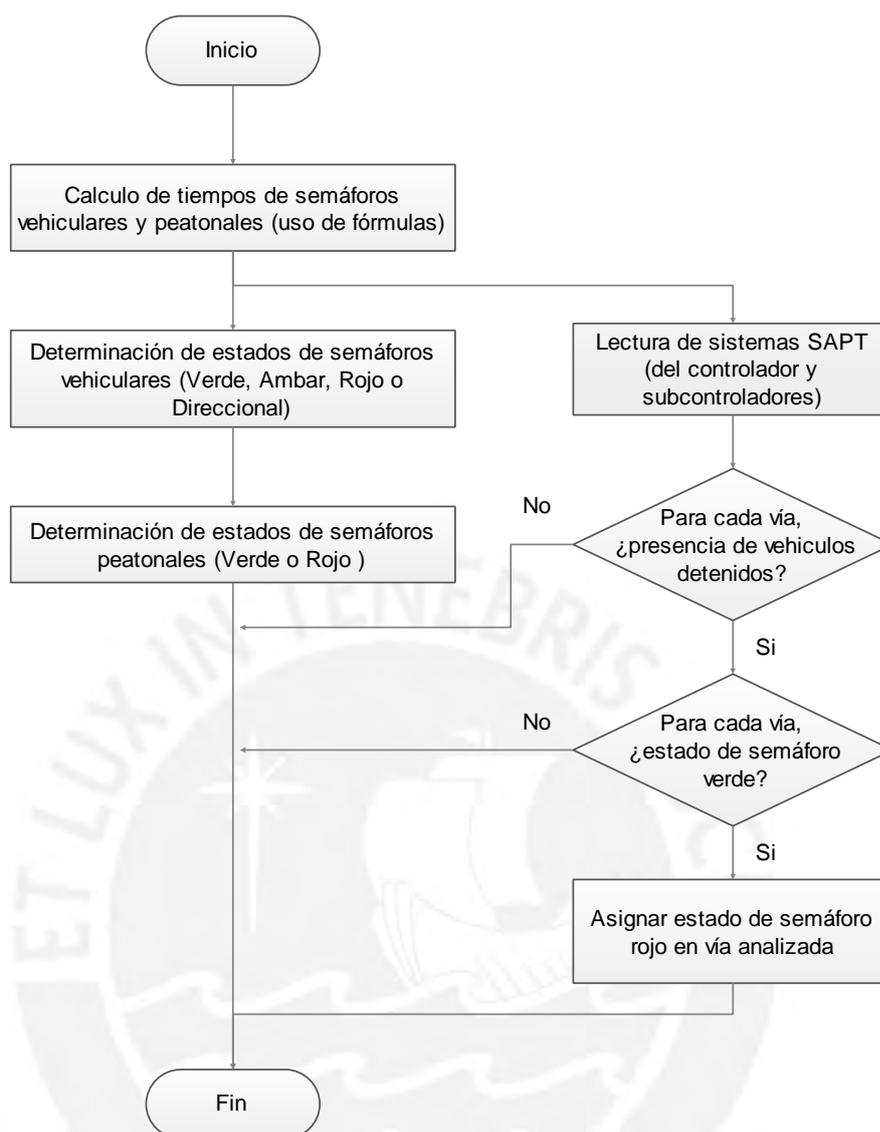


Figura 5.6: Diagrama de flujo de la función cíclica para el modo de operación local

El tercer modo de operación es denominado integrado y se ejecuta cuando el sistema recibe información de otros sistemas instalados en intersecciones aledañas además de la información del tráfico en la intersección. En este caso la determinación de estados de los semáforos también depende de los estados de semáforos aledaños, así como también del nivel de congestión en las vías siguientes. La información provista por los sistemas aledaños indica el estado del semáforo ubicado en la vía que une ambos sistemas y los parámetros de tráfico en la vía siguiente a la dicha intersección aledaña. La Figura 5.7 muestra el diagrama de flujo del algoritmo implementado para el modo de operación integrado.

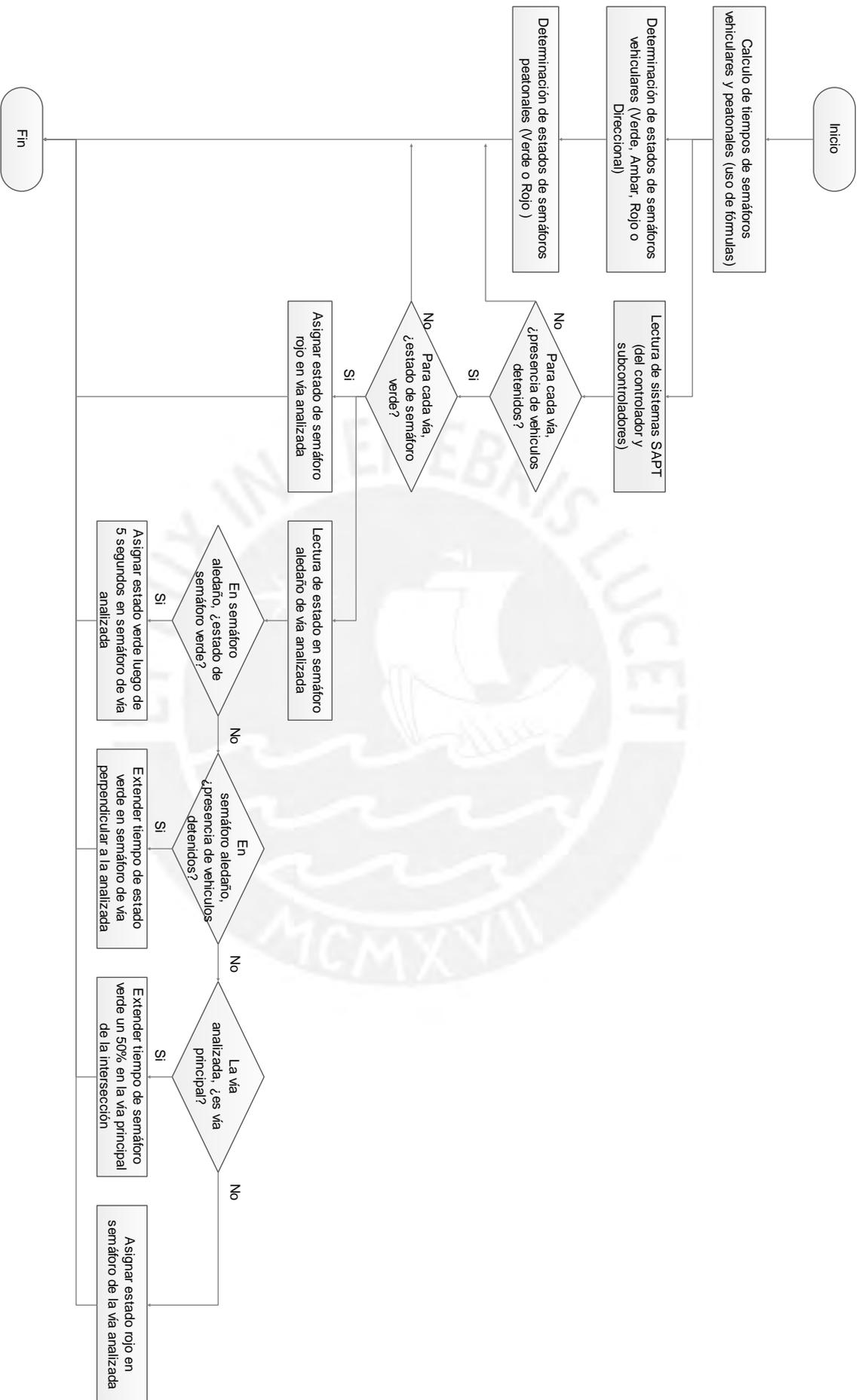


Figura 5.7: Diagrama de flujo de la función cíclica para el modo de operación integrado

5.4 Pseudocódigo del algoritmo

En el Anexo 15 se presenta el pseudocódigo del algoritmo de control del sistema, el cual explica a mayor detalle el funcionamiento del algoritmo con la finalidad de facilitar la implementación del algoritmo. Se muestra el pseudocódigo del diagrama de flujo principal, del diagrama de flujo de los subcontroladores y las funciones utilizadas en los pseudocódigos. La ventaja de los pseudocódigos es que en un futuro podrán ser utilizados para codificar el algoritmo de control sin importar el lenguaje de programación que utilizado.



CAPÍTULO 6

INTERFAZ DE MONITOREO

El sexto capítulo está orientado a explicar el funcionamiento de la interfaz de monitoreo a través de la cual se configurarán los sistemas de control de tráfico, así como también se puede visualizar los estados de operación de cada uno de los sistemas pertenecientes al que denominaremos Sistema Integrado de Control de Tráfico (SICT). En primer lugar, se brinda una descripción detallada de la interfaz de monitoreo y se explica la interacción de los sistemas interconectados con dicha interfaz. Luego se presenta la interfaz del sistema de monitoreo en donde se detalla la información brindada desde la misma, así como también la información enviada por los sistemas de control de tráfico. Posteriormente, se describe a detalle el procedimiento para el manejo de la información manipulada por la interfaz de monitoreo y los sistemas de control de tráfico. Finalmente se presentan pruebas de funcionamiento realizadas con la finalidad de validar funcionamiento algoritmo de operación desarrollada para el funcionamiento de la interfaz. Las pruebas de validación realizadas fueron tres. La primera prueba se realizó para validar la lectura de información mediante el acceso a la Base de Datos. La segunda prueba está orientada a validar la escritura de información en el archivo de Base de Datos. La última prueba busca validar el algoritmo que permite interpretar la información obtenida por los sistemas y mostrarla en la interfaz de monitoreo.

6.1 Descripción de la interfaz de monitoreo

La interfaz de monitoreo es la encargada de configurar los parámetros iniciales de los nuevos sistemas instalados en las intersecciones y además cuenta con la capacidad de monitorear el funcionamiento de cada uno de los sistemas, así como también visualizar cualquier mensaje de alerta que pueda presentarse durante la operación. Es importante recalcar que la interfaz de monitoreo no será capaz de intervenir en la operación de los sistemas ya que se tratan de sistemas autónomos que no requieren de intervención para su correcto y óptimo funcionamiento. En la Figura 6.1 se presenta un diagrama que describe la interacción de la interfaz de monitoreo con los sistemas de control de tráfico.

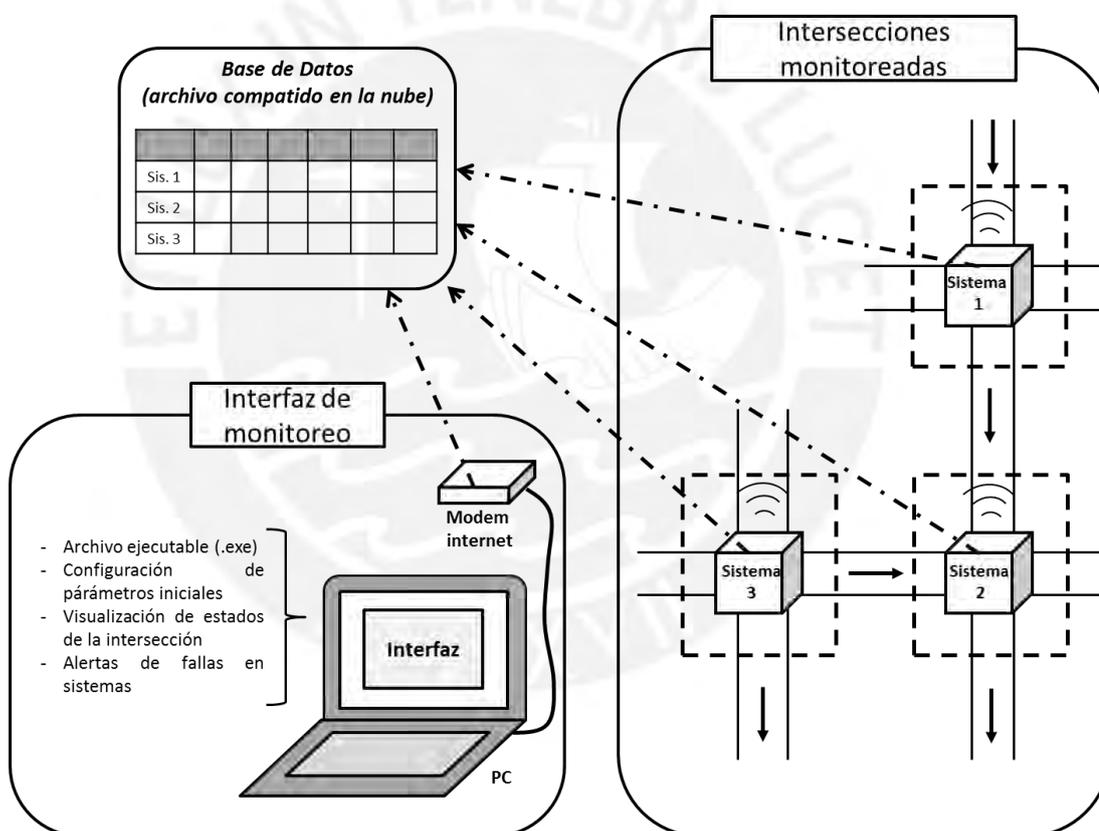


Figura 6.1: Diagrama de interacción entre la interfaz de monitoreo y los sistemas de control de tráfico

En el diagrama se puede observar que la interfaz de monitoreo y los sistemas instalados comparten información a través de una base de datos, la cual se encuentra compartida en la nube por lo que ambos pueden acceder a escribir y leer información relevante solo con acceso a internet. Además, es importante indicar que el monitoreo se puede realizar en cualquier equipo (computadora, laptop o Tablet) que cuente con conexión a internet y que tenga la capacidad de ejecutar un archivo tipo “.exe”. De

esta manera es posible que existan más de una interfaz de monitoreo al punto de que incluso la configuración de los sistemas se puedan realizar *in situ* mediante el uso de un equipo con conexión a internet.

6.2 Monitoreo del sistema

El manejo de la interfaz de monitoreo es realizado a través de un archivo ejecutable (.exe) a fin de poder ser utilizada en algún dispositivo electrónica con capacidad de ejecución de este tipo de archivos y que a la vez cuenten con conexión a internet. Además de la interfaz, se ha desarrollado un mapa personalizado en donde se registran todos los nuevos sistemas de control instalados a fin de conocer el código de identificación de cada uno de los sistemas y de reconocer su ubicación. En esta sección se describe el uso de ambas herramientas (mapa personalizado e interfaz de monitoreo) y las capacidades que tiene cada una de estas.

6.2.1 Mapa de identificación de sistemas

El mapa de identificación de sistemas es una herramienta desarrollada haciendo uso de Google Maps, en donde se creó un mapa personalizado con la finalidad de poder registrar la ubicación de cada uno de los sistemas de monitoreo instalados en la ciudad de Lima Metropolitana. Este mapa brinda información referente a la ubicación de los sistemas existentes y especialmente el ID que permite identificar cada uno de estos sistemas y mediante el cual podrá realizarse la configuración de los mismos haciendo uso de la interfaz de monitoreo.

En la Figura 6.2 se muestra la interfaz del mapa personalizado creado para la identificación de los sistemas de control de tráfico instalados en la ciudad de Lima. Esta imagen muestra de manera general la ubicación de todos en el mapa de los sistemas existentes (identificados con un símbolo de semáforos con fondo rojo) y la lista de sistemas registrados. El acceso a esta herramienta es libre, por lo que cualquier usuario que quiera conocer la información del SICT puede acceder a través del siguiente enlace:

https://drive.google.com/open?id=1FgVFPDbksmHlrsAVWtoIJ7HbR_w&usp=sharing

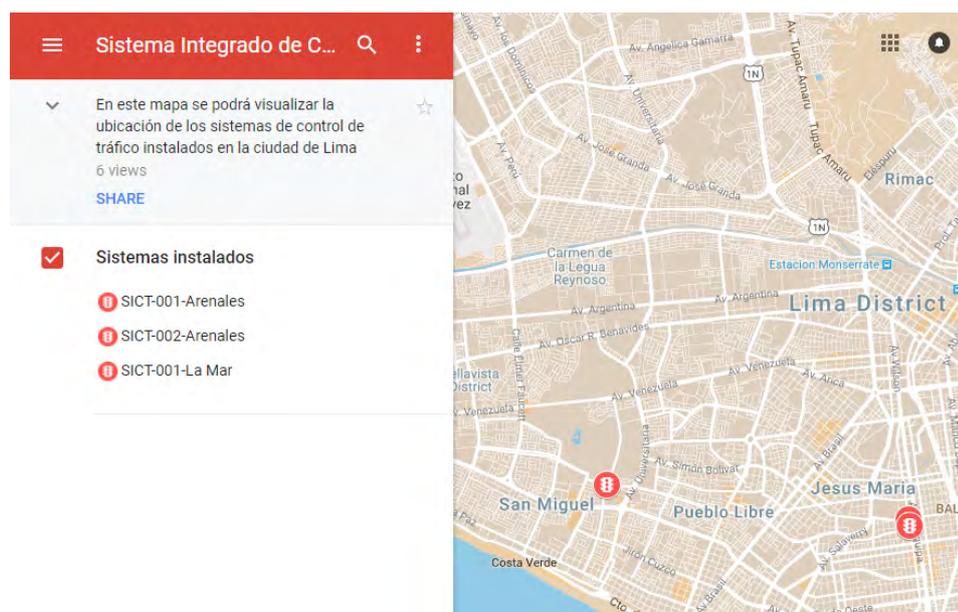


Figura 6.2: Vista general del mapa personalizado para la identificación de sistemas

De manera más específica es posible seleccionar de la lista algunos de los sistemas existentes con la finalidad de visualizar con mayor detalle la ubicación del sistema, la información de las avenidas en donde se encuentra instalado y el identificador de dicho sistema. Un ejemplo se puede apreciar en la Figura 6.3 en donde se muestra las características de un sistema agregado con fines de prueba. Adicionalmente, una vez que se realice la instalación de un sistema se podrá agregar imágenes de dichos sistemas instalados de las intersecciones.

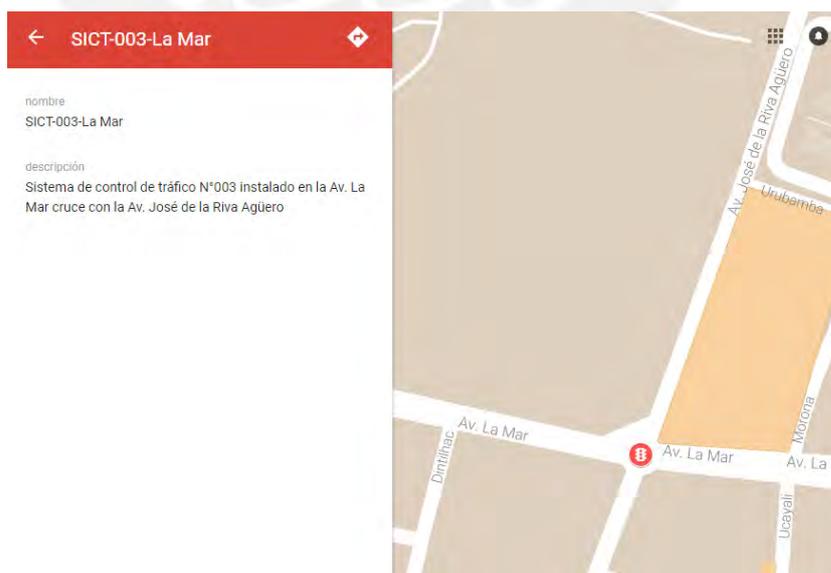


Figura 6.3: Detalle de las características de un sistema en el mapa personalizado

6.2.2 Interfaz de monitoreo

La interfaz de monitoreo es otra herramienta desarrollada con la finalidad de poder configurar o modificar las características y parámetros de los sistemas de monitoreo del SICT. Además, cuenta con la capacidad de poder monitorear el estado individual de cada uno de estos sistemas y de mostrar las posibles alertas enviadas por los sistemas del SICT.

Figura 6.4: Interfaz del Sistema Integrado de Control de Tráfico

La Figura 6.4 muestra la interfaz antes mencionada. En esa imagen se puede apreciar lo siguiente: en la zona superior izquierda, dos cuadros en donde se puede ingresar la ubicación del archivo de base de datos, el identificador del sistema y dos botones para iniciar y detener la ejecución del programa; en la media izquierda, una sección en donde se podrá visualizar la información del sistema; y en la parte inferior izquierda, una sección en donde se podrá visualizar las características de la intersección en caso ésta haya sido configurada anteriormente. Por otra parte, en la zona central se aprecia un cuadro de con cuatro pestañas en donde se puede observar las indicaciones de uso de la interfaz y en tres pestañas para el monitoreo del sistema

de acuerdo a tipo de intersección analizada. Finalmente, en la zona inferior se observa una sección en donde se mostrarán las alertas registradas por alguno de los sistemas del SICT.

Configuración del sistema

Para la configuración un nuevo sistema o modificar la configuración se hace uso de la zona central seleccionando una de las tres pestañas del tipo de intersección. Al seleccionar el tipo de intersección deseado se muestra una interfaz similar a la que se puede apreciar en la Figura 6.5. En la sección derecha se observa un cuadro para el ingreso de datos de las características de la intersección y en la parte inferior se observa un cuadro para el ingreso de los parámetros iniciales del sistema a configurar. Además, en esta figura también se puede apreciar una imagen que representa los semáforos de la intersección y un interruptor para el monitoreo del sistema, lo cual será descrito en la sección de monitoreo del sistema.

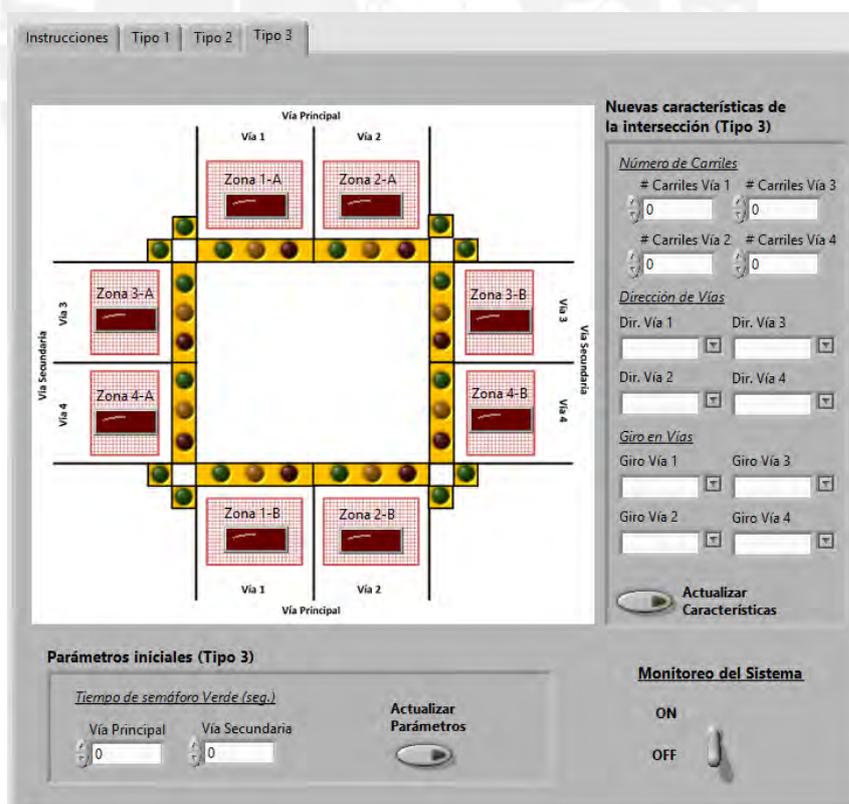


Figura 6.5: Interfaz para la configuración de un sistema

El cuadro para el ingreso de nuevas características de la intersección se encuentra ubicado en la zona derecha de la Figura 6.5. A través de este cuadro es posible agregar la información referente a las características de la intersección en donde se encuentra instalado el sistema a configurar. La información que se debe ingresar es el número de carriles que tiene cada vía, la dirección en la cual se desplazan los autos y si el giro hacia la izquierda en cada una de las vías está permitido. Además, el botón ubicado en la parte inferior del cuadro permite actualizar en la base de datos las nuevas características valores ingresados en la interfaz.

El cuadro para el ingreso de los parámetros iniciales del sistema se encuentra ubicado en la zona inferior de la Figura 6.5. A través de este cuadro se puede agregar la información referente a los parámetros iniciales que serán utilizados como valores referenciales para determinar los tiempos de operación de los semáforos del sistema. La información que se debe ingresar es el tiempo de predeterminado de operación del estado en verde de los semáforos de la vía principal y de la vía secundaria. Además, el botón ubicado en la parte derecha del cuadro permite actualizar en la base de datos los nuevos parámetros ingresados en la interfaz.

Monitoreo del sistema

Para monitorear el funcionamiento de uno de los sistemas de SICT se hace uso de la zona central seleccionando una de las tres pestañas del tipo de intersección. Dependiendo del tipo de intersección se mostrará un gráfico diferente que representa el número de semáforos presentes en la intersección. La Figura 6.6 muestra la interfaz de monitoreo para las intersecciones Tipo 1 (Figura 6.6.a), Tipo 2 (Figura 6.6.b) y Tipo 3 (Figura 6.6.c). Esta interfaz permite observar el estado de operación de cada uno de los semáforos vehiculares y peatonales instalados en la intersección, así como también el estado de los sensores de presencia y la dirección de cada una de las vías. Para iniciar el monitoreo del sistema se debe activar el interruptor ubicado en la zona inferior izquierda tal como se observa en la Figura 6.5.

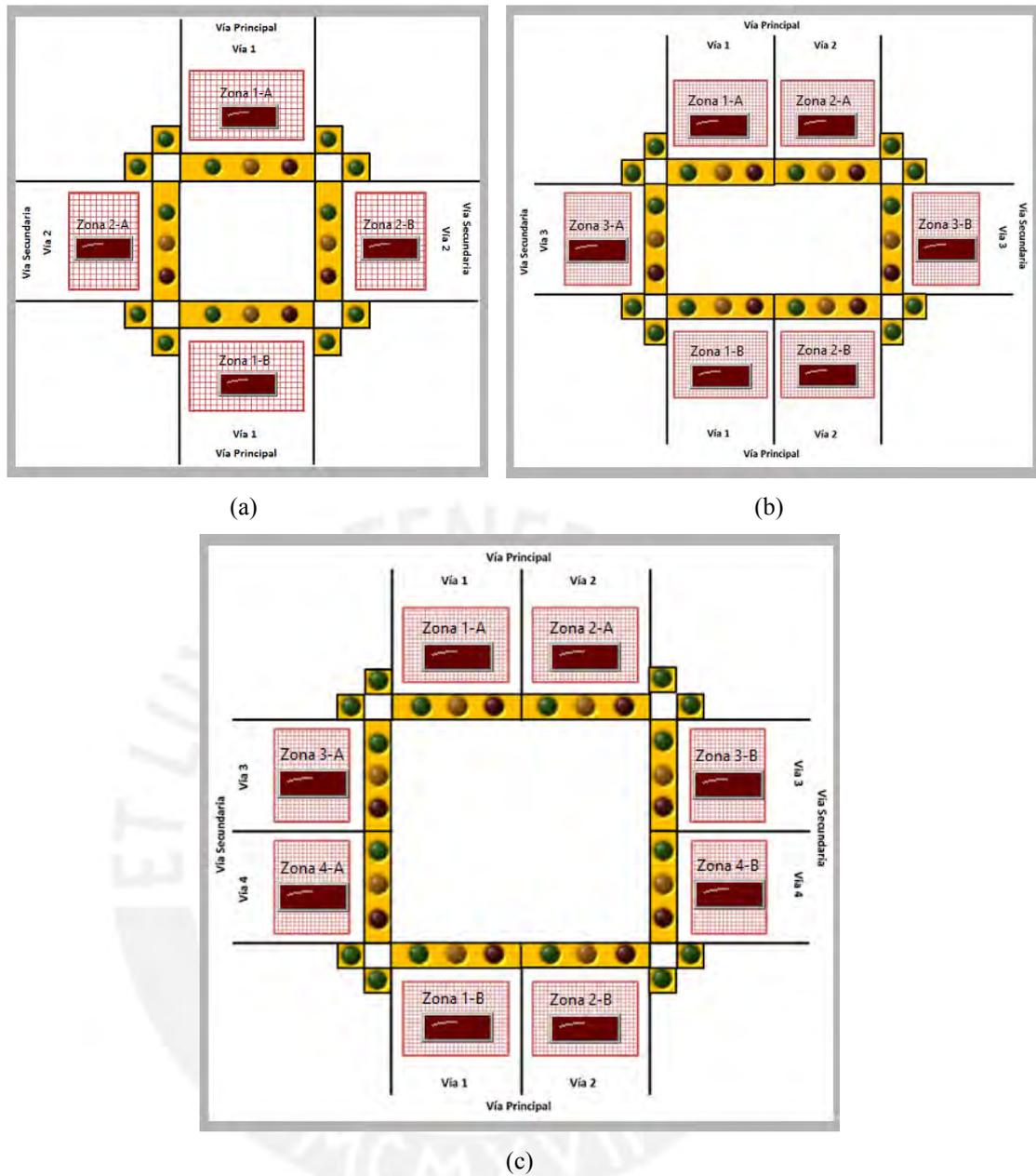


Figura 6.6: Interfaz para el monitoreo de un sistema de acuerdo al tipo de intersección: (a) Tipo 1, (b) Tipo 2 y (c) Tipo 3

6.3 Manejo de datos de la interfaz de monitoreo

La transmisión de los datos entre los controladores y la interfaz de monitoreo se realizará a través de una base de datos a la cual se accede con una conexión de internet. Esta base de datos contiene información para la identificación de cada uno de los sistemas, la configuración de cada sistema proporcionada por la interfaz y la información de operación brindada por los sistemas de control de tránsito. A continuación, se pasa a detallar cada uno de los grupos de datos manejados por la interfaz de monitoreo.

Los datos de identificación de un sistema instalado en la intersección es información utilizada para poder acceder a la configuración del mismo a través de la interfaz del monitoreo, y también es utilizado por el mismo sistema para poder enviar su información de operación a la base de datos. Estos datos son proporcionados al momento de la instalación del sistema y se configuran directamente en la base de datos, en el sistema instalado y en el mapa personalizado con el fin de que pueda ser posteriormente identificado. La información que se utiliza para la identificación es un ID del sistema, el cual corresponde a un código de identificación, el nombre de la vía principal y el de la vía secundaria en donde ha sido instalado el sistema. En la Tabla 6.1 se muestra el detalle de los datos utilizados para la identificación del sistema.

Tabla 6.1: Datos de identificación de la intersección

Categoría	Descripción	Tipo de dato
ID del Sistema	Código de identificación del sistema de control de tráfico	Texto (SICT-###-AvenidaPrincipal)
Vía Principal	Nombre de la vía principal. Permite determinar la prioridad de las vías	Texto
Vía Secundaria	Nombre de la vía secundaria	Texto

Los datos para la configuración del sistema son aquellos proporcionados por la interfaz de monitoreo y son utilizados para poder definir las características de la intersección en la cual ha sido instalado el sistema de control de tráfico y los tiempos predeterminados de operación de los semáforos. Estos datos son ingresados por la

interfaz de monitoreo antes de poner en operación del sistema ya que son utilizados por el controlador para calcular los estados de operación de los semáforos. Además, los datos de configuración pueden ser modificados en cualquier momento a través de la interfaz de monitoreo en caso se realice alguna modificación en las características de la intersección o en los tiempos referenciales de operación de los semáforos. La información de la configuración proporcionada por la interfaz es la orientación de las vías de la intersección, el número de carriles de cada una de las vías, si es permitido el giro a la izquierda en cada vía y el tiempo de operación del semáforo verde predeterminado para la vía principal y la vía secundaria. En la Tabla 6.2 se muestra el detalle de los datos de configuración proporcionados por la interfaz.

Tabla 6.2: Datos de configuración proporcionados por la interfaz

Categoría	Descripción	Tipo de dato
Orientación (Vía 1, Vía 2, Vía 3 y Vía 4)	Permite identificar las vías de la intersección para realizar la configuración	Sentido (N/S, S/N, E/O, O/E)
Carriles (Vía 1, Vía 2, Vía 3 y Vía 4)	Cantidad de carriles en las vías permite definir el tiempo mínimo en semáforos peatonales	Numero entero (# carriles)
Giro (Vía 1, Vía 2, Vía 3 y Vía 4)	Permiso de giro permite definir los tiempos exclusivos de giro para los semáforos	Booleano (0 o 1)
Tiempo de Verde (Vía Principal y Vía Secundaria)	Permite establecer los tiempos de operación iniciales de los semáforos	Numero entero (# segundos)

Los datos de operación de los sistemas de control de tráfico son proporcionados a la base de datos por cada uno de los controlados de los sistemas. Estos son utilizados por la interfaz de monitoreo para visualizar la operación en tiempo de real de los semáforos y sensores de un sistema y también para monitorear las posibles alertas enviadas por los controladores. La información proporcionada por cada uno de los sistemas son los estados de operación de los semáforos vehiculares, los estados de operación de los semáforos peatonales, la información de la presencia de vehículos antes y después de cada una de las vías de la intersección y las alertas de operación. En la Tabla 6.3 se muestra el detalle de los datos de operación proporcionados por los sistemas de control de tránsito.

Tabla 6.3: Datos de operación proporcionados por los sistemas de control de tránsito

Categoría	Descripción	Tipo de dato
Semáforo Vehicular (Vía 1, Vía 2, Vía 3, Vía 4)	Indican los estados de operación de los semáforos vehiculares	Estado de semáforo (Verde, Ámbar, Rojo, Direccional)
Semáforo Peatonal (Vía 1, Vía 2, Vía 3, Vía 4)	Indican los estados de operación de los semáforos peatonales	Estado de semáforo (Verde, Rojo)
Vehículos (Vía 1, Vía 2, Vía 3, Vía 4)	Indican la presencia de vehículos antes y después de cada una de las vías de la intersección	Estado de sensor (Activo, Desactivo)
Alertas	Indican si hay alguna alerta de operación en los sistemas	Booleano (0 o 1)

6.4 Algoritmo de operación de interfaz de monitoreo

La interfaz de monitoreo recibe y transmite información de la base de datos y a la vez cuenta con la capacidad de mostrar los estados de operación de algunos de los sistemas del SICT. Para la ejecución de todas estas funciones detrás de la interfaz existe un algoritmo de funcionamiento, el cuál consta de una función principal y de tres interrupciones que se ejecutan a la par de la función principal. El algoritmo de la interfaz ha sido desarrollado haciendo uso del software Labview de National Instruments, para el cuál se ha hecho uso de los diagramas de flujo presentes en esta sección.

La función principal del sistema se comporta de acuerdo al diagrama de flujo presentado en la Figura 6.7. En este diagrama se puede observar que en primer lugar el algoritmo verificar la orden de inicio del sistema, para luego leer el código de identificación a fin de iniciar la conexión con la base de datos. Una vez que se realiza la conexión se proceder a leer las características del sistema y alertas registradas en la base de datos, para luego ser mostrados en la interfaz y finalizar la conexión con la base de datos. Finalmente se procede a ejecutar el mismo procedimiento de forma repetitiva hasta que se detecte la orden de detener la ejecución del algoritmo.

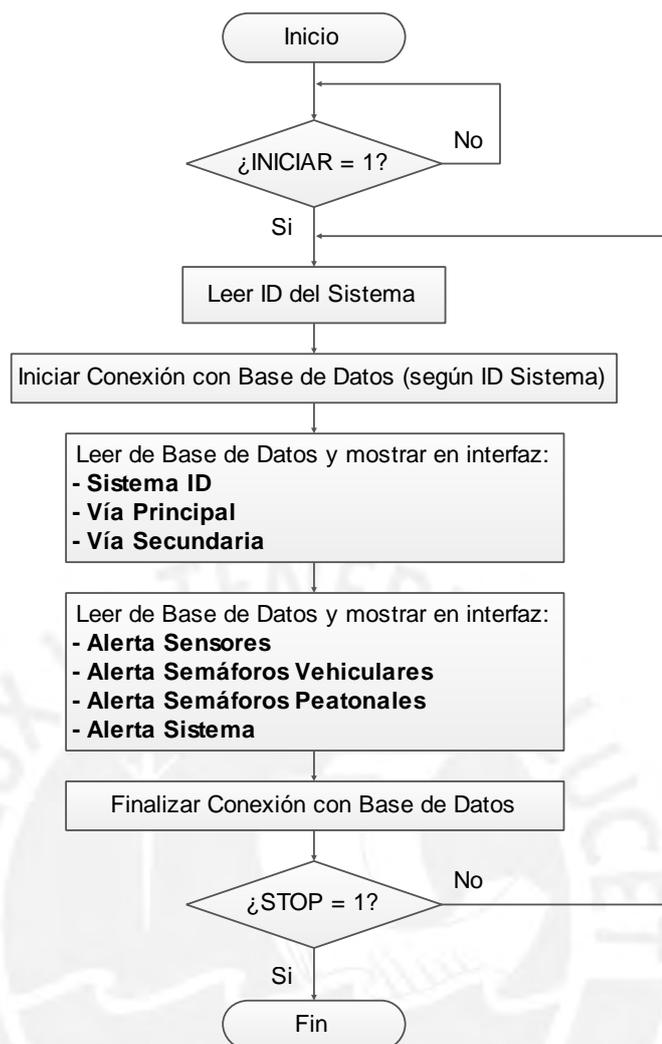


Figura 6.7: Diagrama de flujo principal de la interfaz de monitoreo

La primera interrupción del algoritmo es utilizada para actualizar las características del sistema y su comportamiento se da de acuerdo al diagrama de flujo presentado en la Figura 6.8. El diagrama muestra que una vez que se detecte la acción de actualizar características (botón en la interfaz) se procede a iniciar una conexión con la base de datos de acuerdo al identificador del sistema ingresado en la interfaz. Una vez realizada la conexión se lee la información ingresada en la interfaz y se escribe dicha información en la base de datos. Por último, se finaliza la conexión y se procede a cumplir la ejecución de la interrupción.

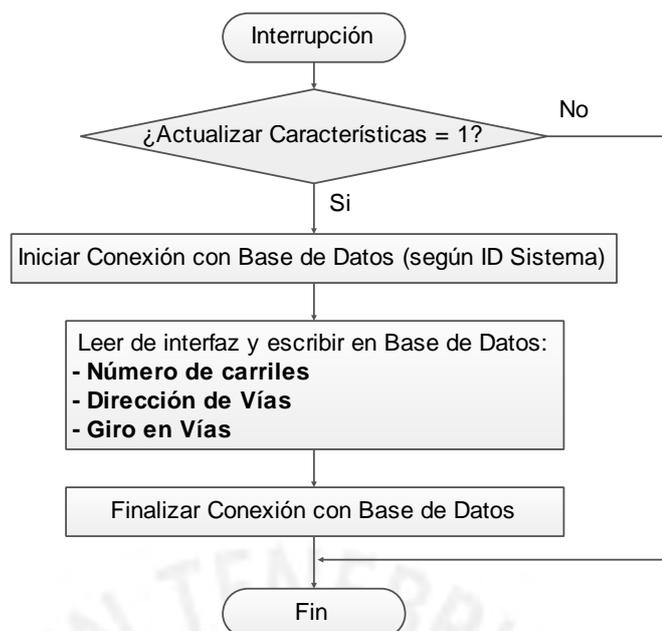


Figura 6.8: Diagrama de flujo de la interrupción “Actualizar características”

La segunda interrupción del algoritmo es utilizada para actualizar los parámetros iniciales del sistema y su comportamiento se da de acuerdo al diagrama de flujo presentado en la Figura 6.9. Su comportamiento es muy similar a la primera interrupción con la diferencia que se leen los tiempos establecidos para los semáforos de las vías principales y secundarias ingresados en la interfaz y luego dichos parámetros son escritos en la base de datos.

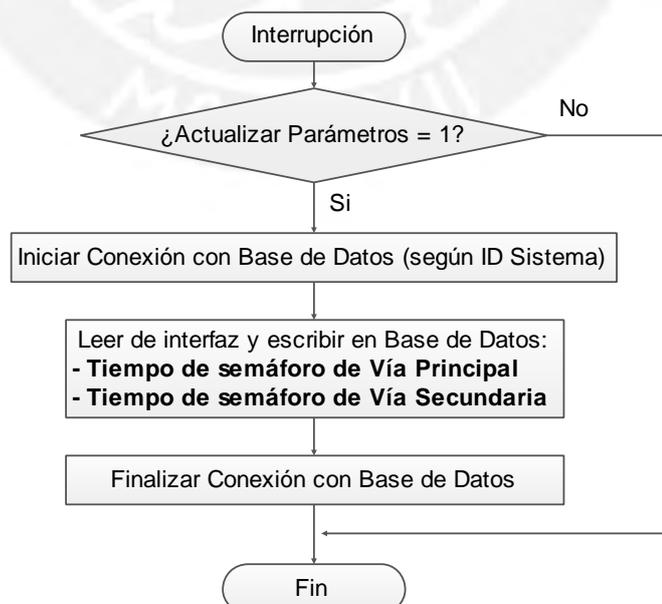


Figura 6.9: Diagrama de flujo de la interrupción “Actualizar parámetros”

La tercera interrupción del algoritmo es utilizada para monitorear uno de los sistemas del SICT y su comportamiento se da de acuerdo al diagrama de flujo presentado en la Figura 6.10. Este diagrama muestra que una vez que se detecta la acción de monitorear sistema (interruptor en la interfaz) se inicia una conexión con la base de datos de acuerdo al identificador ingresado en la interfaz. Una vez establecida la conexión se procede a leer los estados de los semáforos vehiculares, de los semáforos peatonales, de los sensores de presencia y la dirección de las vías de la intersección, con la finalidad de luego mostrar los parámetros leídos en la interfaz de monitoreo. Por último, se finaliza la conexión con la base de datos y se repite el mismo ciclo hasta que el estado de monitoreo se encuentre desactivado.

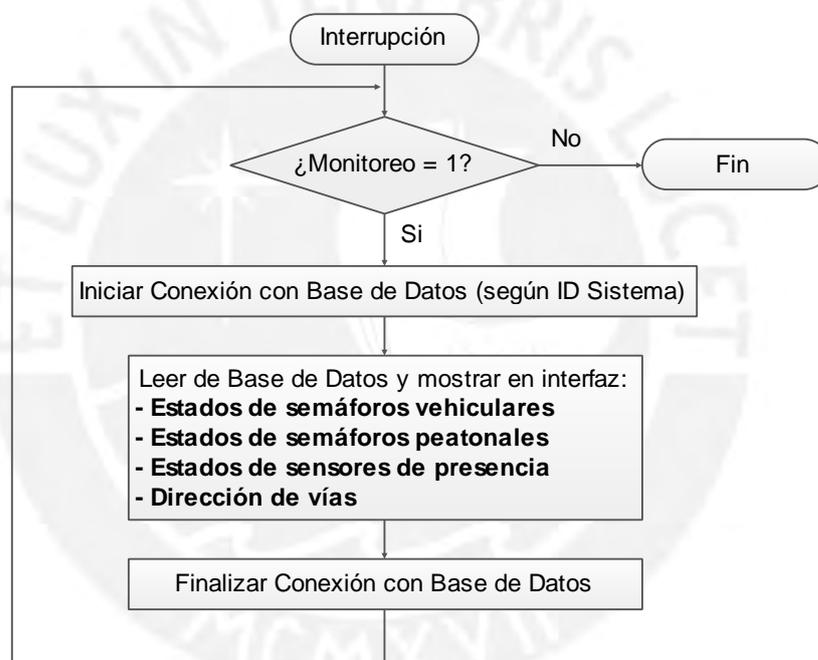


Figura 6.10: Diagrama de flujo de la interrupción “Monitoreo de sistema”

6.5 Pruebas de funcionamiento

6.5.1 Lectura de información

La primera prueba de funcionamiento tiene como finalidad comprobar el funcionamiento del algoritmo desarrollado en la interfaz para la lectura de información de la base de datos. Para esto se hace uso de un archivo CSV, el cual simulará a un archivo de base de datos. En este archivo se tiene registrada la información de dos sistemas de semáforos.

La interfaz de monitoreo tiene la opción de ingresar el ID del sistema para que se pueda mostrar la información del sistema y las características de la intersección. Dado que ya se tiene esta información registrada en el archivo CSV, la prueba consiste solo en ingresar los tres IDs de los sistemas a fin de verificar que la información mostrada sea igual a la información registrada en el archivo base.

ID del Sistema	Vía Principal	Vía Secundaria	Carriles				Orientación				Giro			
			Vía 1	Vía 2	Vía 3	Vía 4	Vía 1	Vía 2	Vía 3	Vía 4	Vía 1	Vía 2	Vía 3	Vía 4
SICT-001-Arenales	Av. Arenales	Jr. Manuel Segura	4	0	2	0	N/S		O/E					
SICT-002-Arequipa	Av. Arequipa	Jr. Risso	2	2	2	0	N/S	S/N	E/O			Si		

(a)

The image shows two side-by-side screenshots of a monitoring interface, labeled (b) and (c). Each screenshot displays the same layout of controls and data fields. The interface is divided into several sections: 'Identificador del Sistema' (System Identifier), 'Visualizar Sistema' (View System) with 'INICIAR' (Start) and 'Detener' (STOP) buttons, 'Información del Sistema' (System Information) with fields for 'Sistema ID', 'Vía Principal' (Main Road), and 'Vía Secundaria' (Secondary Road), and 'Características de la intersección' (Intersection Characteristics) with sub-sections for 'Número de Carriles' (Number of Lanes), 'Dirección de Vías' (Road Directions), and 'Giro en Vías' (Turns at Intersections).

Panel (b) shows the interface for system SICT-001-Arenales. The 'Número de Carriles' section shows 4 lanes for Vía 1, 0 for Vía 2, 2 for Vía 3, and 0 for Vía 4. The 'Dirección de Vías' section shows N/S for Vía 1, O/E for Vía 3, and empty fields for Vía 2 and Vía 4. The 'Giro en Vías' section shows empty fields for all four roads.

Panel (c) shows the interface for system SICT-002-Arequipa. The 'Número de Carriles' section shows 2 lanes for Vía 1, 2 for Vía 2, 2 for Vía 3, and 0 for Vía 4. The 'Dirección de Vías' section shows N/S for Vía 1, E/O for Vía 3, S/N for Vía 2, and empty for Vía 4. The 'Giro en Vías' section shows 'Si' (Yes) for Vía 1 and empty fields for Vía 2, Vía 3, and Vía 4.

(b)

(c)

Figura 6.11: Resultado de prueba de funcionamiento para la lectura de información a través de la interfaz. (a) Información en archivo CSV, (b) resultados de prueba 1 y (c) resultados de prueba 2

En la Figura 6.11 se muestran los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento de los tres sistemas. La Figura 6.11.a muestra la información previamente registrada en el archivo CSV, mientras que las Figura 6.11.b y Figura 6.11.c muestran la información leída a través de la interfaz. Los resultados permiten corroborar que el algoritmo desarrollado en la interfaz para la lectura de información de la Base de Datos funciona de manera correcta.

6.5.2 Registro de información

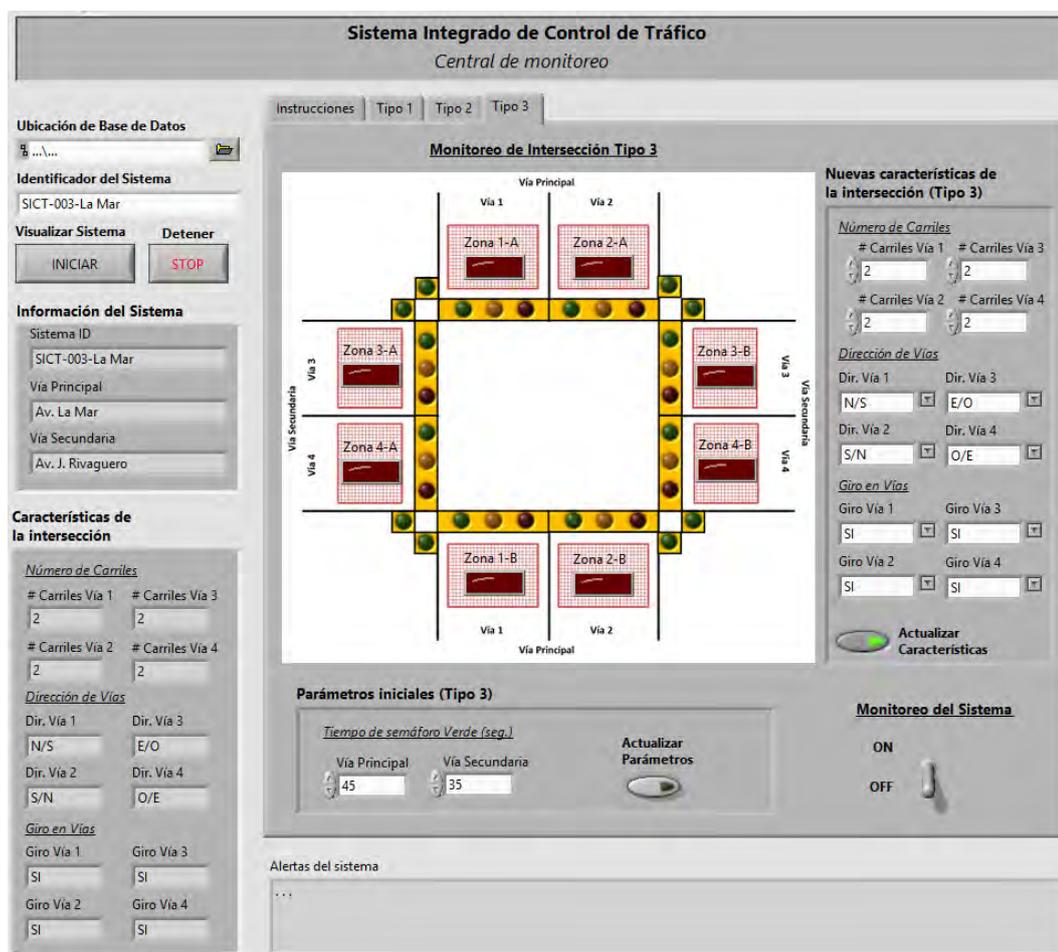
La segunda prueba de funcionamiento tiene como finalidad comprobar el funcionamiento del algoritmo desarrollado en la interfaz para el registro de información de la base de datos. Por esta razón se registrará información de un sistema de prueba en un archivo CSV mediante el uso de la interfaz. La información a registrar en el archivo será las características del sistema y los parámetros iniciales del sistema, tal como se muestran en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4: Información de un sistema de prueba para ser registrado en un archivo CSV mediante la prueba de registro de información

	Información	Valor	
Información del sistema	ID del sistema	SICT-003-La Mar	
	Carriles en Vía 1	2	
	Carriles en Vía 2	2	
	Carriles en Vía 3	2	
	Carriles en Vía 4	2	
	Características del sistema	Orientación en Vía 1	N/S
		Orientación en Vía 2	S/N
		Orientación en Vía 3	E/O
		Orientación en Vía 4	O/E
	Parámetros iniciales del sistema	Giro en Vía 1	SI
Giro en Vía 2		SI	
Giro en Vía 3		SI	
Giro en Vía 4		SI	
Parámetros iniciales del sistema	Tiempo de verde en Vía Principal	45	
	Tiempo de verde en Vía Secundaria	35	

La interfaz de monitoreo tiene la opción de registrar información de un sistema tan solo ingresando el ID y seleccionando el tipo de intersección. Dado que ya se conoce la información que se desea registrar (ver Tabla 6.4), la prueba consiste en usar las opciones de la interfaz que permite actualizar las características del sistema y actualizar los parámetros iniciales del sistema. En la Figura 6.12 se presentan los resultados obtenidos en la prueba de funcionamiento del registro de información del

sistema de prueba. La Figura 6.12.a muestra el uso de la interfaz para el registro de la información, mientras que la Figura 6.12.b y la Figura 6.12.c muestra la información en el archivo CSV antes y después del registro. El resultado permite garantizar que el algoritmo desarrollado en la interfaz para el registro de información de la Base de Datos funciona de manera correcta.



(a)

ID del Sistema	Vía Principal	Vía Secundaria	Carriles				Orientación				Giro				
			Vía 1	Vía 2	Vía 3	Vía 4	Vía 1	Vía 2	Vía 3	Vía 4	Vía 1	Vía 2	Vía 3	Vía 4	
SICT-001-Arenales	Av. Arenales	Jr. Manuel Segura	4	0	2	0	N/S								
SICT-002-Arequipa	Av. Arequipa	Jr. Risso	2	2	2	0	N/S	S/N	E/O			Si			
SICT-003-La Mar	Av. La Mar	Av. J. Rivaguero													

(b)

ID del Sistema	Vía Principal	Vía Secundaria	Carriles				Orientación				Giro				
			Vía 1	Vía 2	Vía 3	Vía 4	Vía 1	Vía 2	Vía 3	Vía 4	Vía 1	Vía 2	Vía 3	Vía 4	
SICT-001-Arenales	Av. Arenales	Jr. Manuel Segura	4	0	2	0	N/S		O/E						
SICT-002-Arequipa	Av. Arequipa	Jr. Risso	2	2	2	0	N/S	S/N	E/O			Si			
SICT-003-La Mar	Av. La Mar	Av. J. Rivaguero	2	2	2	2	N/S	S/N	E/O	O/E		Si	Si	Si	Si

(c)

Figura 6.12: Resultado de prueba de funcionamiento para el registro de información a través de la interfaz. (a) Información registrada en la interfaz, e información en archivo CSV (b) antes del registro de información y (c) después del registro de información

6.5.3 Monitoreo de sistema

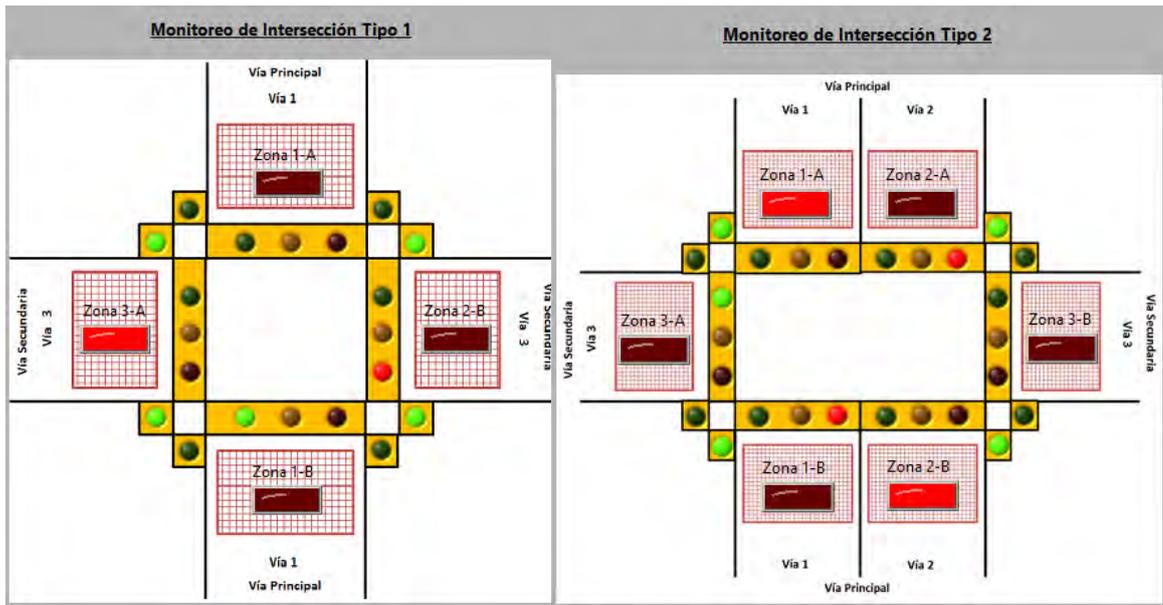
La tercera prueba de funcionamiento tiene como finalidad validar el funcionamiento del algoritmo desarrollado en la interfaz para el monitoreo de un sistema de control de tráfico conectado a la base de datos. Por esta razón se registrará información de tres sistemas de prueba en un archivo CSV, los cuales serán analizados por el algoritmo y se mostrará el estado de operación de cada uno de los sistemas. Se presenta la información de tres sistemas de semáforos de los tres Tipos que se han venido a trabajando en el documento. Cada uno de los archivos contiene los estados de los semáforos vehiculares, de los semáforos peatonales y de la presencia de vehículos, tal como se muestra en la Figura 6.13.

ID del Sistema	Semáforo Vehicular Vía 1	Semáforo Vehicular Vía 2	Semáforo Vehicular Vía 3	Semáforo Vehicular Vía 4	Semáforo Peatonal Vía 1	Semáforo Peatonal Vía 2	Semáforo Peatonal Vía 3	Semáforo Peatonal Vía 4
SICT-001-Arenales	VERDE		ROJO		ROJO	ROJO	VERDE	VERDE
SICT-002-Arequipa	ROJO	ROJO	VERDE		VERDE	VERDE	ROJO	ROJO
SICT-003-La Mar	DIRECCIONAL	ROJO	ROJO	ROJO	ROJO	ROJO	VERDE	VERDE

Figura 6.13: Información de los tres sistemas de prueba utilizados para validar el monitoreo de sistemas en la interfaz

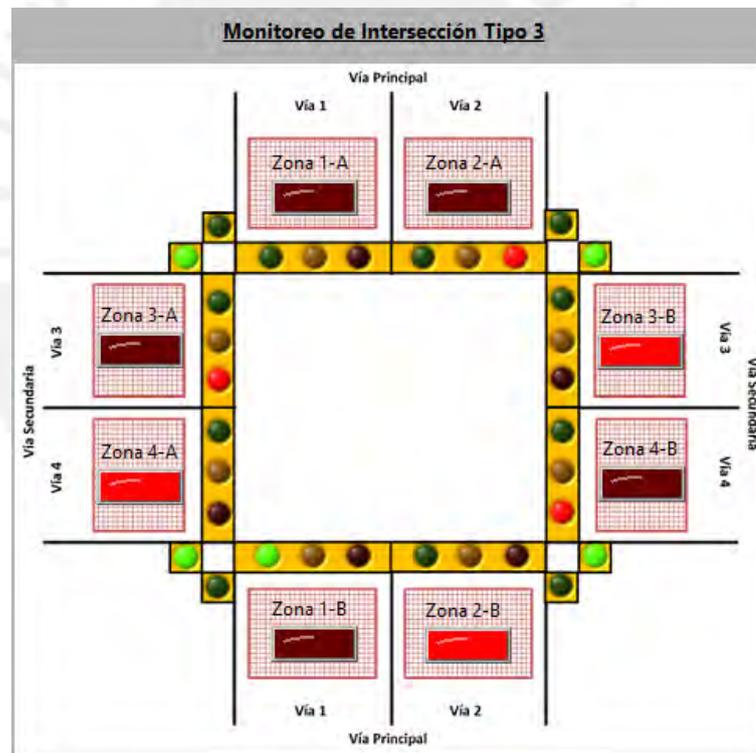
La prueba consiste en hacer uso de la interfaz para validar el funcionamiento de la opción de monitoreo mediante la información de los tres sistemas registrados en el archivo CSV. De esta manera, en la interfaz solo se especifica el ID del sistema a monitorear, se selecciona la pantalla correspondiente para el tipo de sistema y se activa la opción de monitorear sistema.

En la Figura 6.14 se muestran los resultados obtenidos en la prueba de monitoreo de los tres sistemas. La Figura 6.14.a muestra el monitoreo del sistema Tipos 1 con ID SICT-001-Arenales; la Figura 6.14.b. muestra el monitoreo del sistema Tipos 2 con ID SICT-002-Arequipa; y la Figura 6.14.c. muestra el monitoreo del sistema Tipos 3 con ID SICT-003-La Mar. Finalmente, los resultados mostrados permiten corroborar que el algoritmo desarrollado para el monitoreo de sistemas funciona de manera correcta.



(a)

(b)



(c)

Figura 6.14: Resultado de prueba de funcionamiento del monitoreo de sistemas a través de la interfaz. (a) monitoreo de un sistema Tipo 1 (b) monitoreo de un sistema Tipo 2 y (c) monitoreo de un sistema Tipo 3

CAPÍTULO 7

PRESUPUESTO

El séptimo capítulo muestra la estimación de un presupuesto total para la implementación de uno de los sistemas diseñados. Primero se presentan por separado los costos de los componentes mecánicos y electrónicos para los controladores y subcontroladores. Luego se detallan los costos de fabricación y ensamblaje, así como también se indica el costo final de un controlados y de un subcontrolador. Finalmente, se presenta un presupuesto estimado de la instalación de un sistema integrado de acuerdo al tipo de intersección en donde se desea instalar.

7.1 Presupuesto del sistema

Por último, en esta sección se presentan los costos para la fabricación e implementación de un controlador o subcontrolador y el costo estimado de la implementación de un sistema integrado para cada tipo de intersección. Para esto se describe de manera individual los costos de los componentes mecánicos y de los componentes electrónicos del sistema, los costos de fabricación e instalación y los costos de implementación de un sistema integrado. Cada una de las tablas detalla los presupuestos para los controladores como para los subcontroladores, ya que ambos comparten la mayoría de los materiales y componentes utilizados para su fabricación.

La Tabla 7.1 presenta el detalle de los costos de los componentes mecánicos utilizados para la fabricación de un controlador o subcontrolador. En la tabla se consideran solo los materiales necesarios sin incluir los costos de fabricación. Dado que para el controlador y el subcontrolador comparten los mismos componentes mecánicos ambos presentan un mismo valor.

Tabla 7.1: Costos de componentes mecánicos del controlador y subcontrolador

Ítem	Componente	Descripción	Cantidad	Costo unit. (S/) ³	Subtotal (S/)
1	Plancha de acero inox. p/caja	1502 x 916 mm	1.38 m2	125 por m2	172.50
2	Plancha de acero inox. p/puerta	560 x 360 mm	0.21 m2	125 por m2	26.25
3	Chapa		1	20	20.00
4	Bisagra de 3 cm		2	15	30.00
5	Riel DIN	1050 mm	1.05 m	7.5 por m	7.90
6	Prensaestopa IP68		1	45	45.00
7	Otros acc. Mecánicos	Pernos, tuercas, arandelas y remaches	1	50	50.00
Total Controlador / Subcontrolador (S/)					351.65

La Tabla 7.2 detalla los costos de todos los componentes electrónicos necesario para implementación de un controlados o subcontrolador. En la tabla se consideran solo la adquisición de los dispositivos sin considerar los costos de configuración e instalación de estos. En este caso, el controlador y subcontrolador difieren de los componentes requeridos por lo que tienen un costo diferente.

Tabla 7.2: Costos de componentes electrónicos del controlador y subcontrolador

Ítem	Componente	Descripción	Cantidad	Costo unit. (S/) ⁴	Subtotal (S/)
1	Raspberry Pi 3 modelo B		1	220	220.00
2	Router Wifi TP-Link Archer C20	Solo controlador	1	210	210.00
3	Antena TP-Link ANT2412D	Solo controlador	1	110	110.00
4	Router 3G/4G TP-Link TL-MR3020	Solo controlador	1	135	135.00
5	Optoacoplador MOC3021		13	3	39.00
6	Triac BTA08		13	3	39.00
7	Sensor de corriente ASC712		13	5	65.00
8	Fuente XP Power DNR60US05		1	210	210.00
9	Fuente XP Power DNR60US12	Solo controlador	1	210	210.00
10	Interruptor termomagnético 10 ^a		1	30	30.00
11	Otros accesorios electrónicos	Resistencias, borneras capacitores y cables	1	50	50.00
Total Controlador (S/)					1318.00

³ Los costos unitarios de los componentes mecánicos son calculados en base al valor del mercado.

⁴ Los costos unitarios de los componentes electrónicos son calculados en base al valor del mercado.

Total Subcontrolador (S/) 653.00

En la Tabla 7.3 se incluyen los costos de fabricación de los componentes mecánicos y los costos de ensamblaje del controlador. Por otra parte, en la Tabla 7.4 se consolidan todos los costos involucrados para la producción, incluyendo los costos de ingeniería y un porcentaje de ganancia, con el fin de presentar un costo total de venta de un controlador y subcontrolador.

Tabla 7.3: Costos de fabricación y ensamblaje de un controlador y subcontrolador

Servicio	Descripción	Cantidad	Costo unit. (S/)⁵	Subtotal (S/)
Corte y doblaje de plancha de acero	Para acero de 0.5 mm	0.5 horas	100 por hora	50.00
Agujeros en acero	Diferentes diámetros	11 agujeros	2 por agujero	22.00
Soldadura de acero inox.	Cordón de soldadura (m) y soldadura por puntos (puntos)	0.5 horas	150 por hora	75.00
Ensamblaje total	Atomillado y remachado	0.5 horas	5 por hora	2.50
Total Controlador / Subcontrolador				149.50

Tabla 7.4: Costo final de un controlador y subcontrolador

Rubro	Subtotal Controlador (S/)	Subtotal Subcontrolador (S/)
Componentes mecánicos	351.65	351.65
Componentes electrónicos	1318.00	653.00
Fabricación e instalación	149.50	149.50
Precio de Producción	1819.15	1154.15
Costos de ingeniería (20%)	407.98	273.12
Ganancia por producto (15%)	272.87	172.73
Precio Final (S/)	2500.00	1600.00

Finalmente, en la Tabla 7.5 se presenta el presupuesto estimado de la implementación de un sistema integrado para una intersección de acuerdo a su tipo. Este presupuesto contempla la adquisición de todos los componentes requeridos para el sistema integrado (sin considerar postes y semáforos), así como también los costos de programación del sistema para su puesta en funcionamiento. Entre los montos presentados se considera el precio de la interfaz de monitoreo, la cual solo es necesario adquirir por única vez. Además, se está considerando un monto de mantenimiento preventivo del sistema, el cual se realiza de manera semestral y un monto de mantenimiento correctivo, en caso se genere una alerta de mal funcionamiento.

⁵ Los costos unitarios de fabricación y ensamblaje son calculados en base al valor del mercado.

Tabla 7.5: Presupuesto estimado de la implementación de un sistema integrado para una intersección

Componente / Servicio	Cantidad	Costo unit. (S/) ⁶	Subtotal (S/)
Intersección Tipo 1			
Controlador	1	2500.00	2500.00
Sistema de Adquisición de Parámetros del Tráfico	2	2350.00	4700.00
Total Intersección Tipo 1			7200.00
Intersección Tipo 2			
Controlador	1	2500.00	2500.00
Subcontrolador	1	1600.00	1600.00
Sistema de Adquisición de Parámetros del Tráfico	3	2350.00	7050.00
Total Intersección Tipo 2			11150.00
Intersección Tipo 3			
Controlador	1	2500.00	2500.00
Subcontrolador	3	1600.00	4800.00
Sistema de Adquisición de Parámetros del Tráfico	4	2350.00	9400.00
Total Intersección Tipo 3			16700.00
Cotos generales			
Software – Interfaz de Monitoreo	1	6000.00	6000.00
Instalación del sistema (por intersección)	1	1500.00	1500.00
Configuración del sistema (por intersección)	1	1500.00	1500.00
Servicios Adicionales			
Mantenimiento preventivo (cada 6 meses por intersección)	1	500.00	500.00
Mantenimiento correctivo (en caso lo requiera)	1	500.00	500.00

⁶ Los costos unitarios del Sistema de Adquisición de Parámetros del Tráfico son estimados en base a presupuesto referencial presentado en (Vilchez 2017).

CONCLUSIONES

Las conclusiones a las cuales se ha podido llegar luego de presentar toda la información recopilada en este trabajo de investigación son las siguientes:

- Se identificaron los principales factores involucrados en la generación del tráfico vehicular en intersecciones mediante el desarrollo de un estudio del tráfico en el cual se hizo uso de una metodología desarrollada en este trabajo. Esta metodología fue aplicada en dos intersecciones de avenidas, las cuales fueron determinadas como avenidas de interés debido a su alta intensidad de tráfico. Algunos de los factores identificados fueron: vehículos detenidos en lugares no autorizados, uso indebido de carriles al girar, semaforización incorrecta para el giro de avenidas principales y vehículos detenidos en medio de intersecciones.
- Se diseñó un sistema de control de tránsito que posee la capacidad de comunicación inalámbrica para recibir información del tráfico en tiempo real y para enviar la información de los estados de operación hacia otros controladores y hacia una interfaz. La comunicación con los subcontroladores se realiza vía WiFi para distancias de hasta 150 m y vía comunicación 4G para enviar los datos a una base de datos compartida en la cual se almacena la información de los estados. Además, se presentó la integración del sistema desarrollado incluyendo todos los componentes necesarios para el funcionamiento del sistema de control de tráfico vehicular autónomo. El costo total estimado para la implementación de uno de estos sistemas varía entre los S/ 7200 y S/ 16700 de acuerdo al tipo de intersección.
- Se desarrolló un algoritmo de control que posee la capacidad de autonomía para determinar los estados de operación de los semáforos de la intersección en base a información recopilada en tiempo real de la presencia de vehículos en la intersección y en intersecciones aledañas.

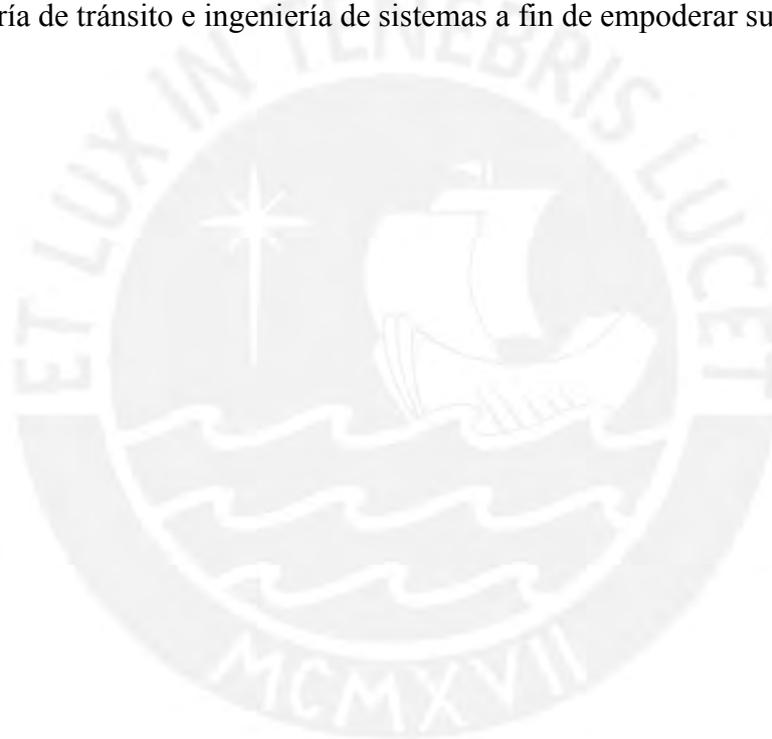
OBSERVACIONES Y COMENTARIOS

Adicionalmente a las conclusiones presentadas se han podido identificar otras observaciones y comentarios relevantes al trabajo realizado que no se encuentran relacionadas con los objetivos de la investigación:

- Durante la recopilación de información referente al tráfico vehicular de la ciudad de Lima no se pudo encontrar estudios relacionados con la temática que hayan sido realizados y publicados. Por tal motivo se decidió realizar un estudio propio para obtener algunos parámetros del tránsito que fueron utilizados para las simulaciones realizadas posteriormente.
- Durante el diseño del sistema se decidió desarrollar un controlador principal y subcontroladores, en el caso sea necesario, a fin de que durante la instalación se evite estar realizando conexiones físicas entre cada uno de estos. De esta manera se evita tanto el costo adicional en la conexión física entre cada esquina de la intersección y evitar la ruptura de las vías, lo cual es muy común en el país y provoca mayor congestión vehicular durante la instalación de este tipo de sistemas.
- El algoritmo de operación del sistema fue desarrollado tomando un enfoque individual de cada una de las intersecciones, es decir, solo se optimiza los estados de operación en base a la información de cada intersección y de intersecciones inmediatamente aledañas; pero el algoritmo puede ser optimizado con un enfoque cooperativo con sistemas más lejanos que formen parte de la misma avenida.
- Para el monitoreo del sistema se desarrolló un software (archivo ejecutable .exe) con la capacidad de visualizar los estados de operación de los semáforos de alguno de los sistemas mediante el acceso a la base de datos compartida en donde se registra la información. Además fue desarrollado con la finalidad de poder configurar los parámetros de operación de estos sistemas luego de la instalación y en caso sea necesario durante su operación.

TRABAJO FUTURO

El trabajo que ha sido presentado en este documento sienta las bases para el desarrollo de trabajos futuros relacionados a una línea de investigación enfocada en la mejora del tránsito vehicular, dado que al contar con un sistema capaz de comunicar su información a sistemas aledaños y que a la vez puede ser reprogramable va a ser posible realizar diversos tipos de mejoras. Una mejora puede darse mediante la optimización del algoritmo de control tomando un enfoque cooperativo, el cual puede ser desarrollado en conjunto por especialistas en temas de ingeniería de tránsito e ingeniería de sistemas a fin de empoderar su funcionamiento.



BIBLIOGRAFÍA

- Abeijón Monjas, D. «Capítulo 2: Fuentes de obtención de datos.» En *Fusión de datos para obtención de tiempos de viaje en carretera*. Disponible en : <<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/4376/02.pdf?sequence=27&isAllowed=y>>, 2007.
- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. «Wireless sensor networks: a survey.» *Computer networks*, 38(4), 2002: 393-422.
- Alcalá, M. *Micro simulación del tráfico de la intersección de las avenidas Bolívar, Córdova y calle Andalucía empleando el software VISSIM 6*. Tesis de Licenciatura, Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2016.
- Alcaldía de Barranquilla, Secretaría de movilidad 89. *Sistema de tráfico Adaptativo*. 2016. Disponible en: <http://www.barranquilla.gov.co/movilidad/index.php?option=com_content&view=article&id=5579> (último acceso: 15 de Setiembre de 2016).
- Allegro. *Technical Data: ACS712 Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*. 2017. Disponible en: <<http://www.digikey.com/product-detail/es/allegro-microsystems-llc/ACS712ELCTR-05B-T/620-1189-2-ND/1284593>> (último acceso: 12 de Marzo de 2017).
- Cal, R., Mayor, R., & James Cárdenas, G. *Ingeniería de tránsito*. Cuspide, 1996.
- Cedron, Juan Carlos, Victoria LANDA y Juana ROBLES. *Química General. Material de enseñanza*. 2011. Disponible en: <<http://corinto.pucp.edu.pe/quimicageneral/contenido/tema>> (último acceso: 23 de Octubre de 2016).
- Charych, A. System and method for wireless electrical power transmission. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office Patente U.S. Patent No. 6,798,716. 2004.
- Chong-White, C., Millar, G., & Shaw, S. «SCATS and the environment study: definitive results.» In *19th ITS World Congress*. Disponible en: <<http://www.scats.com.au/>>, 2012.
- El Comercio. *¿A qué se atribuye la congestión vehicular?* 26 de Julio de 2014a. Disponible en: <<http://elcomercio.pe/sociedad/lima/que-se-atribuye-congestion-vehicular-noticia-1745681>> (último acceso: 15 de Diciembre de 2016).
- El Comercio. *Mapa: los 75 cruces de mayor caos vehicular en horas punta*. 26 de Julio de 2014b. Disponible en: <http://elcomercio.pe/sociedad/lima/mapa-75-cruces-mayor-caos-vehicular-horas-punta-noticia-1745433?ref=flujo_tags_276307&ft=nota_1&e=imagen> (último acceso: 15 de Diciembre de 2016).

- Fan, R. C., Yang, X., & Fay, J. D. Using location data to determine traffic information. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office Patente U.S. Patent No 6,594,576. 15 de Julio de 2003.
- Ferro, E., & Potorti, F. «Bluetooth and Wi-Fi wireless protocols: a survey and a comparison.» *IEEE Wireless Communications*, 12(1), 2005: 12-26.
- Frenzel, L. *The Fundamentals of Short-Range Wireless Technology*. 11 de Octubre de 2012. Disponible en: <<http://electronicdesign.com/communications/fundamentals-short-range-wireless-technology>> (último acceso: 17 de Marzo de 2017).
- Garber, N. J., Garber, L. A. N. J., & Hoel, L. A. *Ingeniería de tránsito y de carreteras*. Thomson, 2005.
- Han, X., & Naeher, L. P. «A review of traffic-related air pollution exposure assessment studies in the developing world.» *Environment international*, 32(1), 2006: 106-120.
- Kanungo, A., Sharma, A., & Singla, C. «Smart traffic lights switching and traffic density calculation using video processing.» *In Engineering and computational sciences (RAECS)*, 2014, 2014: 1-6.
- La Republica. *73% de intersecciones con semáforos no usa el sistema inteligente*. 26 de Noviembre de 2014. Disponible en: <<http://larepublica.pe/26-11-2014/73-de-intersecciones-con-semaforos-no-usa-el-sistema-inteligente>> (último acceso: 26 de Diciembre de 2016).
- Lima Como Vamos. *Encuesta Lima cómo vamos – VI Informe de percepción sobre la calidad de vida*. 2015. Disponible en: <<http://www.limacomovamos.org/cm/wp-content/uploads/2016/01/Encuesta2015.pdf>> (último acceso: 15 de Diciembre de 2016).
- Mayor, R. C., & Cardenas, J. *Ingeniería de Tránsito: Fundamentos y aplicaciones*. México DF: Alfaomega. 7ª Edición, 2000.
- Ming, W., Qin, Y., & Xu, J. «The Application of SCOOT in Modern Traffic Network.» *Management & Engineering*, (18), 2015: 93.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones, Republica del Perú. *Anuario Estadístico 2012*. Lima, Mayo de 2013.
- Ministerio de Transportes, Comunicaciones, Vivienda y Construcción. «Capítulo 5: Semáforos.» En *Manual de carreteras*. Lima, Peru: Disponible en: <http://www.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Transito/manuales.html>, 2000.
- Motorola. *Semiconductor Technical Data: 6-Pin DIP Random-Phase Optoisolators Triac Driver Output*. 2017. Disponible en: <<http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/motorola/MOC3021.pdf>> (último acceso: 12 de Marzo de 2017).

- Mozo Sanchez, J. «Capítulo 1: Teoría de flujo vehicular.» En *Análisis de Capacidad y Nivel de Servicio de Segmentos Básicos de Autopistas, Segmentos Trenzados y Rampas de acuerdo al Manual de Capacidad de Carreteras HCM2000 aplicando MathCad*. Disponible en: <<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.10/0/417/A4.pdf?sequence=4>>, 2012.
- ON Semiconductor. *Technical Data: BTA08-600CW3G Triacs*. 2017. Disponible en: <<http://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/ON%20Semiconductor%20PDFs/BTA08-600CW3G.pdf>> (último acceso: 12 de Marzo de 2017).
- Perú 21 . *Identifican 242 puntos críticos de congestión vehicular en Lima*. 21 de Septiembre de 2016. Disponible en: <<http://peru21.pe/actualidad/lima-hay-242-puntos-criticos-congestion-vehicular-2257746>> (último acceso: 15 de Diciembre de 2016).
- Raspberry Pi. *Raspberry pi 3 model B*. 2017. Disponible en: <<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>> (último acceso: 5 de Marzo de 2017).
- SICE. *Sistema de control de tráfico de Lima Metropolitana (Gerencia de Transporte Urbano – Municipalidad Metropolitana de Lima)*. 2016. Disponible en: <<http://www.sice.com/proyectos-relevantes/sistema-de-control-de-traffic-de-lima-metropolitana>> (último acceso: 15 de Setiembre de 2016).
- SUTRAN. *Texto único ordenado del reglamento nacional de tránsito - código de tránsito*. Lima, Peru: Superintendencia de Transporte Terrestre de Personas, Carga y Mecancías, 2014.
- TP-Link. *Antena omnidireccional para exterior de 12 dBi a 2,4 GHz*. 2017b. Disponible en: <http://www.tp-link.es/products/details/cat-5067_TL-ANT2412D.html#specifications> (último acceso: 5 de Marzo de 2017).
- TP-Link. *Router gigabit de banda dual Inalámbrico AC750*. 2017a. Disponible en: <http://www.tp-link.es/products/details/cat-9_Archer-C2.html#specifications> (último acceso: 5 de Marzo de 2017).
- TP-Link. *Router inalámbrico N 3G/4G portátil*. 2017c. Disponible en: <http://www.tp-link.es/products/details/cat-4691_TL-MR3020.html#overview> (último acceso: 5 de Marzo de 2017).
- Tubaishat, M., Shang, Y., & Shi, H. «Adaptive traffic light control with wireless sensor networks.» In *Proceedings of IEEE consumer communications and networking conference*. Disponible en: <<http://itsslab.com/portfolio/development-and-evaluation-of-an-adaptive-traffic-control-system/>>, 2007. 187-191.
- Vilchez, José. *Diseño y simulación de un sistema para adquisición de parámetros de tráfico en avenidas*. Tesis, en proceso de sustentación, Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2017.

- Walke, B. H., Mangold, S., & Berlemann, L. *IEEE 802 wireless systems: protocols, multi-hop mesh/relaying, performance and spectrum coexistence*. John Wiley & Sons, 2007.
- Wickens, C. M., & Wiesenthal, D. L. «State Driver Stress as a Function of Occupational Stress, Traffic Congestion, and Trait Stress Susceptibility1.» *Journal of Applied Biobehavioral Research* 10(2), 2005: 83-97.
- XP Power. *Technical Data: AC-DC Power Source 5-60 Watts DNR Series*. 2017. Disponible en: <http://www.xppower.com/Portals/0/pdfs/SF_DNR05-60.pdf> (último acceso: 17 de Marzo de 2017).
- Zhang, Y., Hu, H., & Luo, J. (Eds.). *Distributed antenna systems: open architecture for future wireless communications*. CRC Press, 2007.
- Zimmermann, H. «OSI reference model-the ISO model of architecture for open systems interconnection.» *IEEE Transactions on communications*, 28(4), 1980: 425-432.

