



**BUAP**

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
Facultad de Ciencias de la Electrónica  
Maestría en Ingeniería Electrónica, opción Instrumentación  
Electrónica

Tesis para obtener el grado de  
Maestro en Ingeniería Electrónica, opción Instrumentación  
Electrónica

---

Sistema de Simulación mediante  
Hardware-in-the-Loop para Controlador de Faros  
Frontales Adaptativos (AFS)

---

Presenta: Erick Gómez López\*

Director de Tesis: Dr. Roberto Carlos Ambrosio Lázaro

# Agradecimientos

*A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, a la Facultad de Ciencias de la Electrónica y a todos mis profesores por haberme formado como profesional y como persona, por haber cambiado mi vida y manera de pensar para buscar ser mejor cada día. A mi asesor el Dr. Roberto Carlos Ambrosio Lázaro, por la paciencia, todo el respaldo y la confianza que depositó en mí. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado durante la realización de este proyecto de tesis.*

# Dedicatoria

*A mi hermosa madre que tanto quiero, a quien la vida y yo le debemos tanto, mujer valiente, amorosa e incansable, quien siempre creyó en mí a pesar de todo y de todos, que me dio las alas, la fuerza, me educó y me impulsó como nunca nadie. A mi hermana que siempre me apoyó en los días más nublados y difíciles, jamás lo olvidaré, espero poder recompensarlo algún día con sus hijos a quienes quiero como si fueran míos. A Fer, por nuestro gran amor, por la felicidad que le da a mi vida, por sus enormes muestras de cariño y su paciencia para tolerar los momentos de mi ausencia. A mis compañeros, que admiro mucho y de quienes aprendí innumerables e invaluable cosas. A mis amigos, por qué también soy resultado de lo que son ellos. Deseo de corazón que todos ustedes siempre se sientan orgullosos de mí.*

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes	3
1.2. Objetivo	6
1.3. Justificación	7
1.4. Descripción	8
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>12</b>
2.1. Espectro Electromagnético y Luz Visible	13
2.2. El Ojo Humano	15
2.3. Visión de los Colores	15
2.4. Visión Fotópica, Escotópica y Mesópica	17
2.5. Color y temperatura de la luz	18
2.6. Construcción de la visión	19
2.6.1. Percepción visual del movimiento	19
2.6.2. Percepción del sombreado y el color	22
2.6.3. Percepción de los objetos y sus partes	23
2.7. Límites de la atención visual	24
2.8. Movimiento de los ojos	25
2.9. Comportamiento de la visión durante la conducción	27
2.10. Percepción visual de iluminación modulada por ancho de pulso	28
2.11. Conceptos de fotometría	29
2.11.1. Flujo energético y flujo luminoso	29
2.11.2. Intensidad luminosa	29
2.11.3. Iluminancia	30
2.12. Fuentes de iluminación	30
2.12.1. Tecnología Halógena	30
2.12.2. Tecnología HID (Xenón)	32
2.12.3. Tecnología LED	33
2.12.4. Tecnología OLED	36
2.12.5. Tecnología Láser	37
2.13. Faros frontales	39
2.13.1. Patrones de Haz estándar	39
2.13.2. Línea de corte	40
2.14. Fotometría en faros frontales	41
2.15. Tecnología de reflexión en faros automotrices	43
2.16. Tecnología de proyección en faros automotrices	44
2.17. Aspectos de diseño en faros automotrices	46
2.18. Sistema de iluminación frontal adaptativo AFS	46
2.18.1. Antecedentes de sistemas AFS	47
2.19. Componentes de un sistema AFS	63
2.20. Variables de entrada de un AFS	64
2.21. Patrones adaptativos del haz	65
2.21.1. Modo clase V - Luz de Ciudad- Town light	65
2.21.2. Modo clase C- Luz de campo - Country light	66

2.21.3. Modo clase E - Luz de autopista- Motorway light . . . . .	67
2.21.4. Modo clase W - Luz de clima adverso- Bad weather light . . . . .	68
2.21.5. Luz de curva . . . . .	69
2.21.6. Luz Alta libre de deslumbramiento . . . . .	70
2.22. Fuentes de alimentación para sistemas basados en LED . . . . .	73
2.23. Manejo de AFS mediante PWM . . . . .	74
2.24. Estado de los sistemas AFS en el mercado mexicano actual . . . . .	75
2.25. Técnica de simulación Hardware in the loop . . . . .	80
2.25.1. Arquitectura del Hardware in the loop . . . . .	81
2.25.2. Digitalización y tasa de iteración . . . . .	82
2.25.3. Registro de datos . . . . .	83
2.26. Técnicas de control para AFS . . . . .	83
2.26.1. Lógica difusa . . . . .	84
2.26.2. Machine learning . . . . .	85
2.27. Modelos matemáticos para el sistema de simulación . . . . .	86
2.28. Motor Gráfico Unreal Engine . . . . .	87
<b>3. Desarrollo</b>	<b>88</b>
3.1. Selección de dispositivos para el sistema . . . . .	89
3.2. Determinación de grados de libertad para la unidad AFS . . . . .	92
3.2.1. Modos de Iluminación . . . . .	92
3.2.2. Modo iluminación dinámica de curva . . . . .	96
3.3. Desarrollo de la interfaz gráfica . . . . .	100
3.3.1. Creación de circuito de conducción de código libre . . . . .	101
3.3.2. Creación de circuito de conducción Licenciado . . . . .	107
3.3.3. Integración de volante y pedales . . . . .	111
3.4. Modelo Dinámico del vehículo . . . . .	117
3.4.1. Volante cinemático . . . . .	117
3.4.2. Tren motriz y transmisión de potencia . . . . .	120
3.4.3. Cuerpo del Vehículo . . . . .	122
3.5. Desarrollo de estrategia de control . . . . .	125
3.5.1. Definiendo el universo del discurso . . . . .	127
3.5.2. Variables lingüísticas de entrada y salida . . . . .	128
3.5.3. Creación de tablas FAM . . . . .	129
3.5.4. Funciones de membresía y grado de pertenencia . . . . .	132
3.5.5. Reglas de inferencia . . . . .	135
3.6. Circuito electrónico del sistema de iluminación AFS . . . . .	137
3.7. Desarrollo de modelo CAD . . . . .	144
<b>4. Resultados</b>	<b>147</b>
4.1. Circuito virtual para conducción . . . . .	148
4.2. Reglas en la lógica difusa e inferencias de salida . . . . .	149
4.3. Integración del sistema de simulación . . . . .	181
4.4. Diseño de tarjetas PCB . . . . .	184
4.5. Comparación Cualitativa . . . . .	188
<b>5. Conclusiones</b>	<b>191</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>195</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>198</b>
<b>A. Artículos presentados</b>	<b>205</b>

# Capítulo 1

## Introducción

*En este capítulo introductorio se abordará un panorama general que servirá como preámbulo para poder conocer y entender el trabajo que se realiza a lo largo de este documento. Comenzando por los factores sociales e industriales que dan origen a los faros Adaptativos, nuestras motivaciones por el uso de la técnica de simulación HIL, algunos de los antecedentes que se consideraron para realizar este trabajo, se enuncia el problema que se pretende resolver, los objetivos que fueron planteados, así como nuestras justificaciones y una descripción general del funcionamiento del sistema de simulación.*

Existen múltiples factores que pueden ocasionar un accidente de tránsito, entre ellos suelen predominar los factores humanos, de los cuales muchos pueden culminar en accidentes fatales. Con la finalidad de salvaguardar la integridad del conductor del vehículo como también de los pasajeros, la industria automotriz ha buscado maneras con las cuales mejorar los sistemas de seguridad y han desarrollado también sistemas avanzados de asistencia al conductor mejor conocidos como ADAS por sus siglas en inglés (Advance Driver Assistance Systems).

El gran desarrollo de esta industria aumentó en gran medida la producción de vehículos, que de igual manera derivó en un mayor número de accidentes de tráfico, de las cuales los accidentes de noche suelen ser más severos y resultan en mayores fatalidades. En una investigación se encontró que aproximadamente el 60% - 70% de las accidentes fatales vehiculares-peatonales tienen lugar durante la noche, donde la principal causa es la pobre visibilidad del conductor con su entorno, volviendo difícil la tarea de observar peatones y obstáculos.[1]

Las luces frontales de un automóvil juegan un papel crucial en la visibilidad del conductor y por lo tanto en su seguridad, por lo que a finales de la última década del siglo pasado, y principios de este siglo, derivado del aumento en el desarrollo de sistemas de asistencia al conductor (ADAS) surgió la idea de reemplazar los faros frontales comúnmente fijos a la estructura del vehículo por faros inteligentes que permitieran distribuir de manera dinámica la iluminación.[2]

Es de esta manera como surgen los sistemas de faros frontales adaptativos AFS por sus siglas en inglés (Adaptive Front lighting System), faros con los cuales idea principal es tener la capacidad de moverse mecánicamente y dirigir su haz de luz en el sentido y el ángulo en que las llantas delanteras del vehículo lo hacen, que pueden adaptar la inclinación del haz en un sentido vertical conforme cambian la velocidad y el ángulo longitudinal del vehículo con respecto al camino, así como también regular la intensidad de la luminosidad y tener la posibilidad de apertura de canales que impidan el deslumbramiento para el tráfico que circula en sentido contrario.

El sistema AFS necesita de un controlador es decir, necesita ser controlado mediante sistemas electrónicos los cuales contengan algoritmos de control que permitan a su funcionamiento un alto grado de autonomía y muy poca intervención humana, asistiendo de la mejor manera al conductor del vehículo, reduciendo el factor de distracción y aumentando la capacidad de visibilidad del entorno. Estos algoritmos de control tienen distintas etapas de desarrollo durante las cuales son formulados, simulados y probados a través de experimentos de laboratorio, como también por medio de implementaciones físicas en condiciones reales, las cuales en muchas ocasiones llegan a ser costosas y demandan mucho tiempo de desarrollo.

Con el avance de la tecnología, las capacidades de cómputo se han incrementado en gran medida, permitiendo la posibilidad de realizar pruebas y simulaciones cada vez más complejas de sistemas o algoritmos más robustos, con muchas más condiciones involucradas que permiten mayor fiabilidad en los resultados y disminuyen la incertidumbre que existe al momento de llevar un sistema de la simulación por computadora a la implementación física.

Distintos métodos de pruebas y simulaciones se han desarrollado, cada uno presentando sus propias ventajas y desventajas, uno de estos métodos es el Hardware-in-the-loop (HIL) el cual permite la validación del correcto funcionamiento de algoritmos que yacen en unidades o dispositivos que se embotran y colaboran al funcionamiento de sistemas físicos como automóviles, aviones, sistemas mecánicos, sistemas químicos, sistemas hidráulicos, etc. Este método permite reducir en gran medida los tiempos de prueba, además de ser muy útil en casos donde las pruebas no son sencillas de replicar físicamente o en campo.

## 1.1. Antecedentes

Los sistemas de iluminación en un vehículo juegan un rol sumamente importante ya que cumplen con dos tareas fundamentales, la de ser vistos y la de poder visualizar el camino. En los últimos años donde la evolución de los automóviles a sido muy grande, en cuestiones de seguridad y asistencia al conductor, los sistemas de iluminación pasan a ser un tanto desapercibidos, aun que son fundamentales y su función se lleva a cabo continuamente. En la actualidad ya se cuentan con sistemas tecnológicamente avanzados, como los sistemas de iluminación inteligente que intercambian las funciones de luces cortas y luces largas automáticamente, sistemas de luces adaptativas y sistemas de encendido de luces automáticas. Aun que esto no siempre fue así, basta con retroceder en el tiempo para visualizar los cambios de tecnologías y sus mejoras.

En un principio los automóviles solo contaban con farolas que utilizaban velas como un medio incandescente de iluminación y cuya función no era precisamente la de iluminar la calzada, si no que solamente cumplían con la funcionalidad de poder ser vistos, posteriormente llegaría la primera mejora que surgía mediante el sistema Lutzmann que se encontraba en el Patentmotorwagen de Opel, donde se contenía una vela en un faro de cristal con un espejo y donde se impulsaba continuamente la vela hacia arriba conforme esta se consumía para generar un fuente de luz constante. Con la llegada de las bombillas incandescentes a principios del siglo XX, se adoptaría esta tecnología como la principal para estos sistemas, serian reemplazadas entonces por lamparas halógenas donde el principio es el mismo pero en lugar de vacío la ampolla se rellena con algún gas inerte (argón, neón, nitrógeno, etc.) donde el filamento puede alcanzar temperaturas entre 2000 y 3000 grados centígrados para brindar mas luz. Permanecería siendo así por muchos años donde la única mejora se suscitaría por los años de 1950 y sería introducir un sistema de doble haz luminoso, uno para luces bajas y otro para luces altas.

En los años de 1970 serian introducida la tecnología de xenón o HID (High Intensity Discharge), sin filamento y dos electrodos de Tungsteno muy proximos con gas Xenón y sales de metales halogenizados (sodio o mercurio), atravesada por un arco voltaico de hasta 30.000 voltios entre dos electrodos. Aunque la tecnología xenon ha estado disponible por más de 20 años, no representa el 20 % de todo el mercado mundial debido a su alto costo y implicaciones regulatorias en la Comisión Económica para Mercados de Europa (CEPE) (nivelación automática y sistema de limpieza)[3]. A mediados de 2006 el primer carro equipado con un AFS inteligente entró en producción en serie, desde entonces y hasta ahora genero muchas reacciones positivas en la prensa de todo el mundo, los diferentes patrones de haz AFS en este carro son generados por un modulo proyector xenon AFS, el cual trabaja con un sistema de accionamiento giratorio [4]. Últimamente, muchos cambios dentro del la comunidad de iluminación se ha implementado debido a tecnología relativamente más barata, solicitudes específicas de clientes y mayores expectativas del mercado. Los LED han sido la tendencia impulsada por los estudios de diseño en todo el mundo, entre otros porque permite el estudio de diseño para crear una tendencia de ADN en torno a este concepto[3].

En 2007 un estudio presentado en la revista SAE Transactions recopilaba las necesidades y los retos de esta nueva tecnología para reemplazar completamente a la tecnología de xenon. Realizaron amplios estudios acerca de los sistemas ópticos aplicables a los LED para poder obtener mejores patrones de haz, también mostraron posibles sistemas de montaje y los elementos de las funciones necesarias para AFS, describen a detalle las diferentes funciones posibles de los AFS dentro de un marco regulatorio, asi como estudios comparativos de desempeño de las tecnologías HID versus LED[4].

En 2009 un artículo presentó un algoritmo de control para AFS basado en lógica difusa que contempla únicamente los parámetros de entrada de la velocidad del vehículo y el ángulo de la curva en el camino para tomar la decisión necesaria sobre la acción de salida, que determinará la velocidad y la intensidad total de los LED para poder iluminar de mejor la curva en el camino y poder así curvar el haz[3].

En 2010 se reportó la implementación física de una estrategia de control que analiza la velocidad

del vehículo, el ángulo horizontal, y el ángulo del volante, con dicha estrategia se controla la orientación física de los faros halógenos del vehículo redirigiendo así el haz de luz en las curvas que se presentan en el camino, controlando la posición de motores a pasos funcionando como actuadores para las posiciones horizontales y verticales de los faros[5].

En 2012 un artículo presentó la implementación de un algoritmo de control para AFS basado en bus CAN, el algoritmo se basa en una estrategia de control difuso que contempla para la toma de decisiones las entradas de los sensores de velocidad del vehículo y el ángulo de las llantas delanteras. La implementación física se llevo a cabo mediante un microcontrolador ARM cortex M3 con una frecuencia de reloj tope de 72 Mhz y 4 motores a pasos independientes para ajustar la orientación física de los faros halógenos[6].

Un artículo que fue presentado en el año 2013 en donde se realiza una simulación en el software Matlab del control de AFS basado en un sistema de sensor de imagen de dispositivo de carga acoplada, en este desarrollo el sistema puede detectar la operación del volante por parte del conductor y el estado de las condiciones del trafico a través de los sensores, se analizan el angulo del volante, la velocidad y la información de la altura del cuerpo del vehículo, posteriormente se calcula el ángulo de rotación para los faros y mediante los actuadores se posicionan los faros halógenos en el ángulo requerido para la iluminación necesaria en una curva[7].

El año 2014 fue en el que mayor cantidad de trabajos sobre AFS fueron reportados dentro de los cuales podemos encontrar interesantes esquemas de control, tales como un trabajo en donde se diseño un algoritmo de control enfocado en optimización, mediante una red neuronal difusa y un filtro kalman, utilizando un doble lazo de retroalimentación y así controlar las posición de los faros halógenos y la velocidad de los actuadores en el AFS[8], se reportó también el diseño de un algoritmo de control predictivo sobre la dinámica del vehículo bajo la influencia de un estudio previo en el comportamiento del conductor, la presión en acelerador y la presión en freno, el ángulo de la llanta, el ángulo de inclinación y el angulo de alineación del vehículo[9]. En otros trabajos que se realizaban a la par, también se reportaron estudios matemáticos para determinar las ecuaciones que describen la dinámica que gobierna un automóvil al momento de girar en una curva, se determino la relación entre las características de giro en el vehículo y la dinámica del ángulo y la distribución de la luz en los faros[10]. En otra investigación se presentó el diseño de un sistema óptico basado en arreglos de lentes que incrementa la eficiencia de la distribución de luz en faros halógenos utilizados en AFS[11]. De la misma manera se continuaron los trabajos en algoritmos de control que contemplan las señales del vehículo, tales como ángulo de volante, velocidad y altura para controlar actuadores para la rotación y la elevación de los faros halógenos[12].

En 2015 se reporto un metodo de curvatura de haz de luz basado en un modo de control previo para AFS con un modulo de corrección para la retroalimentación, con el cual se controla la posición de motores a pasos que orientaran el eje horizontal faros halógenos[13]. En 2017 se presentó un trabajo que muestra el diseño de faros basados en tecnología LED con un arreglo óptico que demostró mejorar la distribución del haz de luz procedente de un arreglo matricial de LEDs, se utilizo una estrategia de control de modulación on/off para la matriz de LEDs, lo que brinda la posibilidad de apertura de canales para prevenir deslumbramientos al trafico contrario, y se eliminó el uso de actuadores mecánicos[14]. En ese mismo año se reportó un trabajo de un marco efectivo de validación utilizando la plataforma arduino para el control de AFS bajo el uso de co-emulación, con la interacción de un usuario a través de un volante y pedales se comprobó el control de un set comercial de AFS basado en motores a pasos[15].

De los trabajos mas recientes reportados en artículos de investigación se presentaron en el año 2018 en donde uno de estos trabajos desarrolló un modelo de control basado en maching learning que es entrenado para reconocer diferentes señales de entrada, de trafico, y reacciones lentas de conducción, además de la posibilidad de invocar diferentes secuencias de control para cada situación posible a presentarse, se controla un arreglo matricial de LEDs mediante la modulación de la corriente eléctrica para cada uno de los elementos contenidos en esta matriz[16]. Otro articulo de investigación reportado en este mismo año documenta los resultados del diseño y la implementa-

ción de un sistema de control implementado en una placa de arduino y que mediante la posición angular del volante del vehículo controla el encendido de reflectores halógenos que son puestos en una disposición de diferentes ángulos de orientación horizontal[17]. También se reportó un trabajo en donde se diseñó un modelo basado en una estrategia de PID óptimo para el control de AFS de faros halógenos que utilizan motores DC para su posicionamiento adecuado contemplando múltiples variables del vehículo a través de sensores[18].

## Problema a resolver

El enfoque AFS ha suscitado un interés comercial en la iluminación curva. La mayoría de trabajos reportados implican implementaciones solo de desplazamientos horizontales o verticales del patrón de haz de luz. Específicamente, la iluminación de la curva (también llamada luz de flexión o giro) implica controlar el objetivo horizontal del patrón del haz (o una parte de él) dependiendo de variables tales como el radio de la curva y la velocidad del vehículo. Existen varias estrategias posibles para implementar la iluminación curva, que incluyen mover ambas lámparas en apilamiento, mover ambas lámparas pero cada una de manera diferente, mover solo una de las lámparas, mover las lámparas de forma diferencial en las curvas izquierda y derecha entre otras, sin embargo a la fecha no hay una estrategia óptima. Adicionalmente, y derivado del análisis de la literatura, se determina que en la actualidad no se ha reportado un trabajo cuyo funcionamiento se base en una técnica de “hardware-in-the-loop”, que involucre a su vez estímulos por parte del usuario y una disposición de actuadores como la que se propone para este trabajo.

## 1.2. Objetivo

Desarrollar un sistema de simulación en tiempo real para faros AFS mediante el método de hardware in-the-loop.

### Objetivos particulares

- Analizar los modelos dinámicos correspondientes necesarios para el sistema de simulación, determinando las variables más relevantes para el desarrollo.
- Implementar los faros frontales adaptativos determinando los grados de libertad controlables.
- Realizar la interfaz gráfica de comunicación con el usuario para la configuración y la visualización de los estados de la simulación.
- Diseñar un controlador para AFS.
- Implementar el prototipo del sistema de simulación HIL y probar el controlador de AFS.

### 1.3. Justificación

La industria automotriz mantiene mucha de la información correspondiente al funcionamiento detallado de sus tecnologías actuales lejos del alcance del dominio público, en vista de que la competencia de mercado dentro del sector es grande y clara, quien desarrolle y distribuya tecnologías únicas podrá posicionar sus vehículos de mejor manera. Una estrategia que parece muy astuta reside en sus estrictas políticas de privacidad y los secretos industriales, lo que aumenta las probabilidades de ofrecer vehículos con productos tecnológicos únicos.

Estas estrategias afectan en gran medida la cantidad de recursos y documentación a los que se puede acceder para la consulta de información, así lo demuestran las búsquedas realizadas en bases de datos científicas y sistemas de búsqueda de información en línea de las plataformas disponibles en la universidad. Realizando una búsqueda que abarca desde el año 2010 al año 2019, se encontraron únicamente 39 artículos con una relación directa a faros AFS.

Todo lo anterior deriva en un freno que retrasa la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías que pudieran surgir a partir de las existentes. En este sentido, se considera prudente un trabajo que posteriormente pueda ser considerado como referencia para futuros desarrollos. En un mundo donde el desarrollo tecnológico crece de manera apresurada, el tener acceso a la información, de manera abierta y detallada hasta cierta medida, sobre los métodos de desarrollo, protocolos utilizados, y los diferentes parámetros involucrados en el desarrollo de tecnologías orientadas hacia los sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS), pero realizadas por investigadores ajenos a los monopolios automotrices, contribuye de manera positiva al desarrollo y a la investigación.

Por otro lado la elección de una simulación utilizando el método de hardware-in-the-loop (HIL) precede de la cualidad de combinar un modelo de una planta simulado con la versión de un controlador cuyos hardware y software se acercan a la forma en que va a ser producido. A menudo se usa como una herramienta para integración de sistemas donde la función adecuada de varios componentes (posiblemente de diferentes proveedores) debe ser probada tanto individualmente como colectivamente. Otra situación que favorece el uso de la simulación HIL es la posibilidad de modificar o actualizar un controlador (su hardware o software o ambos). La pérdida financiera, daño físico o incluso lesiones que podrían resultar de una función del controlador, esto hace que sea esencial verificar su correcto funcionamiento antes de conectar la planta [19].

En un ámbito académico donde desarrollar y probar técnicas de control se vuelve una tarea fundamental en el desarrollo y la formación integral de sus estudiantes e investigadores, la implementación de un sistema de simulación con pruebas reales en hardware coadyuva al fortalecimiento del aprendizaje teórico obtenido en el aula. Es importante resaltar que la implementación no siempre es tarea fácil, sobre todo si se tiene la necesidad de realizar pruebas en plantas físicas costosas, que en la mayoría de ocasiones no son posibles de costear en un corto plazo. Simulaciones mediante hardware-in-the-loop (HIL) brindan una gran flexibilidad para describir plantas con comportamientos distintos, ya que solo basta con modificar las ecuaciones que la describen, así que es posible tener tantas plantas a disposición de los desarrolladores, como la cantidad de modelos que nos sea posible describir.

## 1.4. Descripción

A continuación se presenta el diagrama a bloques (figura 1.1) que representa la conformación del sistema de simulación y la disposición de los elementos que dan lugar al sistema de simulación mediante la técnica de Hardware-in-the-loop (HIL) para los faros adaptativos AFS, en una forma un tanto abstracta pero que brinda la posibilidad de visualizar este trabajo de tesis.



Figura 1.1: Diagrama a bloques del sistema de simulación.

Se realizará un sistema que mediante la técnica de simulación en hardware in the loop (HIL) tenga la capacidad de probar el funcionamiento del controlador para AFS, con la posibilidad de incluir en sus modelos distintos parámetros de entrada, que a su vez podrían ser despreciados desde la configuración de usuario, brindando mayor detalle al modelo o en lo contrario realizar un modelo simple que contemple únicamente ciertas variables de entrada.

El sistema de simulación contará con una interfaz gráfica de comunicación con el usuario, estará presente dentro de una estación de trabajo que permita la configuración de los parámetros que se contemplaran en la simulación y que a su vez proporcionará la información necesaria al usuario sobre las señales involucradas en el sistema como también el estado en el que se encuentre el sistema y la simulación.

La estación de trabajo contará además con una interfaz de comunicación con el módulo de cómputo en tiempo real por la cual serán transmitidos los valores de configuración para la simulación. Distintos parámetros de simulación podrán ser configurados según los requerimientos que contemple el algoritmo de control a probarse, dentro de los cuales algunas opciones que podrían contemplarse serían perturbaciones por condiciones del camino, tiempo y climas, condiciones de inclinación longitudinal del vehículo [20]. También deberá ser posible ajustar parámetros como los tiempos de muestreo en la adquisición de señales y enviar la indicación de inicio y paro de la simulación. Todas las posibles selecciones y configuraciones serán ingresadas a través de los periféricos habituales de

la computadora, es decir el teclado y el mouse. La información de estatus sera desplegada a través de la interfaz de de la simulación una vez que la misma tenga comienzo, y se buscara visualizar el estado de la planta simulada, los actuadores, y las señales de entrada al sistema. Lo que antes se describió pertenece al modulo de la estación de trabajo a la cual se hace referencia en el diagrama a bloques de la figura 1.1 mediante icono de la figura 1.2.



Figura 1.2: Bloque de la estación de trabajo.

Las señales de entrada por parte del usuario al momento de la simulación con respecto a la aceleración, frenado, y giro del volante serán ingresadas a través de un set de simulación de conducción que se adaptara al sistema y contará con un volante y pedales de aceleración y freno, se acondicionara la señal de entrada para que pueda ser recibida por el modulo de adquisición de las señales y posteriormente procesadas por el algoritmo de control, estas entradas variaran a disposición de los movimientos del usuario volviendo el sistema mas interactivo y representaran variables dentro del entorno de simulación, serán las únicas posibles de variar fuera de la estación de trabajo. Este bloque se representa en la figura 1.3.



Figura 1.3: Bloque de simulación de volante y pedales.

Se implementará un sistema AFS basado en un arreglo matricial de LEDs, esto es representado mediante el ícono de la figura 1.4, se pretende que cuente con 4 grados de libertad, los cuales serán rotación en angulo horizontal, rotación de angulo vertical, intensidad de luminosidad y apertura de canales antideslumbramiento, el último grado de libertad mencionado se logra mediante la función de apagar columnas del arreglo con la finalidad de crear apertura de canales eviten el deslumbramiento del conductor que viene en sentido contrario, esta cualidad se logra gracias a la disposición del arreglo matricial y a la posibilidad de acceder a cada uno de los LEDs individualmente [21]. Los sistemas actuadores que darán la libertad de movimiento en los ejes horizontal y vertical aun serán analizados, si se tiene a bien contemplar movimiento mecánico, los motores serán caracterizados con la finalidad de ingresar estos datos dentro del algoritmo de control y que además se tengan también dichos datos a disposición de los posibles desarrolladores que en algún determinado momento pudieran pretender diseñar y probar sus propios algoritmos en el sistema de simulación.

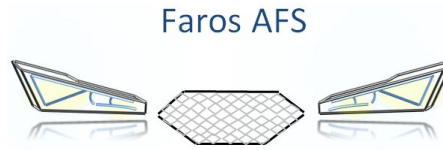


Figura 1.4: Bloque de Faros AFS.

El sistema de simulación basará su funcionamiento en un módulo de cómputo capaz de realizar operaciones matemáticas del modelo de planta simulado en tiempo real, una definición general de un sistema en tiempo real es aquel en el que la corrección del sistema depende no solo de los resultados lógicos de la computación sino también del momento en que se producen los resultados[19]. En este módulo se ingresaran las ecuaciones que describen a la planta (figura 1.5) y que estarán siendo evaluadas constantemente durante la simulación, aquí es donde radica la dependencia con un sistema capaz de realizar operaciones tan rápido como para superar el tiempo de respuesta de los actuadores, dicho tiempo de respuesta se conocerá una vez que se encuentren caracterizados todos los actuadores del sistema. Este modulo deberá a su vez realizar el intercambio de señales con los dispositivos actuadores, los sensores y la estación de trabajo por lo que se deberá contar con dispositivos convertidores analogico-digital (ADCs) y digital-analogico (DACs) ya sea externos o internos, dependiendo de las capacidades con las que cuente el módulo de cómputo en tiempo real, asimismo con la posibilidad de conectar mediante un puerto una interfaz de comunicación hacia la estación de trabajo. La unidad de control (figura 1.6) como su nombre lo supone, albergará el algoritmo de control a ser evaluado y que podrá ser reemplazado en cualquier momento por otro distinto para sujetarse a su evaluación de desempeño, este algoritmo estará interactuando constantemente con las ecuaciones de la planta y la información de las señales de retroalimentación y de entrada para dar origen a una señal de salida que controle los faros AFS.



Figura 1.5: Bloque que alberga las ecuaciones que describen a la planta.



Figura 1.6: Bloque que contiene el algoritmo de control.

Se analizarán los distintos modelos dinámicos necesarios, los cuales tendrán distintos grados de detalle al modelo y se llevará uno de ellos a una etapa de simulación en un software de análisis numérico llamado Simulink el cual realiza dichos análisis con cierto grado de abstracción de los fenómenos físicos del entorno, todo esto para dar lugar al diseño de un controlador para los faros

AFS que sera contenido en la unidad de control del sistema de simulación. Una vez realizado todo lo anterior, se dará paso a la integración de todos los módulos y componentes que conforman el sistema para lograr el funcionamiento mediante la técnica de HIL, como se muestra en la figura 1.1 que representa de manera un tanto abstracta la disposición de los elementos que conformarán el sistema. Se realizarán las pruebas necesarias para determinar el correcto desempeño del sistema de simulación mediante la técnica de HIL para los faros AFS y se procederá a presentar los resultados obtenidos.

## Capítulo 2

# Marco Teórico

*En este capítulo se sientan las bases teóricas necesarias para realizar este trabajo, se comienza definiendo que es la luz y se enlistan algunas de sus propiedades principales, se da paso a los aspectos fisiológicos de la visión humana y algunas de sus relaciones con la tarea de conducción, posteriormente comienza una revisión de aspectos mas técnicos relacionados con las tecnologías de iluminación en faros automotrices que anteceden a los sistemas de iluminación adaptativa, se describen las características y elementos principales de un sistema de iluminación frontal adaptativa, así como el estado de estos sistemas en el mercado mexicano actual, se aborda una introducción técnica a los sistemas de simulación mediante hardware in the loop, como también de sus elementos fundamentales, para culminar con una revisión de los aspectos relacionados con las interfaces gráficas de usuarios y sus elementos técnicos.*

## 2.1. Espectro Electromagnético y Luz Visible

A fines del siglo XVII se propusieron dos teorías para explicar la naturaleza de la luz: la teoría de partículas (corpúscular) y la teoría ondulatoria. De acuerdo con la teoría corpúscular, las partículas muy pequeñas, de masa insignificante, eran emitidas por fuentes luminosas. Estas partículas viajaban hacia fuera de la fuente en líneas rectas con enorme rapidez. Cuando las partículas entraban al ojo, se estimulaba el sentido de la vista. Esta teoría resultaba suficiente para explicar la propiedad de propagación rectilínea y la reflexión, pero no para describir el fenómeno de refracción.

Fue hasta que Huygens un astrónomo, físico, matemático e inventor neerlandés, bajo los términos del movimiento de una perturbación, postularía una teoría ondulatoria que sentaría las bases para poder describir dicho fenómeno, los descubrimientos de los fenómenos de la interferencia y difracción en los años 1801 y 1816 respectivamente, inclinaron el debate a favor de la teoría desarrollada por Huygens, estos dos fenómenos solo podían explicarse gracias a su teoría. Entonces para el año de 1865 James Clerk Maxwell un físico escocés, se dio a la tarea de investigar cuales eran las propiedades de un medio para permitir no solo la propagación de la luz, sino además la transmisión de energía y calor.

Con su trabajo demostraría que una carga acelerada podría radiar ondas que interactuarían tanto con el campo eléctrico como con el campo magnético, campos que siempre son perpendiculares entre si. Posterior al trabajo de Maxwell, Heinrich Rudolf Hertz un físico alemán demostraría que la radiación electromagnética podría surgir a cualquier frecuencia, al mismo tiempo que esta confirmación de la teoría electromagnética abriría la brecha para la confirmación de la dualidad onda partícula de la luz. [23]

Por todo lo anterior una definición adecuada para *Luz* es la que nos da J.Loiseleux en su libro "La luz en el cine" que enuncia lo siguiente:

**Luz:** *(Científ.) Radiaciones compuestas de fotones que se propagan a muy alta velocidad ( $3 \times 10^8 m/s$ ), que presentan simultáneamente un aspecto corpúscular y ondulatorio y que el ojo humano percibe dentro de ciertos límites. Dichas radiaciones tienen la capacidad de oxidar los componentes químicos de superficies fotosensibles.*[24]

Como ya se menciona anteriormente la energía electromagnética se puede propagar en forma de ondas de radio emitidas hacia el espacio libre, o como ondas luminosas. La energía electromagnética se distribuye en un intervalo casi infinito de frecuencias.

La frecuencia no es más que la cantidad de veces que sucede un movimiento periódico, como puede ser una onda senoidal de voltaje o de corriente, durante determinado periodo. Cada vez que la onda se invierte y regresa a un estado inicial se dice que se ha completado un ciclo. La unidad básica de frecuencia es el hertz (Hz), y un hertz es igual a un ciclo por segundo ( $1 \text{ Hz} = 1 \text{ cps}$ ). En electrónica se acostumbra usar prefijos métricos para representar las grandes frecuencias. Por ejemplo, se usa el kHz (kilohertz) para indicar miles de hertz, y el MHz (megahertz) para indicar millones de hertz.[22]

Actualmente, se sabe que el intervalo de frecuencias del espectro electromagnético es enorme. En la figura 2.1 se presenta un esquema de dicho espectro. La longitud de onda  $\lambda$  de la radiación electromagnética está relacionada con su frecuencia  $f$  mediante la ecuación general

$$c \times \lambda f \tag{2.1}$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz ( $3 \times 10^8 m/s$ ). En términos de longitudes de onda, el minúsculo segmento del espectro electromagnético conocido como región visible comprende de 0.00004 a 0.00007 cm.

Debido a las pequeñas longitudes de onda de la radiación luminosa, es más conveniente definir unidades de medida menores. Una unidad común es el nanómetro (nm). Un nanómetro (1 nm) se

define como la millonésima parte de un metro. La región visible del espectro electromagnético se extiende desde 400 nm para la luz violeta hasta aproximadamente 700 nm para la luz roja.[23]

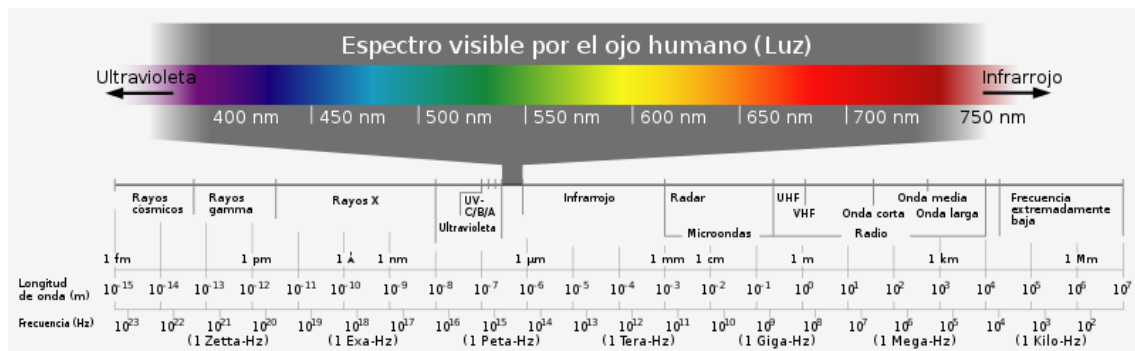


Figura 2.1: Espectro Electromagnético

Todas las diversas propiedades conocidas de la luz están convenientemente descritas en función de los experimentos por medio de los cuales fueron descubiertas, y de los muchos y variados experimentos por medio de los cuales son ahora, continuamente demostradas. Estos numerosos experimentos se pueden agrupar juntos o clasificar bajo uno de los tres siguientes títulos, óptica geométrica, óptica física, óptica cuántica.[25] cada una de estas tres partes se puede subdividir de la siguiente manera:

### Óptica geométrica

- Propagación rectilínea
- Velocidad finita
- Reflexión
- Refracción

### Óptica física

- Difracción
- Interferencia
- Polarización
- Doble refracción

### Óptica Cuántica

- Efecto Fotoeléctrico
- Efecto Compton
- Extinción atómica
- Producción de pares

Las características de las propiedades ópticas geométricas se pueden resumir de la siguiente manera:

La propagación rectilínea nos dice que la luz viaja en línea recta si esta encuentra viajando a través del mismo medio, la velocidad de la luz será siempre constante dentro del mismo medio a una velocidad muy cercana, la reflexión de la luz es la propiedad de regresar al medio en el que viaja si esta incide en una superficie lisa, y por último su trayectoria cambiara cuando el haz de luz entre a un medio transparente y distinto al que viaja, esto refiriéndonos a la propiedad de la refracción.[23]

## 2.2. El Ojo Humano

El ojo humano se puede describir en una primera instancia como una cámara increíblemente fina, que por un lado cuenta con un sistema óptico de lentes que con el paso del tiempo y gracias a la evolución logro ser perfeccionado, y por otro lado un retina que funciona como una superficie tan sensible que funciona de manera similar a como lo haría una película fotosensible.

Cuando un haz luminoso proveniente de cualquier objeto o materia en el exterior incide en el sistema óptico del ojo, su trayectoria es modificada y es enfocado hacia la retina, entonces una imagen real es creada, un hecho muy importante es que todas las imágenes que son formadas estas invertidas, pero el cerebro se encarga de interpretarlas con la posición real de la que provienen.[25]

Algo fundamental para la percepción del color es la capa conformada por células fotorreceptoras, denominados conos y bastones debido a su forma, los bastones son los encargados de percibir la luz tenue y con ella la forma de un objeto y brindan la información en blanco y negro, mientras que los conos perciben cantidades de luz mucho mas intensas, y nos brindan información del color. La razón fundamental por la que nuestra visión nocturna sea pobre es debido a la cantidad mucho mayor de luz a la que operan los conos, de la misma manera se entiende el hecho de que los bastones continúen presentando sensibilidad tanto de día como de noche.[26]

La figura 2.2 nos brinda un panorama de los elementos mencionados anteriormente, el sistema óptico que esta formado por la córnea, el lente, la pupila y el iris, la ubicación de la retina, y la capa de células fotorreceptoras.

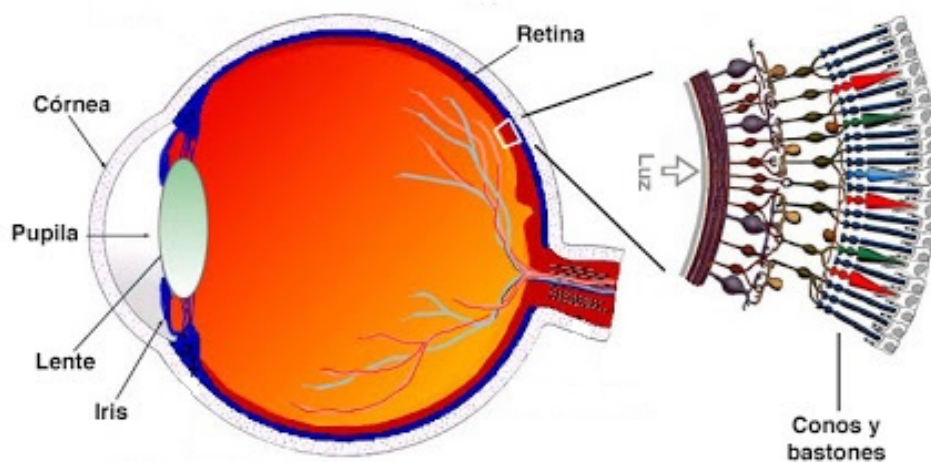


Figura 2.2: Elementos anatómicos básicos del ojo humano.

## 2.3. Visión de los Colores

Cuando un haz luminoso que es conformado por radiaciones de diferentes longitudes de onda incide dentro del ojo humano las sensaciones visuales varían. A la máxima sensación visual que se produce se le asigna un valor arbitrario de 1, esta es producida en el color verde con una longitud de onda  $\lambda = 555nm$  esto se puede observar en la figura 2.3.

Lo anterior se debe a que existen cerca de 8 millones de conos aproximadamente, clasificados en tres tipos de conos, con respecto a su sensibilidad a las longitudes de onda larga, media y corta, dichos conos son distribuidos por toda la retina, siendo los conos de larga y media longitud de onda los que se ubican mas cercanos a la región llamada fovea, esta región se encuentra en el centro del eje visual del ojo, en la cual se enfocan los rayos luminosos y esta ampliamente preparada para la visión de color.

Los tres tipos de conos no están distribuidos equitativamente por toda el área de la retina, siendo los conos de longitud de onda corta los que mayor concentración tienen fuera del área fovea, reduciendo la sensibilidad de estas ondas, que decrece gradualmente conforme aumenta la excentricidad geométrica.

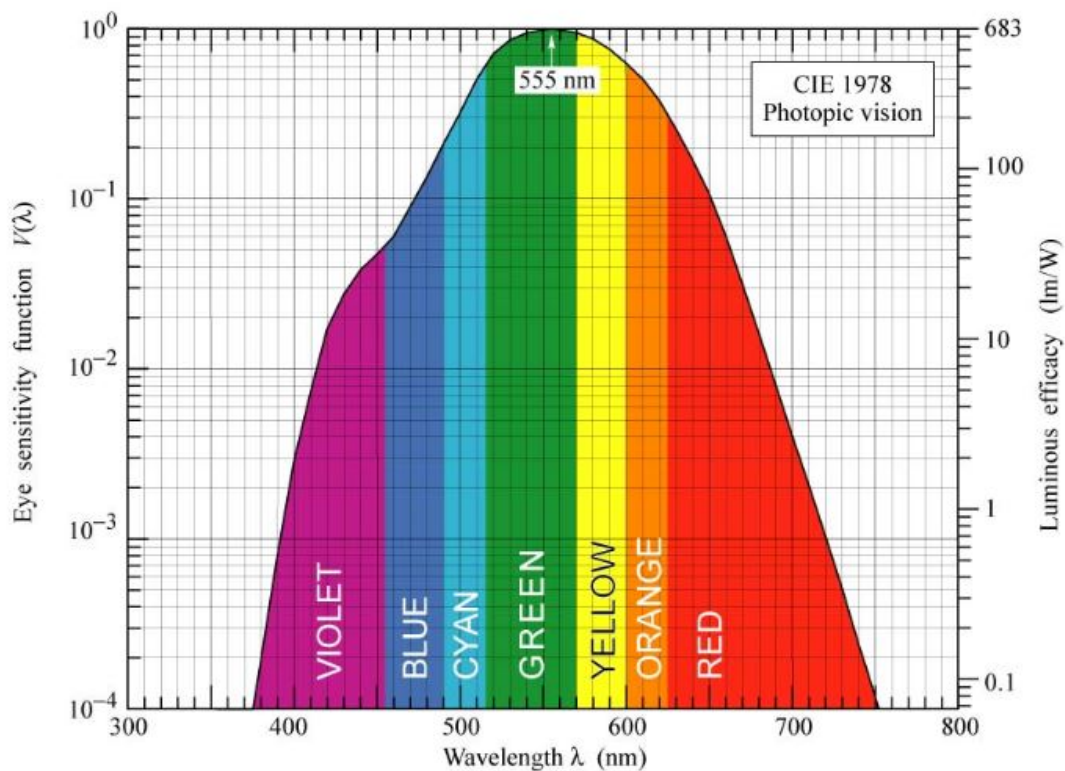


Figura 2.3: Curva de luminosidad, Sensibilidad del ojo (eje ordenado izquierdo), eficiencia luminosa medida en lumen por watt (eje ordenado derecho), donde el mayor valor obtenido es para  $\lambda = 555$ . [27]

Una curva del patrón de luminosidad se determina mediante medios experimentales que se realizan a través de la comparación de brillo de un color con respecto a otro a lo largo del espectro, midiendo además las cantidades de energía relativa. Es entonces una gráfica de magnitudes fotométricas de la energía y no del brillo relativo.

El brillo se dice es una magnitud en la luz, así como la sonoridad lo es en la acústica, debido a que el brillo varía en un margen sumamente amplio tanto como la función logarítmica de la energía, para llevar el brillo al doble de su magnitud sobre una superficie, se debe incrementar su radiación muchas veces. [25]

## 2.4. Visión Fotópica, Escotópica y Mesópica

En un lugar sumamente iluminado o bajo plena luz del día, la mayor sensibilidad del ojo humano se encuentra dentro de los colores amarillos y verdosos. En cambio cuando se tiene una fuente de luz demasiado débil, la mayor sensibilidad para el ojo humano se encontrara entonces entre los colores azules y verdosos, por lo tanto se pueden dibujar dos curvas de sensibilidad luminosa relativa para el brillo una para el día y una para la noche, como se muestra en la figura 2.4.

Bajo una iluminación diurna el ojo humano tiene una visión normal debido a la visión fotópica, por el contrario durante la noche cuando las fuentes de iluminación disminuyen su intensidad, los bastones cuya sensibilidad es mas alta que la de los conos, logran dar lugar a la llamada visión escotópica. Existe un tercer tipo de visión llamada mesópica, la cual se encuentra en una región intermedia de las dos visiones anteriores.[25]

A medida que la iluminación de la visión disminuye, sucede la transición de la visión fotópica hacia las demás formas de visión, la visión entra dentro de la región de visión mesópica, lo que disminuye la sensibilidad absoluta de los conos que se encuentran en el área fovea, eventualmente la visión falla por completo y se llega a un estado de visión escotópica, donde la sensibilidad de los bastones fotorreceptores llega gradualmente a dominar la sensibilidad de los conos fotorreceptores. La importancia de las diferentes funciones adaptativas de los faros de un automóvil puede variar dependiendo de las condiciones del entorno, pero una función principal que no cambia en su importancia, es la tarea de llevar la visión escotópica hacia una región de visión mesópica.

Las características de los niveles de iluminación para cada forma de visión se enlistan a continuación:

- Visión Fotópica - Estado visual que ocurre dentro de altos niveles de luminiscencia aproximadamente  $3 \text{ cd/m}^2$ . En este estado la respuesta de la función de la retina es dominada por los conos fotorreceptores.
- Visión Escotópica - Estado de la visión en que los niveles de iluminación son muy bajos, de aproximadamente  $0.001 \text{ cd/m}^2$ . En este estado la función de la retina es dominada por los bastones fotorreceptores.
- Visión Mesópica - El estado de operación de la visión se encuentra dentro de una región intermedia entre las dos anteriores formas de visión, los niveles de iluminación por lo tanto son de entre aproximadamente  $0.001 \text{ cd/m}^2$  y  $3 \text{ cd/m}^2$ .

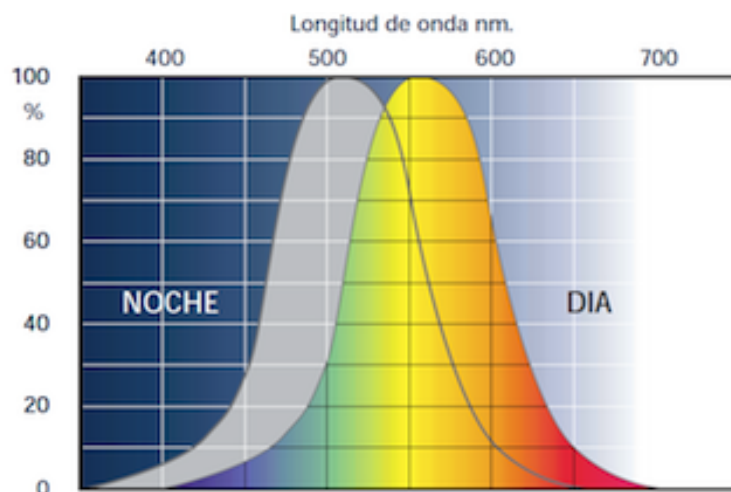


Figura 2.4: Curvas de visión fotópica(color) y escotópica(gris).

Como se puede observar en la figura 2.4 la máxima luminosidad para las curvas de visión fotópica y escotópica se dibuja a la misma altura, pero es importante apuntar que la escala de la curva fotópica es miles de veces mucho mayor que la curva escotópica.

## 2.5. Color y temperatura de la luz

En el año de 1931, la comisión internacional de la iluminación (C.I.I. por sus siglas) aprobó una resolución con bases bien planteadas para poder tener una medida cuantitativa de los colores. El estudio de este sistema patrón de CIE 1931. no debe considerarse trivial y se recomienda a interés personal el estudio mas profundo de dicho sistema, solo mencionaremos que dentro del diagrama (figura2.5) propuesto por esta comisión se colocan las longitudes de onda del espectro visible alrededor de la forma dibujada, mientras que al centro de ella se encuentra el color blanco, formado por la suma de todas las longitudes de onda contempladas dentro del rango visible.[25]

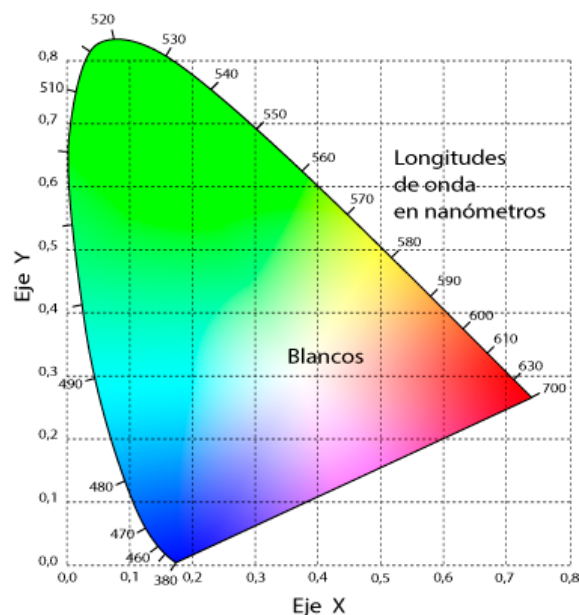


Figura 2.5: Diagrama cromático CIE 1931 propuesto por la C.I.I.

Los bordes del diagrama corresponden a los colores monocromáticos, son especificados por sus colores preponderantes y su longitudes de onda especificados en nanómetros. Los colores cromáticos son situados dentro del diagrama son especificados mediante un conjunto de coordenadas del eje x y el eje y. Los colores blancos son localizados en el centro global del diagrama cromático, como los colores blancos colindan con muchos colores cromáticos se deriva en una amplia gama de de paleta de colores blancos.

Los colores blancos son definidos dentro del diagrama de la C.I.I. por sus coordenadas X y Y, además se pueden caracterizar por la temperatura de su color en grados kelvin. Colores con temperaturas por encima de 5000 K son llamados colores fríos, mientras que con temperaturas por debajo de entre 2700 K y 3000 K son llamados colores de temperatura cálidos(figura 2.6).

Existen fuentes de iluminación que producen colores blancos con distintos niveles de temperatura. La luz diurna tiene una temperatura de aproximadamente 6500K, mientras que los led producen colores blancos de temperaturas mayores a 4500K considerándose un blanco frío, la tecnología Xenon produce blancos con temperaturas de aproximadamente 4300K, siendo las lamparas halógenas las tienen brindan un color blanco mas cálido de 2800K aproximadamente.

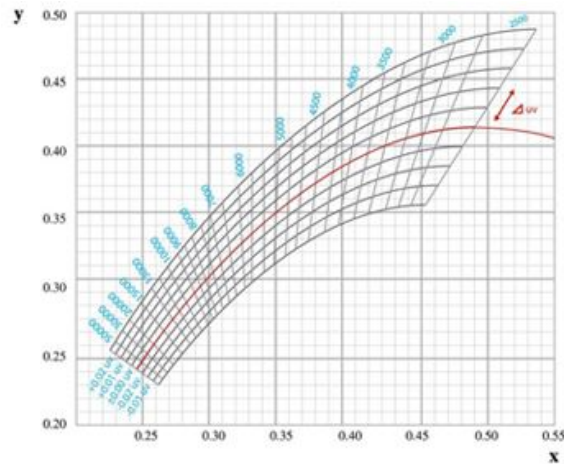


Figura 2.6: Diagrama cromático CIE 1931 con temperaturas de colores blancos.

## 2.6. Construcción de la visión

La imagen en el ojo humano es muestreada de manera no uniforme, lo que implica que se deban atender diferentes partes del campo visual de manera secuencial. Debido a que la imagen del ojo es bidimensional, el sistema de visión debe construir las formas tridimensionales y las profundidades que se observan, debido a que una imagen tridimensional no puede ser comprendida de manera explícita con una imagen de solo dos dimensiones.

La visión humana tiene reglas no explícitas con las cuales puede construir formas tridimensionales y profundidades de manera asombrosa. Estas reglas son construidas dentro de la arquitectura visual y son involucradas automáticamente cuando se presenta una imagen en la retina. Se puede pensar en esto como un sistema que basaría su funcionamiento en un método científico de manera inconsciente, el cual recolecta datos y arroja una teoría.

Generalmente tenemos la idea de que vemos el mundo que nos rodea en tres dimensiones y que podemos percibir la profundidad. Un aspecto fundamental para realizar la tarea de conducción es la percepción de la profundidad de manera compleja, es muy impresionante reconocer que debemos construir esa profundidad a partir de una imagen de dos dimensiones percibida por nuestros ojos. Todos los procesos encargados de realizar esta construcción, están repletos de suposiciones y por lo tanto pueden fallar.

### 2.6.1. Percepción visual del movimiento

La visión humana es especialista en la construcción de profundidad e imágenes tridimensionales a partir de la percepción visual de los movimientos de dos puntos en dos dimensiones, esto no significa que no pueda fallar, ya que se puede pensar en esto como un problema que sería mal planteado, y es que tan solo hay que pensarlo un momento, parece algo poco posible.

El sistema visual infiere el movimiento con base en la distribución de la luz en el espacio, la cual es percibida en la imagen formada en la retina. El primer paso para la percepción del movimiento es la estimación del flujo óptico dentro del sistema visual a partir del patrón dinámico de luz que incide en la retina. El flujo óptico es la variación continua de la imagen sobre la retina mientras el observador se mueve en el espacio en una dirección. Mientras se conduce el estímulo visual no es patrón óptico estático si no un flujo óptico.

El campo de flujo óptico es un conjunto de direcciones desde un punto de observación, en el cual existe un punto llamado punto de fijación el cual brinda un estímulo óptico estático constante sobre la imagen formada en la retina, los demás puntos del ambiente producen entonces un cambio dinámico constante en la estimulación de la retina.



Figura 2.7: Flujo óptico en la percepción visual del movimiento.

Este fenómeno se puede observar en la figura 2.7 en la cual cada flecha representa la velocidad y la dirección del movimiento, las mas flechas mas grandes ubicadas mas cerca al observador se mueven a una velocidad mayor, mientras que las flechas pequeñas ubicadas de manera mas lejanas al observador se mueven mas lento.

Los tipos de percepción del movimiento se pueden clasificar en grupos de la siguiente manera:

- Percepción del movimiento real
  - Percepción determinada por un objeto físico en movimiento dentro del espacio.
- Percepción del movimiento ilusorio o aparente
  - Movimiento estroboscópico
  - Movimiento inducido
  - Movimiento de estructuras estáticas
  - Post-efecto de Movimiento

#### Percepción del movimiento real

En esta forma de percepción, como su nombre lo indica, El movimiento es real, por lo tanto la luz que se mueve físicamente e incide en la retina fluctúa de manera no uniforme, brindando la posibilidad de inferir el movimiento.

#### Movimiento estroboscópico

Este tipo de percepción es generada por destellos de luces separadas en tiempos de 40 ms a 200 ms, y se infiere movimiento de un destello hacia otro, así que no es determinada por la translación de un objeto físico en el espacio. Puede ser generado por luces adyacentes que destellan secuencialmente generando una sensación de movimiento (figura 2.8). Destellos menores a 30 ms no logran hacer que se perciba el movimiento, en destellos con 60 ms de separación logran hacer que se perciba un movimiento realista, es llamado también movimiento óptimo o beta, destellos con separaciones superiores a 60 ms, logran hacer que se perciba una ilusión parcial de movimiento, en la cual el punto parece moverse de la primera ubicación a la segunda sin que se perciban posiciones intermedias, es llamado también movimiento phi.

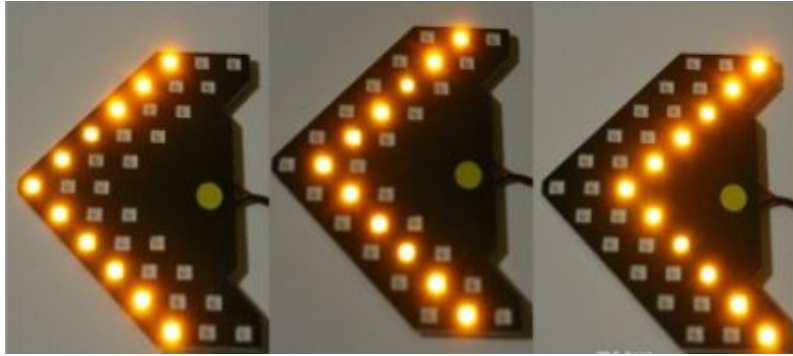


Figura 2.8: Luces Secuenciales que producen el efecto de movimiento estroboscópico.

### Movimiento inducido

En este movimiento la luz esta rodeada de por un objeto mas grande que se mueve, lo que hace que esta luz parezca que se mueve en la dirección contraria(figura 2.9), un ejemplo de este movimiento es cuando miramos a través de la ventana de un autobús que se encuentra detenido y a lado de el un remolque de un tamaño mayor a nuestra ventana se mueve, nuestro cerebro infiere momentáneamente el movimiento de nuestro autobús,casi podemos sentir el movimiento.

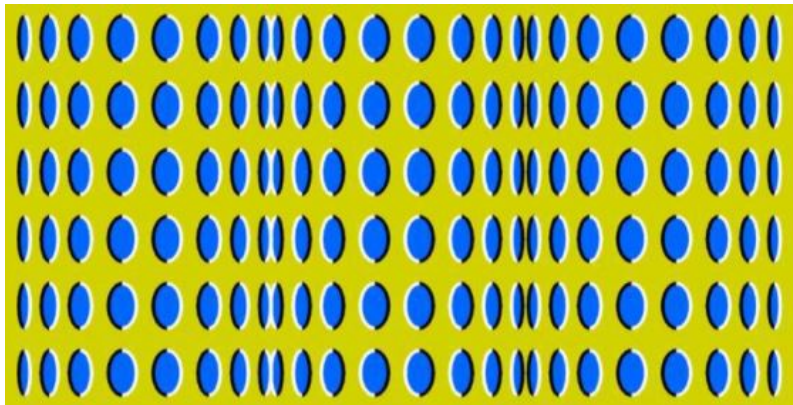


Figura 2.9: Ejemplo del efecto de movimiento inducido.

### Movimiento de estructuras estáticas

También llamado movimiento auto-cinético, en el cual la luz es observada en una habitación completamente oscura, el movimiento es percibido en cualquier dirección(figura 2.10), un ejemplo claro de este tipo de movimiento es cuando jugamos con una braza caliente situada en la punta de una rama en una noche oscura, para nuestro cerebro es muy complicado determinar la dirección del movimiento al no tener mas referencias.



Figura 2.10: Ejemplo del efecto de movimiento de estructura estática en un ambiente oscuro.

## Post-efecto de movimiento

Este fenómeno de movimiento es producido después de observar franjas en movimiento durante cierto tiempo, antes de visualizar la luz de un objeto estacionario, esta luz parecerá viajar en sentido contrario a la dirección de las franjas que visualizamos (figura 2.11).

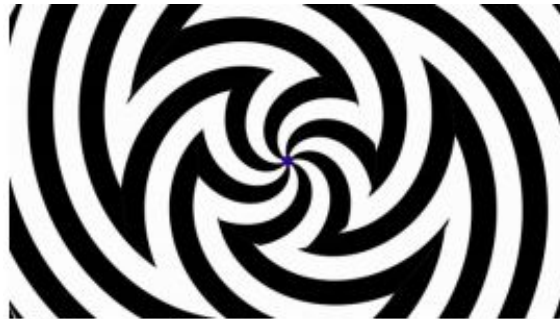


Figura 2.11: Ejemplo comúnmente utilizado para mostrar el efecto posterior al movimiento.

### 2.6.2. Percepción del sombreado y el color

Comúnmente solemos asumir que los colores que vemos y los matices de gris que dan forma a las sombras no son construcciones de nuestro sistema visual, si no que se trata únicamente la recepción de la información de los colores que tienen realmente los objetos en el mundo real. La suposición que hacemos es completamente falsa, ya que los colores y matices grises son el entregable final de un proceso de construcción visual complejo, tan complejo que aun los investigadores de la visión aun no logran comprender completamente.

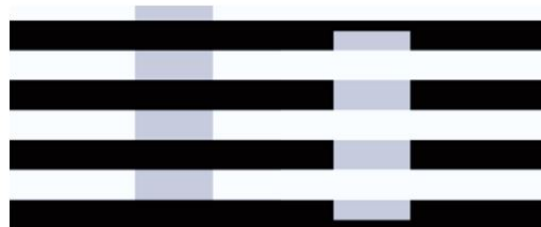


Figura 2.12: La ilusión del blanco.

Consideremos por un momento la figura 2.12, en la cual además de las franjas negras y blancas, parecen apreciarse dos barras verticales grises, la barra gris de la derecha parece flotar frente a las barras horizontales, mientras que la barra gris de la izquierda parece estar por detrás de las franjas horizontales, ahora bien, es posible cambiar esta percepción, con un poco de esfuerzo, se debe pensar en que la barra gris del lado derecho se encuentra por encima de un fondo negro, pero a su vez, detrás de unas franjas horizontales blancas, si esto se logra puede notarse también una percepción distinta en el tono de gris de esa barra, en la primera percepción el tono del gris parece ser un tanto translúcido, siendo que para la segunda percepción se vuelve de un tono más sólido. Por otro lado volviendo a la primera percepción que tuvimos de ambas barras grises, en la que una parecía estar detrás y otra por enfrente de las barras negras horizontales, estas parecen ser de tonos de gris distintos, el izquierdo más oscuro que el derecho, sin embargo basta prestar un poco más de atención y aislar un segmento gris de cada barra para darnos cuenta que en realidad son de la misma tonalidad de gris.

De esta manera no solo podemos mostrar como nuestro sistema visual es capaz de construir tonos de gris diferentes, si no también como distintas tonalidades de gris se involucran en la construcción de la profundidad, lo que nos lleva a percibir estas cualidades dentro de nuestra experiencia visual en todo momento.

Ahora hablaremos un poco del color, comencemos basándonos en que la luz es un fenómeno que puede ser descrito dentro de muchas teorías físicas como polarización y longitud de onda por ejemplo, pero el color no puede ser listado completa y únicamente dentro de alguna de las leyes físicas referentes a la luz. La luz que incide en el ojo entonces se puede describir en términos de longitud de onda y polarización, pero no de color. El color por lo tanto, así como la profundidad y los tonos de gris, es una construcción realizada por nuestro sistema visual.

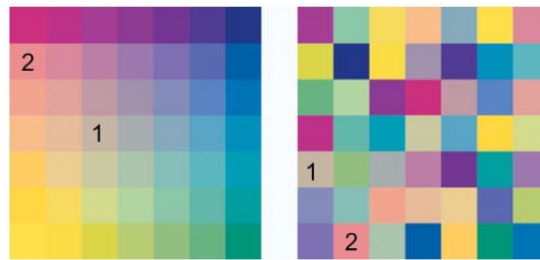


Figura 2.13: Cuadro de Koenderink.

En la figura 2.13 podemos observar un cuadro de colores ideado por Jan Koenderink con el fin de mostrar la complejidad con la que se forma la construcción del color, se presentan dos arreglos con 49 cuadros de diferentes colores cada uno, del lado izquierdo podemos observar un arreglo con colores que a pesar de ser diferentes se ordenan de manera que se encuentran rodeados de tonos cercanos, del lado derecho se tiene un arreglo en el cual los cuadros de color son ordenados de manera aleatoria.

En el cuadro del lado izquierdo podemos notar como se logra una apariencia de que las esquinas del cuadro son iluminadas por fuentes de luz de color amarillo, rosa azul y verde, respectivamente, además de que se percibe un efecto de degradado en cada fuente conforme pareciera alejarse del origen de dicha fuente. También podemos percibir la sensación de ver iluminada por un fuente de luz cálida la parte izquierda de dicho recuadro, mientras que el lado derecho se percibe como si tuviera oscuridad, con estas características podemos incluso ayudar a nuestra mente a inferir una profundidad en la imagen, como si se tratara de un objeto convexo y no una superficie plana. Todo lo anterior contrasta con el arreglo del lado derecho, en el cual el sistema visual no puede percibir nada, no se puede inferir ningún tipo de información de esa fuente.

La figura 2.13 ilustra de buena manera que nuestra percepción del color es algo mas complejo que simples resultados de reflectancias en superficies y haces de luz con diferentes longitudes de onda incidiendo dentro del sistema visual. Cada recuadro del arreglo derecho como del arreglo izquierdo representa una superficie que refleja, sin embargo la forma en que percibimos los colores e inferimos información es diferente para cada uno de los arreglos.

### 2.6.3. Percepción de los objetos y sus partes

La entrada del sistema visual humano se basa en un arreglo de discreto de quatoms de luz que son atrapados, en dicho arreglo cada fotorreceptor se encarga de informar la cantidad de quatoms de luz que ha atrapado recientemente. Esto significa que la entrada al arreglo no se trata de profundidades, de colores, de formas o de objetos. La información acerca de los objetos no es nada menos

que el resultado de un arduo trabajo completamente sofisticado del sistema visual.

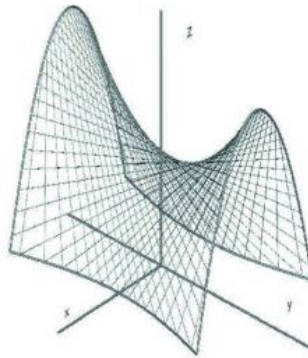


Figura 2.14: paraboloides hiperbólico formado a partir de imagen de dos dimensiones.

En la figura 2.14 se puede observar la figura geométrica de un paraboloides hiperbólico que bien puede representar un objeto del mundo real como la posibilidad de ser una silla de montar, nuevamente este objeto es formado a partir de una imagen de únicamente dos dimensiones sobre una superficie plana, sin embargo la construcción que realiza nuestro sistema visual nos permite observar un objeto de tridimensional, el cual aun sabiendo que se trata de un dibujo plano, nuestro sistema visual no puede parar de construir la imagen tridimensional.

Lo anterior nos muestra que por mas que el sistema visual sea muy sofisticado en construcciones del mundo real, puede presentar errores a pesar de la clara evidencia de que esta fallando, que insiste en construir una imagen tridimensional de un objeto plano. El modo de operación de nuestro sistema visual se basa en reglas de construcción que garantizan el poder constructivo y de inferencia con el que cuenta nuestro sistema visual. Estas reglas que representan dicha potencia de construcción también pueden representar una incapacidad de construir una interpretación diferente y mas útil del mundo real.

Para los ingenieros de diseño de sistemas de iluminación automotriz es sumamente importante comprender estas reglas, sus fortalezas y debilidades, ya que no pueden asumir un observador adaptable que puede ver el mundo como un físico lo describiría. Por el contrario deben trabajar consientes de las sofisticadas reglas de construcción del observado, reglas que proveen la interpretación subjetiva de lo que el observador verá.

La manera en que nuestro sistema visual crea los objetos interactúa con la manera en que el mismo sistema construye el movimiento, temas que ya hemos revisado los puntos anteriores. La visión humana crea todos los objetos que ve, pero eso no significa que crea o destruye objetos innecesariamente. Podemos ver los resultados de la construcción de movimiento de arriba hacia abajo o movimientos de izquierda a derecha, pero no vemos los movimientos en los que los objetos son creados o destruidos, los movimientos que el sistema visual crea están diseñados para reducir recursos en los objetos que creamos.

## 2.7. Limites de la atención visual

El sistema de visión humana tiene recursos limitados de atención. Prestarle atención a realizar una determinada labor, o a una parte única del campo visual, puede reducir la consciencia de los eventos que suceden a nuestro alrededor. Múltiples estudios se han realizado para analizar la ceguera por falta de atención a eventos dinámicos, estos estudios sugieren que toda la información del entorno esta disponible para ser procesada de una manera atenta y dicha información puede ser retenida

en la memoria, sin embargo, si no se presta la atención suficiente mucha de esta información no será retenida. Así que, una afirmación fuerte dice que, sin atención las características visuales de nuestro entorno son imperceptibles, o al menos no pueden ser procesadas de manera consciente, entonces los observadores pueden fallar de manera consciente.[29]

Un experimento muy conocido llamado “gorillas in our midst” sitúa a varios sujetos en una habitación formando un círculo con la tarea de pasar un balón de sujeto en sujeto hasta completar una vuelta, los participantes deben completar el mayor número de vueltas posibles en un tiempo determinado, mientras la tarea se realiza, un hombre disfrazado de gorila se pasea por el cuarto durante 9 segundos, únicamente el 50% de los participante pudo notar al gorila.

Este experimento fue realizado bajo condiciones de iluminación apropiadas en la habitación, mostrando que una iluminación inadecuada no fue el problema. La tarea de conducción tiene implicaciones claras y de importancia, entonces un conductor que es absorbido por una tarea visual distinta o atendiendo solo una parte del campo visual puede decirse que se encuentra distraído.

## 2.8. Movimiento de los ojos

Debido a la conformación fisiológica del ojo humano, es fundamental el movimiento de los ojos para poder así explorar el mundo que nos rodea, esto con el fin de poder llevar la mayor cantidad de rayos luminosos del mundo externo a la retina y que estos sean enfocados en la fovea. Para llevar a cabo esta tarea fundamental dentro del sistema de visión, el ojo humano se vale una cantidad sumamente extensa de diferentes movimientos, dentro de los cuales existen dos tipos de movimientos primordiales que abordaremos, los movimientos de fijación y los movimientos sacádicos.

Los primeros movimientos mencionados, llamados movimientos de fijación, como su nombre lo insinúa, se tratan de movimientos realizados intentando mantener una proyección del objeto de interés fijo en la fovea. Estos movimientos pueden clasificarse en dos tipos, movimientos de fijación voluntaria, y movimientos de fijación involuntaria, ambos generados por mecanismos neuronales.

El mecanismo de movimiento para la fijación voluntaria, permite a una persona mover los ojos de manera deliberada en dirección del objeto sobre el que se desea mantener la visión. La mejor manera de representar esto es imaginarnos en una posición estática dentro de una sala de estar, en donde colocado sobre una mesa se encontrara un teléfono el cual comenzara a recibir una llamada, al suceder esto el teléfono produciría un sonido sobre un objeto estático que llamaría nuestra atención, nosotros nos serviríamos del movimiento de fijación voluntaria para poder observar de manera detenida el objeto del cual proviene el sonido.

Por otro lado el mecanismo de fijación involuntaria, es un tipo de movimiento que permite al observador mantener los ojos fijos con firmeza sobre el objeto que se mira impidiendo así el movimiento de la imagen en la retina, este tipo de fijación, puede dar origen a los llamados movimientos sacádicos, esto debido a que los ojos no pueden permanecer completamente quietos. Imaginemos nuevamente la situación en donde ha sonado el teléfono que se encuentra en nuestra misma habitación, esta vez nosotros ya hemos encontrado gracias a la fijación voluntaria el objeto del cual proviene el sonido, pero debemos mantener la vista fijada sobre el mas tiempo, esto puede ser posible gracias al movimiento de fijación involuntaria.

Los movimientos sacádicos son pequeños movimientos de sacudidas con los cuales eventualmente se origina un movimiento de fijación, estos movimientos sacádicos alcanzan rangos de hasta 700 grados sobre segundo, dependiendo de la distancia a la que se desee encontrar el objeto, estos movimientos suelen ser extremadamente rápidos entre una fijación y otra, de entre 30 ms y 120 ms además de un tiempo de reacción entre la aparición de un objeto y el inicio del movimiento sacádico entre 80 ms y 300 ms, dependiendo de los mecanismos de reflejos para cada individuo. Este movimiento también se puede entender como los pequeños saltos sucesivos para llegar de un punto a otro y generalmente el cerebro suprime la imagen entre cada uno de estos saltos.[30]

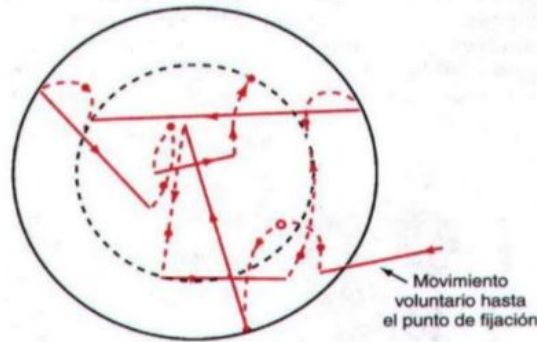


Figura 2.15: Movimientos sacádicos y de fijación voluntaria para fijar una imagen.

En la figura 2.15 se representan los pequeños movimientos sádicos durante el intento de fijación de un objeto como también los movimientos de fijación voluntaria, se representa la fóvea como un círculo negro de línea punteada concéntrico, en el cual los movimientos sacádicos, representados mediante un línea roja discontinua intentan dar paso a los movimientos de fijación representados mediante la línea roja continua, se observa que dichos movimientos se presentan constantemente cerca del área correspondiente a la fóvea, esto con el fin de mantener la imagen fijada de manera voluntaria.

Los tiempos promedio registrados para un movimiento sacádico horizontal del ojo desde una posición inicial hasta una posición final son mostrados de manera mas clara en la figura 2.16, en la cual podemos observar en la parte superior de la figura, la posición que toma el ojo hacia un objeto de interés, y la traslación de ma posición del ojo dentro del rango mencionado de entre 30 ms y 120 ms, dentro de una amplitud que no supera los 30 grados de movimiento, de igual manera tenemos en la parte inferior de la figura la diferente velocidad adquirida en el movimiento durante las diferentes fases, el periodo de latencia o reacción, el inicio del movimiento sacádico y su terminación, en donde la velocidad máxima en el movimiento no supera los 700 grados sobre segundo, y un tiempo de 120 ms.

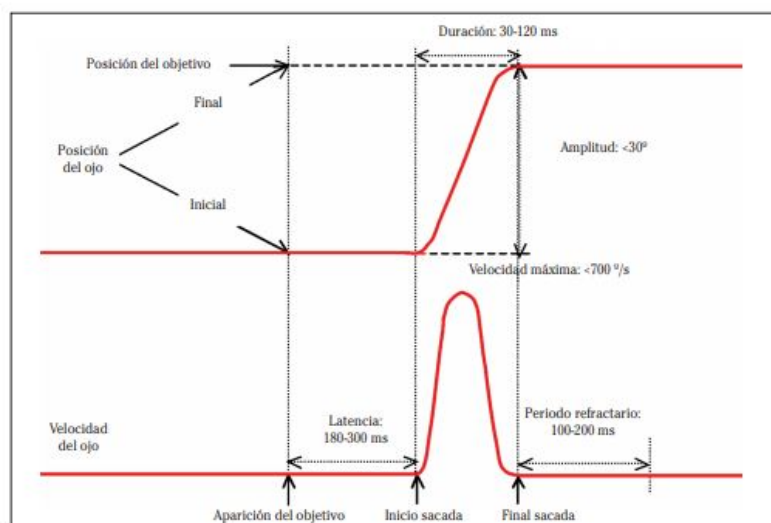


Figura 2.16: Registro gráfico de un movimiento sacádico horizontal.

Todos estos movimientos ocurren en un ojo, pero los movimientos en ambos ojos no trabajan de manera separada, un trabajo de manera coordinada en el conjunto visual brinda el seguimiento en la visión necesario para fijar el objetivo, siendo casi imperceptible para nuestra conciencia, como lo es todo el trabajo realizado por el sistema visual.

## 2.9. Comportamiento de la visión durante la conducción

El comportamiento de la mirada es un indicador que nos sirve como una muestra de como es que el sistema visual trabaja al adquirir la información para nuestro cerebro. la fovea en el ojo humano solo puede abarcar un pequeño ángulo de entre 2 y 3 grados dentro de los cuales las características visuales de nuestro entorno deben ser resueltas rápidamente. Para poder lograr esto, el ojo debe escanear secuencialmente toda la escena que se encuentra frente a el, como si se tratara de un barrido secuencial a una imagen. Esta secuencia de barrido se representa mediante la figura 2.17 en donde se pretende mostrar como aun que el procesamiento de la información solo se realiza para algunas zonas específicas de la escena, el escaneo pretende abarcar la mayor cantidad de objetos posibles.

El comportamiento para esta estrategia de muestreo de información mediante el barrido de la escena, depende en gran medida de la atracción de los objetos que se encuentran en el entorno, podemos imaginar entonces de una manera sencilla este comportamiento como el de un periscopio de un submarino que flota en la superficie y solo cuenta con este medio para poder llevar a cabo un procesamiento interno de la información visual sobre el exterior.

Sin embargo es mucho mas complejo, pues la función de vista periférica en nuestros ojos, también tiene células foto-receptoras ubicadas fuera del área de fovea, las cuales se encuentran interconectadas a células neurotransmisoras, de tal manera que se tiene una sensibilidad especial para los estímulos por reflejos de luz en movimiento. Estas mismas células neurotransmisoras están a su vez conectadas directamente a los músculos de los ojos por vías específicas del cerebro, esto significa que cualquier cambio en los estímulos que alcance la vista periférica del ojo inmediatamente redirigirá la mirada al objeto en movimiento, esto no significa que este impulso no pueda ser negado, se puede evitar si de manera consciente se resiste a dicho impulso.

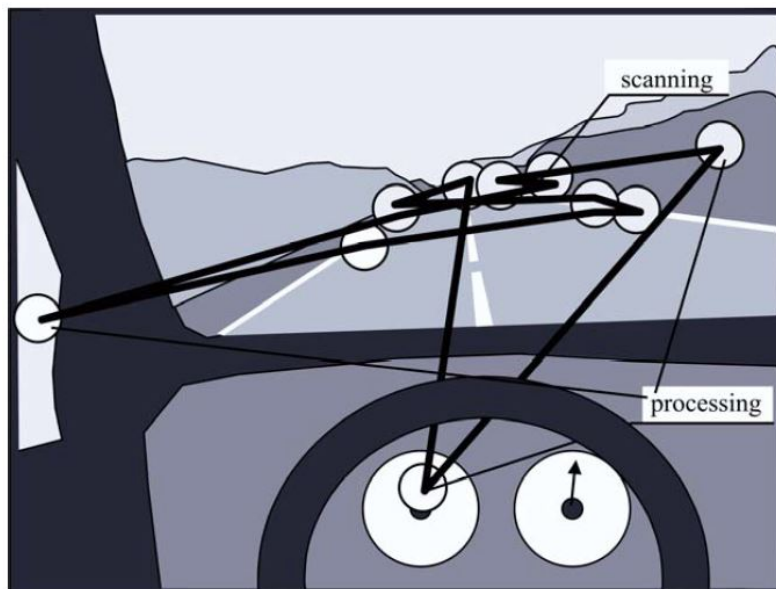


Figura 2.17: Proceso de escaneo secuencial de una escena visual por el sistema visual humano.

Se han realizado estudios en los que se analiza el tiempo de fijación de la mirada sobre ciertas áreas de interés al momento conducir, estos estudios se realizan mediante sistemas de seguimiento de los movimientos del ojo, en estos estudios se puede distinguir entre un momento de escaneo y un momento de procesamiento, debido a que las miradas de escaneo tienen una duración bastante corta, en promedio 400 ms, un escaneo a los bordes de la carretera permite la percepción de señales de tráfico y otros conductores, mientras que el procesamiento significa que la mirada se fije en áreas de interés como los paneles de instrumentos, los retrovisores, y las pantallas multimedia del vehículo.

## 2.10. Percepción visual de iluminación modulada por ancho de pulso

En ocasiones mientras conducimos o caminamos por la calle podemos encontrar vehículos con faros delanteros o luces traseras que parecen estar parpadeando muy rápidamente, dando la sensación de tener fuentes de iluminación poco estables. Es muy probable que dichos vehículos estén equipados con una fuente de iluminación de tecnología LED, la cual es operada mediante una técnica de modulación por ancho de pulso, también conocida como PWM (Pulse-width modulated) por sus siglas en inglés. Cuando la frecuencia de operación no es la adecuada, este fenómeno de parpadeo puede ser percibido por el sistema visual del ojo humano.

El flujo luminoso producido por un LED puede ser controlado de múltiples maneras, pero de manera general, se controla su voltaje o su corriente. Un enfoque de control comúnmente utilizado es el de la operación del LED mediante modulación por ancho de pulso. De esta manera se restringe o se permite el paso de corriente que circula a través del LED, realizando esta conmutación una gran cantidad de veces cada segundo.

El resultado de un corto tiempo de conmutación para el dispositivo LED es una modulación en el flujo luminoso que dicho componente puede emitir y lo hace con la misma frecuencia que la conmutación. Si la frecuencia de modulación supera los 70 Hz el sistema de visión humano únicamente podrá percibir el promedio del flujo emitido. En la figura 2.18 se representa la percepción del sistema visual ante secuencias que superan los 70 Hz de frecuencia en la modulación (lado izquierdo) en donde el flujo luminoso es percibido como un flujo continuo, también se representa la percepción para secuencias con frecuencias de modulación menores (lado derecho) donde se perciben focos de iluminación puntuales discontinuos.



Figura 2.18: Percepción de continuidad y discontinuidad de un flujo luminoso.

Así entonces es posible controlar la intensidad de un LED modificando únicamente el ciclo de trabajo en la corriente de alimentación, sin tener la necesidad de modificar físicamente la integración del controlador del dispositivo. Lo anterior representa un método como solución integrada para poder tener más de un modo de desempeño para una fuente de iluminación LED, si existiera la necesidad de un alto flujo de iluminación, el ciclo de trabajo podría ajustarse al 100 %, mientras que si la necesidad del flujo fuera la mitad de la intensidad, podría ajustarse al 50 % del ciclo de trabajo.

## 2.11. Conceptos de fotometría

La fotometría es tan solo una parte de la amplia área de estudio de la óptica, se trata de una ciencia encargada del estudio de los focos luminosos, como también de la iluminación producida por ellos. Todos los focos luminosos emiten energía en formas de radiación cuyas longitudes de onda corresponden a precisamente a zonas del espectro visible. Aun que en un inicio los principios de esta ciencia se aplicaban a fuentes luminosas incandescentes que solían ser mayoría, actualmente se siguen utilizando para las mediciones en fuentes que no son incandescentes. Revisaremos un breve resumen de conceptos que pertenecen a esta ciencia y son muy utilizados en el sector de la iluminación automotriz, ya sea para medir su desempeño o para un correcto cumplimiento de las normas reguladoras.[35]

### 2.11.1. Flujo energético y flujo luminoso

Un flujo energético ( $\Phi$ ) representa la energía que cada segundo atraviesa una superficie cerrada que lo contiene. La potencia de este flujo es expresada en Watts. Para realizar su medición se suelen utilizar instrumentos sensibles a la energía radiante, en general la sensibilidad de los receptores se limita a una cierta región del espectro.

Dos fuentes luminosas que emiten un mismo flujo energético  $\Phi$  pueden no producir la misma sensación luminosa, ya que la sensación del ojo depende de la longitud de onda de la radiación percibida, la cual es se vuelve nula si dicha longitud de onda se encuentra fuera del rango de espectro visible (aprox. 380nm-740nm). Cada valor del rendimiento luminoso  $V_\lambda$  se obtiene del resultado del cociente entre el flujo energético para la longitud de onda  $\lambda$  y el flujo energético para la longitud de onda de 555nm, de modo que ambos flujos energéticos puedan producir la misma sensación de claridad en el sistema visual.

De esta manera, un flujo luminoso puede ser producido por distintos flujos energéticos. La unidad de medida del flujo luminoso son los lúmenes (lm). Para la radiación de  $\lambda=555\text{nm}$  un flujo energético de 1W produce una luminosidad o flujo luminoso de 680 lm:

$$1\text{lm}(de555\text{nm}) = \frac{1}{680}W \quad (2.2)$$

Lo anterior se denomina como equivalente mecánico del lumen, para  $\lambda=555\text{nm}$  de radiación. el flujo luminoso total se obtiene mediante la ecuación 2.3, donde los límites de integración para el caso del ojo humano deberán ser 380nm y 740nm puesto que ese su rango de percepción.

$$F = \int_0^\infty 680V_\lambda d\lambda \quad (2.3)$$

### 2.11.2. Intensidad luminosa

Para una fuente luminosa  $O$  cuyas dimensiones son lo suficientemente pequeñas como para considerarla puntual, se define la intensidad luminosa  $I$  de la fuente  $O$  en una dirección  $OO'$ , como el flujo luminoso emitido por unidad de ángulo sólido  $\Omega$  :

$$I = \frac{dF}{d\Omega} \quad (2.4)$$

En el sistema internacional de medidas SI la unidad de la intensidad luminosa es la candela (cd) que es la intensidad luminosa en dirección perpendicular de una superficie de  $1/600000 \text{ m}^2$  de un cuerpo negro a la temperatura de fusión del platino bajo la presión de  $1.013 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2}$ . De esta manera un lumen(lm) es igual al flujo emitido por una fuente puntual de 1 candela(cd) en un ángulo solido esterorradian(sr):

$$1\text{lm} = 1\text{cd} \times 1\text{sr} \quad (2.5)$$

Además se puede escribir la ecuación anterior en términos de superficies dadas en metros cuadrados, para lo cual tendremos que la intensidad luminosa  $L$  dada en ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ), es igual al cociente de la intensidad de la luz  $I$  y el área de la superficie de luz emitida:

$$L(\text{cd}/\text{m}^2) = \frac{I(\text{cd})}{S(\text{m}^2)} \quad (2.6)$$

### 2.11.3. Iluminancia

La iluminancia  $E$  se considera el concepto fotométrico más importante desde el punto de vista práctico, pues representa el flujo luminoso recibido por unidad de superficie:

$$E = \frac{dF}{dS} \quad (2.7)$$

La unidad de medida para la iluminancia es el *lux* que equivale a un lumen por metro cuadrado

$$1\text{lux} = 1\text{lm}/\text{m}^2 \quad (2.8)$$

Si la fuente de iluminación puede considerarse puntual, existe una relación sencilla entre la iluminación que origina y la intensidad de dicha fuente de iluminación. En efecto, el flujo luminoso  $dF$  recibido por la superficie elemental  $dS$ , situada a la distancia  $r$  del foco puntual  $O$ , es:

$$dF = Id\Omega \quad (2.9)$$

siendo  $d\Omega$  el ángulo sólido elemental bajo el cual se ve, desde  $O$ , la superficie  $dS$ . Se obtiene entonces la expresión 2.11 conocida también como primera de ley de Lambert.

$$dF = \frac{IdS\cos\theta}{r^2} \quad (2.10)$$

por lo tanto

$$E = \frac{dF}{dS} = \frac{I\cos\theta}{r^2} \quad (2.11)$$

## 2.12. Fuentes de iluminación

Una fuente de iluminación adecuada es una parte fundamental de los faros automotrices, en realidad es tan importante que incluso muchos aspectos de diseño relacionados con los faros son analizados y desarrollados con un principal enfoque en la fuente de iluminación que se contempla para ese dispositivo de iluminación en desarrollo. La selección de la fuente de iluminación es realizada cuidadosamente por los ingenieros de desarrollo automotriz contemplando muchos aspectos que involucran cuestiones como los costos, el tipo de conductor al que dirigen el automóvil, el desempeño necesario de la iluminación, entre otros muchos más. De aquí la importancia de conocer las características de las tecnologías en iluminación para faros automotrices, así como algunas de sus ventajas y desventajas.

En la actualidad existen 4 tecnologías de iluminación para faros automotrices reguladas y disponibles para ser equipadas en cualquier vehículo, cada una presenta diferentes características de desempeño, que en algún momento las han llevado a posicionarse como la mejor opción de iluminación para un automóvil, hablamos de la tecnología Halógena, la tecnología HID, la tecnología LED y los más recientes desarrollos con la tecnología Láser. A continuación se realiza una breve revisión de cada una de estas tecnologías y sus características de desempeño.

### 2.12.1. Tecnología Halógena

Probablemente sea la tecnología que por volumen de ventas en unidades vehiculares y refacciones se pueda hacer llamar la líder del mercado, y como no serlo, si esta tecnología ha estado presente casi desde los inicios del año 1960 cuando Phillips inicio la producción del bulbo H1. Todo comenzó

con la tecnología de un bulbo incandescente y el desarrollo del primer bulbo con doble filamento incandescente, tanto para luces altas, como para luces bajas que fue desarrollado a inicios del año 1920.

Para nosotros la mayoría de fuentes de iluminación están asociadas a fuentes incandescentes, o al menos así solía ser hasta hace unos años, la manera en que estas fuentes incandescentes funcionan es a través de procesos físicos y químicos, en los cuales la energía de una corriente eléctrica es convertida en energía calorífica debido a su paso por un filamento, energía que termina siendo irradiada. Cada cuerpo solido emite una radiación permanente cuya composición espectral continua depende de su temperatura. la mayoría de objetos a una temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$  suelen tener un espectro de radiación emitido que se ubica la región invisible del infrarrojo lejano. Cuanto mas alta es la temperatura de un cuerpo, aumenta la porción de longitudes de onda corta radiadas, esto debido a que físicamente cuando una molécula aumenta su temperatura es por que sus partículas se encuentran en un nivel energético mas alto, así mismo, al encontrarse en un estado energético mas alto la radiación emitida se vuelve de una longitud de onda mas corta, ya que las longitudes de onda mas cortas contienen mas energía. Esto es descrito en la formula de la radiación propuesta por el físico y matemático alemán Max Plank, donde se enuncia la exacta correlación física entre ambos fenómenos.

A una temperatura de  $700^{\circ}\text{C}$  solo una pequeña parte de la radiación emitida se encuentra dentro del rango de luz visible, entre los rangos de 350nm y 780nm de longitud de onda. La distribución de la porción de radiación dentro del espectro visible determina la impresión en el color aparente. A  $700^{\circ}\text{C}$  o 1000K la coloración en la luz emitida parece roja, muy parecida al color de un metal caliente, a  $2700^{\circ}\text{C}$  o 3000K la temperatura en la que la mayoría de metales se funden la luz emitida es muy cercana a un resplandor blanco, sin embargo aun es lejana a una impresión de luz solar, la cual se encuentra cercana a los 6000K.

Explicado lo anterior, podemos comprender entonces que si nosotros calentamos un un filamento a altas temperaturas, podrá comenzar a tener una radiación del visible que sería tomada como luz blanca, ese es principio del funcionamiento de las bombillas incandescentes. Pero al calentar un filamento por mucho tiempo este comenzara a carbonizarse y sus partículas comenzaran a oscurecer el vidrio de la bombilla. Debido a esto surgen las bombillas incandescentes halógenas(figura 2.19), las cuales tienen en su interior pequeños átomos de halógenos, generalmente yodo en forma de yoduro, y un filamento de tungsteno. Cuando la lampara se pone en funcionamiento, al rededor de la cápsula de vidrio la temperatura alcanzada es cercana a los  $600^{\circ}\text{C}$  a la cual los átomos de yodo se recombinan con los átomos de tungsteno liberados por evaporación del filamento, para formar así yoduro de tungsteno. Cuando este nuevo compuesto se acerca nuevamente al filamento, en donde se supera la temperatura de  $2000^{\circ}\text{C}$ , el compuesto se disocia nuevamente en yodo y tungsteno, depositándose así nuevamente lo átomos de tungsteno sobre el filamento, evitando así el oscurecimiento de la cápsula de vidrio y la degeneración del filamento, pues este se regenera gracias a este ciclo halógeno.

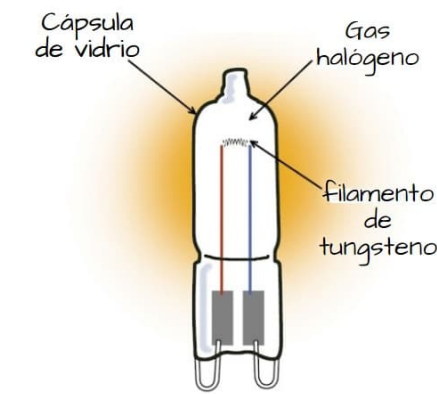


Figura 2.19: Bombilla halógena y las partes que la conforman.

Algunas de las desventajas de las lámparas halógenas es que dado que las lámparas incandescentes son emisores térmicos, su eficiencia en la conversión de energía eléctrica en lumínica es muy baja, el filamento de tungsteno no puede superar una temperatura  $3650\text{K}$ , límite físico establecido por ser esta temperatura su punto de fusión, en el cual alcanza un máximo aproximado del 24% de su radiación total en forma de luz visible, valor máximo teórico dado que nunca ha sido alcanzado en la práctica. El flujo luminoso de una bombilla halógena es bajo, las temperaturas generadas son altas y el tiempo de vida es corto debido a la vaporización del tungsteno. Algunas de las ventajas de este tipo de lámparas halógenas es que su costo en producción es demasiado bajo en comparación con algunas tecnologías de iluminación de estado sólido como el LED o el Laser, además que por su espectro de radiación, contiene longitudes de onda más cercanas a los colores cálidos, con gran cantidad de radiación de espectro rojo y amarillo, las cuales en condiciones de clima adverso, se dispersan menos que los espectros cercanos al azul y al violeta.

La cantidad de lúmenes(lm) de flujo luminoso para una lámpara halógena varía dependiendo los modelos y características de cada fabricante, pero en por lo general si la lámpara es de  $55\text{W}$ , se tiene un promedio de  $25\text{ lm/W}$ . Algunos modelos que en la actualidad se siguen fabricando son los H7, H8, H9 y H11, cada uno con diferentes aplicaciones y distintas cantidades de lúmenes. El bulbo H7 es de aplicación general y promedia  $1500\text{ lm}$  de flujo lumínico, una bombilla H8 de  $35\text{W}$  es fue diseñada para lámparas de niebla y tienen alrededor de  $800\text{ lm}$ , las lámpara H9 de  $65\text{W}$  puede ofrecer hasta  $2100\text{lm}$  volviéndola la bombilla halógena con flujo más alto en aplicaciones automotrices, mientras que las lámpara H11 de aplicación general a  $55\text{w}$  tienen una emisión de  $1350\text{lm}$  en promedio.

### 2.12.2. Tecnología HID (Xenón)

Esta tecnología de iluminación de alta intensidad de descarga también es llamada HID (High-intensity discharge) por sus siglas en inglés, además solemos asociar comúnmente esta tecnología con el nombre de luces xenón debido al nombre del gas noble utilizado en la composición de este tipo de fuentes de iluminación. Una gran opción como fuente de iluminación, dentro de sus bondades se encuentra un consumo de energía mucho menor que el de una fuente de iluminación halógena, de tan solo  $35\text{W}$ , un flujo luminoso dos o tres veces mayor y una temperatura de color cercana a los  $6000\text{K}$  que se asemeja a la luz natural diurna, las lámparas de xenón generan menos emisión de calor lo que las vuelve también más eficientes que las lámparas halógenas. La tecnología HID no logró apoderarse completamente del mercado debido a su alto costo, muy por encima del que tendría una bombilla halógena.

El principio de funcionamiento de esta tecnología se basa en la excitación de iones para llevarlos a un estado energético más alto, cuando estos átomos vuelven al estado básico estos emiten la energía en forma de luz. Las lámparas HID se constituyen de un tubo de descarga aislado externo a la bombilla por la cual se conduce un electrodo, una bombilla de cristal de cuarzo con dos elec-

trodos en sus terminales, la bombilla esta llena de gas xenón y un haluro de metal generalmente mercurio o vapor de sodio. Además las lamparas HID necesitan de un dispositivo especial para la ignición, este dispositivo produce los electrones libres necesarios para el flujo de las altas corrientes, comúnmente llamado balastro (figura 2.20).

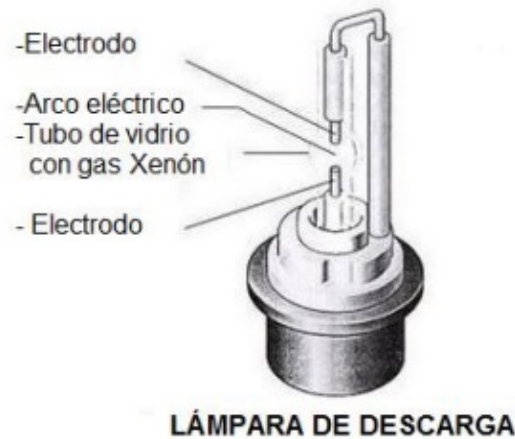


Figura 2.20: Bombilla de xenón y las partes que la conforman.

Cuando la lampara se enciende se produce un chispa entre los electrodos debido a la alta corriente, los electrones libres se aceleran a través del campo eléctrico formado entre los electrodos, estos electrones tienen colisiones con los átomos gaseosos contenidos en la bombilla, estas colisiones dejan átomos en estados de excitación también llamados ionizados, con el paso de tiempo se generan mas electrones libres que también se aceleran y desencadena mas colisiones, llegando a un estado de ionización acumulativa que conduce a un estado en donde la corriente aumenta constantemente a través de la lampara. Para poder evitar la destrucción de la lampara, si la corriente aumenta demasiado se utilizan funciones de limitación. Una vez encendida la lampara hay una corriente constante a través de la lampara, de esta manera una fracción de los átomos del gas esta constantemente en un estado ionizado, este proceso libera energía en forma de radiación que puede estar en el rango de la luz visible.

Como ya se menciona estas lamparas trabajan con una potencia de entrada de 35W, lo que representa un consumo energético menor, por regulación no pueden superar los 3200lm en el flujo luminoso aun que podrían, comúnmente tienen una eficiencia lumínica de 90lm/W y una temperatura de color que ronda los 4100K, y debido a que los electrodos no se carbonizan debido a las altas temperaturas, suelen tener una vida útil mas larga de hasta 3000 horas, por todo lo anterior las lamparas de xenón resultan ser mas eficientes que las lamparas halógenas.

### 2.12.3. Tecnología LED

Aun que se trata de una tecnología desarrollada desde el siglo pasado, es hasta hace unos años que a comenzado a tomar un gran auge dentro de la iluminación automotriz, esto debido a varios factores, dentro de los cuales se puede mencionar que la primera generación de LEDs emitía una baja cantidad de luminancia, alrededor de  $0.8 \text{ Cd/mm}^2$  a una temperatura de unión de  $25^\circ\text{C}$ , cuando comparada con la emitida por una fuente de iluminación halógena con  $21 \text{ Cd/m}^2$ , termina siendo demasiado pequeña, además también importante de mencionar que únicamente se habían desarrollado LEDs que emitían luz con rangos de color entre los colores rojos, ámbar y verdes.[31]

En el año 2014 se le concedió el premio nobel de física a tres investigadores llamados Isamu Akasaki y Hiroshi Amano (Univ. Nagoya, Japón) y Shuji Nakamura (Univ. California, Santa Barbara, EEUU) por la invención de un LED azul eficiente que ha permitido brillo y ahorro de energía en fuentes de luces blancas. Conceder el premio nobel a este invento no era para menos, la importancia de lograr LEDs que emitieran luz azul de una manera eficiente era enorme, pues permiten que a partir de ellos se pueda generar luz blanca como también los demás colores con longitudes de onda mas grandes que el azul. El desarrollo de este invento no era sencillo, debido a que la emisión de luz por electroluminiscencia requiere la existencia de una banda prohibida apropiada que se encuentra entre la banda de conducción y la banda de valencia de los semiconductores. Para obtener los colores azul y violeta esta banda prohibida es mucho mas grande de lo que suele ser para los demás colores. Fue hasta que el desarrollo del método con el que se gano el premio novel, logro la implantación de GaN (nitruro de galio) cuya una banda prohibida es de 3.4eV, con la calidad cristalina adecuada que se pudo obtener el color azul deseado de forma eficiente. Todo lo anterior ha significado una revolución en cuestiones de iluminación, pues los LEDs blancos pueden ahorrar un 30 % de la electricidad consumida, además de aumentar la eficiencia de iluminación.

Es importante señalar que la introducción de esta tecnología de iluminación en faros automotrices sucedió antes del desarrollo de estos LEDs azules eficientes, en realidad desde el año 2006 la regulación europea ya contemplaba la iluminación LED en la norma ECE123. Pero conocer esta importante mejora en la tecnología nos brinda un panorama de lo que se aproxima, pues a la fecha esta fuente de iluminación a comenzado posicionarse como la mas utilizada en los nuevos desarrollos automotrices y probablemente en un futuro se vuelva la líder en volumen de ventas algo que no logró conseguir la iluminación xenón. Esto debido al bajo costo de producción que continua siendo menor cada día, además de las mejoras constantes en el desempeño de iluminación de los LEDs. Se estima que en unos cuantos años único dispositivo LED pueda alcanzar un flujo luminoso de 150lm para la luz blanca.[31]

Para explicar el funcionamiento de esta fuente de iluminación comenzaremos mencionando que en los semiconductores existen dos portadores de carga llamados huecos y electrones. Un dispositivo electrónico con una unión PN es una estructura que puede separar espacialmente electrones y huecos, si a la unión PN se le aplica un voltaje positivo en el material P y un voltaje negativo en el material N, se dice entonces que el dispositivo electrónico esta polarizado de manera directa, bajo esta polarización una corriente fluye a través de la estructura , favoreciendo a que los electrones y los huecos se encuentren en la misma región del espacio, a este proceso se le llama inyección de portadores(figura 2.21). Cuando existen mas electrones y huecos en la misma región del espacio, mas de los correspondientes los que se podrían encontrar en un estado de equilibrio, se favorece la recombinación de portadores y se comienza a radiar energía.

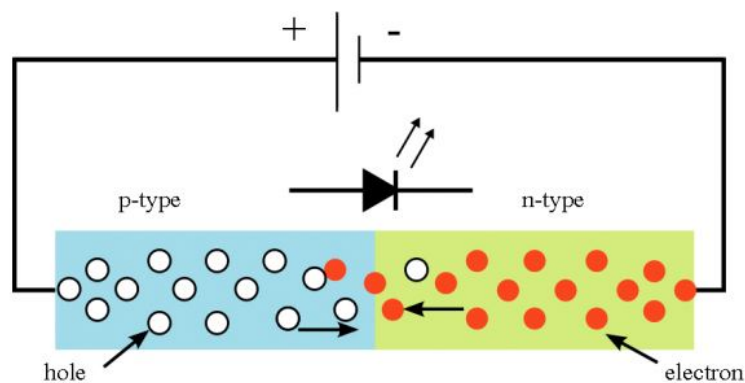


Figura 2.21: Unión PN con polarización directa.

En los materiales semiconductores los electrones libres siempre tienen energías mas altas que aquellos electrones que se encuentran las uniones entre los átomos. La banda de conducción es el rango

de energía que pueden alcanzar los electrones libres, mientras que la banda de valencia son los rangos de energía que pueden tener los electrones de los enlaces, no pueden haber electrones dentro del semiconductor con rangos de energías que se encuentren entre ambas bandas pero que no pertenezcan a ninguna de ellas dos, por lo tanto ese intervalo de valores de energías entre ambas bandas se llama banda prohibida. Cuando un electrón libre se recombina con hueco en la banda de valencia, el electrón libre termina ocupando un lugar en un enlace de la estructura. En este proceso el electrón debe liberar la energía sobrante en forma de calor o radiación electromagnética (figura 2.22).

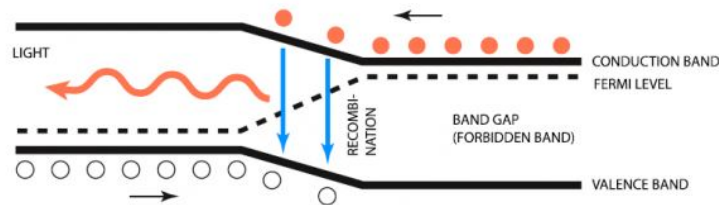


Figura 2.22: Modelo de bandas energéticas en un semiconductor y proceso de recombinación.

Para volver más eficaz la recombinación que emita radiación electromagnética, la unión PN se sustituye por una heteroestructura en la cual se inserta una zona activa formada por varias capas delgadas de materiales con distinto ancho de banda prohibida (figura 2.23). El ancho de banda prohibida en algunas capas es menor que en los alrededores. Los electrones tienden a situarse en las capas con los niveles de energía más bajos. Esa región se convierte entonces en una especie de pozo que mantiene a los electrones, por qué tienen energías más bajas en el que en los alrededores, una vez en el interior es poco probable que los electrones escapen puesto que requieren energía para hacerlo, en cuanto a los huecos, su comportamiento es el opuesto, con esta estructura se consigue llevar electrones y huecos a la misma zona del espacio, lo que permite un aumento en la tasa de recombinación con radiación electromagnética. La región intermedia está diseñada para conseguir una alta concentración de electrones y huecos, dado que en esta situación los LEDs consiguen una mayor eficiencia energética, dado que convierten en luz una mayor parte de la energía eléctrica suministrada. Se puede conseguir que los fotones tengan un valor concreto de energía, eligiendo un material apropiado en la región intermedia. Para lograr la emisión de fotones con la longitud de onda del color azul, se utiliza el material InGaN (nitruro de indio-galio). Actualmente la mayoría de LEDs utilizados en la iluminación se basan en un LED azul recubierto con una sustancia fosforescente, la cual absorbe parte de la luz azul y la vuelve a emitir con una longitud de onda mayor. [32]

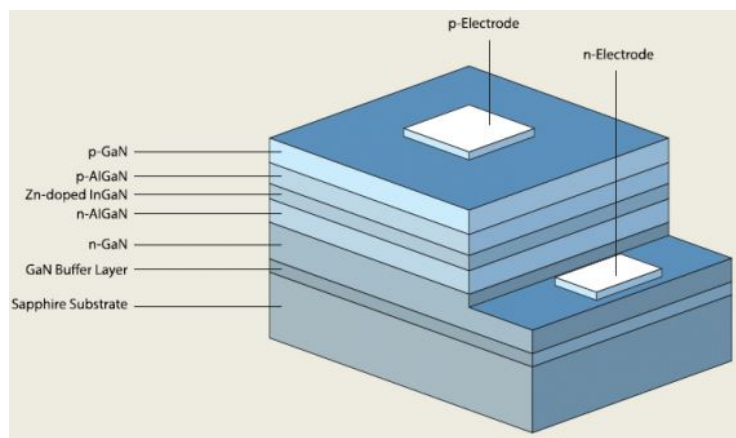


Figura 2.23: Heteroestructura con InGaN para conseguir luz azul.

Es de esta manera como funciona la iluminación LED, la cual presenta ventajas como, posibilidad de ciclos continuos de apagado y encendido sin acortar la vida útil de dispositivo, no presenta tiempo de demora en el encendido como el que presenta la luz xenón inherentes de sus propios procesos físicos, emisión baja de calor, alta eficiencia y una larga vida útil. Aun que los costos de producción de cada LED son mas bajos en comparación con la tecnología de xenón, aun siguen siendo superiores a los costos de las lamparas halógenas, dichos costos se espera que con el paso del tiempo puedan ser reducidos aun mas, sumado a los beneficios que brindan seguramente sera la siguiente tecnología en dominar por volumen el mercado.

#### 2.12.4. Tecnología OLED

Los OLED por su acrónimo en ingles (Organic Light Emitting Diodes) son diodos orgánicos emisores de luz, dispositivos relativamente nuevos que se han convertido rápidamente en una nueva fuente de iluminación. Las luces traseras de los automóviles son las primeras aplicaciones para esta tecnología dentro de este sector. Su estructura delgada, una superficie de iluminación uniforme y homogénea con alto contraste, son parte de las características claves que han llevado a algunas marcas automotrices como BMW y AUDI a ser los precursores en el uso de esta fuente de iluminación con algunos de sus modelos ya disponibles en el mercado. Sin embargo actualmente aun no se comercializan vehículos que utilicen esta tecnología en sus faros frontales, puesto que además del alto costo que representa su producción, aun existen limitaciones técnicas que deben superarse.

La estructura de los OLED es en una construcción sobre un sustrato que consta de varias capas de transporte e inyección que se basa en materiales orgánicos. las capas consisten en un sustrato transparente en la parte inferior, hecho de vidrio o polímero, una capa conductora transparente generalmente de ITO(óxido de indio y estaño) y una capa de eficiente extracción de luz desde el sustrato hacia el aire. Dependiendo de la manufactura el apilamiento de las capas orgánicas pueden verse como la representación de la figura 2.24. El grosor del sustrato integrado varía de  $750 \mu\text{m}$  -  $105 \mu\text{m}$  y la pila de material orgánico con el el espesor del cátodo varía de  $10 \text{ nm}$  a  $40 \text{ nm}$  dependiendo de el número de pilas en el diseño.[33]

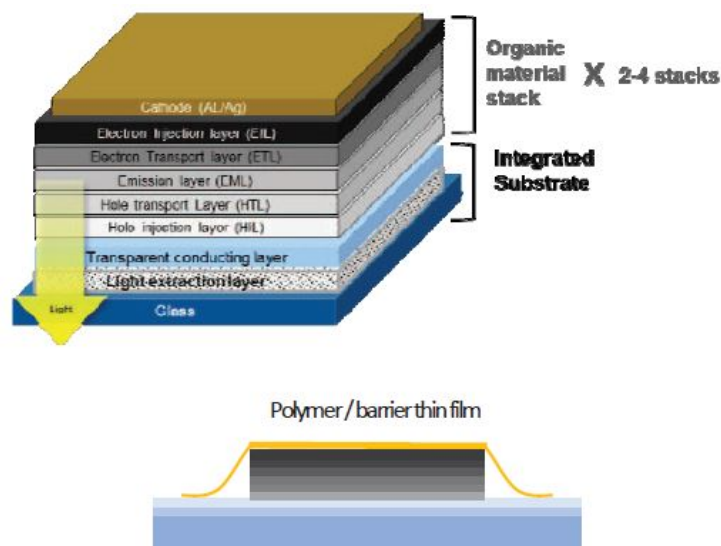


Figura 2.24: Típico diseño de un panel de iluminación OLED.

Los materiales OLED y sus dispositivos tecnológicos hacen significantes progresos desde la década pasada gracias a la iniciativa de las pantallas OLED dentro del sector de los televisores. Desde hace aproximadamente unos 5 años, empresas como LGChemical, OSRAM y OLEDWorks han continuado trabajando en avances para esta tecnología, avanzan de una manera lenta pero continua. Algunas de las ventajas mas notables que supone el uso de esta tecnología en los automóviles, es que

se trata de fuentes de iluminación muy delgadas (módulos hasta 70 % mas delgados en comparación con la tecnología LED) y ligeras (hasta 50 % menos peso), con lo que se podrían reducir los costos en producción hasta un 25 %. Segura para salud dado que esta libre de emitir rayos ultravioleta y luz azul. A los ingenieros de diseño les brinda la posibilidad de diseños únicos y mas elegantes.

### 2.12.5. Tecnología Láser

La tecnología Láser es llamada así debido al acrónimo en ingles de “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” que significa amplificación de luz por emisión de radiación estimulada y se trata de una tecnología descubierta en el siglo pasado, reportada por primera vez en 1959 por el físico estadounidense Gordon Gould. A pesar del largo tiempo que ha pasado desde su descubrimiento y el comienzo de sus aplicaciones, en lo que al sector de iluminación automotriz se refiere, actualmente solo dos marcas líderes de la industria automotriz (BMW, AUDI) han comenzado a colocar recientemente en el mercado unos cuantos modelos de vehículos, considerados dentro de los segmentos premium y equipados con esta tecnología de iluminación.

Es claro que esta tecnología estará presente en el mercado de la iluminación automotriz en los años por venir, después de los LED vendrán a dominar los haces de luz láser, sin embargo esto no sucederá en poco tiempo, aun existen limitaciones por resolver en la actualidad, lo mas probable es que los LED vayan a dominar durante bastante tiempo el mercado. No es para nada prescindible conocer el funcionamiento de esta fuente de iluminación, su desempeño actual, sus ventajas y desventajas.

Un Láser común esta conformado por tres elementos principales, un medio de ganancia o amplificación, un método de bombeo y una retroalimentación(figura 2.25). La idea central detrás del funcionamiento de esta tecnología, radica en excitar los átomos del medio de ganancia a un nivel de energía mas alto que el usual a través de un medio de bombeo, como ya se describió en el funcionamiento de la tecnología LED, los átomos siempre buscan volver a un estado de energía mas bajo, la emisión de un fotón permite el regreso a un estado de energía bajo, este fotón provocara un efecto en cascada al interactuar con otros átomos y provocar un fenómeno llamado emisión estimulada, que conllevara a que otro átomo al interactuar con este fotón se desprenda eventualmente del mismo fotón con el que interactuó y un nuevo fotón generado, ambos fotones tienen la misma fase, frecuencia, polarización y dirección. Dado que esta reacción en cascada se lleva a cabo dentro de una cavidad que funciona como retroalimentación, generalmente formada por dos espejos de total y parcial reflectividad, el proceso se estará repitiendo constantemente, mientras el medio de bombeo lo permita.

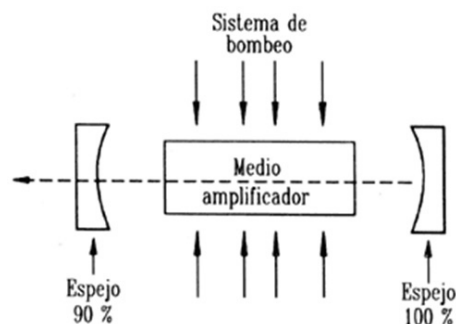


Figura 2.25: Estructura básica del principio fundamental del láser.

Existen mas de 10000 diferentes tipos de láser, sin embargo hay únicamente algunos tipos de láser especiales que tienen amplias aplicaciones, dentro los que pueden tener alguna aplicación en la iluminación automotriz son los semiconductores láser, los diodos láser, y los láser de fibra. A continuación nos centraremos en describir el funcionamiento del diodo láser, debido a que las marcas mencionadas ya se han centrado en el uso de este tipo de láser.

Los diodos láser forman parte de un grupo dentro de una amplia clasificación de diodos semiconductores de unión PN. Como en otros tipos de laser, la región de ganancia que es una fina capa de material dopado, se encuentra dentro de una cavidad óptica que lo rodea, en su forma mas simple, una guía de onda es hecha en una superficie de cristal, de manera que la luz es confinada a una línea relativamente estrecha, los dos extremos del cristal formando dos bordes perfectamente lisos y paralelos, adquiriendo una forma de resonador óptico en una configuración de cavidad fabry-perot(figura 2.26). Los fotones emitidos dentro de esta forma de guía de onda, viajan a través de ella siendo reflejados muchas veces en cada borde, de esta manera se produce la amplificación por emisión estimulada, fenómeno que ya ha sido descrito en la tecnología LED.

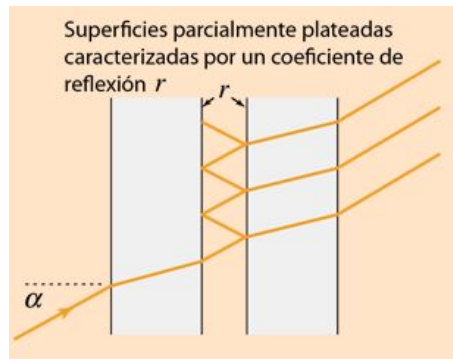


Figura 2.26: Cavidad con geometría fabry-perot.

Para aplicaciones automotrices, los diodos pulsados han comenzado a ser utilizados, generalmente tienen emisiones con longitudes de onda que generalmente suelen ser entre 850nm y 905nm aun que no son únicas, se pueden generar por ejemplo longitudes de onda de color azul (450nm), hay versiones ópticas de potencia máxima de entre 4W y 75W. Los haces emitidos por estas fuentes láser son demasiado divergentes, por lo tanto se requiere un arreglo óptico situado a una distancia adecuada capaz de captar estos rayos luminosos. Se puede generar luz blanca a través de una combinación de fluorescencia amarilla con longitud de onda desplazada generada por un fósforo y un láser azul difuso(figura 2.27).[34]

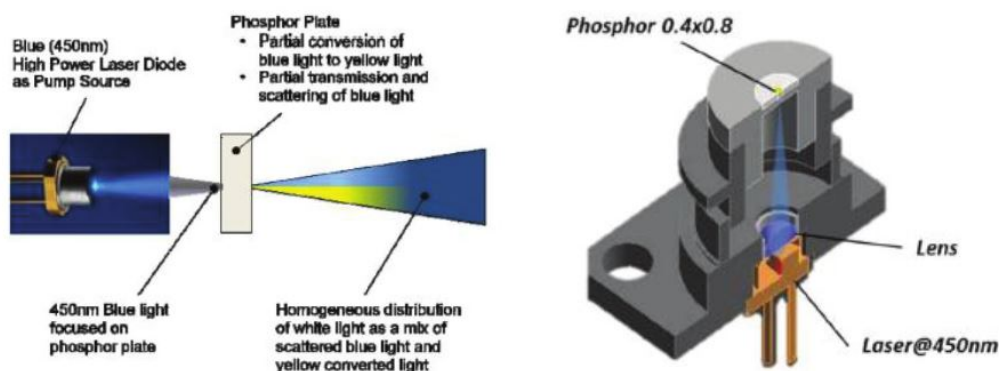


Figura 2.27: Principio de formación de luz blanca con diodo láser azul y fósforo.

Algunas de las ventajas que supone el uso de esta tecnología de iluminación parten de su alto desempeño, pues pueden superar hasta 5 veces los valores de luminancia de un LED. permiten nuevas características de diseño en las formas de los faros gracias al reducido espacio que requieren puesto que no necesitan el uso de un reflector. Esta reducción en el espacio puede disminuir los costos de producción. La baja potencia de consumo de energía (0.3W para láser con emisiones de

635nm) también supone ahorro de recursos, pues la energía es suministrada por un alternador que convierte la energía mecánica del motor en energía eléctrica, una carga mayor de potencia en el alternador genera un mayor consumo de combustible.

Esta tecnología también tiene aun muchas limitaciones que se reflejan en desventajas. Los diodos láser generan altas temperaturas lo cual reduce su tiempo de vida útil, que podrían significar desde 3000 hasta 10000 horas menos de vida útil. El costo actual también es una barrera, los sistemas basados en diodos láser pueden llegar a ser 10 veces mas caros que los sistemas basados en LED. Las aplicaciones automotrices son muy exigentes para cambios de color con temperatura, y la longitud de onda de los diodos láser cambia con la temperatura. Los efectos peligrosos de la luz láser para el ojo humano representan un tema importante, la radiación óptica es recibida por el ojo, como los sistemas que emiten longitudes de onda visibles e infrarrojas cercanas se transmitirán a la retina, Los láser que emiten radiación ultravioleta e infrarroja lejana representan un riesgo para la cornea.

## 2.13. Faros frontales

Los faros frontales de un automóvil son en primera instancia responsables de la iluminación del camino en dirección del movimiento. Deben cumplir algunas tareas durante la conducción bajo situaciones de baja visibilidad, como garantizar la suficiente iluminación para poder visualizar el área del camino por el cual se conduce utilizando diferentes funciones de iluminación, todo esto sin deslumbrar el trafico en sentido contrario, además también de hacer el vehículo fácil de ser visto.

Los faros frontales automotrices licenciados dentro de la unión europea son sujetos a aprobaciones de acuerdo a las regulaciones ECE (Economic Commission for Europe), es importante mencionar que Estados Unidos las aprobaciones son dadas por las regulaciones de la FMVSS (Federal Motor Vehicle Safety Standard), en México las regulaciones se encuentran dentro de dos tipos de normativas, NOM(normas oficiales mexicanas) y NMX(Norma mexicana). Para el desarrollo de este trabajo se tomo un enfoque basado en el uso de las regulaciones europeas, las cuales en general suelen ser mas rigurosas que la normativa mexicana, además claro de ser precursoras en la regulación de los sistemas automotrices. Existen regulaciones que abarcan exclusivamente el equipo fotométrico, como otras mas que abarcan los aspectos relacionados con los sistemas de iluminación, dentro de las cuales podemos encontrar las regulaciones ECE R37(Fuentes de iluminación- Lamparas de filamento), ECE R99(Fuentes de iluminación- Lamparas HID), ECE R112 (Haz de luz bajo y alto - Para lamparas halógenas y LED), ECE R98(Haz de luz bajo y alto- Lamparas HID), ECE R19(Tipos de haz- Lamparas antiniebla frontales), ECE R87(Lamparas de iluminación diurna DRL), ECER48(Disposición de la iluminación en el vehículo) y ECE R123(Sistemas AFS- Halógeno, HID y LED). Estas legislaciones regulan los tipos y las posiciones de instalación de los equipos de iluminación en vehículos, funciones de luces bajas, luces altas y luces de posición, como también el diseño, las fuentes de iluminación, el color de la fuente y sus valores fotométricos.

### 2.13.1. Patrones de Haz estándar

Los faros frontales de un vehículo suelen definir muchas formas de haz dentro de 3 patrones estándar de iluminación, Luz alta, Luz baja y luz de niebla. Estos patrones pueden ser definidos a su vez de acuerdo con sus formas y sus rendimientos, para lo cual existen ciertas áreas específicas que dependiendo de sus características, brindan diferentes formas a los patrones(figura 2.28). Las áreas específicas son anchura (Width - entre 20 y 30 metros de distancia) la cual cubre todo el ancho del camino en el campo cercano al conductor, comodidad (confort - entre 30 y 60 metros de distancia para luz baja, entre 50 y 150 metros para luz alta) que corresponde a la principal zona de visión del conductor y al área de alcance(Range - mas de 60 metros de distancia para luz baja, mas de 150m para luz alta), la cual es el área donde se tiene el máximo nivel de iluminancia.

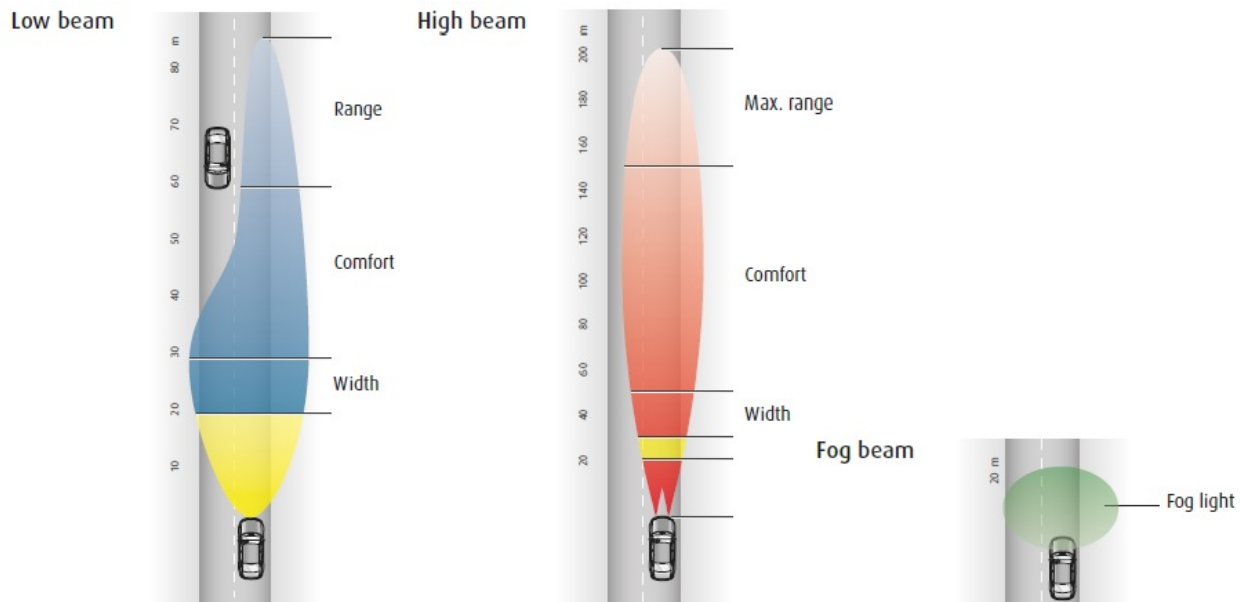


Figura 2.28: Tipos haz luminoso, su áreas y rangos de alcance.

### 2.13.2. Línea de corte

Cada tipo de faro automotriz debe contemplar dentro de su sistema una manera de generar una línea de corte, la cual define un límite dentro de la cual la luz no debe ser proyectada para prevenir deslumbramientos a otros conductores, esta línea de corte permite el paso de luz por encima de la línea horizontal que restringe el paso, debe tener un ángulo máximo de 15 grados y debe estar desplazado hacia el lado opuesto del carril por el que viaje el tráfico en sentido contrario tal y como se muestra en la figura 2.29. Para faros de niebla no restringe el paso de luz por encima de la línea horizontal de restricción pero debe adoptar una forma rectangular con curvaturas en su base para evitar los deslumbramientos por reflexión en el suelo (figura 2.30). Esta línea de corte esta obligada por las normas reguladores para luces bajas y luces de niebla, las luces altas no están obligadas a tener dicha limitación.



Figura 2.29: Ejemplificación de línea de corte para luz baja.



Figura 2.30: Ejemplificación de línea de corte para luz de niebla.

## 2.14. Fotometría en faros frontales

Dentro de todas las mediciones e indicaciones de instalación que se regulan, algunas de las más importantes son, el color de la fuente de luz que debe ser utilizado el cual debe ser blanco, la altura de instalación con respecto al suelo la cual debe ser de al menos 500mm y no debe superar los 1200mm, se debe contar con un dispositivo para el ajuste de la nivelación, la distribución de la iluminación es representada en términos de intensidad luminosa y los patrones de iluminancia. Las mediciones de los requerimientos legales para la iluminancia deben ser medidos con una línea de corte como referencia situada a 25 metros de distancia de la fuente. La distribución de iluminancia se evalúa en una pared a distancia de 10 m delante del faro como ayuda adicional a la discusión e interpretación de las características de las funciones de la luz. Los rangos de los ángulos en la distribución de la luz están dados por el eje horizontal H y el eje vertical V (figura 2.31).

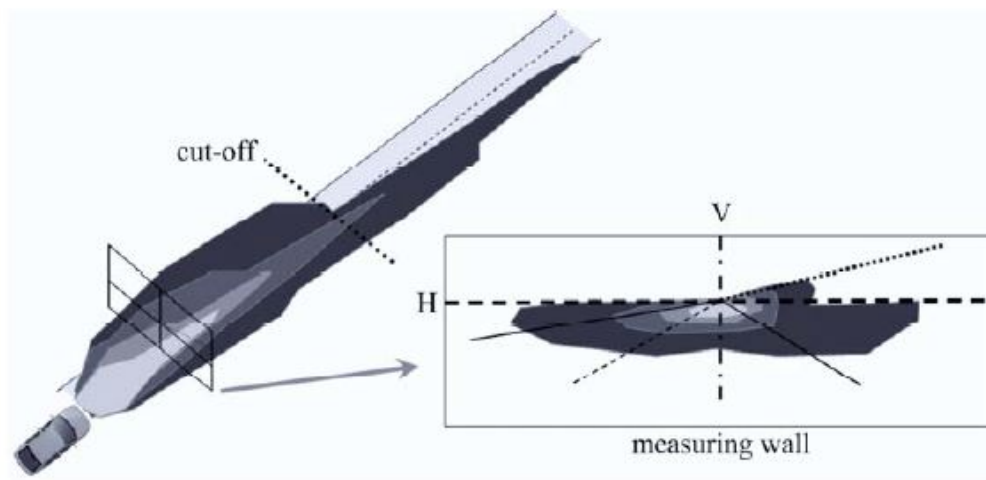


Figura 2.31: Diagrama esquemático de las referencias para las mediciones de iluminación.

Las especificaciones fotométricas ajustan los niveles de iluminación que se requieren en el camino, para esto se utilizan puntos específicos y zonas dentro del campo visual del conductor, dichos puntos son definidos y colocados tanto del lado izquierdo del campo visual (left L) como de lado derecho (right R), a diferentes distancias del vehículo. Estos puntos se asocian a los valores mínimos o máximos de iluminancia (expresados en luxes) o de su intensidad (en candelas), los cuales son establecidos en la regulación. Los puntos entonces se identifican con un número que indica la distancia desde el vehículo al punto, una letra que precede al número indica el lado del campo visual al que pertenece, y en algunos puntos en los que se considera un punto de deslumbramiento al tráfico en sentido contrario, se antecede el número con la letra B. Por lo tanto algunos puntos específicos importantes son por ejemplo, 25L - 25R estos puntos sirven como una referencia para el ancho del haz localizados a 25 metros del vehículo, 50V es un punto localizado a 50 metros del vehículo sobre el trayecto vertical, 50R es un punto localizado del lado derecho del campo visual a 50 metros de distancia, B50L es un punto localizado del lado izquierdo del campo visual a 50 metros de distancia, el cual se encuentra indicando una zona de deslumbramiento para los conductores en sentido contrario, 75R punto localizado a 75 metros de distancia en el lado derecho del campo visual indica el punto de comodidad visual (confort) para el ojo y debe tener un valor cercano a la máxima iluminación. Estos puntos son representados de una manera visual en la figura 2.32.

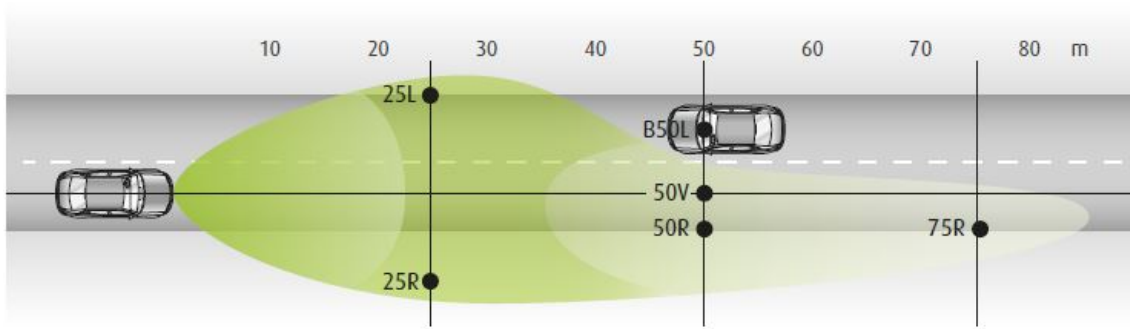


Figura 2.32: Ubicación espacial de puntos fotométricos específicos.

Con el fin de simplificar un control adecuado y evitar controversias en cuanto al cumplimiento de las regulaciones en los sistemas de iluminación, se crearon cartas fotométricas estandarizadas para cada tipo de fuente de iluminación. Se trata de una representación en dos dimensiones de la proyección de luz a 25 metros de distancia sobre una pantalla plana vertical. Las imágenes planas reflejan la iluminación real en el camino. Estas cartas fotométricas son actualizadas de acuerdo a la evolución de los sistemas de iluminación y su complejidad. Existen cartas fotométricas diferentes que se utilizan para cada fuente de iluminación. La carta fotométrica para las fuentes de iluminación Halógenas y LED es contemplada dentro de la regulación ECE R112, mientras que las fuentes de iluminación HID utilizan la carta fotométrica de la regulación ECE R98.

La carta fotométrica es una cuadrícula de líneas horizontales (H) y verticales (V) donde la iluminación proyectada es mapeada. Cada línea representa un grado ( $1^\circ$ ) de desplazamiento para la proyección de la luz, por lo tanto los puntos fotométricos son definidos en términos de posiciones angulares. La línea de corte es uno de los enfoques de análisis más relevantes dentro de la carta fotométrica para cumplir con las regulaciones.

Dentro de la carta fotométrica se pueden delimitar 4 zonas relevantes para la iluminación, cada zona es representada por su numeración griega. Para fuentes de iluminación halógena y LED que comparten la misma carta fotométrica (figura 2.33), la zona I es localizada en la parte más inferior la cual refleja un alcance en la iluminación menor a 25 metros en los extremos y 50 metros bajo la zona IV, lo anterior para cada lado del campo visual y una iluminación máxima de 13200cd de lado izquierdo, la iluminación mínima estipulada para una distancia de 25 metros es de 1700cd, la zona IV representa un alcance de hasta 50 metros que debe tener una iluminación superior a 2500cd y su dispersión debe estar más focalizada que en la zona I, la zona III es una representación de proyecciones de luz permitidas por encima de la línea de corte las cuales deben ser menores a 625cd, la zona II involucra representaciones para proyecciones con alcances superiores a los 50 metros apenas por encima de la zona IV y por debajo de la línea de corte con una iluminación mínima de 10100cd y máxima 10600 para el lado izquierdo. El punto fotométrico B50L en el que se deben evitar deslumbramientos al tráfico en sentido contrario permite una iluminación máxima de 350cd.

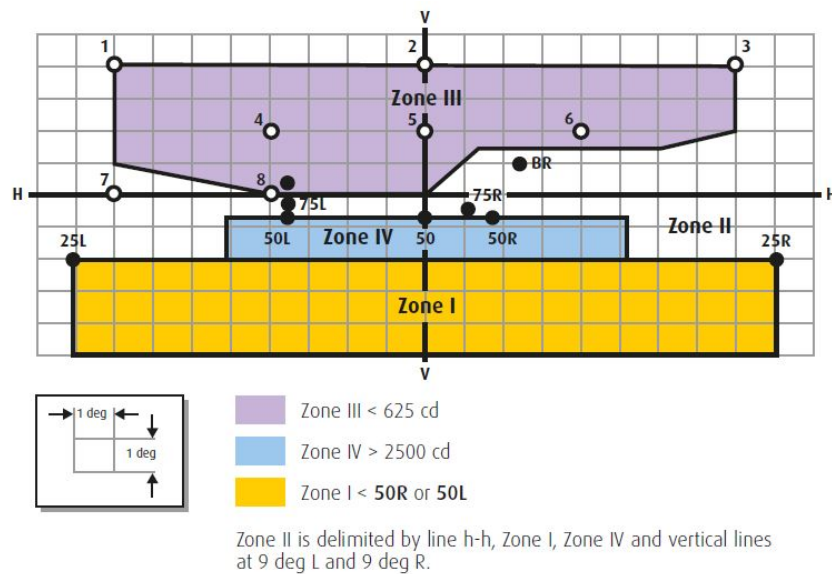


Figura 2.33: Carta fotométrica de luz de haz bajo para fuentes Halogenas y LED (ECE R112).

## 2.15. Tecnología de reflexión en faros automotrices

Gracias a la ayuda de una tecnología de reflexión una lampara de iluminación puede incrementar su desempeño, la luz se distribuye de mejor manera sobre el espacio de la carretera debido a la geometría del reflector, generalmente utilizado en fuentes de iluminación incandescentes. Muchos reflectores utilizan una forma parabólica en su diseño geométrico, desde el cual se produce la emisión tanto del haz de luz bajo como el haz de luz alto. La manera europea de lograr la emisión de ambos haces luminosos es con un fuente de iluminación de dos filamentos. Generalmente se utilizan lentes transparentes para la cubierta de los reflectores, estos lentes transparentes siguen siendo la tendencia actual.

Anteriormente solían utilizarse únicamente cilindros pulidos (figura 2.34) o algunos lentes prismas, sin ningún tipo de lente de dispersión colocado entre la cubierta transparente de policarbonato y el reflector, ahora ya se utilizan los reflectores lisos segmentados perfectamente pulidos y con una superficie diseñada a través de cálculos por computadora (figura 2.35). Mientras en el pasado bastaba un simple reflector parabólico, en la actualidad ya no es suficientemente útil, las necesidades se han vuelto cada vez más demandantes y la tecnología de computo como asistencia en el desarrollo puede ser de gran ayuda.

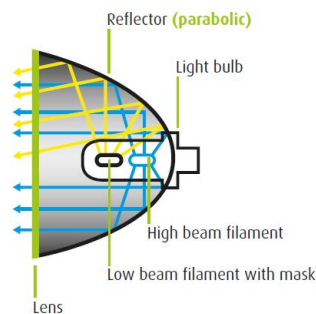


Figura 2.34: Cilindro pulido utilizado para la reflexión luminosa.

Un faro con tecnología de reflexión puede ser de gran utilidad en el incremento de la fuente de iluminación, para prevenir deslumbramientos, se debe agregar una barrera que limite la dispersión de rayos luminosos hacia direcciones que sobre pasan la línea de corte o los límites de los reflectores. Estas barreras pueden ser colocadas desde la fabricación de la lampara mediante una terminación opaca en la punta del bulbo, o con barreras físicas recubiertas de materiales reflectantes que cubren el extremo de la lampara una vez instalada en el faro.

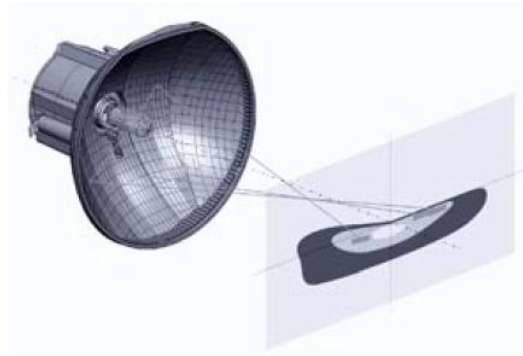


Figura 2.35: Diseño asistido por computadora en tecnología de reflexión segmentada.

## 2.16. Tecnología de proyección en faros automotrices

Los sistemas basados en proyección de la iluminación funcionan bajo otros principios básicos distintos a los de reflexión, En un principio se utiliza un reflector elíptico que se encarga de focalizar los rayos de la fuente de iluminación, se utiliza un arreglo óptico mas sofisticado encargado de dispersar la iluminación mediante un efecto similar al de las lupas. Una barrera entre la cavidad reflectante y la lente se encarga de limitar los rayos luminosos con el fin de producir la línea de corte. Los lentes encargados de la proyección son esféricos de diámetros típicos entre 40-70mm. una característica particular de estos sistemas de proyección es la franja de iluminación en cortes bruscos debido al efecto de aberración. Lo cual permite una mayor dispersión de la fuente luminosa.

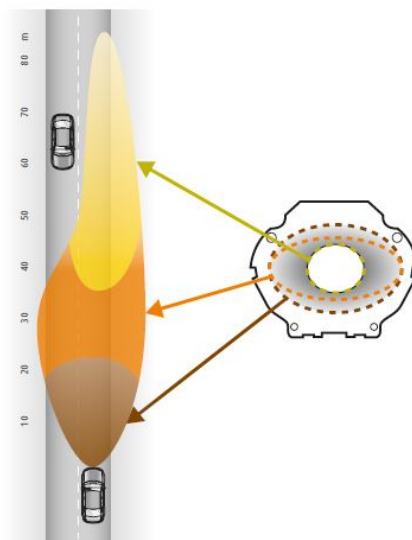


Figura 2.36: Reflector elíptico complejo fundamental en la generación de patrones del haz luminoso.

La unidad de proyección cuenta con 4 elementos principales, la fuente luz, un reflector cercanamente elipsoidal, una barrera para haz de luz bajo, y un lente de proyección. Los reflectores no son elipses básicos, si no un diseño complejo con varias superficies elípticas al rededor de la fuente de iluminación y superficies parabólicas en los bordes. La reflexión de los rayos en la zona elíptica da mayor rango de iluminación, mientras que la reflexión en la zona parabólica esta diseñada para un rango cercano(figura 2.36).

Existen mecanismos distintos para la función de barrera que limita el haz luminoso, actualmente se utilizan lo sistemas bi-función capaces de generar tanto un haz de luz baja como un haz de luz alta. Se trata de dispositivos electromecánicos que no están fijos, si no que pueden conmutar entre la limitación y el libre paso del haz completo gracias a un obturador(figura 2.37).

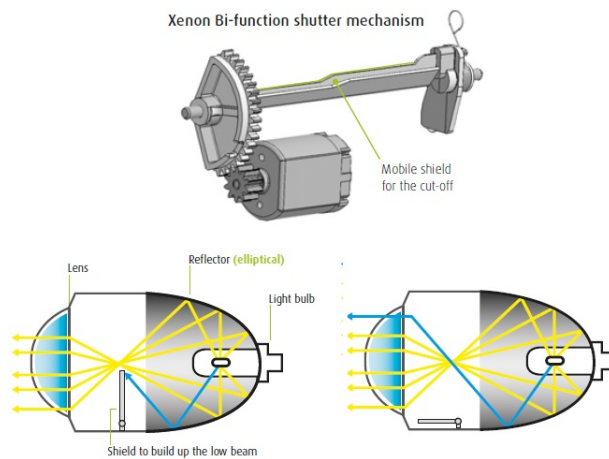


Figura 2.37: Mecanismo obturador de dispositivo bi-función.

Es haz de luz es demasiado divergente después de pasar la barrera, con un ángulo de salida dado por el reflector de aproximadamente  $45^\circ$ , con una intensidad de luz que no es suficiente para un faro. La lente se utiliza para estrechar el haz luminoso, colimando el flujo especialmente en dirección vertical, a la apertura óptica típica para el haz de luz, entre  $10^\circ$  y  $15^\circ$  aproximadamente. Para poder aumentar la intensidad de iluminación el haz debe pasar por una lente que produzca un efecto similar al de una lupa. Si esta lente es esférica no tendrá la colimación adecuada para lograr una proyección en los ángulos necesarios, para esto se utiliza una lente esférica, que mediante el fenómeno de aberración en la apertura del lente, logra colimar verticalmente el haz luminoso con los ángulos de proyección necesarios(figura 2.38).

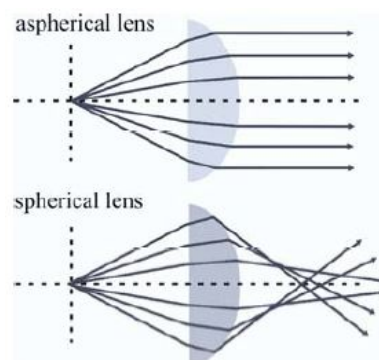


Figura 2.38: Aberración en la apertura de la lente esférica que produce un haz colimado.

## 2.17. Aspectos de diseño en faros automotrices

Los principales aspectos de diseño en faros automotrices se pueden agrupar dentro de los siguientes requerimientos principales: desempeño técnico, diseño, calidad, integración al cuerpo del vehículo, tiempo de desarrollo y costos de desarrollo. Esto con el fin de poner en practica una construcción óptima, para cumplir de la mejor manera las tareas de un faro frontal. Los principios de diseño, requerimientos legales y la experiencia en el campo de los faros automotrices han sido establecidos gracias a un continuo desarrollo de las tecnologías y nuevas invenciones con el paso de las décadas. Para un buen diseño de los faros automotrices se debe contemplar los siguientes aspectos puntuales, cuya integración al sistema puede asegurar un desempeño mínimo de manera óptima.

La inclinación del faro con respecto al camino debe tener la posibilidad de ajustarse una vez instalado en el cuerpo del vehículo. Para esto el faro debe tener la posibilidad de moverse solo o en conjunto con otras partes de el. En los faros de reflexión, el reflector debe tener la posibilidad de moverse dentro de la carcasa, el dispositivo de nivelación puede estar integrado a la carcasa, el movimiento del reflector no debe modificar las distancias entre la carcasa y el cuerpo del vehículo, distancias que deben ser relativamente pequeñas. Los faros en los cuales la unidad de lentes y el reflector se mueven juntos, pueden hacer uso de un marco de soporte de faros, el cual sera el que tenga la libertad para el movimiento. Esto simplificara la instalación del faro.

De igual manera se deben contemplar, los puntos de sujeción entre el faro y la carrocería, el ajuste básico para los sistemas ópticos para el vehículo, sellado y ventilación de los faros, la posibilidad de reemplazar la fuente de iluminación de una manera sencilla, las conexiones eléctricas para la fuente de iluminación, de ser necesario la electrónica para la adecuada alimentación eléctrica de las fuentes de iluminación.

Los puntos de sujeción con la carrocería deben asegurar una conexión firme entre el cuerpo del faro y la carrocería, para un buen aspecto de los faros, estos puntos deben ubicarse de manera que posterior a la instalación del faro queden ocultos al exterior, pero se debe tener la posibilidad poder acceder a ellos fácilmente para un posible desmontaje posterior. El sellado y la ventilación del faro deben prevenir el acceso de polvo y sustancias liquidas que pudieran comprometer el estado físico de la fuente de iluminación y provocar alguna disminución en su rendimiento, ya sea por acumulación de suciedad o por empinamientos debido a humedad , debe ser resistente a condiciones extremas de aire y flujo de líquidos en sentido directo con una alta presión relativa.

Se debe tener la posibilidad de reemplazar fácilmente la fuente de iluminación sin tener que retirar el toda la unidad de la carrocería, generalmente se utilizan estructuras que mediante cierta presión sobre la unidad permitan su liberación. Las conexiones eléctricas deben estar diseñadas para poder utilizar una tecnología de enchufe, conexión y uso, que facilite la conexión de un nuevo dispositivo sin necesidad de una configuración mayor. La unidad electrónica para la adecuada alimentación del faro en caso de ser necesaria, también debe tener la posibilidad de retirarse del faro y ser reemplazada sin mayor dificultad, debe contemplar sus propias características de sellado, con el fin de que su desempeño no se ve comprometido por agentes externos como el polvo y el agua.

## 2.18. Sistema de iluminación frontal adaptativo AFS

**Definicion:** *(Ingen.) Dispositivo de alumbrado frontal para automóviles que emite haces cuyas características se adaptan automáticamente a las condiciones variables de utilización del haz de cruce y, en su caso, del haz de carretera con un contenido funcional mínimo. Dicho sistema incluye «el mando del sistema», uno o varios «dispositivos de alimentación y de funcionamiento», si procede, y las «unidades de instalación o alumbrado» colocadas a la derecha y a la izquierda del vehículo.*

Los sistemas de iluminación adaptativa vieron su inicio formal mediante la discusión de la extensión para la regulación que existía en patrones de haz de cruce que eran adaptados a las diferentes situaciones de conducción y ambientes que rodeaban al vehículo, lo cual derivó en el proyecto 1403

de la organización europea (EUREKA Project 1403) en el año 1992.

Numerosas investigaciones posteriores para la realización técnica de patrones adaptativos, así como de la aceptación de los clientes a esta nueva tecnología llevaron a la realización de las normas reguladoras ECE (R1, R8, R20, R48, R98), resultando en 4 patrones de haz para luces de cruce, así como también luces de curva dinámicas y estáticas, siendo así posible poner en contexto una regulación de los sistemas AFS.

En el alcance de dicha norma reguladora se clasificaron 3 diferentes componentes:

- Patrones de Haz de cruce (low beam) definidos: luz de ciudad, luz de campo, luz de autopista y luz de clima adverso.
- Luz de curva estática (Cornering light): como una función suplementaria de iluminación.
- Luz de curva dinámica (Dynamic bend light): como una posibilidad en el cambio de orientación en la alineación horizontal para los patrones de haz relativos al vehículo.

Gracias a la incorporación de las luces de curva dinámicas y estáticas dentro de la regulación, los primeros vehículos con estos elementos fueron lanzados al mercado en el año 2003.

La introducción al mercado de los primeros vehículos con la función de un sistema completamente adaptativo AFS, fue realizada en el año 2006 para la región europea bajo la regulación ECE.

Posterior a las regulaciones ECE mencionadas, siguió una nueva norma ECE123 en el año 2006, la cual contempla la introducción de una nueva fuente de iluminación, la creciente tecnología LED, esta regulación busca homologar las características de los sistemas de iluminación adaptativa AFS involucrando alcances y necesidades de la nueva tecnología que sería introducida.

El propósito de esta tecnología adaptable a diferentes situaciones de conducción es aumentar la capacidad de conducción de la persona que maneja un vehículo, al encontrarse esta en situaciones que pudieran disminuir la visibilidad del camino y su entorno, como lo sería la carencia de iluminación en ciertos sectores del entorno inherente al trayecto, donde tal carencia pudiera representar aminorar la posibilidad de esquivar obstáculos o peatones, y en determinados momentos empobrecer la correcta apreciación de señales viales en el camino.

Esta tecnología resuelve la necesidad del aumento en la seguridad en la conducción de un vehículo, gracias al aumento en la capacidad de la visión del conductor se pueden incrementar las posibilidades de prevenir un incidente vial en condiciones de baja visibilidad, está comprobado estadísticamente que la mayor cantidad de accidentes fatales vehiculares-peatonales tienen lugar durante la noche, donde la baja visibilidad de conducción juega un rol importante.

### 2.18.1. Antecedentes de sistemas AFS

A pesar de que su existencia antecede a su regulación, como muchas ocasiones suele suceder, como ya se menciona la introducción de un sistema completamente adaptativo fue realizada en el año 2006, por lo que consideramos presentar un breve resumen de algunas investigaciones relevantes posteriores a esa fecha.

En el año 2009 se publicaba un artículo en la revista SAE[3], cuyo contenido presentaba una investigación en la cual determinaban algunas implicaciones y los resultados de utilizar un control por lógica difusa. Se compararon dos modelos de lógica difusa, tipo-1 y tipo-2. El sistema de prueba incorpora 5 LEDs con un arreglo óptico Birdeye que aumenta el alcance y la dispersión de la fuente de iluminación. La manera en la que el sistema de prueba logra crear el haz de curva, es mediante una activación secuencial de estos dispositivos, cuya tasa de conmutación e intensidad de luz, es determinada, por los grados y la velocidad en la curva. En la figura 2.39 muestran los datos medidos

de la proporción de iluminación en el camino y su relación con la velocidad del vehículo y el radio de la curva.

Road scenario and speed conditions		Luminous flux ratio	
Speed (km/h)	Road curvature radius (m)	Without AFS	With AFS
40	50	1	3.9
70	150	1	2.8
90	280	1	1.6

Figura 2.39: Relación entre el escenario de conducción y la proporción del flujo de iluminación.

Se establecieron reglas que serian adoptadas por ambos modelos de lógica difusa, a partir de la necesidades que determinaron algunos especialistas involucrados en los estudios de esta investigación(figura 2.40). Estas reglas dictaban la cantidad de corriente que se debía suministrar a la fuente de iluminación de acuerdo con el escenario de conducción que se presentara.

#	Rules for the antecedents	Current to LEDs (mA)(specialist)
1	If speed < 40 km/h and radius < 50 m	1,750
2	If speed < 40 km/h and 50 m < radius < 280 m	1,400
3	If speed < 40 km/h and radius > 280 m	1,050
4	If 40 km/h < speed < 90 km/h and radius < 50 m	1,350
5	If 40 km/h < speed < 90 km/h and 50 m < radius < 280 m	1,000
6	If 40 km/h < speed < 90 km/h and radius > 280 m	700
7	If speed > 90 km/h and radius > 280 m	350
8	If speed > 90 km/h and 50 m < radius < 280 m	0

Figura 2.40: Reglas determinadas para los modelos difusos y sus posibles escenarios.

Los resultados(figura 2.41) mostraron que un modelo de lógica difusa de tipo-2 presentaba una mejor respuesta para esta aplicación, además de que su salida daba un mejor seguimiento a las reglas establecidas para la lógica del modelo.

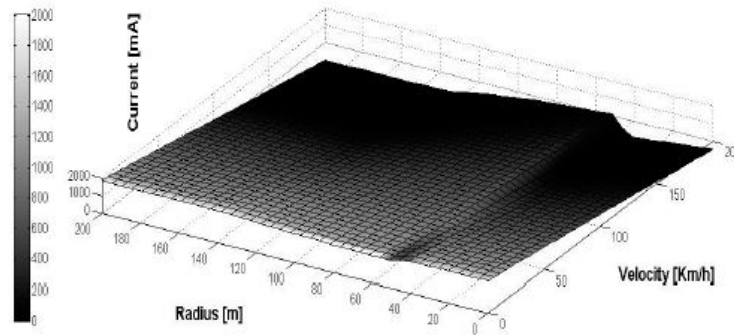


Figura 2.41: Superficie generada por el modelo de lógica difusa tipo-2.

En el año 2010 un estudio de control inteligente para prevención de accidentes, reporto la implementación de una estrategia de control para AFS[5]. El sistema AFS constaba de 3 partes principales, los sensores del vehículo (posición del volante, sensor de velocidad y sensor horizontal), un modulo de control AFS (AFSCM) y una de actuadores. La arquitectura del sistema AFS se muestra en la figura 2.42. La unidad de control AFSCM se encarga de recibir las señales provenientes de los sensores del automóvil, a través de un modelo cinemático de y su estrategia de control, evaluar la posición actual del vehículo, entonces procederá a mandar la señal de control hacia la unidad de actuadores, que derivara en movimientos horizontales y verticales, a través de mecanismos electromecánicos para ajuste vertical y ajuste horizontal.

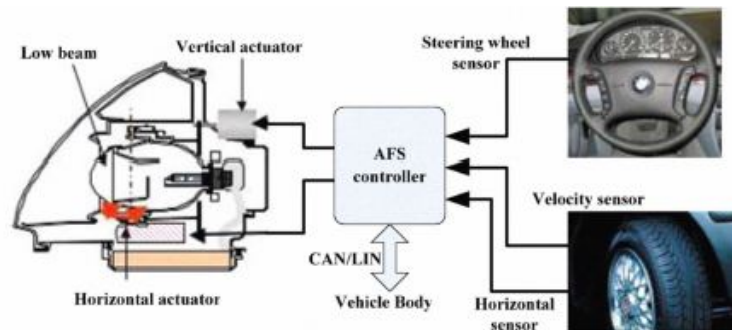


Figura 2.42: Arquitectura de sistema AFS reportado en 2010.

La implementación del sistema se realizó de manera física (figura 2.43), utilizando una planta real a la cual fueron adaptados los faros frontales así como las unidades de actuadores, estos fueron posicionados sobre un parachoques, con la finalidad de no realizar grandes modificaciones a la planta de pruebas que hubieran requerido mayor esfuerzo y costo.



Figura 2.43: Implementación de sistema AFS en planta física.

En el año 2012 se reportó el diseño e implementación de un sistema inteligente para faros basado en CAN bus[6]. La forma en que realizaban el control inteligente se basaba en el uso de una lógica difusa, la cual no necesita un modelo matemático exacto para controlar un objeto. En este estudio se dispuso un hardware basado en un microcontrolador, 4 motores a pasos y sus controladores, una vista general del sistema se muestra en la figura 2.44.

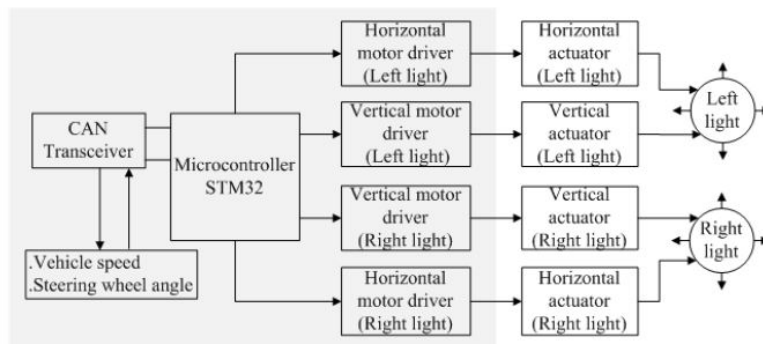


Figura 2.44: Vista general del sistema de control inteligente para faros.

En este estudio, parametrizaron el ángulo de giro del vehículo dentro de  $-100^\circ$  y  $100^\circ$ , con un punto de referencia central en  $0^\circ$  que indica que la rueda del vehículo se encuentra centrada. Posterior a esto, discretizaron los valores dentro de 7 puntos  $[-6, -4, -2, 0, +2, +4, +6]$ , los cuales eran asignados a las variables del lenguaje  $[NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB]$  (acrónimos del lenguaje inglés para, Negative Big, Negative Middle, Negative Small, Zero, Positive Small, Positive Middle, Positive Big), lo anterior es utilizado para un control horizontal en la posición del faro  $\Theta_h$ , basado en la entrada de las variables  $E_h$  (desviación en ángulo de giro) y  $DE_h$  (cambio en la tasa de desviación). De esta manera se establecieron las reglas de control difuso para el movimiento horizontal que podemos observar en la figura 2.45.

FUZZY CONTROL RULES IN HORIZONTAL DIRECTION

$E_h$ $\theta_h$ $DE_h$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
NS	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PM
PM	ZE	ZE	PS	PS	PM	PM	PB
PB	ZE	PS	PS	PM	PM	PB	PB

Figura 2.45: Reglas para lógica difusa en control horizontal.

El control de la posición vertical, se basa en las variables de entrada  $E_v$  (error del controlador) y  $DE_v$  (velocidad del vehículo), para obtener una salida  $\Theta_v$  del ángulo de posición vertical. Estimaron que la máxima aceleración de un carro en promedio es de  $10m/s^2$ , así que discretizaron la aceleración dentro de 5 puntos en un rango de  $[-10m/s^2$  y  $10m/s^2]$ , estos 5 puntos adquieren una posible variable dentro del lenguaje de programación entre [NB, NS, ZE, PS, PB](acrónimos en ingles de Negative Big, Negative Small, Zero, Positive Small, Positive Big). De igual manera establecieron dentro de su diseño que la velocidad promedio de un carro en general es de 0 a 120 km/h, así que establecieron la velocidad dentro de 5 puntos [0, 1, 2, 3, 4] asignados para las variables dentro de lenguaje[Z, S, M, F, H] (acronimos en ingles de Stop, Slow speed, Fast speed, Medium speed, High speed). Las reglas establecidas para el control difuso en el movimiento vertical se pueden observar en la figura 2.46.

FUZZY CONTROL RULES IN VERTICAL DIRECTION

$E_v$ $\theta_v$ $DE_v$	Z	S	M	F	H
NB	Z	Z	S	M	M
NS	Z	Z	S	M	B
ZE	Z	S	M	M	B
PS	S	S	M	B	B
PB	S	M	M	B	B

Figura 2.46: Reglas para lógica difusa en control vertical.

En el año 2013 un artículo de investigación presentó un estudio de modelado y simulación para iluminación en curvas de un sistema AFS basado en un sensor de imagen de dispositivo de carga (CCD). Este sistema controlaba la posición de motores bajo una estrategia que recibía la señal desde sensores de velocidad, ángulo de giro, y de imagen. Los motores son posicionados gracias a una señal PWM. El movimiento únicamente es realizado en dirección horizontal. La disposición de los elementos de este sistema se muestra en la figura 2.47.

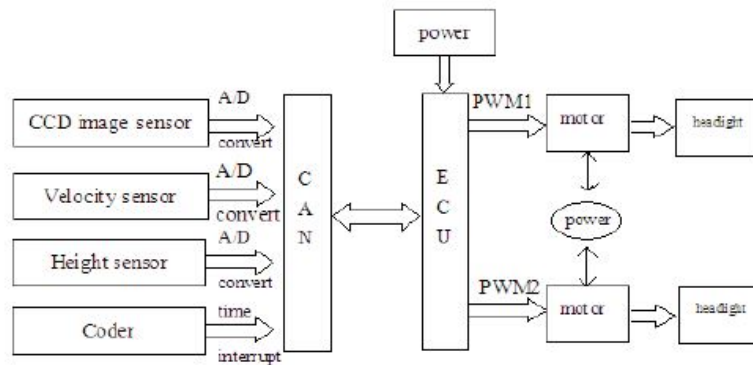


Figura 2.47: Disposición de elementos para el sistema basado en sensor CCD.

La estrategia de control se basa una distancia mínima de frenado, la velocidad actual del vehículo, el radio de curvatura y un radio mínimo de curva para la distancia de frenado. Como salida del sistema se tiene un ángulo horizontal para la posición de los motores. Este sistema no se llevo a una implementación física, solamente se realizaron simulaciones en software, dicha simulación se muestra en la figura 2.48 en donde se observan diferentes ángulos de rotación para distintas velocidades y radios de curvatura. Este nuevo método presentaba una manera de calcular el radio de curvatura a partir de información obtenida en tiempo real a través del sensor CCD. Se presento como un método mas preciso, ya que el movimiento del haz era anterior al movimiento del volante, además de presentar un método basado en reconocimiento de imágenes CCD, que podía no solo presentar la luz de curva, si no proporcionar imágenes con un reconocimiento integral.

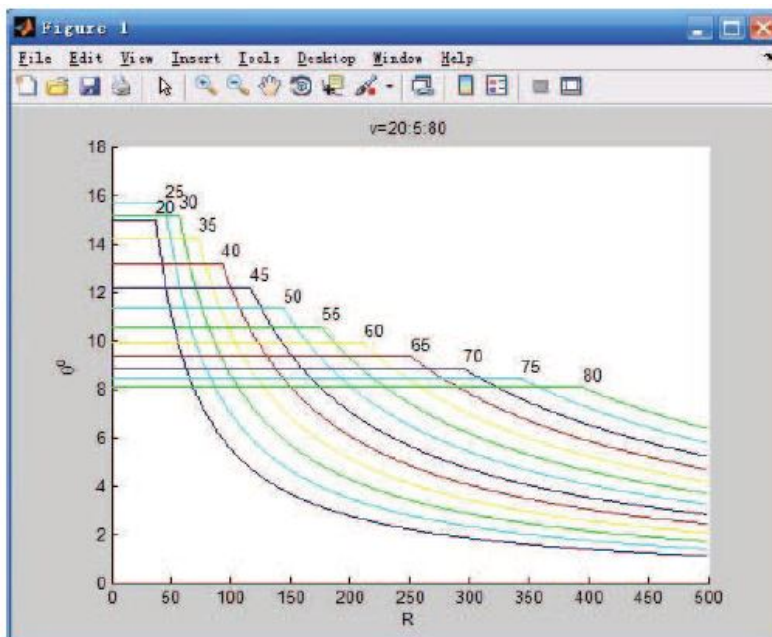


Figura 2.48: Resultados de la simulación del sistema basado en CCD.

Como se menciona en la introducción de este documento, el año 2014 fue en el que mayor cantidad de trabajos de investigación sobre sistemas AFS se presentaron, comenzaremos presentando de manera breve un trabajo mas complejo en el que realizaron una fusión de múltiples sensores a una red conjunta de un filtro kalman y una red neuronal difusa[8]. La disposición de los elementos de este sistema se muestra en la figura 2.49. Como se puede observar existen múltiples sensores de

entrada, los cuales son procesados y fusionados en la entrada previa el controlador, el cual accionara un motor a pasos mediante un driver de aplicación específica (ASSP). La posición del motor a pasos es retroalimentada al sistema.

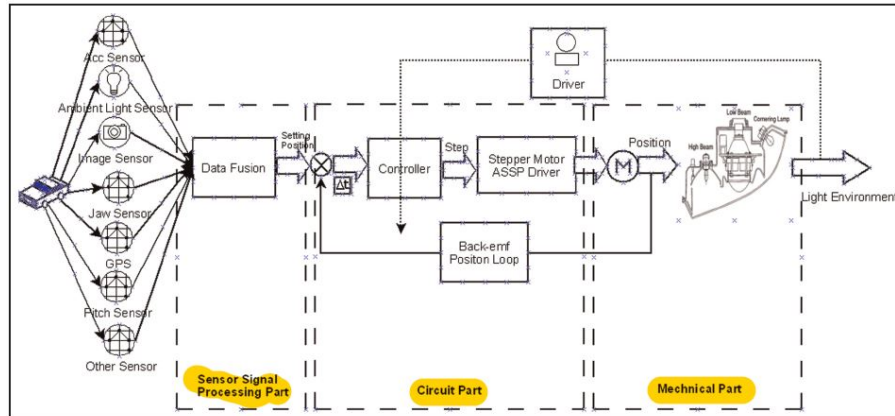


Figura 2.49: Conformación de sistema con múltiples sensores fusionados una red conjunta de filtro Kalman y red neuronal difusa.

Se utiliza un modelo matemático que involucra el radio de la curva, un factor de estabilidad, la velocidad del vehículo, la longitud de la base de la llanta, un ángulo de giro del vehículo y el ángulo de volante, todo esto para determinar el ángulo de giro horizontal necesario para el faro. De igual manera determinan un patrón de elevación para el faro mediante un modelo que considera la inclinación del vehículo debido a la dinámica de la aceleración. Los datos necesarios son adquiridos por los sensores y pasados a través de un filtro Kalman que se encarga de fusionar los datos que posteriormente llegarán a una red neuronal difusa, entrenada para ser la encargada de tomar las decisiones de control para el sistema. Esta estructura es mostrada en la figura 2.50.

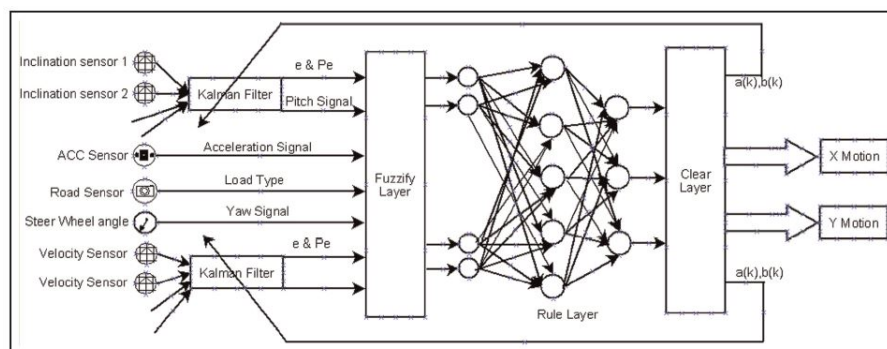


Figura 2.50: Flujo de señales para el sistema con múltiples sensores fusionados una red conjunta de filtro Kalman y red neuronal difusa.

También en ese mismo año se presentó un trabajo basado en un algoritmo de control predictivo sobre la dinámica del vehículo bajo la influencia de un estudio previo en el comportamiento del conductor. Modelando el comportamiento de vista previa del conductor en una curva, la trayectoria futura del vehículo en un período de tiempo se predijo de acuerdo con el estado actual del vehículo y las características de respuesta de estado estable del vehículo a la entrada de la posición del volante del conductor, pedal de acelerador o pedal de freno. Simultáneamente se determinó la ubicación de fijación del conductor en camino futuro, según la regla de comportamiento de vista previa de los conductores (la regla de ubicación de fijación o punto de vista previa) en curvas reales.

Posteriormente se determino el ángulo de deflexión de los faros y el área del camino fue iluminada de manera efectiva. La figura 2.51, muestra el flujo de señales para este sistema. Donde se puede observar que las entradas al sistema son, una posición longitudinal del vehículo, el ángulo de la posición del volante, y la presión ejercida sobre los pedales, además de una evaluación paralela de distancias previas en el camino.

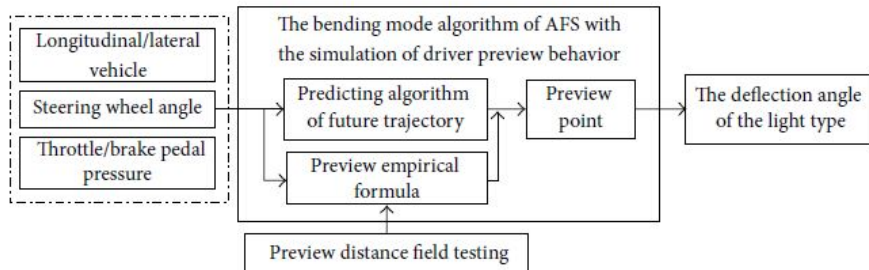


Figura 2.51: Flujo de señales para el sistema con estudio previo del comportamiento del conductor.

En este trabajo realizaron un modelo matemático para poder predecir la futura trayectoria del vehículo, con base en ecuaciones de la dinámica del vehículo y ecuaciones que describen el comportamiento de vista previa en los conductores, de esta manera logran el calculo del modelo matemático para la deflexión del haz luminoso del faro. La representación gráfica de este modelo matemático se muestra en la figura 2.52.

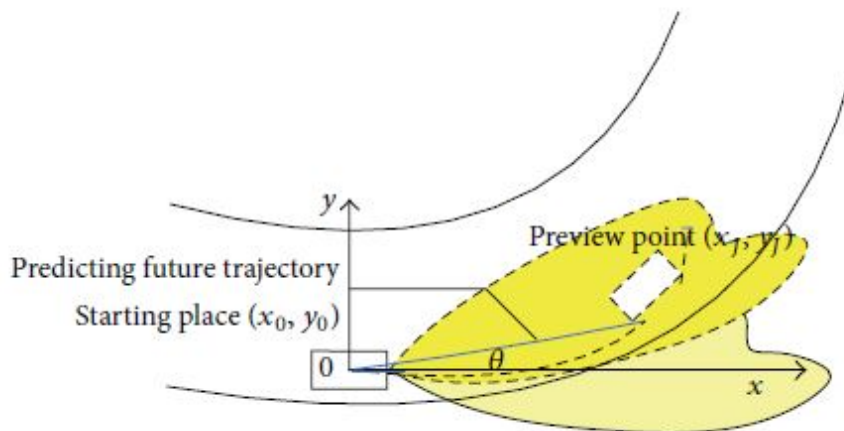


Figura 2.52: Representación gráfica del modelo matemático para la deflexión del haz luminoso, del sistema con predicción de la trayectoria.

En ese mismo año también se reporto un estudio de un modelo matemático para luz curva dinámica de un sistema AFS basado en las características de un vehículo en movimiento[10]. Para este trabajo primero determinaron el modelo dinámico de un vehículo basado en sistema de coordenadas rectangulares, tomando como punto de referencia el punto BL50 libre de deslumbramiento, y en el cual la dirección del eje óptico para la irradiación es ajustado por el movimiento del vehículo. El sistema de coordenadas sobre el cual se basaron para la determinación del modelo matemático se muestra en la figura 2.53. El sistema contempla una relación entre el ángulo del movimiento del carro, el radio de la vuelta, y la velocidad.

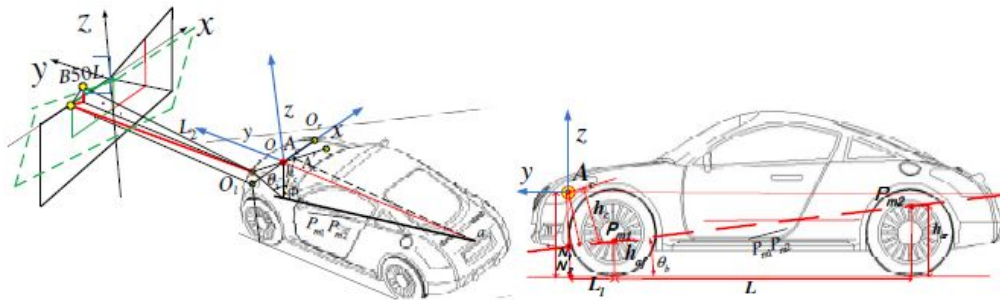


Figura 2.53: Marco de referencia en sistema de coordenadas rectangulares para el desarrollo del modelo matemático para luz de curva dinámica.

A pesar de que no presentan a detalle la implementación de un algoritmo que utiliza su modelo matemático desarrollado, mediante simulaciones en matlab podemos observar que lograron un buen seguimiento de la iluminación sobre la dinámica que presenta el vehículo, esto se puede observar en la figura 2.54. En donde podemos observar del lado izquierdo el comportamiento y las características del vehículo y su ángulo de giro cuando ingresa a curvas de diferentes radios, del lado derecho podemos observar el ángulo del AFS presentado para distintos radios de curva, los mismo que el vehículo, además se incluyen las diferentes velocidades simuladas para las pruebas de este modelo matemático.

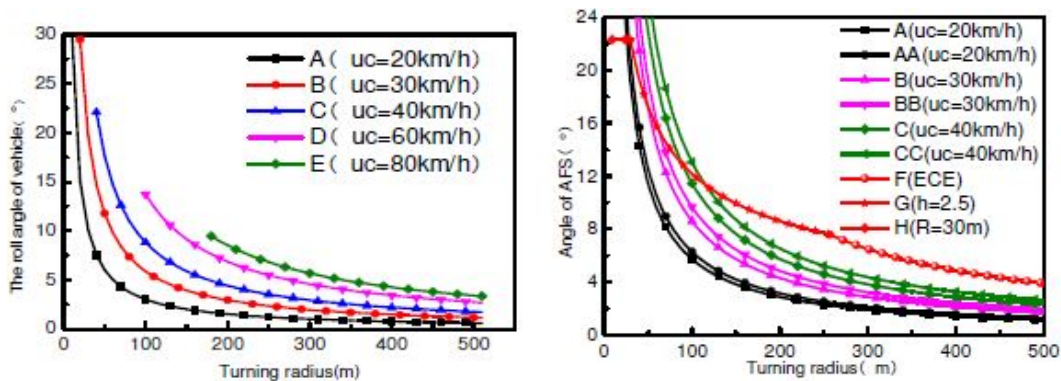


Figura 2.54: Resultados de simulación en matlab para modelo matemático para luz de curva dinámica.

A la par de los estudios que se realizaban para lograr una luz de curva dinámica mas precisa en desempeño, hubo investigadores que también estudiaron nuevos sistemas ópticos que tuvieran mejor desempeño de dispersión para los sistemas AFS. Tal es el caso del estudio que presentaba un diseño óptico de un sistema AFS con alta eficiencia de energía[11]. Este estudio presento un arreglo óptico como el que se muestra en la figura 2.51. Este sistema presenta el uso de un dispositivo de micro espejo digital (DMD), el cual puede tener diferentes modos de iluminación dependiendo de la configuración de sus micro espejos.

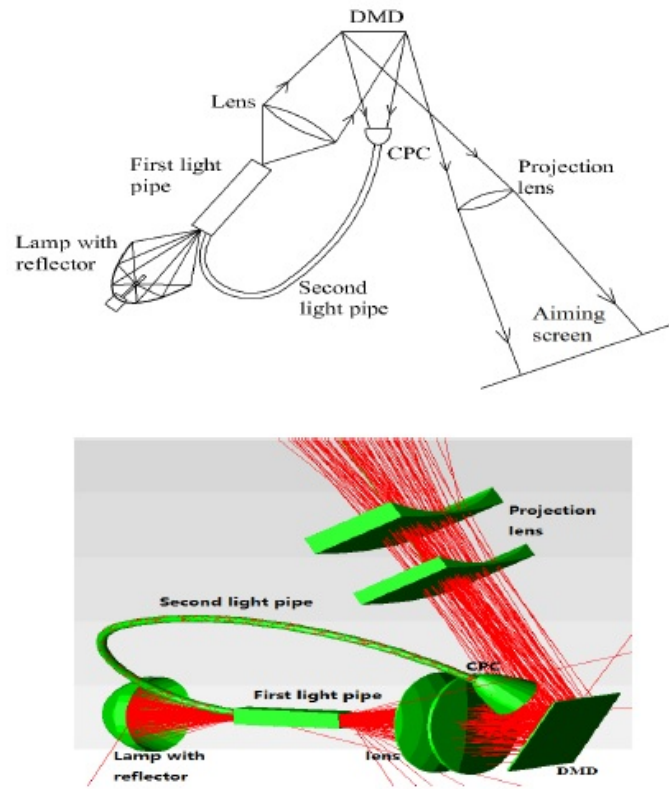


Figura 2.55: Diseño óptico propuesto para un sistema AFS con alta eficiencia de energía.

De esta manera es como lograron generar diferentes tipos de haz lumínico, a partir de un diseño óptico complejo, la figura 2.52, presenta una comparación de los resultados obtenidos y el valor marcado dentro de la regulación ECE para un modo de iluminación clase V.

Test points on the screen		Standard Regulatory Value (Lux)	Simulation Value (Lux)	Test points on the screen		Standard Regulatory Value (Lux)	Simulation Value (Lux)
1	B50L	$\leq 0.4$	0.35	8	50 V	$\geq 6$	14.8
2	HV	$\leq 0.7$	0.61	9	50 L	$>4.2$ and $<15$	14.1
3	BR	$>0.1$ and $<1$	0.72	10	25 LL	$\geq 1$	3.1
4	Segment BRR	$\leq 1$	$\leq 0.80$	11	25 RR	$\geq 1$	4.8
5	Segment BLL	$\leq 1$	$\leq 0.78$	12	Segment 10 and below	$\leq 14$	$\leq 12.2$
6	Zone III	$\leq 0.7$	0.59	13	Emax	$>10$ and $<50$	30.8
7	50 R	$\geq 6$	15.1				

Figura 2.56: Comparación de resultados obtenidos mediante simulación y los establecidos en la regulación para un haz luminoso de clase V.

Otra trabajo presentado en ese mismo año se describe un algoritmo de control para el movimiento rotacional de los faros del vehículo[12]. Este sistema se basa en la entrada de señales proporcionadas

por los sensores del vehículo, este proveen las señales del ángulo del volante, la velocidad y la altura con respecto al suelo del vehículo. El diagrama de bloques de este sistema es presentado en la figura 2.57.

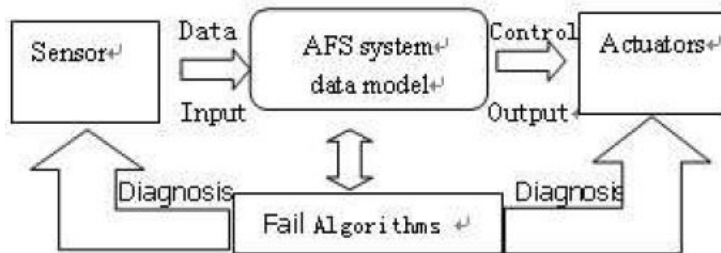


Figura 2.57: Diagrama de bloques del algoritmo de control para un movimiento rotacional en AFS[12].

El núcleo de este sistema está basado en una estrategia de control que evalúa ecuaciones matemáticas, con las entradas al sistema brindadas por los sensores. Estas ecuaciones permiten ajustar un ángulo de rotación horizontal para el faro, contemplan el radio de la curva, la altura de la posición del faro con respecto al suelo, además, la velocidad y la distancia segura de frenado. Una vez evaluada las ecuaciones matemáticas y que ha sido obtenido el ángulo para el faro, se posicionan los actuadores en el ángulo determinado por la estrategia de control. Los resultados de este trabajo se muestran en la figura 2.58, la cual muestra el ángulo de salida obtenido, para diferentes radios de curvatura.

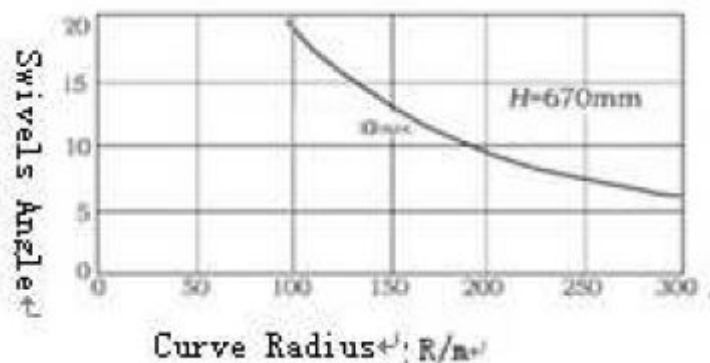


Figura 2.58: Resultado de la simulación del algoritmo de control para rotación horizontal del faro[2].

En el año 2015 se presentaba un nuevo estudio basado en control previo para la generación de luz curva en AFS[13], este método propone resolver los problemas de retraso (lag) que se presentan en sistemas que basan su método de control en utilizar sistemas de posicionamiento global GPS y/o sensores de imagen CCD, para un sistema de rotación con servomotores para posicionar adecuadamente el faro a en una curva. Determinaron que los sistemas que utilizan un bus de datos CAN tienen un tiempo de retardo de aproximadamente 42 ms. El planteamiento de su solución se basa en la propuesta de que al girar, el conductor ajustaba continuamente el ángulo del volante de acuerdo con la curva, por lo que la relación entre la tasa de cambio del ángulo del volante y el ángulo del faro, podría resolver el problema del retardo. El modelo de control que presentaron incluye un módulo de corrección para la retroalimentación, el principio de este modelo de control se muestra en el diagrama de bloques de la figura 2.59.

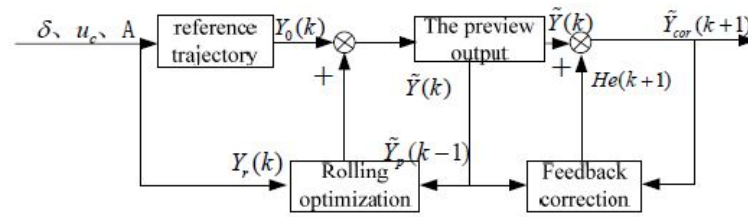


Figura 2.59: Diagrama de bloques del modelo de control con modulo de corrección.

La implementación física para la realizar las pruebas correspondientes tuvo una configuración como la que se muestra en la figura 2.60, en donde mediante el uso de un microcontrolador y drivers correspondientes para cada servomotor, controlaron la posición de los faros. Los resultados obtenidos se muestra en la figura 2.61, en donde simularon una velocidad constante de 40 km/h y observaron una respuesta del sistema adecuada, la estrategia del método de control redujo el tiempo de retardo (lag) en la reacción del sistema.

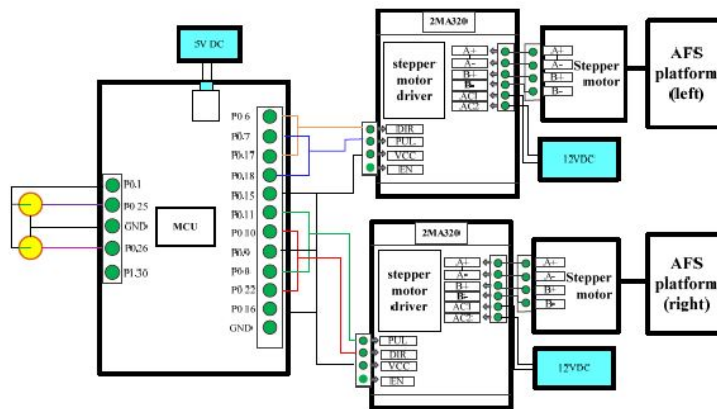


Figura 2.60: Disposición de los elementos para la implementación física del sistema de control presentado en [13].

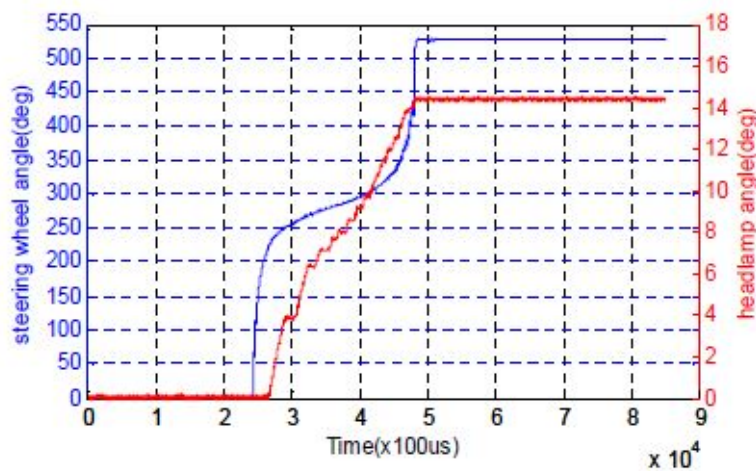


Figura 2.61: Resultados obtenidos a una velocidad de 40 Km/h para el ángulo de faro.

Para el año 2017 se presentaron un par de estudios relacionados con AFS, el primero de ellos plantea un diseño óptico avanzado, con el cual pudieron generar un patrón de haz adaptativo capaz de generar los diferentes tipos de haz contemplados en las regulaciones[14]. Este estudio presentó una estrategia de control on/off simple para un arreglo de LEDs, el conjunto es potenciado por el diseño óptico avanzado que logra una buena dispersión de la fuente de iluminación y un correcto cumplimiento de los parámetros regulados para cada haz luminoso. Este sistema dispone de dos arreglos ópticos por cada faro, es decir 4 arreglos ópticos en total para un vehículo. La disposición de estos elementos se muestra en la figura 2.62.

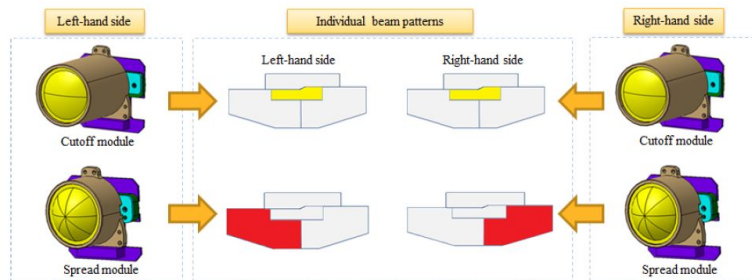


Figura 2.62: Disposición de los arreglos ópticos avanzados para la generación de los patrones de iluminación.

El arreglo de LEDs es correctamente acoplado al sistema óptico, este arreglo permite la apertura de los canales anti deslumbramiento que se generan apagando ciertos LEDs. Lo anterior se muestra en la figura 2.63. El arreglo de LEDs a su vez cuenta con micro lentes de esparcimiento individuales en cada uno de los dispositivos, lo que permite la discretización de la fuente de iluminación.



Figura 2.63: Arreglo de LED con micro lentes individuales para generar la fuente de iluminación.

Por último presentaron los resultados de la generación de los diferentes modos de haz luminoso, los cuales cumplieron con los parámetros establecidos dentro de las regulaciones (figura 2.64).



Figura 2.64: Resultados en la generación de los patrones de iluminación mediante el arreglo óptico.

En ese mismo año se presentó un artículo que mostraba la validación de un sistema AFS de respaldo[15]. Las pruebas fueron realizadas bajo una arquitectura de simulación que constaba de un microcontrolador sobre la plataforma de arduino, un dispositivo físico AFS y un volante para el ingreso las acciones de un usuario, el modelo de control fue desarrollado en simulink. La disposición de estos elementos se muestra en la figura 2.65.

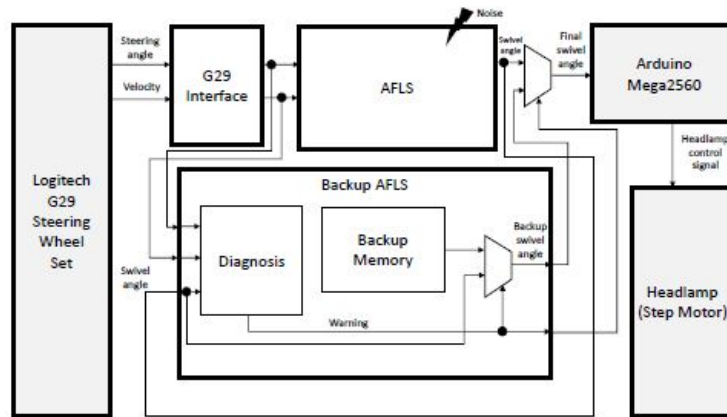


Figura 2.65: Disposición de los elementos para la plataforma de prueba de AFS de respaldo .

A pesar de que no se detalla el modelo de control desarrollado en simulink, presentan los resultados de una simulación ligada a la plataforma de pruebas mediante un modelo de respaldo para AFS, estos resultados son probados para una velocidad constante de 20 Km/h y se muestra el seguimiento realizado a la posición del volante incluido en la plataforma de pruebas, así como también los ángulos de rotación enviados a los actuadores del dispositivo AFS. Estos resultados se pueden apreciar en la figura 2.66.

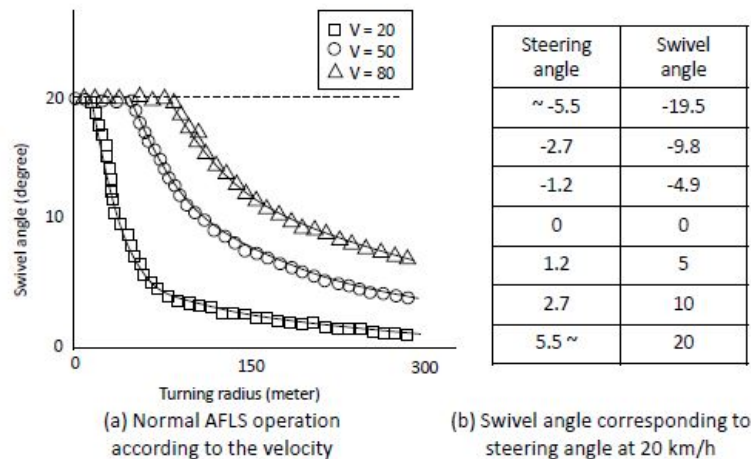


Figura 2.66: Resultados de la función principal de AFS de respaldo obtenidos en la simulación.

En el año 2018 se presentó un trabajo en el cual realizaban el control de un AFS basado en un arreglo matricial de LEDs utilizando una técnica de maching learning[16]. Este trabajo fue presentado con una implementación de un arreglo matricial de LEDs que podían ser activados o desactivados dispositivo a dispositivo, lo cual permitía la creación de una plataforma con un funcionamiento de haz luminoso de matriz, además dieron a conocer las ventajas del uso de una

fuente de iluminación como esta. El diagrama de bloques de esta implementación se muestra en la figura 2.67.

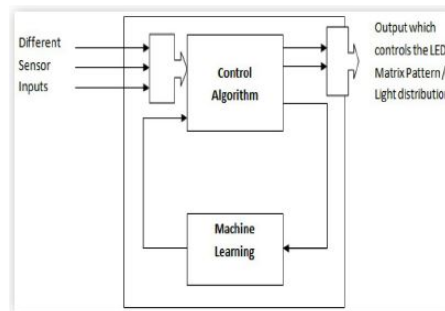


Figura 2.67: Resultados de la función principal de AFS de respaldo obtenidos en la simulación.

Estudiaron un modelo matemático que podía describir la actuación y respuesta de un radar que se encargaba de monitorear e identificar objetos en el camino, a su vez, el modelo matemático podía determinar la distancia del objeto con respecto al vehículo (figura 2.68). Determinaron las reglas para el aprendizaje basadas en las necesidades de cada tipo de haz que debían proyectar, utilizaron un support vector machine (SVM), de la cual no se dan detalles exactos de las reglas de aprendizaje, únicamente mencionen que es capaz de 2 tipos de clasificadores, uno lineal y otro no lineal. La SVM es capaz de aprender y generar los complejos patrones requeridos para cada situación.

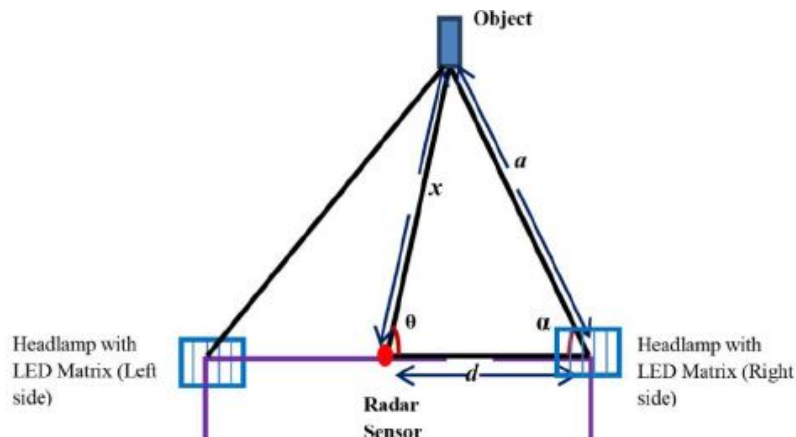


Figura 2.68: Resultados de la función principal de AFS de respaldo obtenidos en la simulación.

En ese mismo año se presentó un diseño y la implementación de un AFS usando tecnología digital y una placa arduino[17]. Este trabajo es un tanto peculiar debido a que utilizan un sistema basado en 4 proyectores de haz luminoso colocados en una disposición fija, cada reflector es fijado de manera paralela pero con distintos grados de rotación horizontal hacia los extremos partiendo de un eje central para la iluminación (figura 2.69). Analizaron detenidamente los grados necesarios para la fijación de cada uno de los elementos partiendo de la arquitectura del vehículo. Lo anterior con el fin de lograr una generación de distintos patrones de haz luminoso, mediante la superposición de diferentes trayectorias luminosas producidas por cada reflector.

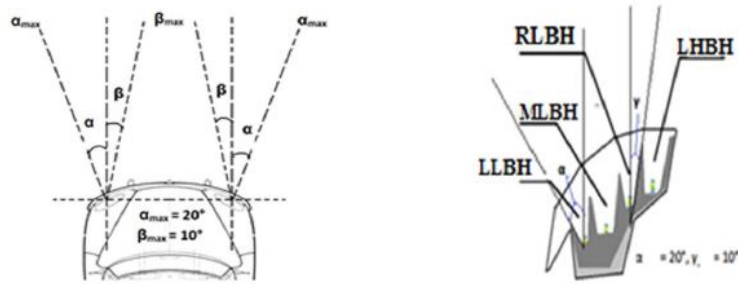


Figura 2.69: Arquitectura propuesta de iluminación paralela fijada con distinta rotación horizontal.

Además para poder realizar la activación adecuada de cada reflector, parametrizaron las diferentes posiciones de un volante de vehículo, las cuales son agrupadas dentro de las posibles posiciones resultantes de una conversión ADC de 10 bits que se encuentra disponible en la placa arduino(figura 2.70), este ADC permite hasta 1024 valores distintos, los cuales serian evaluados para determinar los reflectores que debían ser activados mediante una técnica de PWM, posible de lograr gracias a los canales disponibles en la placa arduino.

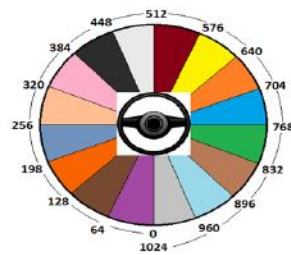


Figura 2.70: Posición del volante convertida mediante un ADC de 10 bits.

Un trabajo de mayor complejidad fue publicado de igual manera en el mismo año 2018 el cual presentaba un modelo basado en un diseño de ganancia PID óptimo para un sistema AFS[18]. En este trabajo se realizaron los modelos matemáticos de un motor DC basado en especificaciones y su correspondiente linealización, así como también los modelos de sus controladores correspondientes, obteniendo como resultado la linealización de la velocidad angular(figura 2.71).

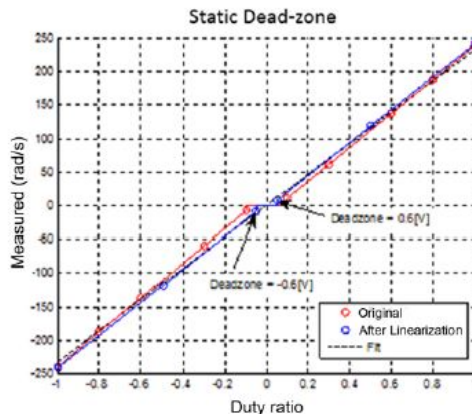


Figura 2.71: Linealización de la velocidad angular de un motor DC.

La estrategia de control para la posición del ángulo de salida se baso en un lazo de retroalimentación, que contenía además un control de la velocidad inercial por lazo cerrado, el diagrama de bloques de esta estrategia de control se muestra en la figura 2.72.

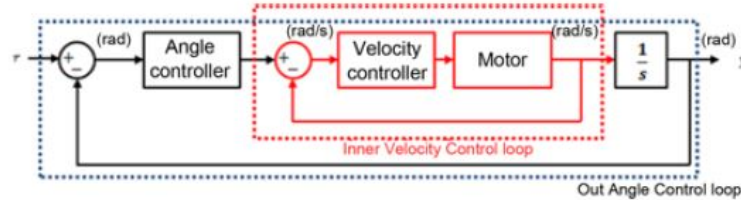


Figura 2.72: Diagrama de bloques de controlador PID con lazo de retroalimentación para AFS.

Los resultados obtenidos muestran una comparación realizada en el desempeño del sistema sin la estrategia de control PID, el desempeño con un controlador PID y la señal de seguimiento para el ángulo de salida. estos resultados se muestran en la figura 2.73.

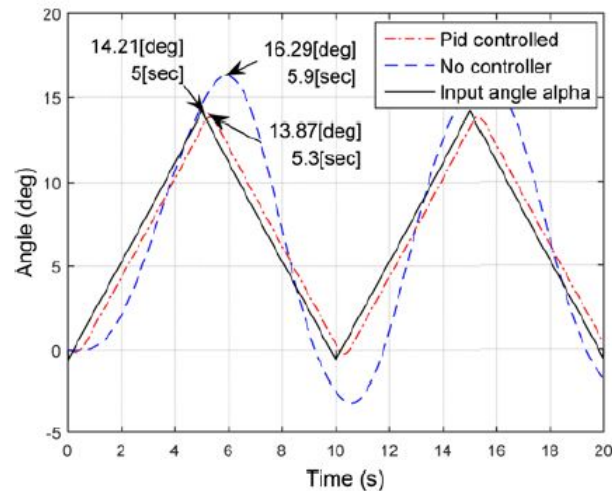


Figura 2.73: Resultados obtenidos comparando el desempeño del sistema con controlado PID y sin el controlador PID.

## 2.19. Componentes de un sistema AFS

El control automático es un componente esencial de los sistemas de iluminación adaptativa. Por esta razón la generación de patrones de luz bajo la regulación es solo uno de los aspectos que se contemplan en la realización de estos sistemas. Puntos importantes para la funcionalidad así como la aceptación del cliente respecto al faro, es la calidad de los elementos del control, los algoritmos y los sensores responsables de determinar las variables de configuración.

Existen numerosos avances en el desarrollo de un sistema AFS, sobre todo porque cada función puede ser generada por unidades o elementos lumínicos separados o por una combinación de ellos. Un sistema AFS altamente integrado y que ya ha sido desarrollado en producciones en serie nos sirve como base para representar los elementos que conforman un sistema de iluminación adaptativa que contemple las funciones descritas en las regulaciones.

El completo alcance funcional de un sistema AFS puede ser únicamente presentado tomando en cuenta los siguientes componentes:

- Datos del vehículo a través de un bus (Bus de comunicación)
- Unidad de control (ECU)
- Módulos de Potencia (Drivers)
- Unidades Lumínicas (Faros)
- Señales de entorno (Sensores)

A continuación se muestra un diagrama de bloques (figura 2.74) que muestra de una manera abstracta los elementos considerados para el sistema AFS de este trabajo:

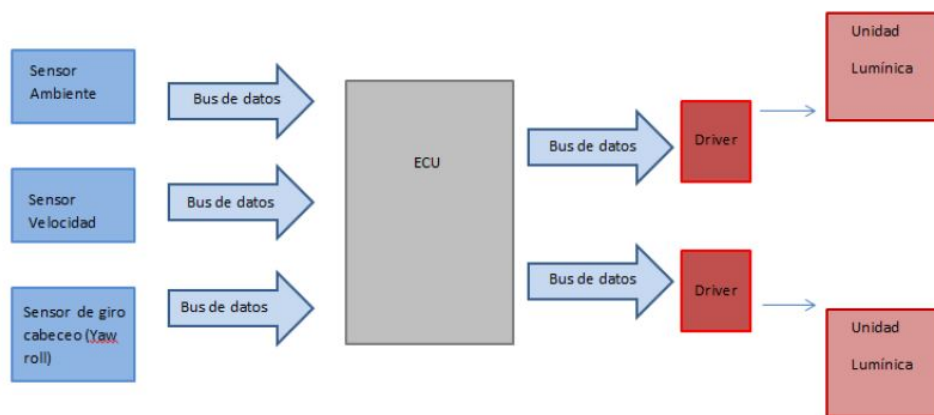


Figura 2.74: Diagrama de bloques para los elementos del sistema AFS.

## 2.20. Variables de entrada de un AFS

El hardware de un sistema AFS se encarga de realizar los patrones del haz, así como también de poner en marcha el sistema. Con el fin de asegurar que las funciones del sistema funcionen correctamente adecuándose a cada situación, un algoritmo de control que fuese desarrollado necesita de los datos disponibles en los sensores del vehículo o la combinación de ellos, para determinar los valores requeridos para el sistema.

Existen sensores que pueden determinar la situación ambiental correcta a través del comportamiento del conductor. Las situaciones de clima adverso suelen ser provistas mediante un sensor de lluvia o el switch de los limpiadores del parabrisas. Sin embargo también hay métodos que aseguran un comportamiento mas automático o con mayor precisión como por ejemplo; Un sensor inteligente de superficies mojadas puede optimizar la aplicación del sistema AFS brindando mayor nivel de automatización, en comparación a tomar como entrada el accionamiento del switch de los limpiadores, a su vez, en función de la calidad de los sensores, podría brindar una mejor precisión al accionamiento del sistema con respecto al uso de un sensor de lluvia.

Un comportamiento conveniente del sistema completo es posible utilizando sensores ya existentes en un vehículo, sin la necesidad de agregar hardware que no esté disponible. Las señales entonces del sistema basado en hardware disponible actualmente en algunos vehículos del mercado serían las siguientes:

- Señal de velocidad del vehículo
- Señal de giro en cabeceo (Yaw roll)
- Señal de ambiente
- Señal de inclinación del vehículo (Pitch roll)
- Señal de tráfico en sentido contrario
- Señal de alcance a tráfico en el mismo sentido
- Señal de reconocimiento de señales viales

## 2.21. Patrones adaptativos del haz

Derivado de la clasificación propuesta en los alcances de las normas reguladoras, a continuación se presentan las funciones individuales de un sistema adaptativo.

El haz del patrón adaptativo para la luz de ciudad, campo y autopista son los resultados de una combinación de las posiciones de una luz dinámica de curva y el haz fijo, por lo que para cada una de las situaciones la norma contempla los siguientes propósitos y características:

### 2.21.1. Modo clase V - Luz de Ciudad- Town lighth

El propósito de este patrón de iluminación es brindar una calidad de iluminación suficiente para situaciones de tráfico dentro de entornos en los que se encuentra un cierto resplandor ambiental debido a construcciones alrededor e iluminación vial. Una amplia iluminación del área que se encuentra directamente alrededor del vehículo es más importante que el rango absoluto de visibilidad. También debe de tomarse en cuenta la tarea de evitar el deslumbramiento de peatones y ciclistas que circulen en sentido contrario.

El modelo de proyección del haz de luz debe ajustar el patrón del haz a  $-0.57^\circ$  del corte simétrico y ambos módulos de iluminación son movidos  $9^\circ$  grados de la línea cero de posición manteniendo una iluminación de 60 Lx en el centro del haz, esto agranda la dispersión de la luz hasta  $18^\circ$  en total para cada faro en el sistema completo (figura 2.75).

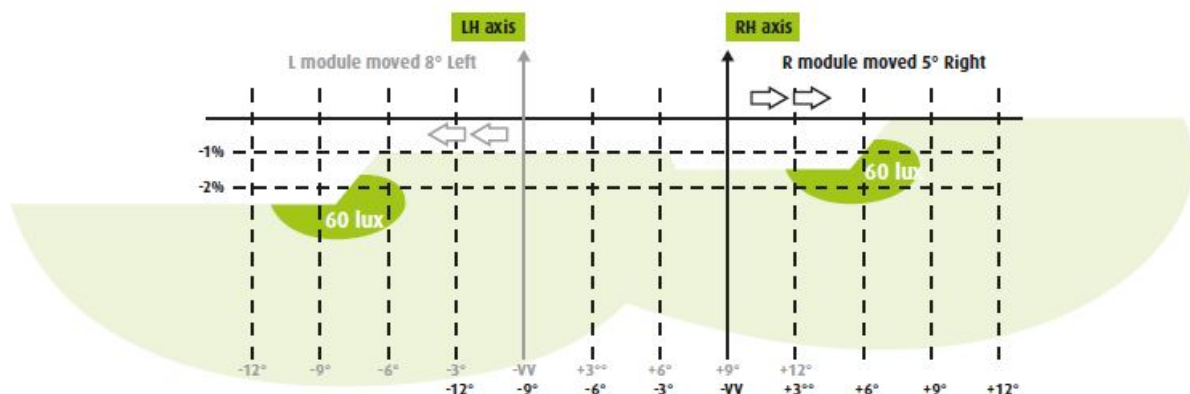


Figura 2.75: Carta fotométrica guía para haz clase V .

Con el fin de llevar a cabo una transición suave y fácil de la luz de ciudad hacia la luz de campo por una parte, además también de ajustar los requerimientos dentro del campo de visión con el aumento de la velocidad, el ángulo vertical es reducido de  $9^\circ$  a  $0^\circ$  gradualmente hasta tener una luz de campo completamente activada a una velocidad que excede el límite, contemplado en 50 Km/h(figura 2.76).

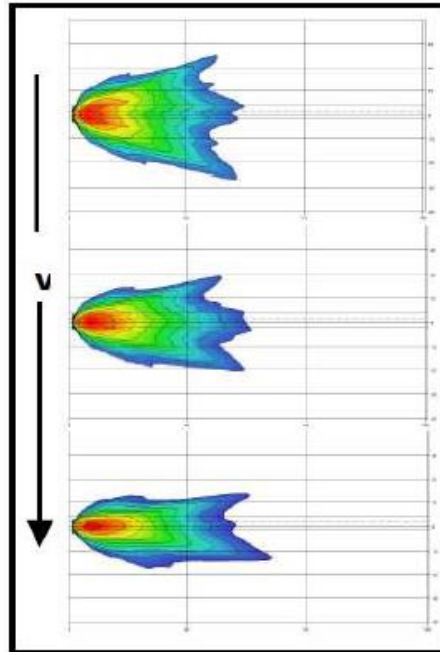


Figura 2.76: Patrón de Haz modo clase V.

### 2.21.2. Modo clase C- Luz de campo – Country light

También llamado modo neutral, este modo corresponde básicamente al modo usual en el patrón del haz. Este patrón corresponde a las características del patrón de luz de haz bajo normalizado por la ECE. Además es bien adaptado a los requerimientos para caminos de dos carriles con tráfico en sentido contrario.

Cuando la conducción se realiza en particular a través de zonas abiertas en donde ya no existe el resplandor de las construcciones aledañas al camino, o una iluminación vial que ayude a la visibilidad del camino, la información que existe en el área más lejana sobre el camino, se vuelve extremadamente importante.

Para esto el haz de luz incrementa la altura de proyección hasta  $-0.24^\circ$  en el patrón de corte del lado izquierdo de la línea cero vertical, y hasta  $15^\circ$  en la posición horizontal a partir de la línea cero vertical del lado izquierdo y  $12^\circ$  en la posición horizontal a partir de la línea cero vertical del lado derecho, para alcanzar un rango de hasta  $26^\circ$  en la dispersión para el sistema completo(figura 2.77). Este sistema contempla un funcionamiento en velocidades de hasta 70 Km/h y alcanza un rango de hasta 60m de distancia (figura 2.78).

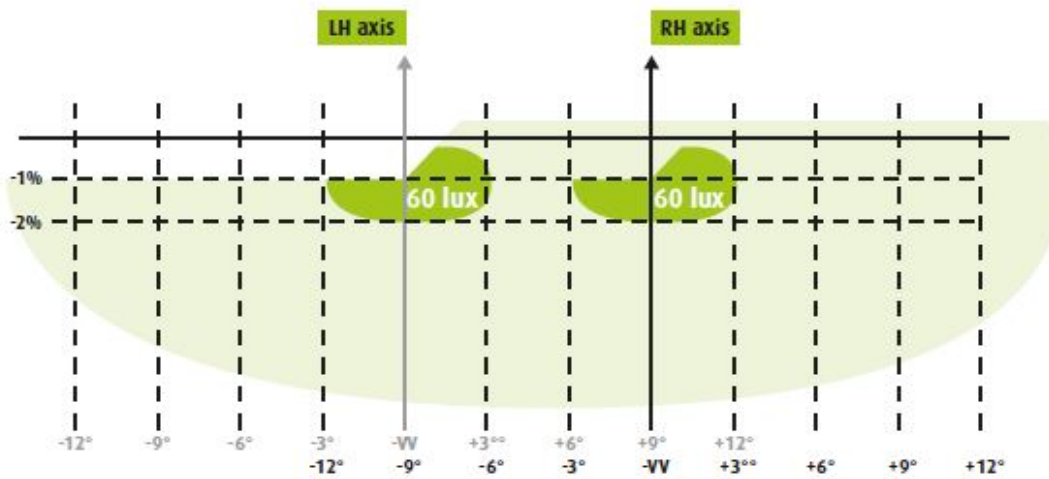


Figura 2.77: Carta fotométrica guía para haz clase C.

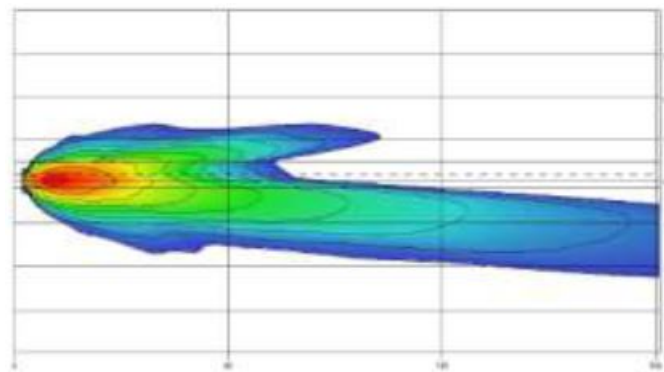


Figura 2.78: Patrón de Haz modo clase C.

### 2.21.3. Modo clase E - Luz de autopista- Motorway light

La tarea de este patrón de haz como lo describe su nombre es incrementar el rango visual en autopistas o caminos similares con más de dos carriles para cada sentido, la iluminación del segundo carril usando este patrón de haz es limitado a un rango de entre 60 y 70 metros. La luz de autopista produce un mayor flujo luminoso debido al contorno que puede dibujarse y aun aumento en la potencia del sistema de iluminación de hasta el 10% . La altura en la proyección se mantiene a  $-0.24^\circ$  de la línea de corte y 120 Lx en el centro del haz, para velocidades superiores a los 120 Km/h donde el sistema alcanzara su máximo desempeño en este patrón de haz. El rango visual aumenta de 120 a 140 metros en todas las áreas del camino, en las demás áreas es puesto de vuelta a  $-0.54^\circ$  para reducir el deslumbramiento. Si el vehículo excede los 80 Km/h la luz se ajustara a  $-0.54^\circ$  en la línea de corte, pasados los 90 Km/h se ajustara a  $-0.45^\circ$  en la línea de corte para un rango de iluminación medio, después de los 100 Km/h se ajustara a  $-0.34^\circ$  en la línea de corte(figura 2.79), los diferentes patrones que se forman se pueden observar en la figura 2.80.



Figura 2.79: Carta fotométrica guía para haz clase E.

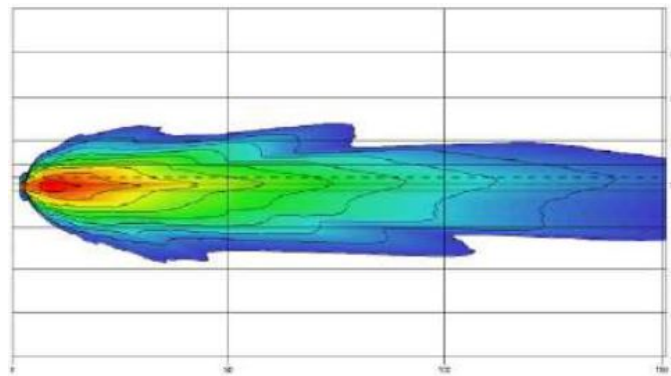


Figura 2.80: Patrón de Haz modo clase E.

#### 2.21.4. Modo clase W - Luz de clima adverso– Bad weather light

La luz para el clima adverso necesita de consideraciones especiales, este patrón de haz no es controlado por el entorno del camino, sino que es utilizado usado únicamente en condiciones de climas lluviosos o con el camino mojado. Los requerimientos de este patrón de haz incluyen una óptima iluminación del camino del conductor, reducción del deslumbramiento del tráfico en sentido contrario provocadas por las reflexiones directas frente al vehículo ya que en caminos mojados los valores mayores a 10 luxes pueden ser alcanzados a los 25 m, cuestión que en la luz de ciudad no debe ser excedida. Para lograr que se evite el deslumbramiento, el módulo de iluminación izquierdo es llevado a las características de luz de ciudad girando 3 ° hacia la derecha con 120 Lx en el centro del haz, mientras el módulo de iluminación derecha es girado 5° hacia el exterior en la misma dirección con 60 Lx en el centro del haz, además se eleva la iluminación hacia la zona 4 utilizando los sistemas de la nivelación de altura(figura 2.81), el patron formado puede observarse en la figura 2.82.

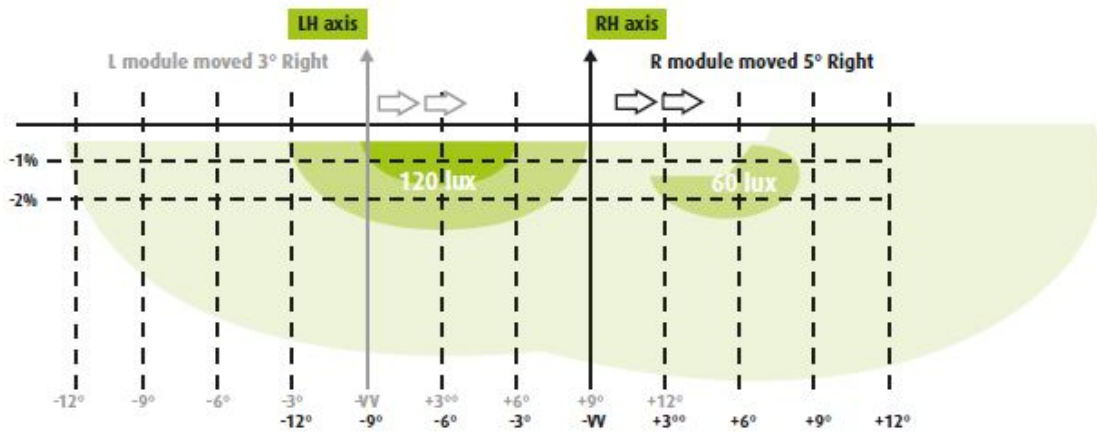


Figura 2.81: Carta fotométrica guía para haz clase W.

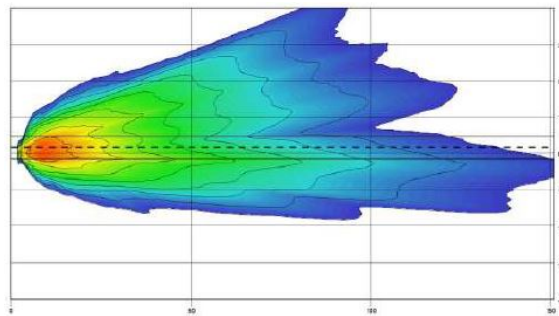


Figura 2.82: Patrón de Haz modo clase W.

### 2.21.5. Luz de curva

En una luz de curva la función principal como su nombre lo presume, es iluminar el área de una curva, actualmente existen sistemas de luz de curva estática y dinámica, la primera es generada por un sistema adicional de iluminación que es generado por un sistema óptico especial, el cual es activado en una situación de curvas con radios pequeños o cruces de calles, la luz dinámica se trata de un sistema generalmente electromecánico el cual es girado en la dirección de la conducción detectando el radio momentáneo de la curva.

La funcionalidad de la tecnología LED brinda la posibilidad de crear sistemas de luz de curva con una mezcla de un sistema dinámico y uno estático, evitando el uso de elementos mecánicos móviles, esto se puede realizar con base en el concepto de uso de 4 canales ópticos los cuales son calculados en la manera de que cada uno de ellos tenga un patrón característico y alcancen una tarea especial en la distribución de la luz.

El canal 1 genera un haz bajo esparcido con alta intensidad en el centro de la distribución, mientras que el canal 2, 3 y 4 esparcen el patrón del haz incrementándolo cada vez más hacia los exteriores del área de distribución de la luz. Usando una estrategia de activación inteligente, basado en el radio momentáneo de la curva y la velocidad actual del vehículo se puede tener los beneficios de lo que se podría llamar un sistema de luz de curva secuencial (figura 2.83).

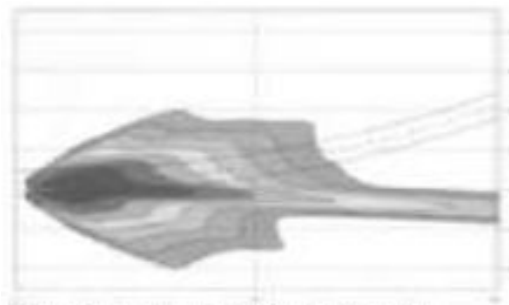


Figure 25. Low beam added with channel 1

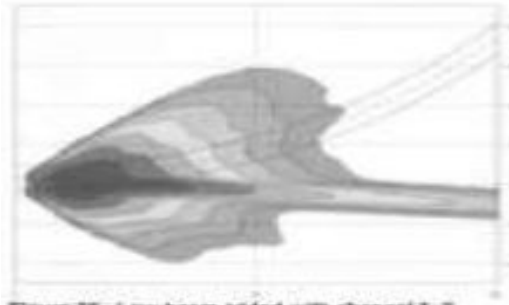


Figure 26. Low beam added with channel 1+2

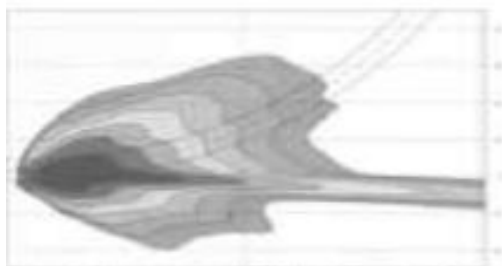


Figure 27. Low beam added with channel 1+2+3

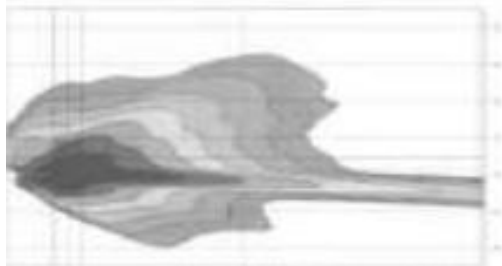


Figure 28. Low beam added with channel 1+2+3+4

Figura 2.83: Patrón de Haz modo curva.

### 2.21.6. Luz Alta libre de deslumbramiento

La tecnología LED es una de las más recientes evoluciones de los proyectores de haz alto libre de deslumbramientos, tan solo por detrás de la nueva tecnología láser. Con el fin de ilustrar los diferentes sistemas existentes basados en tecnología LED con una funcionalidad capaz de evitar deslumbramientos al tráfico y en pleno uso de el modo de luz alta, se muestran a continuación 5 diferentes conceptos:

Multibeam

Dependiendo de la posición horizontal de un escudo interno de rotación horizontal con diferentes formas en la línea de corte, la lámpara va alternando entre un haz bajo, haz de autopista, un haz alto y un haz plano con una zona libre de deslumbramiento y una línea de corte plana. El haz completo rota alrededor de un eje vertical de acuerdo a la posición de los vehículos detectados (figura 2.84).

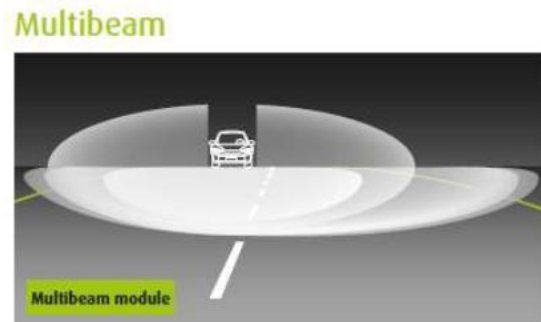


Figura 2.84: Patrón de Haz antideslumbramiento multibeam.

#### Haz de vela

La principal limitación de un sistema adaptativo Xenón es que el haz entero tiene que rotar. Si un vehículo en sentido contrario es rebasado manejando en una curva del lado derecho, por ejemplo, el haz va a ir directamente hacia el lado izquierdo para enmarcar el auto detectado, lo cual reduciría el haz proyectado en la curva.

Para ajustar esto, la versión de haz de vela, empareja los haces de corte estáticos con dos haces simétricos, cada uno proyectado por cada una de las lámparas.

Los haces en forma de vela están por encima del corte y proyectan más de su luz por encima del horizonte. Ellos tienen un corte vertical, son movidos lateralmente y posicionados en cada lado del vehículo detectado (figura 2.85).

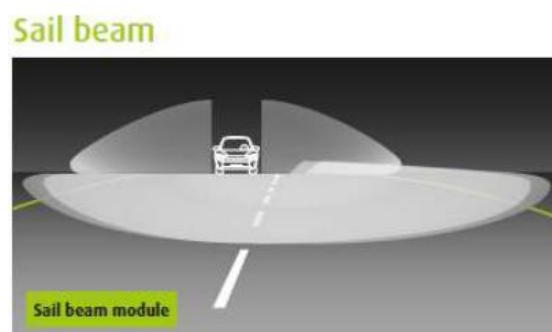


Figura 2.85: Patrón de Haz antideslumbramiento SailBeam.

#### Sombra dinámica

En los sistemas anteriores, el corte vertical del escudo tiene una posición fija dentro del haz. Es necesario entonces rotar el haz para alinear el corte con el vehículo detectado. El módulo de sombra dinámica es equipado con un escudo móvil lateral que puede mover el corte vertical sin mover el haz, produciendo un haz que permanece alineado con el vehículo mientras el área obscurecida

puede moverse tan lejos como sea necesario.

Cuando el escudo está completamente retraído, el haz es un haz de luz alta. Para un haz de luz baja el módulo de luz alta libre de deslumbramiento es emparejado con un módulo de haz bajo separado (figura 2.86).



Figura 2.86: Patrón de Haz antideslumbramiento sombra dinámica.

### Matrix Beam

A pesar de su alta eficiencia, todos los sistemas descritos presentan algunos defectos funcionales. El primero de ellos, hay únicamente un área oscurecida. En el caso de dos o más vehículos detectados, se abarcaría todo el grupo entero de vehículos dejando sin visibilidad el espacio entre ellos. Segundo, la cantidad de luz proyectada por encima del corte, en cada lado del área oscura ya no es la suma del haz derecho y el haz izquierdo, como en un haz convencional, ya que el haz en el lado opuesto es oscurecido.

El sistema de Matriz beam que se remonta a AUDI asigna un chip LED para cada sector del campo para iluminar u oscurecer. El área oscurecida es obtenida por apagar uno o más LEDS, para cada uno de los faros, sin ninguna parte móvil. Esta solución mantiene la salida de luz máxima a través de las áreas no oscurecidas y puede oscurecer muchas áreas diferentes la condición de que el espacio entre dos áreas consecutivas oscurecidas exceda la medida del área elemental (figura 2.87).



Figura 2.87: Patrón de Haz antideslumbramiento matrix beam.

### Iluminación Pixel

Cada una de las áreas iluminadas en un patrón de luz Matrix Beam, puede ser considerado como un macro pixel, producido por la combinación de un LED elemental y una óptica dedicada. El

numero de estos macro pixeles es por lo tanto limitado por el volumen de cada faro.

Para mejorar la resolución, el encendido y apagado de cada pixel debe ser desasociado de la activación y desactivación de un elemento LED, como en un proyector de video el cual la fuente de luz permanece iluminado independientemente de si los pixeles en la imagen proyectada aparecen o no.

Una primera solución considerada es formar el haz a través de una matriz LCD. Contrario con las fuentes de luz Xenón, la ausencia de radiación infrarroja en la luz emitida por los LEDs ofrece la posibilidad de aumentar la fuente de potencia. Estos sistemas de alta resolución van a ser tan efectivos como los sistemas Matrix Beam, pero más precisos(figura 2.88).



Figura 2.88: Patrón de Haz antideslumbramiento Pixel light.

## 2.22. Fuentes de alimentación para sistemas basados en LED

Los nuevos desarrollos en LEDs de potencias han llevado al uso de esta tecnología no solamente en funciones de iluminación dentro del vehículo, tales como la iluminación ambiental y de cortesía, indicadores de alerta dentro del panel de instrumentos, o el panel de instrumentos en si mismo. Los LEDs comenzaron a utilizarse dentro de la iluminación exterior en las luces de freno y las lamparas de señales de giro, actualmente ya son utilizados como fuente principal de iluminación en los faros frontales. A su llegada, una alimentación de 12 volts DC proveniente de la batería del vehículo, no puede suministrar la potencia necesaria directamente.

El LED es un dispositivo controlado típicamente por una fuente de alimentación DC similar a una lampara típica. No se puede alimentar con una corriente alterna pues podría comprometer el estado del dispositivo. El comportamiento de los LED es bastante diferente a las lamparas incandescentes, ya que se trata de un dispositivo electrónico no lineal. El flujo luminoso en el LED es proporcional a la corriente aplicada. Su comportamiento de respuesta es reflejado en una curva de corriente contra voltaje que se muestra en la figura 2.89. En la figura se muestra un área de operación segura, ubicada en el cuadrante superior derecho, cuando el LED opera en esta zona, produce una salida luminosa predecible. Un pequeño incremento en el voltaje de alimentación produce cambios significativos en la corriente del dispositivo. Si el voltaje y la corriente incrementan de manera conjunta, la luz emitida también incrementara. Si la temperatura aumenta demasiado, el LED comenzara a operar de manera incorrecta, y se puede inducir un daño irreversible. Por lo tanto es una tarea crucial controlar el funcionamiento dentro de el área de operación adecuada.

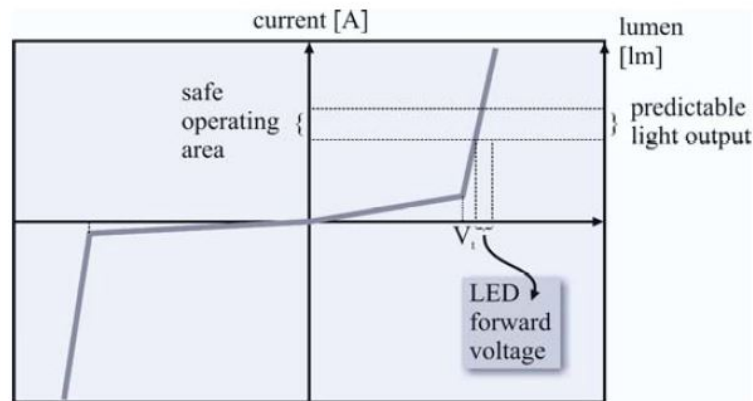


Figura 2.89: Curva de voltaje(V) contra corriente(I) de LED.

La batería de un vehículo puede tener rangos de alimentación de entre 12V y 14V, si el alternador falla puede elevarse hasta 19V. En aplicaciones sencillas, el controlado por una simple conexión de un diodo y una resistencia eléctrica conectados en serie con el LED, tal y como se muestra en la figura 2.90. El valor de la resistencia se elige de manera que la corriente en el LED produzca la suficiente iluminación sin comprometer el estado del dispositivo.

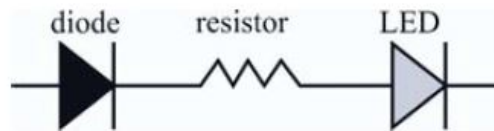


Figura 2.90: Representación de una conexión adecuada para un LED.

La figura ?? muestra la conexión típica para un solo LED, pero esta conexión puede llevarse a cabo en varias conexiones de distintos dispositivos, o para un arreglo de ellos. La inclusión de un diodo previene el paso de voltajes y corrientes inversas, que podrían suceder por una conexión incorrecta de la batería. Una lámpara convencional no sufriría ningún daño, pero como ya se mencionó el LED podría dañarse permanentemente. Para aplicaciones de más de 10W a 60W se pueden utilizar una técnica de modulación de pulso PWM además del arreglo mostrado anteriormente, reguladores lineales, reguladores lineales con PWM y reguladores conmutados. Dentro de los reguladores conmutados se pueden encontrar diferentes topologías que pueden ser utilizadas, tales como un convertidor Buck donde la salida del voltaje es menor que el voltaje de entrada, un convertidor Boost, en el que la salida de voltaje es mayor que el voltaje de entrada. Para LEDs de alta potencia el uso de una fuente conmutada resulta más eficiente, una eficiencia de hasta 75% puede ser alcanzada.

## 2.23. Manejo de AFS mediante PWM

Debido a que el control de la luz en un automóvil generalmente está aislado de la cabina y el voltaje de operación es 12 V, normalmente se utiliza técnica de conmutación para el control de la Luz. Los Faros pueden ser controlados por medio de un transistor MOSFET de canal N, con un manejo de altos niveles de corriente, generalmente por encima de 20 Amperes, esto debido a que las corrientes de los faros suelen estar al rededor de 10A, y algunos pueden exceder los 15A.

Para lograr el control del dispositivo MOSFET, se requiere de un driver capaz de realizar dicho control, un dispositivo que puede encargarse de esta tarea es el dispositivo pre-driver TPS2811. Se

trata de un dispositivo de dos canales para control de transistores MOSFET de alta velocidad, con un regulador interno que hace el circuito mas compacto. La conexión necesaria para el control de la lampara se muestra en la figura 2.91.

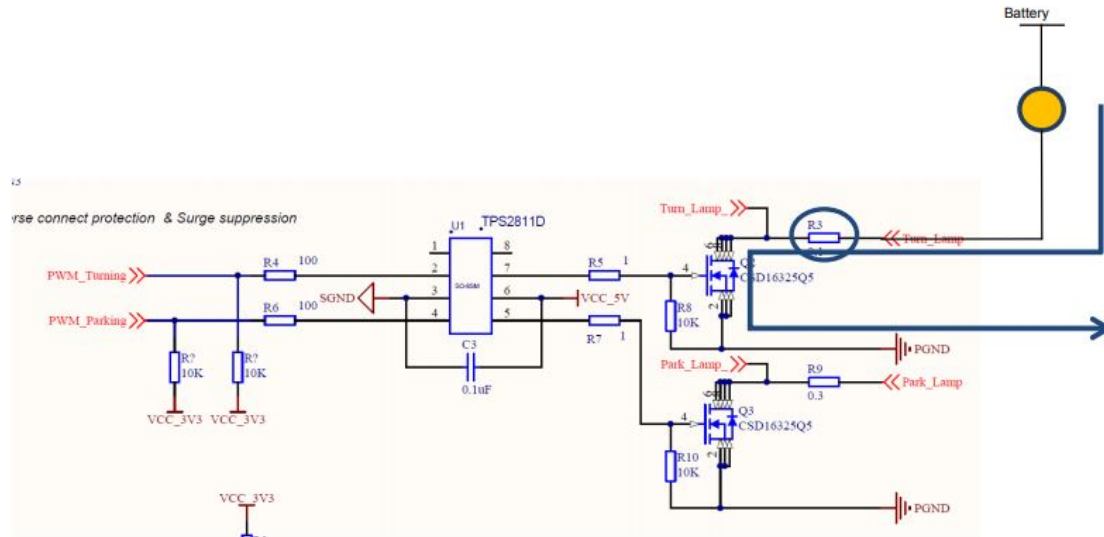


Figura 2.91: Diagrama esquemático de controlador PWM para AFS.

Para controlar la lampara, se genera una señal PWM de 1KHz la cual puede provenir de un dispositivo lm555, o con algun dispositivo temporizador de alta gama y varios canales por ejemplo el dispositivo TSM470MF03107. Para limitar el consumo de la energia, se puede modificar el ciclo de trabajo del PWM a un 60 %. La corriente de operación de las lámparas se monitorea muestreando el voltaje en la derivación de la resistencia. Cuando ocurre un cortocircuito o una desconexión, el controlador AFS puede detectar el problema y operar en consecuencia.

## 2.24. Estado de los sistemas AFS en el mercado mexicano actual

No se tiene un registro oficial de la fecha exacta de la llegada del primer automóvil a México, pero sabe que data del año 1895 con la importación de un modelo Delaunay Belleville fabricado por la empresa S.A. des Automobiles Delaunay-Belleville, construido a mano y traído desde Toulón, Francia, por la Agencia de Ingenieros Basave, Robles Gil y Zoraya.[36]

En ese momento el parque vehicular no solo en la ciudad de México, si no en todo el país, se reducía únicamente a 1 solo vehículo. Fue hasta ocho años después que se tiene una contabilidad mas clara del parque vehicular nacional. Pasaron casi diez años para que en territorio nacional existieran 137 automóviles y para el año de 1906 la cantidad de estos ascendía hasta 800. Al termino de la revolución mexicana y el paso del tiempo, las condiciones de estabilidad política, la creación de la comisión nacional de caminos(CNC) y la constante promoción de una modernización nacional, sentaron las bases idóneas para un adecuado crecimiento de la industria y el mercado automotriz nacional. Para el año 1930 ya existía un automóvil por cada 297 habitantes, relación que fue aumentando cada vez mas, con mayores importaciones y la llegada al país de lineas de ensamble pertenecientes a las marcas Ford y General Motors, para el año 1960 ya se tenía un automóvil por cada 72 habitantes. Debido al incremento en el numero de importaciones de automóviles y el asentamiento de un numero creciente de distribuidores, se creo en 1945 la asociación mexicana de distribuidores de automotores(AMDA), asociación que en la actualidad ya cuenta con mas de 2 mil distribuidores de 42 marcas de vehículos ligeros y pesados. Para mediados de la década de

los ochenta, el gobierno abrió mayores facilidades en la frontera principalmente para la compra de autopartes, situación que está alcanzando su punto máximo como consecuencia del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), en el que paulatinamente a partir de 1994 se fueron reduciendo las tasas arancelarias de algunas partes componentes y de igual forma ha ido disminuyendo la exigencia de contenido nacional mínimo a los fabricantes de la industria terminal ubicados en el país hasta llegar a la total liberalización del sector en 2004, no sólo de las autopartes sino también de los vehículos terminados.[37][38]

En la actualidad no solo podemos encontrar vehículos importados, si no también vehículos que han sido ensamblados en territorio nacional. Lo anterior no implica que el desarrollo tecnológico que da un valor agregado o marca tendencia en los automóviles, sea de origen mexicano. Es así el caso de algunos sistemas avanzados de asistencia al conductor, de sistemas de iluminación avanzados, del diseño de motores o el diseño de sistemas de transmisión con altos desempeños. Hay marcas de vehículos extranjeras que lideran los avances de las tecnologías innovadoras y las mejoras en el desempeño de las existentes. Tal es el caso de los sistemas de faros frontales adaptativos, en los cuales las marcas de origen alemán se han destacado en los desarrollos de estos sistemas, como también en la implementación e introducción de estas tecnologías en el mercado.

Para poder conocer el estado actual de los sistemas de faros frontales adaptativos dentro del mercado mexicano actual, sus tendencias, así como también algunos datos importantes como los países líderes en desarrollo de estos sistemas, se realizó un trabajo de investigación que presentamos a continuación.

Esta investigación del mercado automotriz mexicano tiene un enfoque en los sistemas de iluminación automotriz que se equipan actualmente en los modelos disponibles a la venta en el territorio nacional. La información fue recopilada desde catálogos web en el mes de septiembre del año 2020. Se consideraron únicamente marcas de automóviles que son vendidas mediante distribuidores registrados en la AMDA. Los datos obtenidos se refieren a la venta de vehículos nuevos, considerados venta de agencia. Las cantidades monetarias son expresadas en pesos mexicanos. Se consideraron únicamente automóviles de los segmentos A, B, C, D, E, F (los cuales son clasificados de esa manera debido a las longitudes de sus carrocerías), con carrocerías Sedan, Hatchback, SUV, PickUp, Coupé, Roadsters. No se consideraron las marcas premium exclusivas Ferrari y Lamborghini. Se realizó distinción entre modelos y las versiones existentes para cada modelo. Por último es importante enfatizar que se analizaron 388 modelos pertenecientes a los segmentos y carrocerías contempladas, los cuales están disponibles a la venta.

Comenzaremos analizando las fuentes de iluminación que actualmente se utilizan. De los 388 modelos analizados (contemplando que el equipamiento sea de serie y las versiones más costosas disponibles), 247 ya son equipados con una fuente de iluminación basada en tecnología LED, convirtiendo esta tecnología en la más utilizada en los nuevos modelos, representa un 63.65% el uso de esta tecnología por los ingenieros de diseño en los modelos disponibles. Como la segunda fuente de iluminación más utilizada, se encuentra la tecnología Halógena con 111 modelos disponibles equipados con esta fuente de iluminación, lo que representa un 28.6% de disponibilidad en el mercado. Sorprendentemente, a pesar de sus mejores prestaciones con respecto a la tecnología halógena, se encuentra en un tercer lugar la tecnología HID Xenón con tan solo 27 modelos disponibles a la venta equipados con esta tecnología, representando un 6.9% de la disponibilidad en el mercado. La última generación de desarrollos se basa en iluminación con fuentes de iluminación Láser, en los que actualmente solo 3 modelos de vehículos equipan de serie esta tecnología de iluminación, representando un 0.77% de disponibilidad en el mercado (figura 2.92). Cada marca por supuesto, elige la fuente de iluminación más acorde al segmento y prestaciones de cada uno de sus vehículos, además también de contemplar al público y las necesidades para las que es orientada cada versión de cada uno de los modelos. En la figura 2.93 podemos observar cada tecnología de fuente de iluminación utilizada por cada marca y la cantidad de modelos que la equipan.



Figura 2.92: Fuentes de iluminación en los modelos disponibles del mercado.

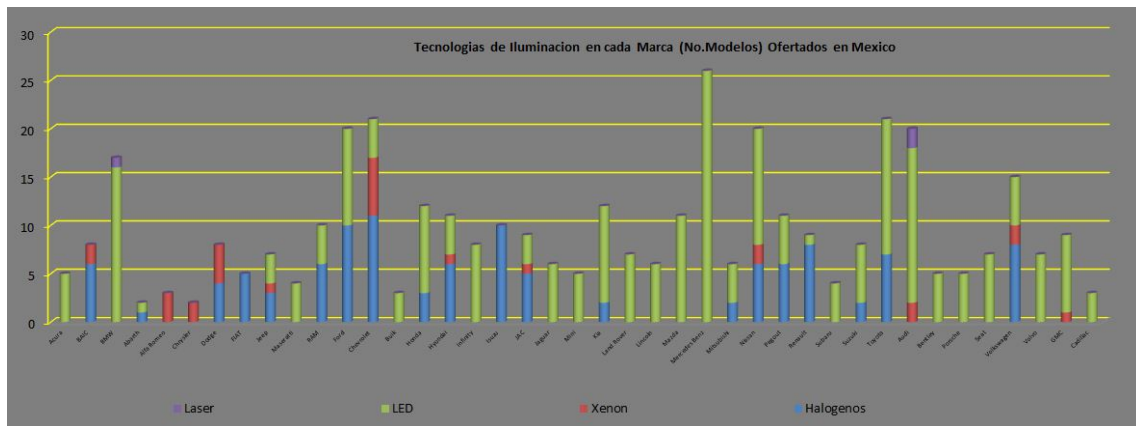


Figura 2.93: Fuentes de iluminación de cada marca utilizadas en los modelos disponibles.

De los 388 modelos disponibles a la venta en el mercado, únicamente 104 modelos tienen la posibilidad contar con un sistema de faros frontales adaptativos, ya sea por equipamiento disponible de serie, o equipamiento opcional (costo extra al correspondiente del modelo y versión del vehículo). Esta cantidad de vehículos representa únicamente el 26.8% de disponibilidad en el mercado (figura 2.94).



Figura 2.94: Disponibilidad de los sistemas AFS en el mercado Mexicano.

De todos los modelos que brindan la posibilidad de tener un sistema de iluminación AFS, la marca alemana AUDI es la que se posiciona como líder de uso de esta tecnología, con 17 modelos disponibles a la venta. El segundo lugar lo tiene la marca inglesa Mercedes-Benz, con 15 modelos disponibles a la venta que tienen la posibilidad de equipar esta tecnología. En el tercer puesto la marca BMW procedente de Alemania, con 13 modelos disponibles a la venta con esta tecnología. Estas son las marcas líderes en disponibilidad y uso de sistemas AFS, como podemos observar en la figura 2.95 aun existen muchas marcas que son muy comerciales y que probablemente representan un gran volumen de ventas en el país, las cuales aun no han implementado un sistema AFS en sus modelos actuales disponibles a la venta.

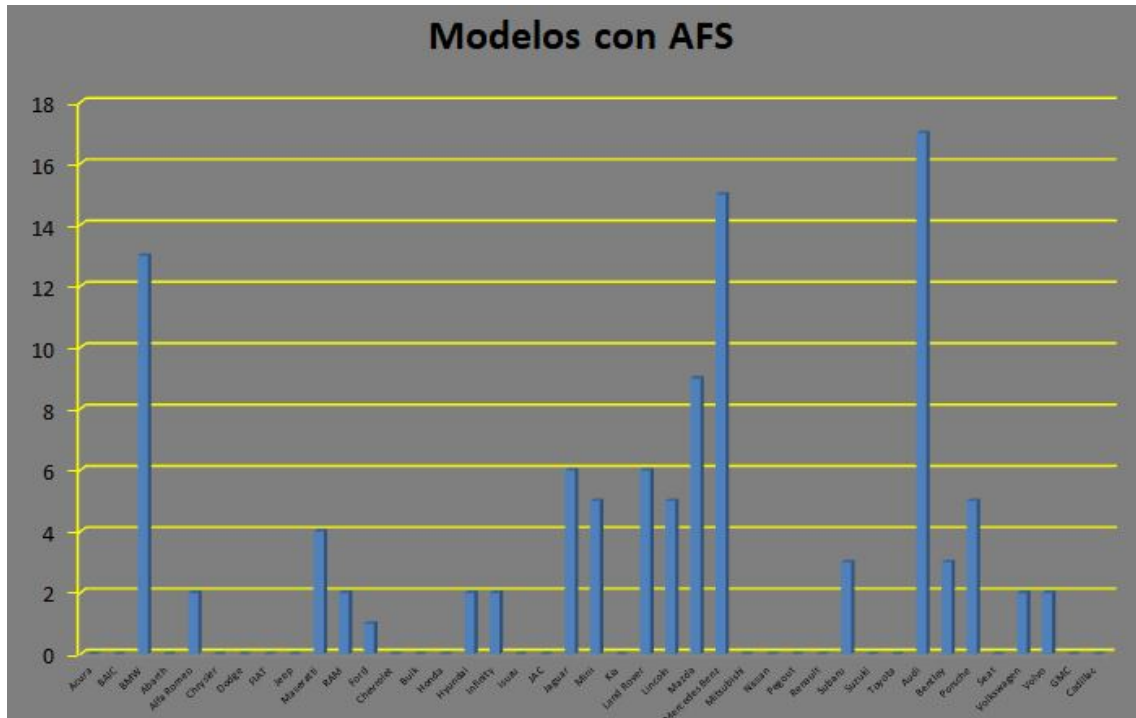


Figura 2.95: Cantidad de modelos equipados con AFS en cada marca.

El modelo mas accesible con un equipamiento AFS es el Mazda MX5 2020, con un precio de \$ 405,900 pesos. Pero es un precio relativamente engañoso, pues se trata de un equipamiento que solo esta disponible en vehículos de alta gamma, con precios que quizá para la mayoría de la población no son tan accesibles aun. El precio promedio de los modelos de vehículos que disponen de la tecnología AFS es de \$ 1,725,454 pesos. En la figura 2.96 se enlistan los 3 modelos mas accesibles que disponen de esta tecnología.

Los 3 modelos mas accesibles con Tecnología AFS		
Mazda	MX5 2020	\$405,900
Mini	cooper 3P	\$413,000
Mazda	CX3 2021	\$414,900

Figura 2.96: Los 3 modelos con sistemas AFS mas accesibles del mercado.



Los países cuyas marcas cuentan con modelos de vehículos que equipan sistemas AFS disponibles en el mercado mexicano se muestran en la figura 2.99. Las marcas alemanas son las que mayor número de modelos con AFS ofertan en nuestro país, ellas ofertan 52 modelos diferentes con la posibilidad de equipar AFS, prácticamente abarcan el 50% de modelos con la disponibilidad de este equipamiento, en segundo lugar se encuentran las marcas provenientes de Inglaterra con 20 modelos con AFS disponibles en distintas versiones, y en tercer lugar las marcas provenientes de Japón con 14 modelos disponibles. Se puede observar un rezago de las marcas estadounidenses en la cantidad de modelos que equipan esta tecnología, lo que puede representar un nicho de posibilidades, pues son marcas con gran volumen de ventas dentro del país.



Figura 2.99: Países cuyas marcas ofertan modelos con AFS en México.

## 2.25. Técnica de simulación Hardware in the loop

Una simulación es una manera de experimentar con un modelo que describe un sistema, por lo tanto dentro de los experimentos el estado del modelo puede experimentar cambios pequeños o radicales, esta manera de experimentación agiliza la manera en que se ejecutan pruebas para sistemas complejos. Cuando se trabaja con sistemas embebidos, la manera más usual y rápida de realizar las pruebas en un diseño para nuestro sistema es alimentándolo con entradas artificiales, las cuales suponen un posible comportamiento esperado de las variables que pretendemos tener a la entrada del sistema, en otras palabras engañamos al sistema. Esta manera de realizar las pruebas puede llevarse a cabo conectando un simple potenciómetro y una fuente de alimentación alambreada hacia la entrada, pero si se trata de un sistema complejo con una gran cantidad de entradas necesarias, realizar estas pruebas se complica, es aquí donde una simulación digital comienza a mostrar algunos de sus muchos beneficios.

Los antecedentes de este método de simulación se remontan a la necesidad de probar la viabilidad de los sistemas y algoritmos, la cual surgió en los ingenieros de control derivado del aumento en las exigencias sobre los tiempos de desarrollo que comenzaron a presentarse en la industria. Los ingenieros de control tenían que evaluar de manera concurrente el diseño de un modelo adecuado y los datos obtenidos en pruebas realizadas utilizando dichos modelos, en muchas ocasiones los datos en las pruebas no eran suficientes, pero eran la mayor cantidad que el tiempo de desarrollo les permitía obtener. Es como se adoptan métodos que agilizaban el desarrollo, sobre todo en modelado y pruebas a motores automotrices, es dentro de estos métodos donde se comienzan a utilizar las pruebas de control en tiempo real[39].

En 1986 dentro de los laboratorios de investigación de General Motors, el departamento de investigación en sistemas de potencia condujo pruebas para la validación del nuevo sistema fuel-injection que desarrollaban en ese momento, el banco de pruebas contemplaba un motor V-6 con puerto secuencial de inyección de combustible naturalmente aspirado al cual se le adaptó a través de una espiga un dinamómetro que imponía la carga de torque, involucrando de esta manera pruebas en tiempo real sobre hardware y la emulación de ciertas condiciones como la carga, surgió el concepto de las simulaciones con hardware acoplado[39]. Para el año 1992 se presentaba una simulación en tiempo real de hardware in the loop para un vehículo[40], en la cual la simulación, las pruebas de modelos y emulaciones de las condiciones bajo las que trabajaba el hardware ya se realizaban en computadora, con acoplamiento al hardware por medio de entradas y salidas en tarjetas especiales, bajo el término Hardware-in-the-loop (HIL) adoptado ya por la comunidad científica[41]. En dicho trabajo, el motor, la transmisión motriz, el vehículo y una superficie de contacto de la llanta y el camino eran descritos a través de modelos, mientras que el hardware de varias unidades de control eran conectadas al sistema.

En la técnica de Hardware-in-the-loop existen dos tipos de simulaciones que generalmente se suelen distinguir:

- Planta simulada conectada a un controlador real
- Planta real conectada a un controlador simulado

En ambas situaciones, más de un modelo físico puede ser conectado y probado en tiempo real, para entender mejor esto podemos exponer cada caso más adelante. De cualquier manera se busca engañar al sistema, haciéndole creer que se trabaja en condiciones reales y con el hardware completamente ensamblado y empotrado. El concepto de HIL es ampliamente utilizado en el sector de la industria automotriz, aeronáutica, e industrias que requieren un desarrollo rápido. El ejemplo más típico de una simulación HIL es el de una conexión entre un ambiente de un vehículo simulado y una ECU (unidad de control) completa, donde dentro de esta configuración la planta es el ambiente y la ECU el controlador.

Múltiples son las razones que llevan al desarrollo utilizando simulaciones mediante HIL, sobre las cuales podemos mencionar algunas de las más sobresalientes. Las pruebas en escenarios críticos, sin llegar a exponer la integridad y en casos extremos la vida de los operadores en dichas pruebas, así como evitar comprometer sustancialmente el hardware elevando los costos de desarrollo. Las pruebas de desarrollo puede alcanzar un alto grado de automatización. Los ambientes virtuales pueden ser fácilmente modificados. Se puede contar con tantas plantas como nos sea posible describir. Los grandes o pequeños cambios en las unidades de control son más fáciles de llevar a cabo. Las pruebas pueden ser repetibles de manera inmediata. Si algunas partes del modelo son demasiado complejas para ser descritas, en cualquier momento es posible conectar internamente en la simulación la parte del hardware real. Es posible reducir el costo y el tiempo de desarrollo.

### 2.25.1. Arquitectura del Hardware in the loop

La arquitectura de un sistema de simulación Hardware-in-the-loop, es bastante flexible, como se mencionó en el apartado anterior, hay dos configuraciones de simulación que más suelen distinguirse, planta simulada conectada con un controlador real y una planta real conectada a un controlador simulado. Además existe la posibilidad de conectar alguna parte del hardware de la planta, en el caso de que el modelo no pueda ser descrito por su complejidad.

En el primer caso, lo más favorable de evaluar es el comportamiento y los resultados del software del algoritmo de control, así como el rendimiento del hardware del controlador físico. El modelo matemático, sus análisis, y las variaciones de valores dentro del modelo, son ejecutados desde una pc, mientras el software de control es empotrado en la unidad de control física, que evaluará las señales emuladas, estas señales provienen del resultado del análisis en el pc, son convertidas en señales analógicas mediante un DAC (Digital-Analog Converter) introducidas al controlador físico, evaluadas y se obtendrá una salida correspondiente, esta señal debe ser nuevamente introducida

hacia el pc para cerrar el lazo de comunicacion, son ingresadas por medio de un ADC (Analog-Digital Converter) (figura 2.100).

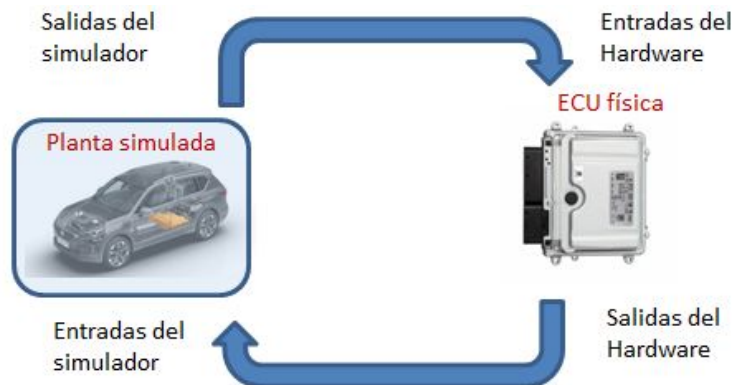


Figura 2.100: Arquitectura HIL con planta simulada.

El segundo caso, en el cual es posible evaluar de mejor manera un nuevo prototipo de hardware de la planta, también es posible evaluar el desempeño de un algoritmo de control a través de los resultados computacionales que se obtienen al evaluar un controlador embebido de manera simulada. La configuración entonces consistiría en contar con el hardware de planta conectado a través de medios acondicionados adecuadamente para la transmisión de datos en un tiempo adecuado, si el hardware de la planta funciona con señales eléctricas analógicas, sus salidas estarán conectadas un ADC (Analog-Digital Converter) que permita ingresar los datos hacia una PC desde la cual el algoritmo de control estará evaluando dichas señales y producirá una respuesta de control necesaria para la situación en la que se presente el sistema, esta señal será pasada por medio de un DAC (Digital-Analog Converter) para ingresar al hardware de la planta y responder al estímulo de la manera en que un actuador lo haría (figura 2.101).

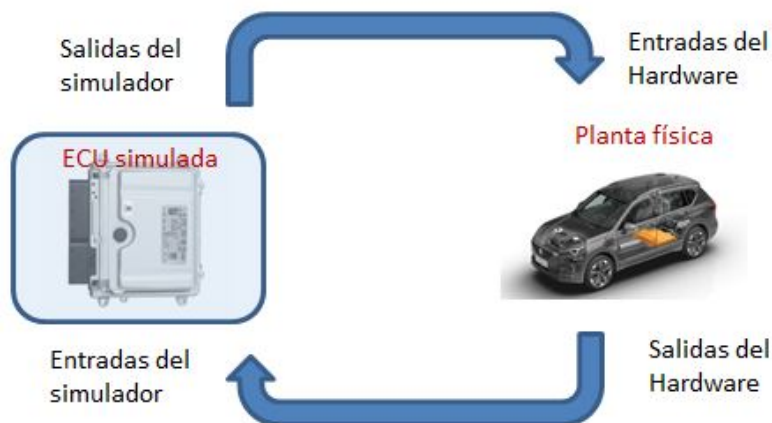


Figura 2.101: Arquitectura HIL con ECU simulada..

### 2.25.2. Digitalización y tasa de iteración

Debido que una gran parte de la simulación en hardware-in-the-loop es evaluada en una computadora los datos deben ser previamente digitalizados a la entrada, para ello se utiliza un dispositivo electrónico llamado ADC, el cual convierte señales eléctricas analógicas a señales eléctricas digitales

que pueden ser comprendidas por la computadora, esta digitalización puede tener diferentes resolución dependiendo directamente del dispositivo ADC que se utiliza, dentro de los mas comunes se encuentran los ADC de 10 bits de resolución y 12 bits de resolución. En esa ocasión no se detallara a fondo el funcionamiento de un ADC, pero si se resaltara la importancia de la resolución de un dispositivo.

Cada dispositivo ADC cuenta con un valor de resolución de conversión dado en bits que representa la cantidad de valores que puede adquirir una señal digital convertida, es decir, si se tiene una señal analógica entrante, al ser convertida en información digital, los valores analógicos serán divididos entre el numero de niveles de conversión permitidos por la resolución del convertidor. Por ejemplo si una señal analógica que oscila entre valores de 0 y 10 volts ingresa a un ADC de 10 bits de resolución, dichos valores de voltaje analógico serán asignados entre  $2^{10}$  (1024) posibles niveles, si por otro lado la resolución del dispositivo es de 12 bits, la cantidad de valores digitales distintos oscilaran entre  $2^{12}$  (4096) datos diferentes, en donde el nivel 0 es asignado al valor de 0 volts y el nivel 4096 es asignado al valor de 10 volts. Cuando se tiene una mayor cantidad de resolución en el dispositivo ADC es posible trabajar con datos de tipo flotante de mayor cantidad de decimales por ejemplo.

Dentro de una simulación HIL es importante contemplar los aspectos de las capacidades del equipo con el que se trabaja, así que una alta resolución en el dispositivo podría o no ser necesaria, todo depende del sistema que se estará trabajando y que tanta precisión se requiera. Además de la resolución del ADC, otro aspecto importante es la velocidad de muestreo con la que puede trabajar nuestro dispositivo conversor, así como también la velocidad con la que se trabajara la simulación es decir, la tasa de iteración.

Se suele pensar de manera errónea que en una simulación HIL la frecuencia con la que trabaja el sistema debe ser de al menos el doble de la frecuencia mas alta de nuestra señal muestreada, esto derivado de lo que dicta teorema de muestreo, pero para nuestro sistema esto es un completo error, ya que, la velocidad de adquisición de datos debe ser lo suficientemente rápida como las iteraciones de los procesos algorítmicos de la simulación. Aun que tiempo estipulado para el termino tiempo real puede ser variable dependiendo del sistema que se evalúa, los expertos siempre recomiendan que la tasa de iteración en la digitalización sea de entre 10 y 5 veces mas rápida que la frecuencia mas grande contenida en la señal.

### 2.25.3. Registro de datos

El propósito de un sistema HIL es verificar el comportamiento de un sistema integrado, y se sabe que el funcionamiento de dicho sistema es correcto cuando las salida sean las esperadas para las entradas que le han sido ingresadas. para poder analizar una cantidad enorme de datos generados en un corto tiempo remarcable la necesidad de un registro de datos. La manera mas utilizada es almacenar los datos de cada una de las entradas y las salidas del sistema al finalizar cada ciclo de iteración. Si la velocidad de almacenamiento compromete la definición del sistema de tiempo real, se puede optar por opciones de almacenamientos tan rápidas como el sistema, para lo cual los discos de almacenamiento de estado solido representan una opción suficiente.

También se debe de contemplar que el almacenamiento de los datos se realice de manera automática, ya sea en una hoja de excel, un archivo de matlab o diferentes posibilidades que permitan un almacenamiento automático. Los software de simulación y desarrollo actualmente cuentan con APIs, las cuales permiten conectar software de diferentes naturalezas de manera mas amigable, por lo que es posible explorar múltiple maneras de llevar a cabo el almacenamiento de los datos.

## 2.26. Técnicas de control para AFS

Dentro de la bibliografía analizada para este trabajo, existieron técnicas de control cuyo uso predominaron dentro de los antecedentes, estas técnicas predominantes fueron 3, no precisamente por

ser las mejores, las mas óptimas o las que obtenían mejores resultados, si no simplemente las mas utilizadas, las cuales se enlistan a continuación:

- Logica Difusa
- Machine Learning
- Control PID

se brindara una breve introducción de cada una de estas técnicas, de las cuales, derivado de sus ventajas, desventajas, oportunidades de implementación y acoplamiento a los fines de este trabajo, se seleccionara una para realizar este trabajo.

### 2.26.1. Lógica difusa

La lógica difusa cada vez adquiere una fama mas grande por la variedad de sus aplicaciones, las cuales van desde el control de complejos procesos industriales, hasta el diseño de dispositivos artificiales controlados de manera automática. Se ha considerado de manera general que el concepto de lógica difusa apareció en 1965, en la Universidad de California en Berkeley, introducido por Lotfi A. Zadeh[42].

Existe mas de un modelo de lógica difusa, por cual es mejor hablar de esta técnica en modo plural, estas lógicas suelen diferir de la lógica clásica por el hecho de que basa sus premisas únicamente en valores de *verdadero* y *falso*, mientras que las lógicas difusas no se limitan a ambos valores tan deterministas, brindan un matiz mas amplio de posibilidades en sus premisas. Una posibilidad que brindan las lógicas difusas es crear aproximaciones matemáticas, en la resolución de ciertos problemas, su finalidad es lograr resultados exactos partiendo de datos imprecisos. Las lógicas difusas han logrado jugar un rol importante de alta relevancia en el procesamiento electrónico de los datos. En determinadas áreas de sus variadas aplicaciones, a sus enunciados se les asocia valores de verdad que son grados de veracidad o falsedad, mucho mas amplios que los valores deterministas “verdadero” y “falso”.

Las lógicas difusas trabajan bajo la teoría tradicional de los conjuntos, desde esa teoría se estudia un elemento y la forma en que este tiene pertenecía a un conjunto de un universo  $U$  establecido. Se tiene el concepto de conjunto como una colección bien definida de elementos, en la que es posible determinar para un objeto cualquiera, en un universo dado, si acaso éste pertenece o no al conjunto. Es posible obtener el grado de pertenencia de un elemento con base en el grado de proporción en la que el elemento posee un atributo, tales proporciones pueden ser complemento, unión, intersección.

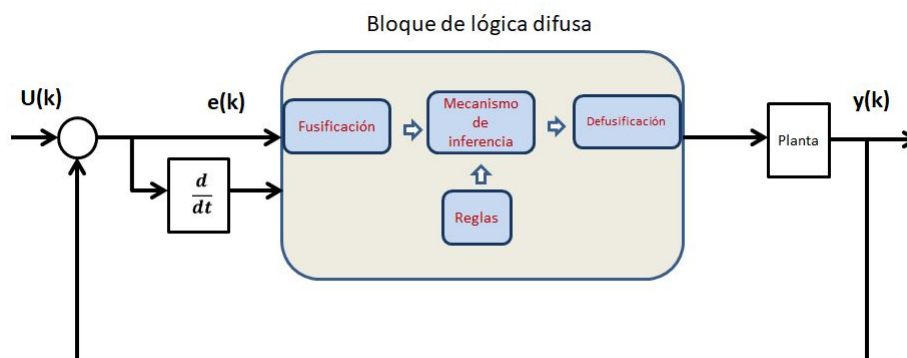


Figura 2.102: Diagrama de control de lazo cerrado con bloque de lógica difusa.

El proceso de realizar un control de lógica difusa puede seguir los siguientes pasos, aun que éstos no se tomen estrictamente como reglas de diseño, si no sugerencia de pasos a seguir. Lo primero es

tener una etapa de fusificación donde los valores de entrada de forma lingüística adquieren valores que el sistema de control puede interpretar. A continuación se establece un universo del discurso, es decir, un rango de valores entre los cuales oscilarán los posibles valores de los parámetros de error y la derivada del error. Se crean o establecen las funciones de pertenencia o membrecías, las cuales definen el grado entre 1 y 0 en las cuales el elemento pertenece a los conjuntos difusos. Es de suma importancia establecer las variables lingüísticas de entrada para el error y la derivada del error, comúnmente se establecen por grados de bajo, medio, alto, por ejemplo, eNG(error negativo grande) eNM(error negativo medio) eNP(error negativo pequeño), eZ(error zero), ePG(error positivo grande) etc. deNG(derivada del error negativo grande) deNM(derivada del error negativo medio) deNP(derivada del error negativo pequeño), deZ(derivada del error zero), dePG( derivada del error positivo grande) etc. Para cada uno de las variables se propone una función de pertenencia con la que el control conocerá si el elemento pertenece a la variable o no. Se establecen variables lingüísticas de salida, como UFNG(salida negativa grande) UFNM(Salida negativa mediana) UFNP(salida negativa pequeña) UFZ( salida cero) UFPG(salida positiva grande) etc. Obtenidas las variables de salida, se establecen las reglas de inferencia, partiendo de una tabla FAM(figura 2.103) la cual involucra todas las posibilidades de combinaciones, estas reglas son del tipo IF-THEN, por ejemplo If (e is eNG) and (de is deNG) then (u is UFNG). Por último llega la etapa de defusificación, en esta etapa se representa por medio de un valor numérico el resultado de los valores arrojados por los grados de pertenencia de las variables de entrada. Se evalúan las reglas de inferencia y se obtiene la respuesta del controlador en términos de cada conjunto de salida. Un diagrama a bloques de un sistema de control de lazo cerrado que contempla un bloque de lógica difusa se muestra de manera simplificada en la figura 2.102.

e/de	deNG	deNM	deNP	deZ	dePP	dePM	dePG
eNG	UFNG	UFNG	UFNG	UFNG	UFNM	UFNP	UFZ
eNM	UFNG	UFNG	UFNG	UFNM	UFNP	UFZ	UFPP
eNP	UFNG	UFNG	UFNM	UFNP	UFZ	UFPP	UFPM
eZ	UFNG	UFNM	UFNP	UFZ	UFPP	UFPM	UFGP
ePP	UFNM	UFNP	UFZ	UFPP	UFPM	UFGP	UFGP
ePM	UFNP	UFZ	UFPP	UFPM	UFGP	UFGP	UFGP
ePP	UFZ	UFPP	UFPM	UFGP	UFGP	UFGP	UFGP

Figura 2.103: Tabla FAM para establecer reglas de inferencia.

### 2.26.2. Machine learning

El aprendizaje automático de máquinas o Machine Learning(ML), se ha convertido en una herramienta eficaz en la solución de problemas, desde reconocimiento de imágenes y voz , diagnóstico médico, ciberseguridad , hasta control autónomo de robots. Todas las actividades anteriores pueden realizarse dentro del ámbito computacional, es decir, empleando sólo computadoras y datos electrónicos. El aprendizaje automático de máquinas (ML) es una herramienta relativamente nueva debido a que la tecnología de las pasadas décadas no permitía su implementación de manera práctica[43]. El machine learning se puede utilizar para dar solución a una extensa variedad de problemas, pero algo completamente fundamental es la posibilidad de dar un acceso de comunicación a la información para su llegada al sistema el cual realizará los cálculos computacionales necesarios para poder entonces llevar a cabo una toma de decisiones adecuadas al estado que se presente en el sistema.

Se han clasificado tres principales variantes del machine learning las cuales son el aprendizaje supervisado, el aprendizaje no supervisado, y el aprendizaje por refuerzo. En el aprendizaje supervisado, se dota al sistema con una base de datos de los cuales se conoce y se ha etiquetado los resultados

correctos, para que sea posible poder evaluar y corregir el desempeño del sistema. En el aprendizaje no supervisado el sistema únicamente recibe la información con la cual genera una clasificación de la información en grupos que tienen coincidencias, generalmente es utilizado en el reconocimiento de patrones. Por último el aprendizaje por refuerzo, en el cual el sistema obtiene experiencia a través de su interacción con el mundo real, se utiliza en tareas de vehículos autónomos, jugadores virtuales de videojuegos, robótica, entre otros.

De manera similar que las lógicas difusas, el machine learning no es un método determinista entre falso y verdadero, asigna cierto grado de veracidad a las premisas que se evalúan y poder redirigirse así en dirección de otro nodo de evaluación, para poder realizar una programación en machine learning entre múltiples opciones existe por ejemplo TensorFlow, una biblioteca de código abierto para cálculo numérico desarrollada en el año 2015 por la compañía Google. La forma en la cual se implementa la programación es mediante grafos, donde cada nodo del grafo representa una operación matemática, que será evaluada mediante métodos numéricos. Cada conexión entre nodos representa conjuntos de datos multidimensionales, también llamados tensores. TensorFlow permite llevar a cabo el diseño de una red neuronal, así como también la posibilidad de realizar el entrenamiento de dicha red. El ejemplo de un grafo realizado en TensorFlow se muestra en la figura 2.104.

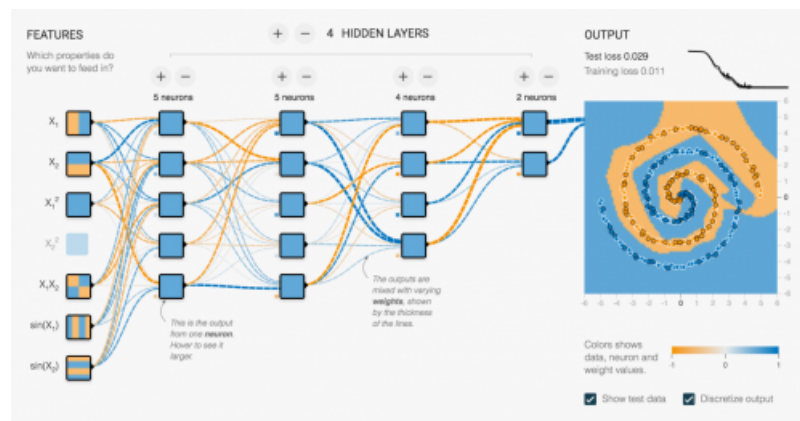


Figura 2.104: Biblioteca de diseño Machine Learning TensorFlow.

## 2.27. Modelos matemáticos para el sistema de simulación

A lo largo del tiempo se han desarrollado diferentes técnicas y principios de simulación, de las cuales su uso depende directamente del dominio del modelado con el cual se obtuvo el modelo sobre el que se realizarán los experimentos. Estos dominios se pueden clasificar en 3 tipos diferentes[39]:

- DESS (Differential Equation System Specification) - Continuos en el tiempo y en valores.
- DTTS (Discrete Time System Specification) - Sistemas de tiempo discreto.
- DEVS (Discrete Event Systems Specification) - Visto como una versión mas general de los DTTS.

Una simulación DESS, considerada como una simulación continua, en la cual los valores y el tiempo también son continuos, trabaja con un modelo el cual esta cambiando continuamente. Generalmente suelen utilizarse modelos basados en ecuaciones diferenciales, las cuales se resuelven con integraciones numéricas. En realidad la simulación es considerada cuasi-continua, debido a la solución numérica que brinda la computadora, ya que para obtener dicha solución, el sistema adapta los pasos de tiempo para resolver de manera adecuada la ecuación diferencial, recordando que esto es causado por las soluciones no exactas de los algoritmos numéricos. En simuladores cuasi-continuos como Simulink de MATLAB, la solución numérica puede ser elegida por el usuario, existen varios

métodos como el single-step o el multiple-step, pero se debe tener en cuenta que la precisión del método, depende de su orden y a su vez, un alto orden demanda mayor consumo de recursos computacionales para los cálculos.

## 2.28. Motor Gráfico Unreal Engine

Un buen sistema de simulación se caracteriza por contar con una interfaz gráfica que permita al usuario u operador obtener una buena interpretación de datos de manera gráfica, ya sea presentando animaciones, gráficas o modelos 3D, o como lo fue para nuestro trabajo, un entorno virtual que representa un plano en el espacio imaginado, capaz de recrear espacios con características del mundo real, entre otros. Para poder realizar esto, es necesario el uso de software que nos permita realizar representaciones gráficas que nosotros busquemos, por lo que un motor de videojuegos es apto para realizar parte de nuestro trabajo, seleccionamos el motor Unreal Engine 4, en su versión, 4.23 con base en las características y prestaciones que se describen a continuación.

Unreal Engine es un poderoso motor de videojuegos y editor de ellos, desarrollado por la compañía Epic Games para crear juegos para consolas, PCs y aplicaciones móviles. Con un editor capaz de ser ejecutado en entornos de Windows, Mac, Playstation 4, Xbox One, IOS, Android, y plataformas de Linux. Permite la creación de gráficos en 2D y 3D, con un estilo de edición de estos gráficos, similar a entornos CAD, con la posibilidad de realizar programación de funciones y actores con un lenguaje de programación propio que funciona bajo un ambiente de scripts visuales tal y como lo hacen algunos de los lenguajes de programación por bloques. Es un software completamente gratuito para su uso, hasta que el videojuego, aplicación o contenido sea lanzado o genere remuneraciones. Una vez que sucede esto, se debe realizar el pago del 5 por ciento de las ganancias que se generen. Fue pensado de esta manera por Epic Games para facilitar el acceso de esta herramienta por parte de una gran cantidad de desarrolladores, pensando en que no siempre se cuentan con los recursos suficientes.[44]

Para poder desarrollar entornos virtuales, con esta poderosa herramienta se deben entender conceptos como el tipo de coordenadas con las que trabajas, algunas transformaciones, las unidades y su organización, para entonces poder dar paso a elementos que se pueden ir adhiriendo al entorno a desarrollarse. Estos elementos gráficos editables, pueden clasificarse en actores, dinámicos y estáticos, que son elementos dentro del juego que tienen la capacidad de sufrir algunas interacciones de su entorno capaces de modificar su características físicas. También existen los elementos de malla estática, que suelen ser identificados como elementos primarios que pueden tomar parte del paisaje, tal como arbustos, suelo, objetos, pavimento, algún material de recubrimiento, etcétera. Los Level Blueprints, que son funciones y/o características programables tanto para los elementos como para capas del videojuego, con las cuales se puede hacer cierta analogía con algo similar a lo que podrían ser las funciones en otros lenguajes de programación, o las clases en los lenguajes de programación orientados a objetos, en otras palabras los Level Blueprints son la vía por la cual los elementos pueden tener unas funciones y características mas detalladas mediante código de programación. Cada Actor o elemento de malla, puede ser editado en múltiples características propias del elemento, tales como las características de apariencia, propiedades de interacción física, entre otras mas.

Una edición gráfica a con un nivel de detalle avanzado no es posible dentro del entorno de UE4, para un diseño gráfico detallado se deben utilizar otras herramientas mas avanzadas que puedan generar archivos compatibles con este software. Algunas de las extensiones mas comunes compatibles con UE4 son los archivos .FBX .PNG .JPGE .PSK .TFC .DTX1 .DTX5 .TGA, entre otros.



Figura 2.105: UE4 Logotipo.

## Capítulo 3

# Desarrollo

*En este capítulo se presenta el desarrollo y la metodología del presente trabajo, cada una de las actividades realizadas con el fin de lograr un adecuado cumplimiento de los objetivos. Se describen a detalle las tareas realizadas con la finalidad de ofrecer un completo entendimiento del desarrollo gradual del sistema de simulación, partiendo desde su planteamiento en función de un correcto desempeño del sistema, hasta culminar en su labor dentro de la integración del sistema completo.*

### 3.1. Selección de dispositivos para el sistema

Comenzamos seleccionando una fuente de iluminación adecuada, gracias al estudio realizado en el mercado actual, podemos identificar las tendencias actuales. Basados en lo anterior y debido a que es necesario basar la fuente de iluminación en dispositivos que estén disponibles a la venta, con un costo razonable para poder desarrollar el sistema sin que represente un gran gasto, se decidió elegir la tecnología LED, como fuente de iluminación para el sistema.

El dispositivo LED seleccionado debe cumplir con algunos requisitos mínimos que se establecen con el fin de lograr un desempeño óptimo, dentro de los cuales se enlistan a continuación:

Característica	Valor mínimo	Valor máximo
Empaquetado SMD	-	-
Voltaje de operación	2.7V	3.5V
Potencia	0.1W	0.3W
Corriente	20mA	500mA
Flujo luminoso	25lm	-
Temperatura de color	5000K	6500K

Cuadro 3.1: Características mínimas para la fuente de iluminación

La búsqueda se realizó enfocados en las características mencionadas, esto nos dirigió hacia los LED de potencia con alta eficiencia, dentro de los cuales pudimos encontrar la serie J, la cual combina alta eficiencia y excelentes valores de desempeño, optimizados para aplicaciones de iluminación en donde se debe tener alta eficiencia y una luz uniforme, con un costo accesible por cada unidad. Algunas de las características de funcionamiento de esta serie se muestran en la figura 3.1.

Product	Power Class	Test Temperature	Test Current	Typical Forward Voltage	5000 K, 70 CRI		4000 K, 80 CRI		Maximum Current
					Typical Flux	Typical Efficacy	Typical Flux	Typical Efficacy	
JB5630 3-V Standard	0.2 W	25 °C	65 mA	2.8 V	37.5 lm	206 LPW	36.4 lm	200 LPW	240 mA
JB5630 3-V High Efficacy	0.2 W	25 °C	65 mA	2.71 V	38.3 lm	217 LPW	36.8 lm	209 LPW	240 mA

Figura 3.1: Características principales de LEDs de la serie J.

Se eligió un dispositivo de montaje superficial (figura 3.2), de la serie J 5630, las siguientes características:



Figura 3.2: LED de la serie J 5630 SMD.

Características J 5630 series	Valor mínimo	Valor máximo
Empaquetado SMD	-	-
Voltaje de operación	2.8V	3V
Potencia	0.2W	-
Corriente	65mA	240mA
Flujo luminoso	34lm	-
Temperatura de color	5700K	-

Cuadro 3.2: Características del LED serie J 5630

Posteriormente seleccionamos los dispositivos necesarios para realizar un controlador adecuado de la fuente iluminación mediante una técnica de PWM por lo que necesitamos 3 dispositivos fundamentales, transistor MOSFET , LED driver y generadores de pulsos PWM. Para esto se ha seleccionado un un transistor MOSFET de baja potencia y mejorado como solución a tareas de un High-side Switch, la gestión necesaria en la selección de canales no es de alta frecuencia de operación, por lo cual el dispositivo TPS1101 es un dispositivo adecuado. Siendo este un dispositivo MOSFET de canal P, el cual ha sido diseñado para minimizar la pérdida de potencia y tiene un buen rendimiento para aplicaciones de High-side Switch, con un voltaje en el canal máximo de -1.5V, una duración de pulso menor de  $300\mu\text{s}$  para un ciclo de trabajo de 2%. Algunas de las características de este dispositivo de se muestran en la figura 3.3.

PARAMETER	TEST CONDITIONS	TPS1101			TPS1101Y			UNIT
		MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
$V_{GS(th)}$ Gate-to-source threshold voltage	$V_{DS} = V_{GS}$ , $I_D = -250\mu\text{A}$	-1	-1.25	-1.5	-1.25			V
$V_{SD}$ Source-to-drain voltage (diode-forward voltage)†	$I_S = -1\text{A}$ , $V_{GS} = 0\text{V}$		-1.04		-1.04			V
$I_{GSS}$ Reverse gate current, drain short circuited to source	$V_{DS} = 0\text{V}$ , $V_{GS} = -12\text{V}$			$\pm 100$				nA
$I_{DSS}$ Zero-gate-voltage drain current	$V_{DS} = -12\text{V}$ , $V_{GS} = 0\text{V}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$			-0.5			$\mu\text{A}$
		$T_J = 125^\circ\text{C}$			-10			
$r_{DS(on)}$ Static drain-to-source on-state resistance†	$V_{GS} = -10\text{V}$	$I_D = -2.5\text{A}$		90		90	m $\Omega$	
	$V_{GS} = -4.5\text{V}$	$I_D = -1.5\text{A}$		134	190	134		
	$V_{GS} = -3\text{V}$	$I_D = -0.5\text{A}$		198	310	198		
	$V_{GS} = -2.7\text{V}$			232	400	232		
$g_{fs}$ Forward transconductance†	$V_{DS} = -10\text{V}$ , $I_D = -2\text{A}$		4.3		4.3		S	

Figura 3.3: Características y valores absolutos de transistor MOSFET TPS1101 .

De igual manera se selecciono un dispositivo LED driver, encargado de regular la corriente y el voltaje para los dispositivos LED, el cual puede tolerar corrientes picos de hasta 2A, ya sea a una alta velocidad de conmutación propuesta por un PWM externo al dispositivo o en actividad constante y fija si así se prefiere. El dispositivo seleccionado fue el LM3409(figura 3.4), el cual dentro de sus características de desempeño es que puede controlar hasta 10 dispositivos LED en su canal de salida con una corriente maxima de 2 Amperes, y una alimentación de voltaje entre 6V y hasta 42V, cuando se configura un footprint para este dispositivo es importante contemplar que cuenta con un thermal pad debajo del empaquetado, lo anterior con el fin de disipar las altas temperaturas que puede generar durante la gestión de los LED, sin que estas llegasen a comprometer el estado del dispositivo. Algunas funciones de las terminales de este dispositivo se muestran en la figura 3.4.

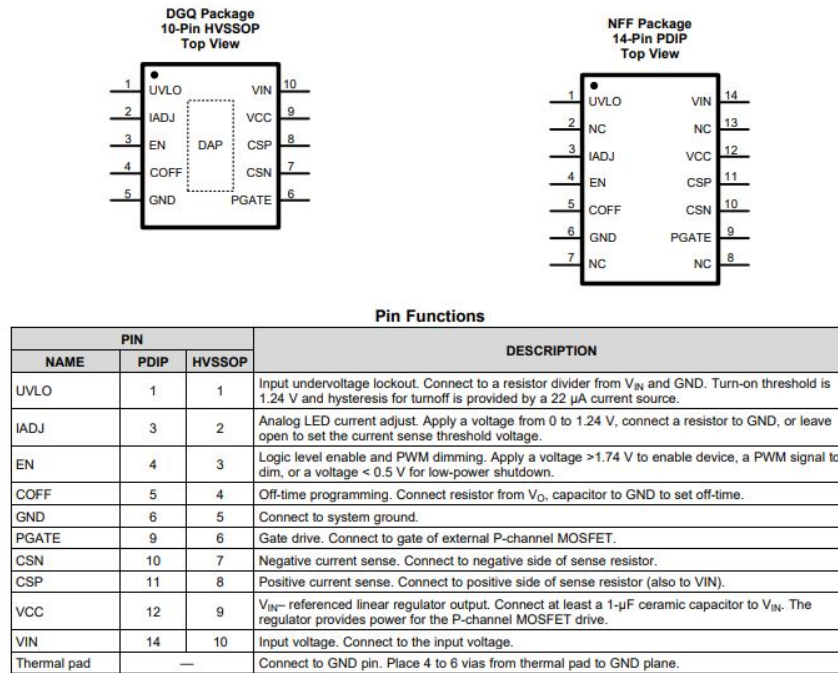


Figura 3.4: Funciones de las terminales del dispositivo LM3409.

Como generador de pulsos seleccionamos un dispositivo TL5001 capaz de generar una modulación de ancho de pulso con frecuencias desde 20 KHz hasta 500 KHz y que puede encontrarse en empaquetado de montaje superficial SMD, tolera una alimentación de hasta 40V de operación, capaz de realizar un control sobre su ciclo de trabajo en hasta el 99 %, dicho ciclo de trabajo es controlado mediante la configuración de un resistor en conjunto con un capacitor, las condiciones de funcionamiento sugeridas de este dispositivo se muestra en la figura 3.5.

recommended operating conditions			
	MIN	MAX	UNIT
Supply voltage, $V_{CC}$	3.6	40	V
Amplifier input voltage, $V_{I(FB)}$	0	1.5	V
Output voltage, $V_{O, OUT}$		50	V
Output current, $I_{O, OUT}$		20	mA
COMP source current		45	$\mu$ A
COMP dc load resistance	100		k $\Omega$
Oscillator timing resistor, $R_t$	15	250	k $\Omega$
Oscillator frequency, $f_{osc}$	20	500	kHz
Operating ambient temperature, $T_A$	TL5001C, TL5001AC	-20	85
	TL5001I, TL5001AI	-40	85
	TL5001Q, TL5001AQ	-40	125
	TL5001M, TL5001AM	-55	125

Figura 3.5: Condiciones de Funcionamiento Sugeridas para el dispositivo TL5001.

Posterior a la selección de dispositivos relacionados con la fuente de iluminación debemos seleccionar los actuadores con los cuales se podría generar el movimiento del faro y poder crear la línea de corte necesaria para la iluminación. Para lo cual se seleccionaron motores a pasos Nema17 KS42STH34-1504A los cuales dentro de sus especificaciones tienen las características que se muestran en la tabla 3.3.

Característica	Valor	Unidades
Ángulo de paso	1.8	grados
Voltaje de operación	12	VDC
torque	3.4	Kg-cm
Corriente	1500	mA
Resistencia	2.2	Ohm

Cuadro 3.3: Características de motor a pasos Nema17 KS42STH34-1504A.

Para poder controlar este motor, es necesario un driver, el driver seleccionado para ajustarse de manera correcta a este trabajo fue el driver DRV8823, el cual dentro de sus características tiene las siguientes: puede controlar motores a pasos con voltajes de operación desde 8 V a 45 V, bajo un control lógico con voltajes TTL, la corriente de salida para cada bobina es de 1.5 A o hasta 2.5 A con ventilación, tiene una resolución desde 1/2 paso hasta 1/32 paso. El diagrama esquemático simplificado de este dispositivo se muestra en la figura 3.6.

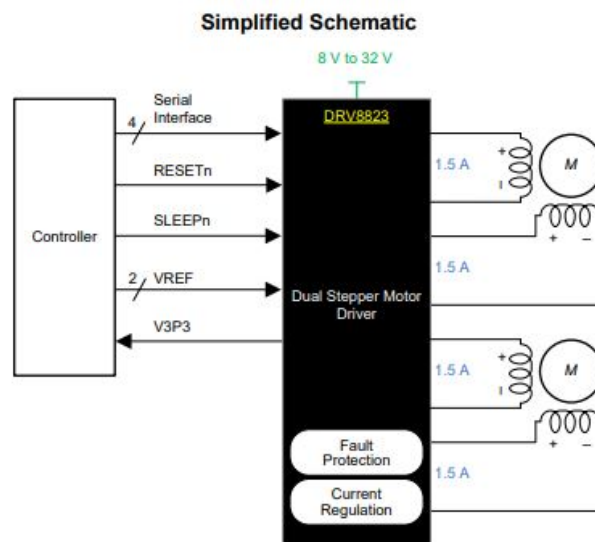


Figura 3.6: Diagrama simplificado de DRV8823.

## 3.2. Determinación de grados de libertad para la unidad AFS

Una tarea de primordial importancia es la determinación de los grados que deberá moverse el haz del faro tanto en movimiento horizontal como vertical, para cada clase de haz y las diferentes situaciones de conducción que pudieran presentarse. De igual manera debemos determinar los rangos de velocidades en los que serán ajustados los las diferentes clases de haz. La corriente y el voltaje que se suministran a los módulos LED pueden hacer variar la intensidad luminosa del faro, bajo un esquema de control de la intensidad luminosa por medio de PWM es importante saber la cantidad de luxes necesarios en cada situación de manejo.

### 3.2.1. Modos de Iluminación

#### Modo clase V

En este modo de manejo se producirá una disminución gradual de la anchura del patrón del haz, conforme la velocidad del vehículo aumente. Se puede pensar como el modo de haz más dinámico en su expansión horizontal, puesto que contempla 3 rangos de velocidad distintos, en los cuales el haz va adquiriendo disminuyendo el volumen de ensanchamiento. También es el primer modo de haz luminoso con el que se encontraría el conductor al comenzar a conducir el automóvil desde una velocidad de 0 Km/h.

Bajo lo estipulado en las normas ECE para la iluminación frontal, determinamos que serán 3 los rangos de velocidad dentro de este modo, en todos los rangos de esta clase se mantendrán siempre 60 luxes de iluminancia en el centro del haz, el primer rango de velocidad con el que actuara el modo clase V comenzara desde los 0 Km/h y hasta alcanzar los 30 km/h, en donde el centro del haz producido por el faro izquierdo se ubicará a  $-9^\circ$  de la línea V y el centro del haz del faro derecho se posicionará a  $6^\circ$  de la línea V, la inclinación del haz con respecto a la línea horizontal H para la línea de corte, se ubicará a  $-0.57^\circ$  por debajo de la línea H. Dentro de esta clase V, la línea de corte siempre estará proyectada a  $-0.57^\circ$  de inclinación por debajo de la línea H.

Establecida la altura de la línea de corte para cualquier rango de velocidad perteneciente a este modo, procedemos a definir las características de orientación del haz luminoso para el segundo rango, el cual está contemplado entre los 31 km/h de velocidad y los 40 km/h. El faro izquierdo tendrá una orientación de  $-7^\circ$  hacia la izquierda de la línea V, y el faro derecho mantendrá la orientación de  $5^\circ$  a la derecha de la línea V. En un tercer rango que se contempla entre los 41 km/h y los 50 km/h de velocidad, el faro izquierdo tendrá una orientación de  $-6^\circ$  a la izquierda de la línea V, el faro derecho estará orientado a  $5^\circ$  por el lado derecho de la línea V. A continuación se muestra una tabla en donde se clasificó las necesidades de este modo de iluminación y son proporcionados de manera que pueden ser dibujados dentro de una carta fotométrica con línea horizontal H como eje central o de  $0^\circ$  y línea vertical V como eje central o de  $0^\circ$ , también se muestra la figura 3.7 en la cual se da un ejemplo gráfico de la orientación de este patrón de haz luminoso, tomando el último rango de velocidad para efecto.

Modo de haz luminoso	Giro al extremo Izq en eje H ( $^\circ$ )	Giro al extremo Der. en eje H ( $^\circ$ )	Giro al extremo inferior en eje V ( $^\circ$ )	Rango de Vel. en Km/h
Clase V	- 9	6	-0.57	0, <30
Clase V	- 7	5	-0.57	>31, <40
Clase V	- 6	5	-0.57	>41, <50

Cuadro 3.4: Grados de dispersión en eje horizontal y eje vertical para clase de iluminación V.

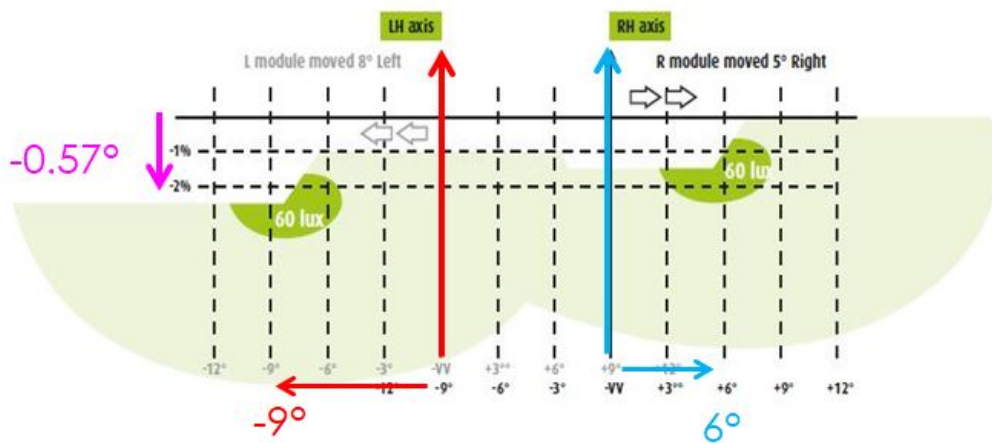


Figura 3.7: Desplazamientos en gráfica del haz luminoso para el 1er rango de velocidad en el modo clase V.

### Modo clase C

Este modo de iluminación frontal solo contempla un único rango de velocidad en el cual actúa, el cual se encuentra después de los 51 km/h y antes de los 70 km/h. Dentro de este modo clase C la orientación del centro del haz en el faro izquierdo se encuentra a 0° del lado izquierdo de la línea V del eje V izquierdo y a -9° de distancia con respecto al eje V del faro derecho. Para el faro derecho se ubicara el centro del haz a 0° sobre el centro de su línea V de eje derecho y a +9° de distancia correspondientes al eje V del faro izquierdo. Con estas orientaciones se produce un haz luminoso mas amplio en el rango de los 25 metros de distancia. De igual manera se ajusta la altura para la línea de corte a -0.54° por debajo de la línea H, lo cual permite que el haz luminoso se levante un poco mas que en el modo clase V, permitiendo un mayor rango de alcance, sin deslumbrar al trafico en sentido contrario, este modo siempre contempla una iluminancia de 60 luxes en el centro del haz.

A continuación se muestra una tabla en donde se a clasificado las necesidades de este modo de iluminación, también de muestra la figura 3.8 que ayuda a ilustrar de manera mas gráfica la orientación que se ha determinado del haz luminoso de cada faro en esta clase C.

Modo de haz luminoso	Giro al extremo Izq en eje H (°)	Giro al extremo Der. en eje H (°)	Giro al extremo inferior en eje V (°)	Rango de Vel. en Km/h
Clase C	- 9	9	-0.54	>51,<70

Cuadro 3.5: Grados de dispersión en eje horizontal y eje vertical para clase de iluminación C.

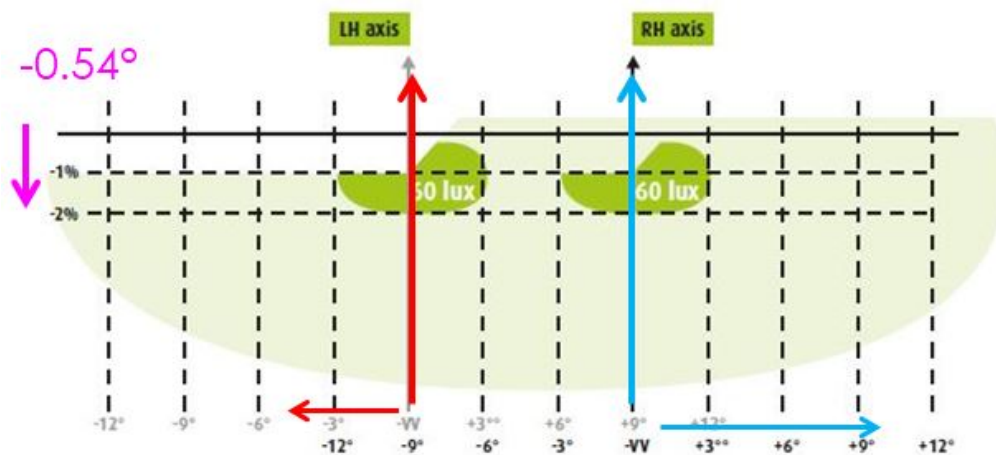


Figura 3.8: Desplazamientos en gráfica del haz luminoso para el modo clase C.

### Modo clase E

En esta clase se contemplan 4 rangos de velocidades distintos, en donde la ubicación del centro del haz con respecto a un eje vertical no se modificara de alguna medida de grados, permanecerá constante dentro de los cuatro distintos rangos, lo que se verá modificado es la orientación en inclinación con respecto a un eje horizontal. Aumenta la iluminancia en esta clase, la cual sera de 120 luxes en el centro del haz, para todos los rangos de velocidad contemplados en este modo, de esta manera es posible brindar un mayor alcance. La ubicación del haz a partir de los ejes verticales de cada faro, se mantiene de la misma manera que en el modo anterior, a  $-9^\circ$  del eje V derecho para el centro del haz proveniente del faro izquierdo y a  $9^\circ$  del eje V izquierdo para el centro del haz proveniente del faro derecho.

Para el primer rango de velocidad que esta contemplado entre los 71 Km/h y los 80 Km/h la inclinación de la línea de corte del haz luminoso con respecto al eje H será de  $-0.54^\circ$ . Un segundo rango de velocidad contemplado entre los 81 Km/h y los 99 Km/h tendrá una inclinación de la línea de corte menor correspondiente a  $-0.45^\circ$  con respecto al eje H. El tercer rango de velocidad contemplado entre los 100Km/h y los 119 Km/h, deberá tener una inclinación para la línea de corte de  $-0.34^\circ$  con respecto al eje H. Finalizando con un cuarto rango que comprende velocidades superiores a los 120 Km/h en donde se alcanza la inclinación mínima de la línea de corte del haz luminoso, ubicada a solo  $-0.24^\circ$  por debajo de la línea H.

De esta manera se logra un aumento gradual del alcance de la iluminación, la cual va siendo requerida a mayor distancia conforme la velocidad del vehículo aumenta, a continuación se muestra una tabla en donde se a clasificado las necesidades de este modo de iluminación, también de muestra la figura 3.9 que ayuda a ilustrar de manera mas gráfica la orientación que se ha determinado del haz luminoso de cada faro en esta clase E.

Modo de haz luminoso	Giro al extremo Izq en eje H (°)	Giro al extremo Der. en eje H (°)	Giro al extremo inferior en eje V (°)	Rango de Vel. en Km/h
Clase E	- 9	9	-0.54	>71,<80
Clase E	- 9	9	-0.45	>81,<99
Clase E	- 9	9	-0.36	>100,<119
Clase E	- 9	9	-0.24	>120

Cuadro 3.6: Grados de dispersión en eje horizontal y eje vertical para clase de iluminación E.

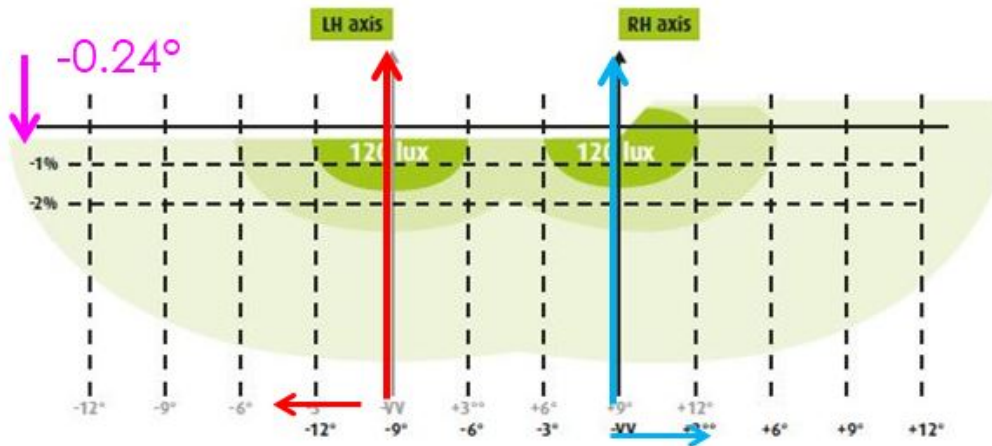


Figura 3.9: Ejemplo de desplazamientos en gráfica del haz luminoso para el modo clase E en su ultimo rango de velocidad.

### 3.2.2. Modo iluminación dinámica de curva

Para poder generar una estrategia de iluminación curva, es necesario tener un hardware adecuado que permita el desplazamiento del haz en el momento en el que se gire el volante y el sistema detecte dicho giro, este hardware estará conformado entre otros elementos por los servomotores que orientaran el giro en el eje horizontal (Swiveling) y la inclinación en el eje vertical (Leveling).

Siguiendo los lineamientos del reglamento europeo, se determina que dentro de este modo de iluminación curva únicamente se puede girar a la vez uno de los dos faros, pero no ambos. Esto significa que cuando el automóvil gire a la izquierda, únicamente el faro izquierdo podrá rotar horizontalmente sobre un eje vertical (Swiveling movement), mientras que el faro derecho permanecerá fijo. De manera similar sucederá en el giro al lado derecho, donde el faro derecho tendrá el giro la posibilidad de girar, mientras el faro izquierdo permanece estático, esto se representa en la figura 3.10, donde podemos observar que para cada sentido de giro, únicamente un faro es el que tiene la posibilidad de tener rotación.

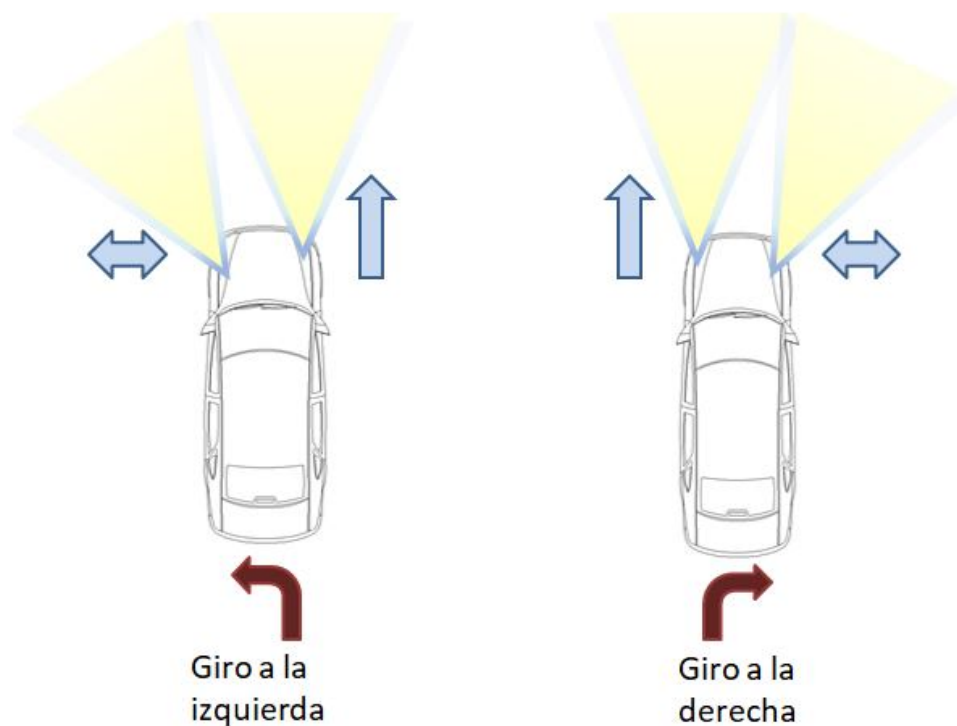


Figura 3.10: Movimiento rotacional de faro izquierdo o derecho en iluminación dinámica de curva, donde únicamente uno de los dos faros adopta el movimiento.

De igual manera la regulación nos indica que durante el modo de iluminación de curva no se debe hacer una mezcla entre las características del modo de iluminación previo a la curva y las de un modo de iluminación curva. Este modo de iluminación deberá permanecer con las características del haz neutral o también llamado el modo clase C, sumando las características del movimiento rotacional. Para generar nuestra estrategia de iluminación curva, nos basamos en la generación de 4 canales de iluminación en donde cada uno de ellos está compuesto por 10 leds, cada canal es regulado en nivel de intensidad de iluminación variando la cantidad de corriente y voltaje que alimenta a los dispositivos leds. La mejor manera de regular voltaje y corriente es mediante una estrategia PWM que permite salvaguardar la integridad de los dispositivos permitiendo que operen en intervalos de tiempo tan pequeños que parecen continuos, así como también brinda la posibilidad de modificar la intensidad de iluminación, modificando únicamente el ciclo de trabajo.

Durante este modo de iluminación los dispositivos led deberán iluminar en las cantidades de luxes distintas para cada canal, de manera que para la vuelta hacia el lado izquierdo el faro adopta las características que se muestran en la figura 3.11, de igual manera para una vuelta al lado derecho los dispositivos led deben asumir las características de iluminación que se muestran en la figura 3.12. Todo esto como ya se menciona, a partir de 3 ciclos de trabajo PWM distintos para cada uno de los canales. La figura 3.13 nos muestra una vista general para ambos sentidos de giro, donde se puede apreciar de manera más clara la atenuación en los Leds propios de cada uno de los faros, es entonces como bajo la estrategia de canales se lleva a cabo la correcta atenuación para evitar deslumbramiento al tráfico en sentido contrario al entrar en un modo de iluminación dinámica de curva.

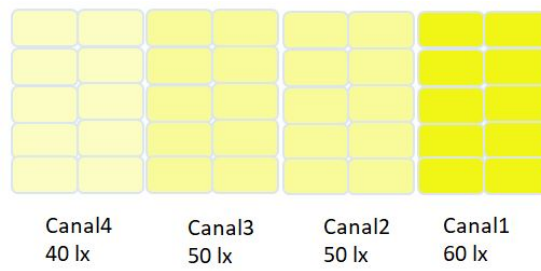


Figura 3.11: Distribución de la iluminación en los 4 canales del faro izquierdo para la iluminación de curva.

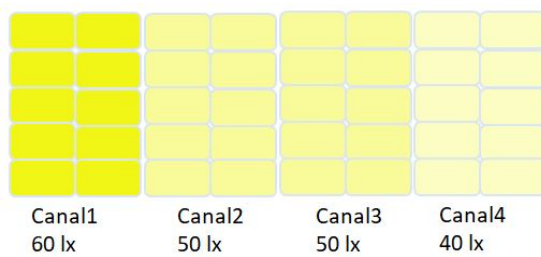


Figura 3.12: Distribución de la iluminación en los 4 canales del faro derecho para la iluminación de curva.

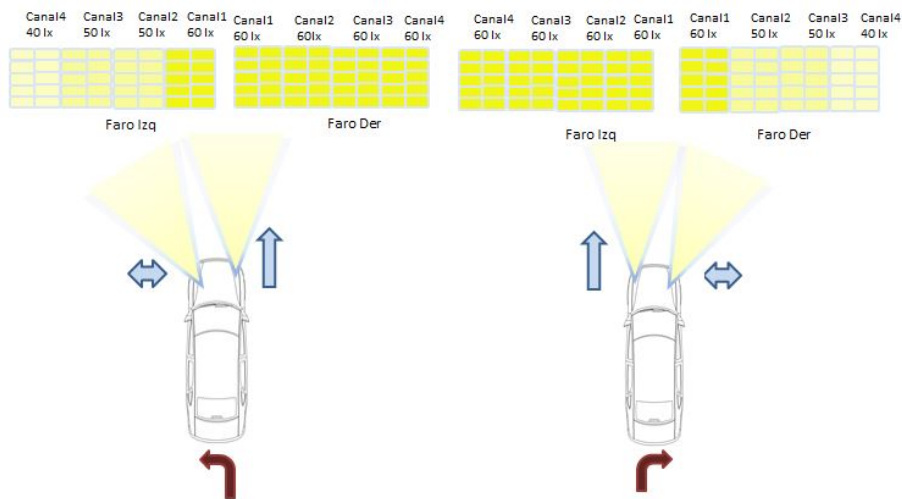


Figura 3.13: Vista general del funcionamiento de la iluminación mediante Leds y su atenuación para el modo de iluminación de curva.

Con respecto a los grados que deberá girar el actuador para posicionar el elemento de iluminación en la posición adecuada, comenzaremos partiendo de los límites, donde establecemos que el volante podrá enviar una señal de mando desde -90 grados para la vuelta al lado izquierdo, pasando por cero grados que corresponderían al hecho de alinear la dirección, hasta llegar a 90 grados para la vuelta al lado derecho. Después de que han sido contempladas las señales de entrada al sistema para el posicionamiento del volante, debemos fijar los grados de movimiento que requieren los faros,

tanto para el lado izquierdo como para el lado derecho.

Los actuadores deberán ser capaces de posicionar el sistema de iluminación a 0°, 5°, 6°, 7°, 9°, 11°, 13° y 15°, con dirección hacia el lado izquierdo que corresponden al faro izquierdo, como también hacia el lado derecho para el faro derecho, estos son los grados involucrados en el posicionamiento para todos los modos de de iluminación, el sentido de los movimientos de rotación horizontal (Swiveling movement) y los grados de posicionamiento permitidos para cada faro son representados en la figura 3.14 .

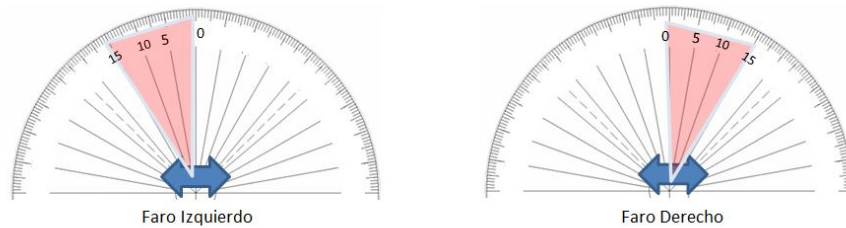


Figura 3.14: Sentido de movimiento y rango de posicionamiento en grados permitido para cada faro ( trazo rojo).

Para poder determinar los grados de posicionamiento para cada actuador se establecieron reglas con base en las necesidades de cada modo de iluminación, es entonces cómo contemplado la velocidad del vehículo y la posición del volante se obtiene una sugerencia de estado actual para el vehículo en movimiento. Para el caso en cual el movimiento del volante es hacia el lado izquierdo, se sugiere un único estado de conducción para el vehículo, se determina en que modo de iluminación esta catalogada la condición y los grados necesarios para el posicionamiento de ambos actuadores, las premisas establecidas se encuentran divididas en dos grupos, tanto para el motor de movimiento horizontal izquierdo, cómo para el del lado derecho, que a su vez se subdividen en dos grupos las que sugieren conducción en recta, y las que por el estado de las señales sugieren conducción en curva. Estos grados de posicionamiento para los actuadores de ambos faros en caso de una vuelta hacia la izquierda son visualizados en la tabla de la figura 3.15, donde las señales de entrada son la velocidad y el ángulo de las ruedas con respecto al eje (AWRE).

Movimiento Horizontal Motores Vuelta Izquierda					
Posicionamiento motor faro izquierdo			Posicionamiento motor faro derecho		
La condicion sugiere que se maneja en recta			La condicion sugiere que debe activar iluminacion curva		
#	Premisa	Grados ← izq	#	Premisa	Grados → der
1	if velocidad < 30 km/h , Angulo ruedas Respecto Eje < 2°	9°	1	if velocidad < 30 km/h , Angulo ruedas Respecto Eje < 2°	6°
2	if 31km/h < velocidad<40km/h, AWRE < 2°	7°	2	if 31km/h < velocidad<40km/h, AWRE < 2°	5°
3	if 41km/h< velocidad<50km/h , AWRE < 2°	6°	3	if 41km/h< velocidad<50km/h , AWRE < 2°	5°
4	if 51km/h<velocidad<70km/h, AWRE< 1°	0°	4	if 51km/h<velocidad<70km/h, AWRE< 1°	0°
5	if 71km/h<velocidad<90km/h, AWRE < 0.5°	0°	5	if 71km/h<velocidad<90km/h, AWRE < 0.5°	0°
6	if 91km/h<velocidad<120km/h,AWRE >0.28°	0°	6	if 91km/h<velocidad<120km/h,AWRE >0.28°	0°
7	if 121km/h<velocidad,AWRE >0.15°	0°	7	if 121km/h<velocidad,AWRE >0.15°	0°
8	if velocidad < 30 km/h , AWRE > 6°	15°	8	if velocidad < 30 km/h , AWRE > 6°	0°
9	if 31km/h < velocidad<40km/h, AWRE > 3°	13°	9	if 31km/h < velocidad<40km/h, AWRE > 3°	0°
10	if 41km/h< velocidad<50km/h , AWRE >2°	11°	10	if 41km/h< velocidad<50km/h , AWRE >2°	0°
11	if 51km/h<velocidad<70km/h, AWRE> 1°	9°	11	if 51km/h<velocidad<70km/h, AWRE> 1°	0°
12	if 71km/h<velocidad<90km/h, AWRE >0.5°	7°	12	if 71km/h<velocidad<90km/h, AWRE >0.5°	0°
13	if 91km/h<velocidad<120km/h,AWRE >0.28°	6°	13	if 91km/h<velocidad<120km/h,AWRE >0.28°	0°
14	if 121km/h<velocidad,AWRE >0.15°	5°	14	if 121km/h<velocidad,AWRE >0.15°	0°

Figura 3.15: Tabla de grados de posicionamiento sugeridos para actuador izquierdo (Azul sugiere conducción en curva, Gris sugiere conducción en recta) con base en el estado actual de las señales de entrada.

Para la posición de volante con grados positivos, lo cual nos indica una vuelta con giro en sentido de lado derecho, también se creo una tabla de premisas que nos indica el valor adecuado en grados de

rotación horizontal que deben adoptar los actuadores debido al modo de conducción el que se sugiere se encuentra el vehículo. De igual manera que en la tabla anterior, las premisas fueron separadas en cuatro grupos, de los cuales unos sugieren conducción en recta y otros grupos sugieren conducción en curva. Los grados de posicionamiento para los actuadores de los faros son visualizados en la tabla de la figura 3.16 utilizando las mismas señales de entrada que la tabla anterior.

Movimiento Horizontal Motores Vuelta Derecha						
Posicionamiento motor faro izquierdo			Posicionamiento motor faro Derecho			
La condicion sugiere que se maneje en recta			La condicion sugiere que debe activar iluminacion curva			
#	Premisa	Grados ← izq	#	Premisa	Grados → der	
1	if velocidad < 30 km/h , Angulo ruedas Respecto Eje < 2°	6°	1	if velocidad < 30 km/h , Angulo ruedas Respecto Eje < 2°	9°	
2	if 31km/h < velocidad<40km/h, AWRE < 2°	5°	2	if 31km/h < velocidad<40km/h, AWRE < 2°	7°	
3	if 41km/h< velocidad<50km/h , AWRE < 2°	5°	3	if 41km/h< velocidad<50km/h , AWRE < 2°	6°	
4	if 51km/h<velocidad<70km/h, AWRE< 1°	0°	4	if 51km/h<velocidad<70km/h, AWRE< 1°	0°	
5	if 71km/h<velocidad<90km/h, AWRE < 0.5°	0°	5	if 71km/h<velocidad<90km/h, AWRE < 0.5°	0°	
6	if 91km/h<velocidad<120km/h,AWRE >0.28°	0°	6	if 91km/h<velocidad<120km/h,AWRE >0.28°	0°	
7	if 121km/h<velocidad,AWRE >0.15°	0°	7	if 121km/h<velocidad,AWRE >0.15°	0°	
8	if velocidad < 30 km/h , AWRE > 6°	0°	8	if velocidad < 30 km/h , AWRE > 6°	15°	
9	if 31km/h < velocidad<40km/h, AWRE > 3°	0°	9	if 31km/h < velocidad<40km/h, AWRE > 3°	13°	
10	if 41km/h< velocidad<50km/h , AWRE >2°	0°	10	if 41km/h< velocidad<50km/h , AWRE >2°	11°	
11	if 51km/h<velocidad<70km/h, AWRE> 1°	0°	11	if 51km/h<velocidad<70km/h, AWRE> 1°	9°	
12	if 71km/h<velocidad<90km/h, AWRE >0.5°	0°	12	if 71km/h<velocidad<90km/h, AWRE >0.5°	7°	
13	if 91km/h<velocidad<120km/h,AWRE >0.28°	0°	13	if 91km/h<velocidad<120km/h,AWRE >0.28°	6°	
14	if 121km/h<velocidad,AWRE >0.15°	0°	14	if 121km/h<velocidad,AWRE >0.15°	5°	

Figura 3.16: Tabla de grados de posicionamiento sugeridos para el actuador derecho (Azul sugiere conducción en curva, Gris sugiere conducción en recta) con base en el estado actual de las señales de entrada.

### 3.3. Desarrollo de la interfaz gráfica

Se realizo el desarrollo de una interfaz gráfica que permitiera la conducción de un vehículo de la misma forma que se realiza en un simulador de conducción. Basándonos en el motor gráfico para video juegos Unreal Engine, se planearon dos estrategias para la implementación del escenario gráfico para el usuario, la primera de ellas contempla la creación completa de un escenario de conducción de nuestra propia elaboración y diseño, el cual en lo sucesivo llamaremos circuito de conducción de código libre. Un circuito de conducción que funciona sin la necesidad del pago de una licencia, completamente modificable, pero con un grado alto de complejidad de integración al sistema completo de simulación. El escenario cuenta con tramos de rectas prolongados que permiten probar altas velocidades en el sistema y con curvas en sentido izquierdo y derecho en las que se puede dar una conducción capaz de evaluar completamente los diferentes modos de iluminación de nuestro sistema.

De igual manera como una segunda opción, se busco la integración al sistema de un escenario de conducción existente, licenciado por parte de la empresa Mathworks en todo lo que refiere a su uso y aplicación configurado para funcionar fácilmente desde el ambiente de Simulink, un desarrollo con varios años atrás de maduración y refinación en su programación, preconfigurado con varios escenarios de conducción y disponibilidad de diferentes vehículos. A esta segunda opción de implementación gráfica en lo sucesivo lo llamaremos circuito de conducción licenciado.

Ambas estrategias mencionadas fueron analizadas con base en los requerimientos de este trabajo, se evaluaron ventajas y desventajas de cada una de ellas, pros y contras son analizados dentro del apartado de resultados de este documento. Se realizo la selección de la estrategia adecuada y se llevo a la implementación de la simulación gráfica para el manejo, en una primera instancia el vehículo simulado fue conducido mediante controles virtuales, esto con el fin de realizar validaciones de manera mas rápida, una vez que se validaron completamente los escenarios de conducción y su funcionamiento integrado a Simulink, se procedió a realizar la conexión del volante y los pedales al sistema.

### 3.3.1. Creación de circuito de conducción de código libre

La necesidad de establecer un entorno de conducción virtual, que brinda la posibilidad a un operador de realizar pruebas sobre las cuales, se puede seguir una trayectoria de conducción y que esta pueda ser corroborada, nos llevo a buscar la manera de obtener un integración con un escenario virtual trabajando en conjunto con nuestra simulación, el cual además de brindar mayor calidad con alto grado de detalle a la simulación, lograría mayor nivel de interacción con el usuario.

Dentro de la búsqueda se encontró un simulador de conducción llamado MonoDrive (figura 3.17), el cual se integraba de manera fácil y rápida al software LabVIEW, de manera tan sencilla como descargar la API, instalar, pagar la licencia y ejecutar la simulación de conducción. Al ser un software licenciado y desarrollado por terceros, no permite una edición de sus archivos, candados de seguridad de desarrollo bloquean la manipulación abierta de su API, claro es de entender esto.

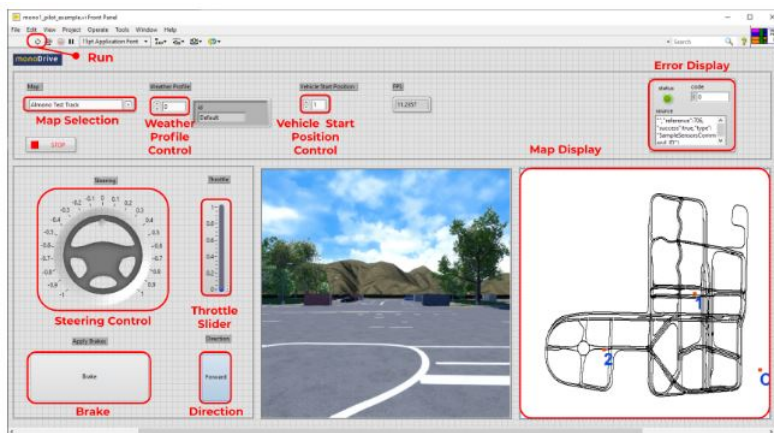


Figura 3.17: Interface de simulador para conduccion MonoDrive.

Investigando un poco mas a fondo, los desarrolladores explican que su software trabaja utilizando un motor gráfico de videojuegos. Así que la animación en 3D del vehículo como de su entorno son diseñados y renderizados desde Unreal Engine 4(UE4), un motor y editor de videojuegos gratuito desarrollado por la empresa Epic Games, utilizado para la producción de distintos tipos de videojuegos y aplicaciones, el cual tiene la posibilidad de desarrollar proyectos basados en C++, o como es el caso de este trabajo, proyectos basados en blueprints los cuales utilizan un ambiente de scripts visuales, en los que se programan funciones de una manera similar a la programación por bloques.

Se comenzó a trabajar en el desarrollo de un entorno de conducción virtual desde este motor de videojuegos. Una vez instalado adecuadamente el software libre de UE4, debemos iniciar un nuevo proyecto. Dentro del nuevo proyecto, comenzamos el diseño del entorno, para lo cual debemos construir los espacios necesarios. El escenario de conducción es estructurado a partir del uso de dos mallas prediseñadas, diferentes texturas y un algoritmo de creación de Spline. Las mallas prediseñadas son las formas básicas para la construcción de una carretera dentro de UE4, tanto la cinta asfáltica (figura 3.18) como las barras de contención (figura 3.19) presentan texturas repetitivas que pueden ser replicadas múltiples veces. Con la ayuda de un algoritmo para la creación de un Spline es posible insertar de manera mas fácil estructuras repetitivas como puentes, tuberías y en nuestro caso una carretera, facilitando en gran medida el diseño de nuestro entorno de conducción. Las texturas precargadas por el mismo UE4, nos ayudan a dar un entorno mas realista, en este trabajo se agregaron texturas de césped en el suelo y piedra en las paredes que rodean el escenario.

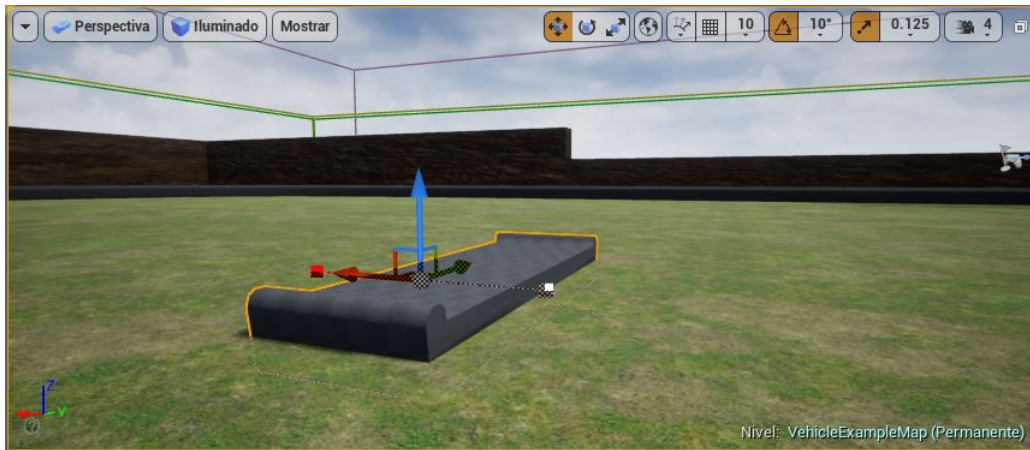


Figura 3.18: Malla prediseñada de cinta asfáltica.

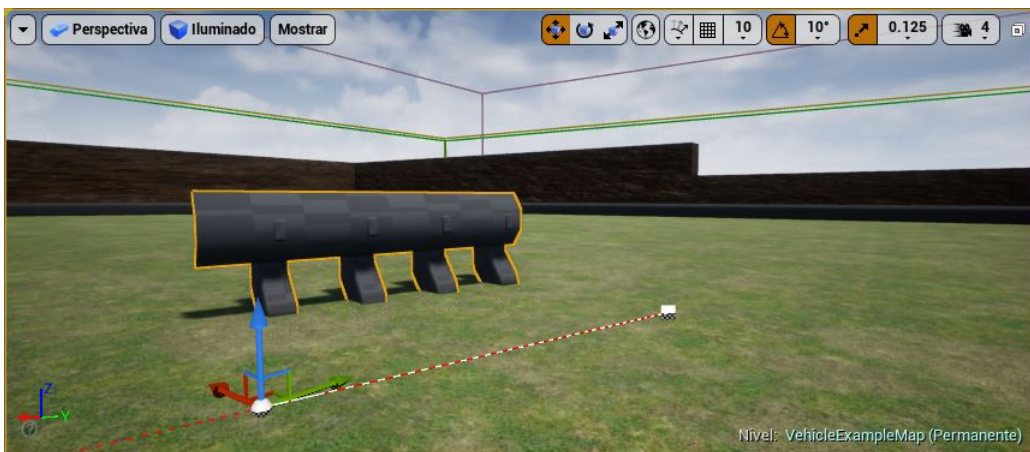


Figura 3.19: Malla prediseñada de una barra de contención.

La creación de un Spline facilita mucho el diseño de un escenario repetitivo, un Spline contiene dentro de sí un algoritmo de reproducción continua que se encarga de repetir la estructura, desde la creación de un nuevo *Blueprint de actor* nombrándolo Spline, desde el cual programaremos dicho algoritmo, agregamos un elemento nuevo y modificaremos sus detalles del actor, la modificación que se realiza es cargar la malla prediseñada con la que el actor deberá trabajar, esto lo logramos arrastrando la malla al apartado de default, esto lo podemos ver en la figura 3.21, en la cual se subraya con un color amarillo la parte mencionada. Una vez modificados los detalles y se ha asignado la malla que se estará repitiendo mediante el Spline, procedemos a dar un doble clic sobre el actor Spline, accediendo a sus niveles de ventanas de desarrollo, buscamos la pestaña *Construction script*, desde esa ventana editaremos la función colocando el algoritmo de bloques que se puede observar en la figura 3.20. Este algoritmo consigue crear un ciclo de repetición de una malla, contemplando la selección de nodos de expansión de la malla, el resultado es el que, los nodos extremos de la malla, duplican dicha malla en la dirección que sea arrastrada, siempre que sea el mismo eje de dirección, si el eje se altera, detectara que la estructura se pretende curvar, y el algoritmo ajusta la curva en la malla. Para poder modificar las dimensiones de anchura y los radios de curvas, se debe seleccionar el nodo central en la malla, y arrastrar la posición de los nodos laterales que aparecen.

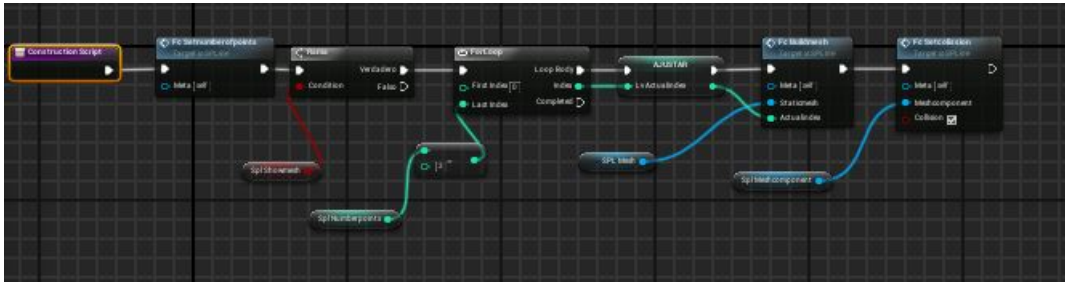


Figura 3.20: Algoritmo de repetición de mallas Spline.

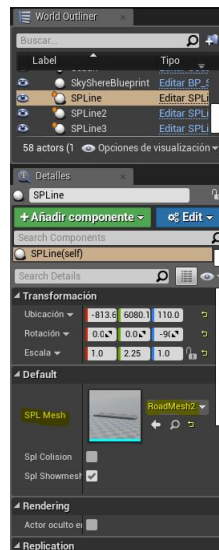


Figura 3.21: Modificación de detalles en el Blueprint actor para la malla de cinta asfáltica.

Una vez que el Spline para la cinta asfáltica esta listo, basta con replicarlo para la malla de la barra de contención, creando un nuevo *Blueprint de actor* y repitiendo el proceso, podemos entonces comenzar a diseñar el escenario de conducción, construyendo primero la carretera (figura 3.22), posteriormente agregaremos la barra de contención izquierda y terminaremos con una barra de contención para el lado derecho (figura 3.23), el escenario en construcción terminado se muestra en la figura 3.24, es importante resaltar que cada uno de los Spline debe tener el efecto de colisión física activado, de otra manera, el vehículo podría atravesar las superficies y no parecería una conducción real. Una vez terminado el escenario debemos agregar un vehículo con las funcionalidades que debería tener propias de su naturaleza, el nivel de diseño permitido en UE4 es relativamente bajo, los desarrolladores en este software suelen apoyarse de programas externos de diseño para poder realizar objetos lo mas reales posibles. Asi que en este trabajo únicamente agregaremos un vehículo básico que nos proporciona UE4, el cual es posible editar de la manera que se necesite y con el grado de detalle que se permita, que en realidad no es muy alto. Este vehículo básico, únicamente sera comandado en aceleración, frenado y reversa, además es posible dar una dirección a las llantas delanteras de izquierda a derecha.

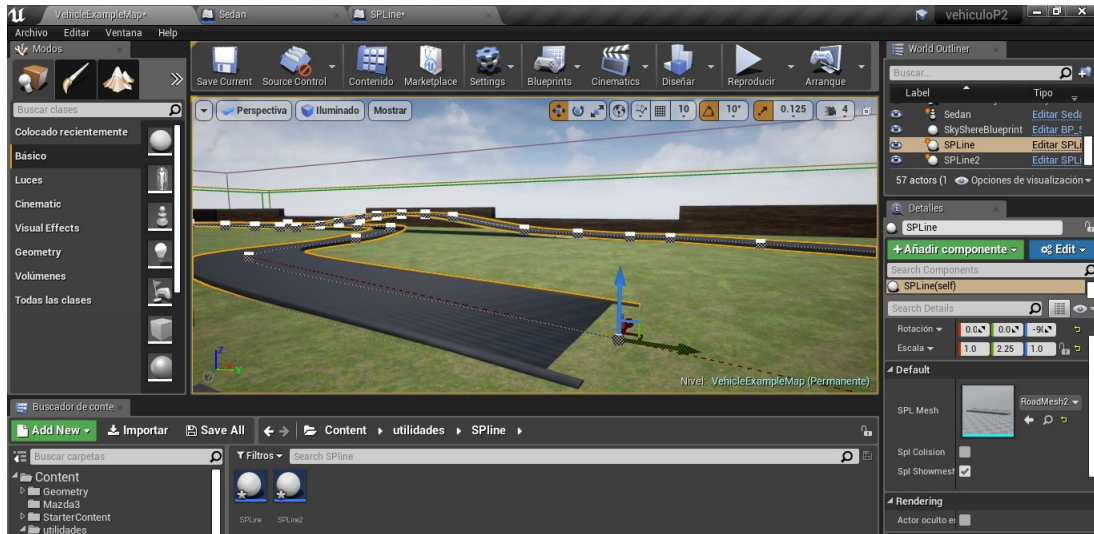


Figura 3.22: Modificación de detalles en el Blueprint actor para la malla de cinta asfáltica.



Figura 3.23: Modificación de detalles en el Blueprint actor para la malla de cinta asfáltica.



Figura 3.24: Modificación de detalles en el Blueprint actor para la malla de cinta asfáltica.

Para poder utilizar un modelo de vehículo para nuestro proyecto procedemos a insertar el modelo base que es incluido en UE4, un vehículo de pocas características pero completamente funcional. Para poder insertar este vehículo seleccionamos la opción vehículo desde el menú principal para elección de proyectos, tal y como se muestra en la figura 3.25, a pesar de no ser modificable en aspectos de apariencias (figura 3.26), puede ser modificado en las características dinámicas que definen su física y por tal motivo su interacción con el ambiente simulado de este elemento virtual.

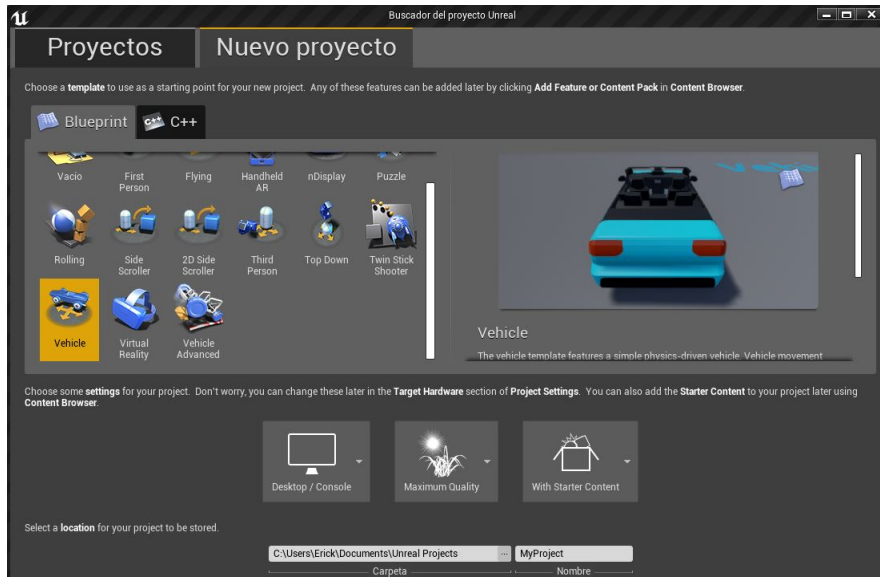


Figura 3.25: Menú de proyectos en UE4 para insertar vehículo.



Figura 3.26: Apariencias y características visuales de vehículo predeterminado UE4.

La modificación de las variables propias de la dinámica con la cual el vehículo puede interactuar con su ambiente virtual se modifican a través de la variable general *Vehicle Movement*, la cual puede ser encontrada y editada desde el menú contextual de componentes (figura 3.27), en el ámbito de edición para el Blueprint level del actor *Vehicle*. Dentro de esta variable general se puede modificar aspectos de comportamiento del vehículo (figura 3.28) tal y como la curva de torque, configuración de motor, ajuste diferencial, ajuste de la transmisión, curva dinámica de volante entre otras, hasta cuestiones físicas como la masa del vehículo, tensores de inercia entre otros. Modificar estas variables no es para nada una tarea sencilla y puede repercutir en un manejo del vehículo complicado, o en una respuesta de reacción demasiado lenta.



Figura 3.27: Menú contextual de componentes (Vehicle Movement).



Figura 3.28: Menú de detalles para el componente Vehicle Movement.

Para poder programar el manejo, avance y frenado del vehículo, es necesario crear scripts dentro del gráfico del evento sedan que permitan determinar las acciones a seguir en el entorno de videojuego a través de los bloques de programación, para comenzar esto, definiremos 3 grupos de bloques que nos permitirán controlar diferentes acciones. Los grupos son Steering input, Throttle input, Handbrake input, todos ellos comenzaran a través de un evento, los cuales son inherentes del actor sedan, estos eventos a su vez deben tener asociación a la función que queremos controlar, los eventos son entrada de movimiento a la derecha, entrada de movimiento hacia adelante y acción de frenado. insertados los primeros eventos crearemos dos variables necesarias que nos permitan comunicar datos desde el entorno de manejo hacia Blueprint level del actor sedan, las cuales son llamadas giro y avance, variables del tipo entero, que darán el valor a la función. La función es llamada a continuación en el flujo de los datos, después de tener el evento activo y la variable relacionada, estas funciones son ajustes de entrada para steering, throttle y handbrake, es importante señalar a la función que la meta es la variable Vehicle movement. Con todo lo anterior se logra dar completa conducción al vehículo a través de datos almacenados en variables que pueden ser utilizadas en cualquier momento para comunicarles los datos adecuados desde donde sea que el desarrollador desee obtenerlos para llevar a cabo la conducción, ya sea desde el mismo entorno virtual o desde datos externos a UE4, pero obtenidos mediante alguna estrategia de transmisión para dichos datos. Los bloques y la respectiva configuración antes mencionada se muestran en la figura 3.29, donde podemos observar los 3 grupos de programación, los eventos, las funciones y las variables utilizadas.

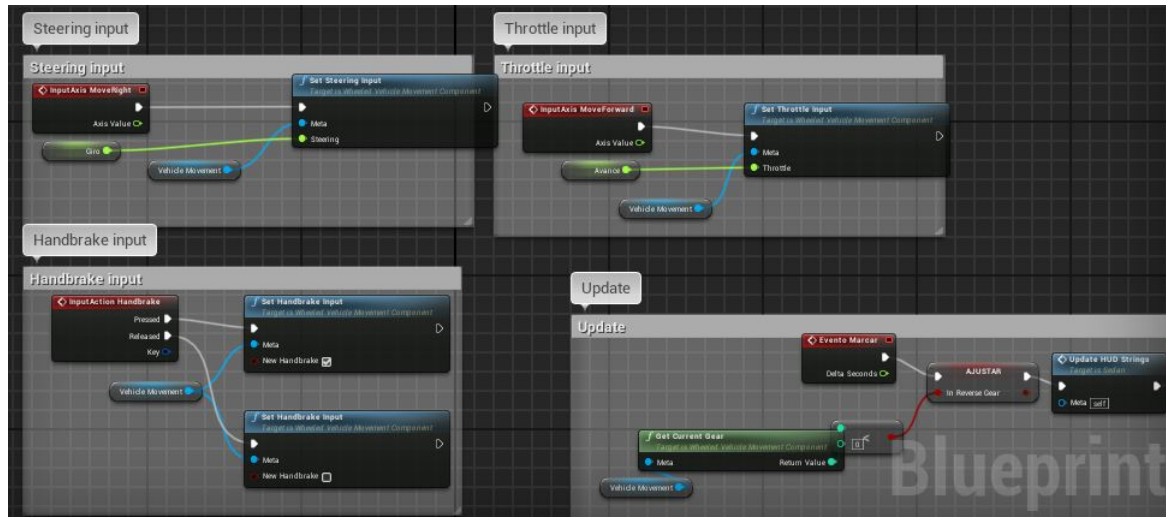


Figura 3.29: Programación del Blueprintlevel para la conducción del vehículo.

### 3.3.2. Creación de circuito de conducción Licenciado

Una segunda estrategia para la implementación del escenario gráfico para la conducción de un vehículo fue el uso de software desarrollado por la empresa Mathworks, el cual bajo el uso de una licencia, nos brinda un paquete de animación 3D de fácil integración al software simulink. Este paquete de software trabaja utilizando el motor de UE4 para la renderización de la animación virtual, por lo cual requiere instalar previamente el motor gráfico UE4 y sus paqueterías completas de manera correcta, la versión que nosotros utilizamos como ya fue mencionado es la versión 4.23.

La paquetería necesaria para el ajuste y ejecución de la animación 3D, esta dentro del *Vehicle Dynamics Model* un Add-on que puede ser agregado a Matlab para versiones superiores a R2020b, misma versión que es utilizada en la realización de este trabajo. A pesar de ser un software que nos facilita el uso de un entorno prediseñado, necesitamos configurar los archivos de matlab para que puedan encontrar la ruta adecuada para invocar el motor de UE4, es ahí donde pueden comenzar a existir complicaciones a la hora de realizar una implementación, toda vez que dicha configuración no sea realizada de manera correcta, para esto realizamos la configuración adecuada a través de ejecutar las instrucciones siguientes desde un Script.

```
dest_root = "C:\Users\Erick\Documents\carpetaprueba";
src_root = fullfile(matlabshared.supportpkg.getSupportPackageRoot, ...
    "toolbox", "shared", "sim3dprojects", "automotive");

src_root = fullfile('C:\', 'Program Files', 'Polyspace', 'R2020b', 'toolbox', 'shared',
    'sim3d_projects', 'automotive_project');

ueInstFolder = "C:\UE_4.23";

C:\Program Files\Polyspace\R2020b\toolbox\shared\sim3d_projects\automotive_project
\UE4\WindowsNoEditor\AutoVrtlEnv\Plugins\MathWorksSimulation
\Source\MathWorksSimulation

mwPluginFolder = fullfile(src_root, 'UE4', 'WindowsNoEditor', 'AutoVrtlEnv', 'Plugins',
    'MathWorksSimulation', 'Source', 'MathWorksSimulation');
uePluginFolder = fullfile(ueInstFolder, "Engine", "Plugins");
```

```

C:\Program Files\Polyspace\R2020b\toolbox\shared\sim3d_projects
\automotive_project\UE4\WindowsNoEditor

projFolderName = 'UE4','WindowsNoEditor','AutoVrtlEnv';

projSrcFolder = fullfile(src_root, 'UE4','WindowsNoEditor', projFolderName);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

dest_root = "C:\Users\Erick\Documents\carpetaprueba";
>> src_root = fullfile('C:\','Program Files','Polyspace','R2020b','toolbox','shared',
'sim3d_projects','automotive_project');
>> ueInstFolder = "C:\UE_4.23";
>> mwPluginName = "MathWorksSimulation";
>> mwPluginFolder = fullfile(src_root, "PluginResources", "UE423");
>> mwPluginFolder = fullfile(src_root, 'UE4', 'WindowsNoEditor', 'AutoVrtlEnv', 'Plugins',
'MathWorksSimulation', 'Source', 'MathWorksSimulation');
>> uePluginFolder = fullfile(ueInstFolder, "Engine", "Plugins");
>> uePluginDst = fullfile(uePluginFolder, "Marketplace", "MathWorks");
>> cd(uePluginFolder)
foundPlugins = dir("**/" + mwPluginName + ".uplugin");
>> if ~isempty(foundPlugins)
    numPlugins = size(foundPlugins, 1);
    msg2 = cell(1, numPlugins);
    pluginCell = struct2cell(foundPlugins);

    msg1 = "Plugin(s) already exist here:" + newline + newline;
    for n = 1:numPlugins
        msg2{n} = "    " + pluginCell{2,n} + newline;
    end
    msg3 = newline + "Please remove plugin folder(s) and try again.";
    msg = msg1 + msg2 + msg3;
    warning(msg);
else
    copyfile(mwPluginFolder, uePluginDst);
    disp("Successfully copied MathWorksSimulation plugin to UE4 engine plugins!")
end
Successfully copied MathWorksSimulation plugin to UE4 engine plugins!
>>
>> projFolderName = "AutoVrtlEnv";
>> projSrcFolder = fullfile(src_root, 'UE4', 'WindowsNoEditor', projFolderName);
>> projDstFolder = fullfile(dest_root, projFolderName);
>> if ~exist(projDstFolder, "dir")
    copyfile(projSrcFolder, projDstFolder);
end
>>

```

La primera línea del código anterior define la ruta a la cual Matlab deberá copiar los archivos (nosotros elegimos en donde se almacenara la información) que son necesarios para ejecutar correctamente la *Scene interrogation*, que en otras palabras se trata de ejecutar la animación invocando funciones de UE4. Después se escribe en una variable `src_root` la ruta de la carpeta donde se encuentran los nombres de los archivos pertenecientes al Add-on que serán copiados. A continuación se define la ruta de instalación de nuestro UE4 (esta dirección también la modificamos según la de nuestra PC). Después de realizar todo lo anterior, es necesario indicar la ruta donde fueron

instalados archivos de simulación de Matlab. en adelante, las instrucciones le indican a Matlab la ruta y el nombre de las carpetas que van a contener todos los archivos copiados, los nombres de los archivos, sus ubicaciones, y todo lo que debe encontrar y agrupar para poder realizar la copia de cada archivo a la ruta especificada. Por ultimo y después de haber ejecutado el Script, Matlab debería haber generado en la ruta que hemos elegido en la primera instrucción, dos carpetas, las cuales son AutoVrtlEnv y Engine, además del archivo Vehicle simulation, un archivo ejecutable, de ser correcto lo anterior, la paquetería debería de haber sido configurada correctamente y Simulink debería de ser capaz de ejecutar una animación del vehículo y su entorno sin problema alguno.

La escena de animación en 3D cuenta de varios bloques que nos ayudan a configurar los escenarios prediseñados y de que manera estos escenarios interactúan en respuesta a datos que provienen de Simulink. Lo bloques mínimos para poder conformar una escena 3D son son 4 *Simulation 3D Vehicle With Ground Following*, *Simulation 3D Scene Configuration*, *Simulation 3D Actor Transform Get*, *TransformDisplay*, los cuales pueden ser encontrados dentro del menu Library, dentro del blockset de Vehicle Dynamics Blockset, dentro de la carpeta Vehicle Scenarios. Estos bloques a su vez, pueden ser complementados con otros bloques de funciones mas, sin embargo para este trabajo únicamente se utilizaran los ya mencionados. La disposición mínima necesaria de conexiones y de bloques se muestra en la figura 3.30.

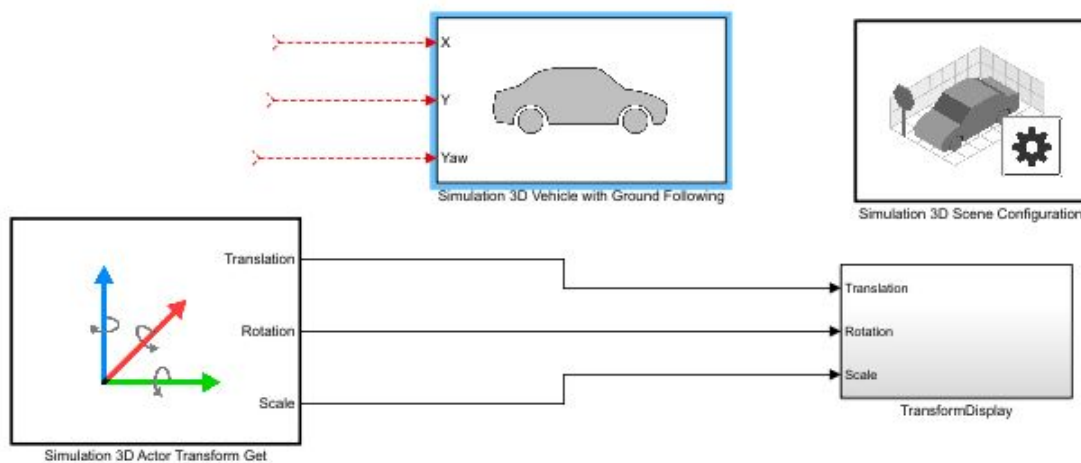


Figura 3.30: Disposición mínima de bloques y conexiones para escena 3D.

El bloque de *Simulation 3D Vehicle with Ground Following* es el que se encarga de interpretar y ajustar con base en los datos del modelo del vehículo, la inclinación en los ejes de elevación (yaw), roll(X) y pitch(y), que deberá seguir el vehículo moviéndose sobre el plano de tierra en el ambiente visualizado. En otras palabras se trata de un bloque de configuración visual para el vehículo. Desde este bloque se tiene la posibilidad de seleccionar entre 6 tipos de vehículos distintos, su color, una posición inicial si así se desea, la cual es dada en radianes, además de que se da un nombre al actor (Vehículo), y un tiempo de muestreo para los datos del modelo del vehículo (figura 3.31). Con respecto al flujo de datos para este bloque, cabe mencionar que sus datos de entrada provienen del bloque del modelo del vehículo, sus datos de salida son transmitidos a escritura en archivos dll que son leídos por UE4.

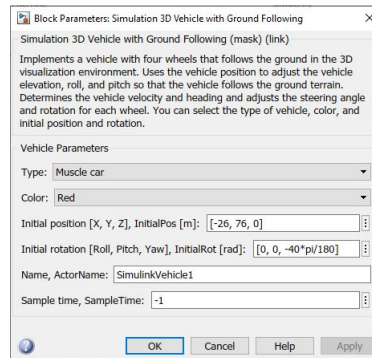


Figura 3.31: Configuraciones disponibles en el bloque Simulation 3D with Ground Following.

El bloque de *Simulation 3D Scene configuration* nos permite configurar el ambiente en la simulación. Si un modelo de simulación, incluye sensores, algoritmos, o alguna prueba de percepción del ambiente que se está simulando es fundamental incluir este bloque, puesto que es el bloque encargado de configurar el tiempo de muestreo de la escena simulada. Además en este bloque permite elegir entre 9 escenarios predeterminados, utilizar nuestro propio escenario ejecutable, o ejecutar el editor de escenarios de UE4, también enlaza con UE4 el nombre del actor y sus respectivos archivos, el cual fue definido en el bloque anterior (figura 3.32).

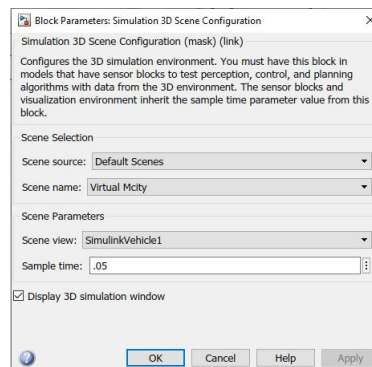


Figura 3.32: Configuraciones disponibles en el bloque Simulation 3D Scene Configuration.

El bloque de *Simulation 3D Actor Transform Get* es capaz de devolver datos propios del vehículo desde el ambiente simulado en UE4 para tenerlos disponibles ya sea únicamente para su visualización o para poder trabajar con ellos desde Simulink. Los datos que nos devuelve este bloque son la posición del vehículo, su rotación y la escala de factores en la escena visualizada. Este bloque trabaja en conjunto con un bloque propio de Simulink llamado Transform Display, que no es más que un display que nos muestra los datos recibidos (figura 3.33). Para configurarlo solo basta con elegir el nombre del actor del cual se obtendrá la información y el número de partes por actor.

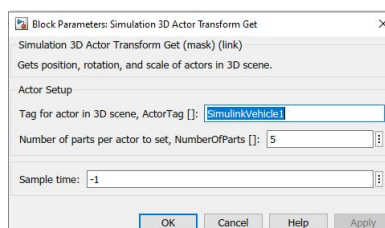


Figura 3.33: Configuraciones en el bloque Simulation 3D Actor Transform Get.

La integración de todos los bloques al sistema completo se lleva a cabo obteniendo los datos de salida del bloque de modelo vehículo y conectándolos a la entrada del bloque *Simulation 3D Vehicle with Ground Following*, esta disposición de bloques conectados al sistema que fue realizado, puede observarse en la figura 3.34, en la cual es posible reconocer ver las 3 conexiones provenientes del bus de información del bloque del modelo. Una vez ejecutada la simulación se comienza a generar la escena con un ambiente predeterminado para el cual seleccionamos la escena Virtual Mcity, como vehículo seleccionado se eligió un tipo Hatchback con color azul. Los resultados de la creación del escenario pueden visualizarse en la figura 3.35, estos resultados serán comentados y analizados mas a detalle dentro del capítulo de Resultados.

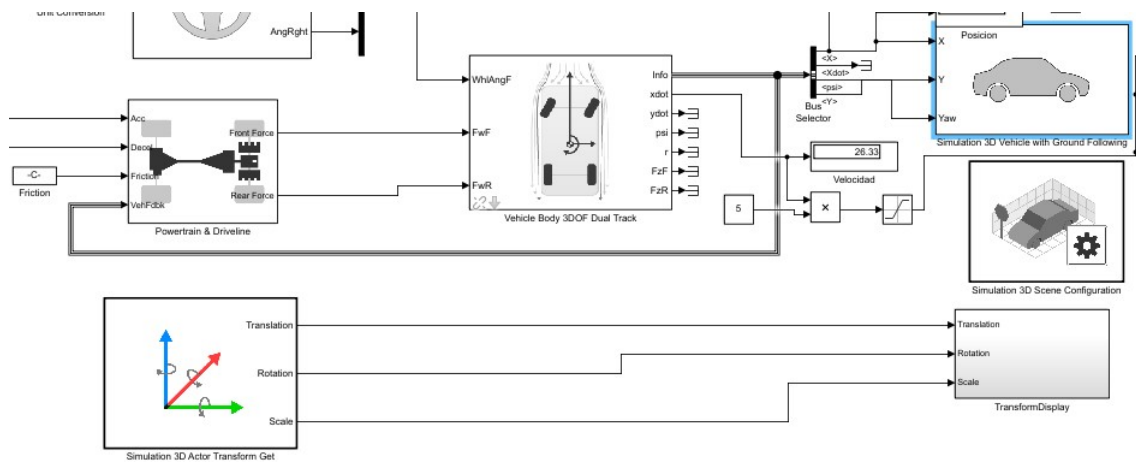


Figura 3.34: Disposición de bloques de escenario 3D dentro del sistema de simulación.



Figura 3.35: Resultado en la creación de circuito de conducción licenciado.

### 3.3.3. Integración de volante y pedales

La interfaz de usuario requiere de una interacción física, a través de un set de volante y pedales, dentro de los dispositivos comerciales disponibles en el mercado, se eligió uno set de la marca Logitech, en su modelo G29 compatible con varios modelos de consolas de videojuegos, así como

también con windows 10. La adquisición de datos comienza a llevarse a cabo bajo pruebas iniciales mediante un control de consola de videojuegos Xbox One, se utiliza el software de Labview para poder realizar una conexión preliminar de fácil integración y poder comprender como funcionan los mandos de videojuegos, que valores entrega y como pueden ser utilizados, se acondicionan los datos y se prepara una trama de transmisión de los mismos para poder corroborar el funcionamiento adecuado, todo esto se realiza con base en los estados que se muestra en la figura 3.36.

, una vez que se ha entendido lo anterior, se realiza la integración al software de Matlab Simulink, el cual trabajara directamente con el modelo dinámico para realizar la simulación completa del sistema. se acondicionan los datos y se prepara una trama de transmisión de los datos, todo se realiza con base en los estados que se muestra en la figura 3.36.

La maquina de estados nos describe una lectura repetitiva de 33 ms del estado del mando, cada que esta cantidad de tiempo ocurra, se analizara si ha sucedido algún evento en el mando y se registrarán los datos de cada elemento del mando (palancas, botones, gatillos) en un vector de datos. Posteriormente el vector de datos pasa a un estado de acondicionamiento de los datos, en donde se analiza los valores ingresados dentro del vector, dado que el mando funciona transmitiendo palabras de 16 bits, cada palanca, gatillo o pad, pueden tener 65536 valores diferentes, desde valores de -32767 hasta 32768, por lo que lo que en el acondicionamiento de datos, se ajustan estos valores para oscilar únicamente en valores positivos de 0 a 180. Es necesario entonces distinguir primero de cual eje proviene los datos, de pues se deben realizar acciones en cuyo caso resulte el valor negativo o positivo, la cantidad del dato se divide entre 360 y se le suma la cantidad necesaria para ajustarla hacia un valor entre 0 y 180.

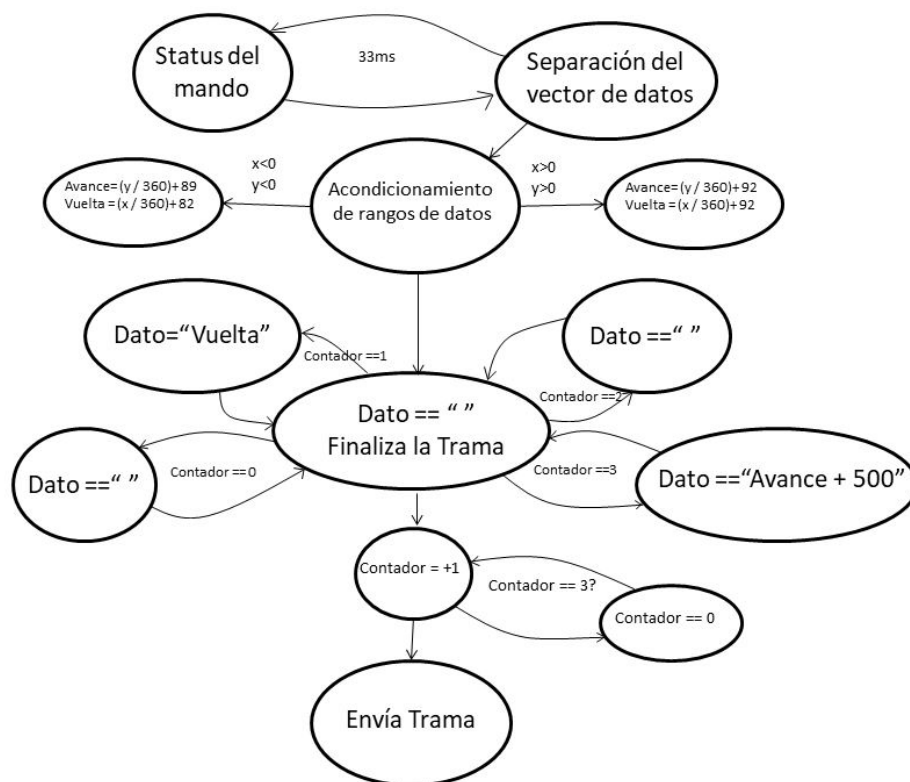


Figura 3.36: Diagrama de estados para la adquisición, acondicionamiento y envío de datos.

Debido a que estos datos deberán ser transmitidos, en pruebas de enlace de red con protocolo TCP/IP se debe preparar una trama para ser enviada. Esta trama solo puede contener el dato de una variable a la vez para facilitar el manejo de la información, se implementa un contador que alterna entre diferentes asignaciones de las variables a una variable general llamada *Dato* la cual se envía en la trama, para poder distinguir de que variable se envía, se suma un valor de 500, lo

que brinda la posibilidad de enviar múltiples variables, con rangos de datos similares, distinguibles por tener adiciones de 500 unidades las veces que sean necesarias.

Para poder realizar la implementación dentro de LabVIEW se comienza conectando el mando de Xbox One a la PC, posteriormente dentro de un proyecto se inserta un ciclo while que permita una ejecución continua, fuera de este ciclo iniciamos el reconocimiento del mando insertando la función *Open* que pertenece al grupo de herramientas *Maker Hub interface for Xbox One controller* y permitimos que permanezca en Auto Detect, dentro del ciclo while se anida un *eventstructur* para reconocer cuando sucede un evento en el mando de Xbox, dentro de esta estructura se agrega la función *Read* y por último, fuera del ciclo infinito se cierra la conexión con el mando insertando la función *Close*, esta disposición de los bloques de funciones se muestra en la figura 3.37.

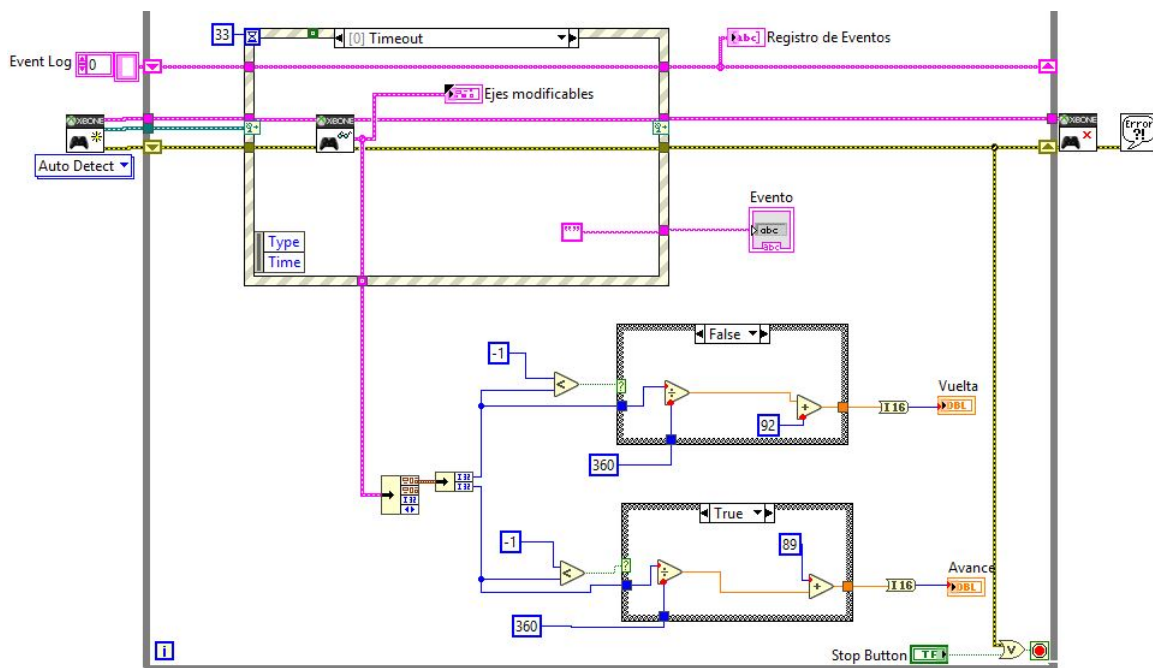


Figura 3.37: Disposición de bloques de función para el inicio y fin de la conexión con el mando de Xbox one.

Como ya se explicó, las palancas del mando tienen una resolución de 16 bits para cada eje, por lo que los datos de lectura en LabVIEW, pueden tomar valores desde -32768 hasta 32768 en cada uno de los ejes y son entregados por medio de un vector de datos que incluye todos los valores de posición, de las palancas de mando, gatillos y D-pad. Se deben separar los datos del vector y deben ser convertidos en información útil. Así que tal y como se observa en la figura 3.37, al vector de datos se le aplica un primer bloque de función *Unbundle*, lo que separa los datos de la palanca de mando izquierda, un segundo *Unbundle* entrega los datos separados del eje *x* y el eje *y*, los cuales brindarán el giro y la aceleración respectivamente. Para obtener la información que será enviada, convertimos los datos del rango de 16 bits a un rango simple de 1 a 180, esto lo logramos con la ayuda de un bloque de función *Case structure*, el cual separa los números negativos de los números positivos, los cuales dividimos entre 360, sumamos la cantidad de 89 para los datos negativos y 92 para los datos positivos, de esta manera y repitiéndolo para cada eje, obtenemos los valores que se envían. Cada eje obtendrá un rango de valores diferentes en LabVIEW y serán utilizados para ser transmitidos hacia UE4 (figura 3.38).

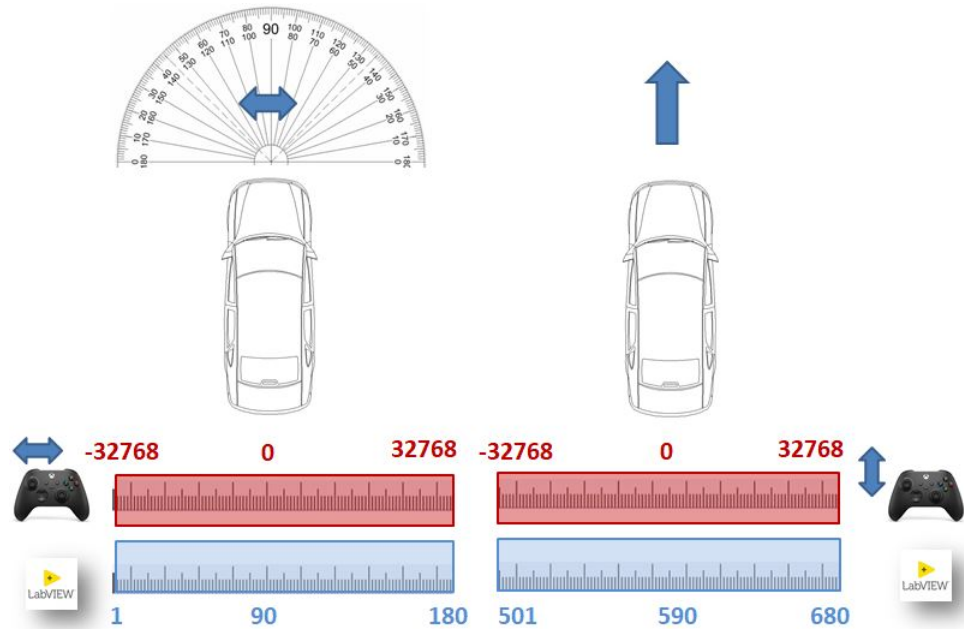


Figura 3.38: El eje  $x$  de la palanca de mando izquierda brindara la dirección del vehículo, el eje  $y$  la aceleración, los datos del mando son convertidos a un rango útil y diferente cada uno, para ser transmitidos.

Para culminar estas pruebas preliminares, se realizo una transmisión de los datos obtenidos mediante un protocolo de red TCP/IP, para lo cual desde el proyecto en labVIEW se inicia configurando fuera del ciclo while, un bloque de función *TCP Open connection*, en el cual se coloca la dirección IP, un numero de puerto de servicio (8888), además un valor de 60000 ms para el timeout. Posterior a esto, se coloca un bloque de función *TCP Write* dentro del ciclo while del proyecto, y se cierra la conexión colocando fuera del ciclo el bloque de función *TCP Close connection*, en la figura 3.39 se puede observar esta configuración utilizada.

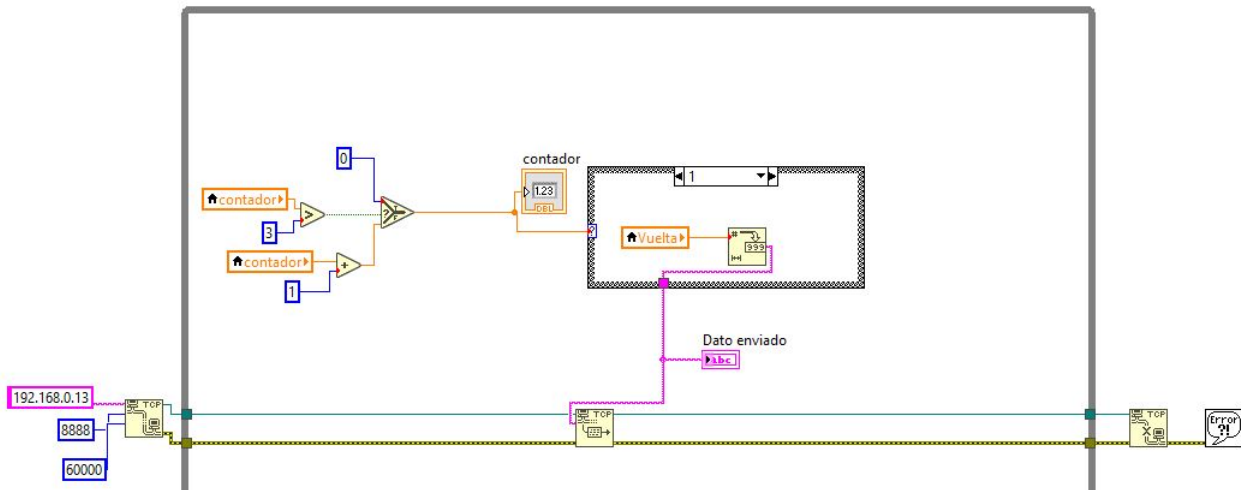


Figura 3.39: Disposición de bloques de función para el inicio y fin de la transmisión de datos por protocolo TCP/IP.

Con todo lo anterior desarrollado, nos resulta más fácil comprender el funcionamiento de los mandos de videojuego, como pueden ser conectados e integrados a los software que utilizamos. Sabemos que los mandos entregan mediante buses de datos diferentes, la información analógica de perillas y gatillos obtenida a través de DACs y la información digital de botones presionados. También sabemos que una vez que los dispositivos son conectados a la PC y sus drivers son instalados de manera correcta, el sistema operativo asigna un ID a nuestro dispositivo, generalmente comienzan a ser enumerados desde el 1, por lo que si no se encuentra otro dispositivo HID (Human interface device) conectado, lo más probable es que el Device ID asignado sea 1, de lo contrario, esta información puede ser consultada desde el administrador de dispositivos y las propiedades del mismo. Todo lo que concierne a la forma en que los dispositivos entregan los datos a la PC ya fue mencionado, por lo cual ahora es importante aclarar que el conjunto de Volante y pedales modelo G29 de la marca Logitech, seleccionado para este trabajo, se comporta de la misma manera que cualquier mando de videojuego, y entregan los datos de la misma forma que el mando de Xbox de las pruebas preliminares.

Entonces para poder integrarlo a nuestro sistema de simulación procedemos de una manera similar a lo que ya habíamos realizado, ahora en el ambiente de Simulink debemos buscar en la librería el bloque llamado *JoyStick* (figura 3.40).



Figura 3.40: Bloque de Función Joystick.

Este bloque es posible encontrarlo dentro de la librería *Simulink 3D Animation* (figura 3.41). Se trata de un bloque que es capaz de enlazar de manera correcta los datos del mando a la interfaz de Simulink, para configurarlo basta con señalar adecuadamente el Joystick ID, permitir que el bloque ajuste las entradas y las salidas de datos de acuerdo a las capacidades del joystick (activando la función desde el checkbox), también tiene la posibilidad de habilitar una entrada para la función de Forceback feedback que incluyen algunos mandos con la logran a través de motores generar una fuerza contraria a la que aplica el usuario logrando dar una sensación de oposición al movimiento más realista. La configuración que nosotros utilizamos puede ser observada en la figura (3.42).

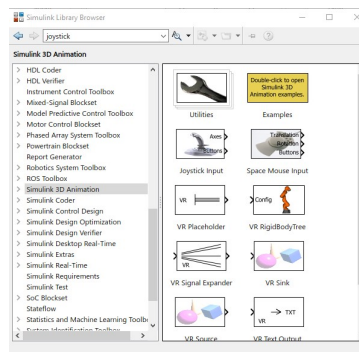


Figura 3.41: Librería que contiene el bloque de Función Joystick.



### 3.4. Modelo Dinámico del vehículo

El sistema de simulación presentado en este trabajo necesita de un modelo matemático que sea capaz de describir mediante ecuaciones, el comportamiento que tendría un vehículo y sus elementos al interactuar con las variables que pueden presentarse en un entorno físico. Este modelo puede volverse tan complejo como nos sea posible describir dicho vehículo y su relación con las variables del entorno, es por eso que para este trabajo únicamente tomamos en cuentas ciertos factores que pueden ayudarnos a describir un comportamiento de vehículo completo con los bloques mínimos posibles, pero qué resultarían suficientes como para involucrar ambientes externos complejos que pueden contribuir en mayor o menor medida el desempeño del vehículo.

Para este sistema en específico, contemplamos un modelo que nos permite calcular el movimiento longitudinal, lateral y de inclinación para el mismo (Vehicle body 3DOF Dual-track). Además agregamos un modelo de tren motriz y transmisión de la potencia que permite describir el torque del vehículo, como es transferido a las ruedas para la aceleración, frenado y resistencia al derrape (Powertrain and Driveline), por ultimo consideramos también un modelo de volante cinemático (Kinematic Steering), con el cual podemos determinar en ángulo de Ackerman para las ruedas hacia la izquierda y a la derecha.

#### 3.4.1. Volante cinemático

Comenzaremos describiendo el modelo que quizá se mas sencillo y es mas fácil de representar debido a que es el que contempla menor numero de variables, hablamos del modelo de volante cinemático (Kinematic Steering figura 3.44), este modelo puede ser configurado con tres opciones para el ajuste de tipo de volante, Ackerman, piñón y cremallera, modo paralelo. El ajuste de parametrización puede ser constante o mediante tablas de datos de parámetros. Además el modelo permite seleccionar si la dirección del vehículo será delantera o trasera. Ahora que se conocen las diferentes configuraciones que se pueden elegir en el bloque, podemos revisar los modelos matemáticos en los que se fundamenta el bloque. Es importante mencionar que nuestro sistema de simulación trabaja utilizando el modelo de piñón y cremallera, a pesar de eso daremos una breve descripción de los demás modelos posibles.

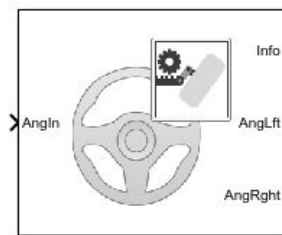


Figura 3.44: Bloque de modelo Kinematic Steering.

Para trabajar con una selección de Ackerman ideal, las ecuaciones que describen el movimiento del volante se basan en el modelo de la figura 3.45, en donde se tiene un círculo de vuelta común para los ángulos de las llantas se contempla la longitud de la base del vehículo y la distancia entre el rodamiento de cada llanta .

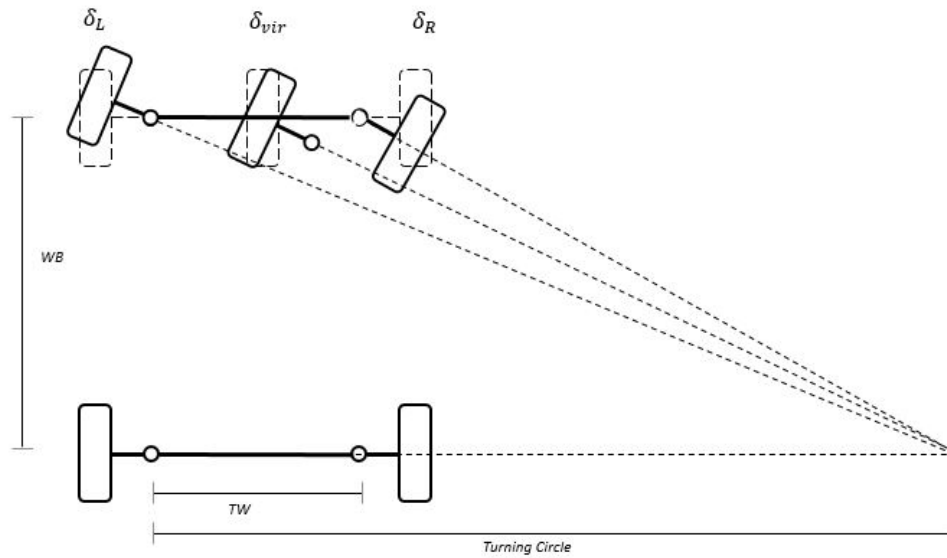


Figura 3.45: Modelo ideal de Ackerman.

Para determinar las ecuaciones que describen este modelo tomaremos en cuenta las variables  $\delta_L$  (ángulo de llanta izquierda),  $\delta_{in}$  (ángulo de volante),  $\delta_R$  (ángulo de llanta derecha),  $\delta_{vir}$  (ángulo de llanta virtual),  $TW$  (Distancia entre rodamientos),  $WB$  (Base de las llantas),  $\gamma$  (proporción de volante). Para calcular los ángulos de las llantas el bloque utiliza las siguientes ecuaciones:

$$\cot(\delta_L) - \cot(\delta_R) = \frac{TW}{WB} \quad (3.1)$$

$$\delta_{vir} = \frac{\delta_R}{\gamma} \quad (3.2)$$

$$\delta_L = \text{Tan}^{-1} \left( \frac{WB \tan(\delta_{vir})}{WB - 0,5TW \tan(\delta_{vir})} \right) \quad (3.3)$$

$$\delta_R = \text{Tan}^{-1} \left( \frac{WB \tan(\delta_{vir})}{WB + 0,5TW \tan(\delta_{vir})} \right) \quad (3.4)$$

Podemos también trabajar con un modelo de piñón y cremallera como el que se muestra en la figura 3.46, modelo el cual con uso de engranes convierte el movimiento de rotación del volante en movimiento lineal. Para este modelo utilizamos las variables  $\delta_{in}$  ángulo del volante,  $\delta_L$  ángulo de llanta izquierda,  $\delta_R$  ángulo de llanta derecha,  $TW$  distancia entre rodamientos,  $r$  Radio del piñón,  $\Delta P$  cambio lineal en la cremallera,  $D$  distancia entre el eje y la cremallera,  $I_{rack}$  longitud de la carcasa de la cremallera,  $I_{arm}$  longitud del brazo del volante,  $I_{rad}$  longitud del tirante. Las ecuaciones que se muestra a continuación se derivan del modelo.

$$l_1 = \frac{TW - I_{rack}}{2} - \Delta P \quad (3.5)$$

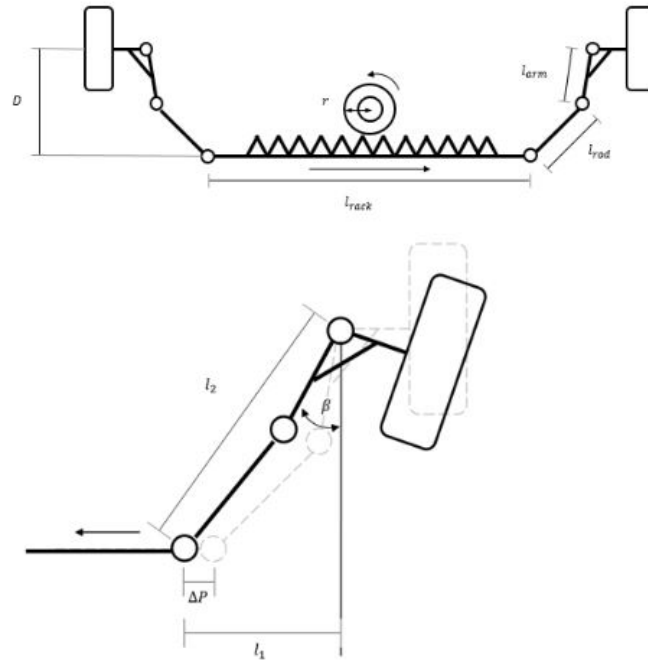


Figura 3.46: Modelo de piñón y cremallera.

$$l_2^2 = l_1^2 + D^2 \tag{3.6}$$

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{D}{l_1} \right) - \cos^{-1} \left( \frac{l_{arm}^2 + l_2^2 - l_{rod}^2}{2l_{arm}l_2} \right) \tag{3.7}$$

Existe también un modelo mas sencillo llamado paralelo en donde los ángulos de las llantas se toman como de igual magnitud, las ecuaciones se basan en el modelo de la figura 3.47, en dicho modelo las variable utilizadas son  $\delta_L$  (ángulo de llanta izquierda),  $\delta_{in}$  (ángulo de volante),  $\delta_R$  (ángulo de llanta derecha),  $\gamma$  (proporción de volante), las ecuaciones se describen a continuación:

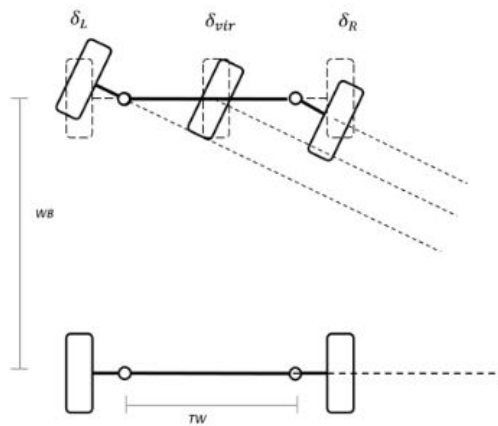


Figura 3.47: Modelo Paralelo.

$$\delta_R = \delta_L = \frac{\delta_{in}}{\gamma} \tag{3.8}$$

### 3.4.2. Tren motriz y transmisión de potencia

Debido a que en este trabajo no incorporamos un análisis profundo de rendimiento en el motor, un bloque de potencia se vuelve despreciable, esto debido a que el análisis se basará en la velocidad, la orientación y la posición del vehículo, por lo cual necesitamos simplemente de un modelo realista que sea capaz de devolver información sobre el avance, retroceso o frenado del vehículo, para que estos datos puedan ser transmitidos a su vez al modelo de cuerpo del vehículo. El bloque de desplazamiento de dos llantas con disco nos brinda la posibilidad de implementar un comportamiento longitudinal y lateral, usando este bloque en conjunto con la selección de una transmisión (AWD, FWD o RWD), y un tren motriz simple que desarrolle potencia para el movimiento del vehículo, es posible obtener simulaciones de las fuerzas de aceleración frenado y resistencia al derrape. La configuración general de bloques para nuestro modelo de tren motriz y transmisión que engloba los bloques mencionados puede observarse en la figura 3.48.

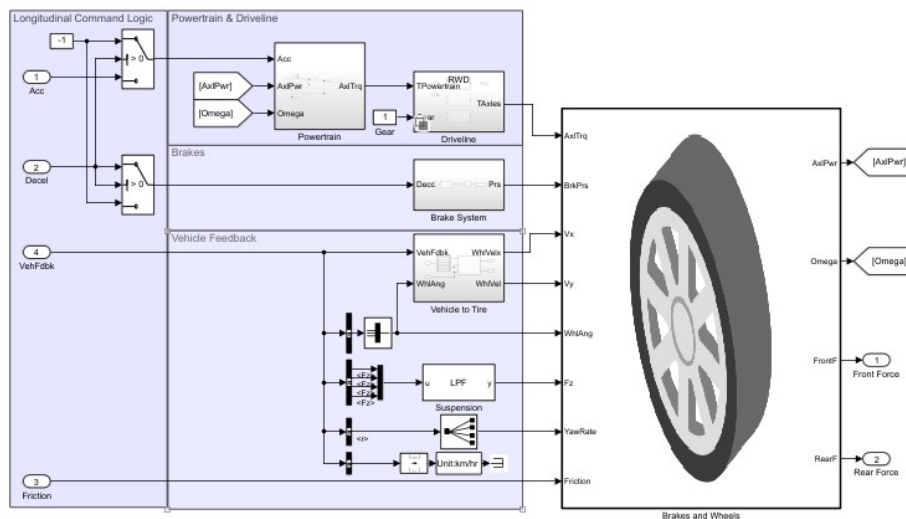


Figura 3.48: Disposición de bloques internos de tren motriz y transmisión.

Nuestro tren motriz simple puede entonces ser definido de la manera que se muestra en la figura 3.49, donde se tiene una potencia de motor definida en  $100e3$ , una retroalimentación  $\omega$  (Omega) que proviene del desplazamiento y representa la velocidad angular de la llanta, la anterior se fija como entrada al tren motriz, mas sin embargo proviene del bloque exterior de Brake and Wheels. Además se agrega una configuración de diferencial de torque para brindar la implementación de una aceleración dada por el pedal externo conectado al sistema, al cual se le asigna una ganancia  $K$  de 1000, para que entonces se definan los límites máximos y mínimos de torque axial que genera este bloque como salida. Existe un segundo bloque interno de transmisión que permite la selección de la ubicación del torque, es decir, en cual de los dos ejes se aplique el torque axial, o en su defecto, si es que es transmitido a ambos para poder implementar un sistema AWD (All Wheel Drive), para nuestro sistema, trabajaremos con una transmisión RWD (Transmisión trasera), para esto entonces la ganancia de torque debe pasar por una multiplicación matricial en la cual se elegirán únicamente las últimas ruedas traseras, por lo cual  $K$  es ajustada a una matriz de la siguiente forma  $[0,0,1,1]$ . Con todo lo anterior, logramos implementar una fuerza de motriz que impulsaría el vehículo, ahora se debe transformar esa fuerza de torque axial, en una aceleración y que debe ser interpretada en velocidad.

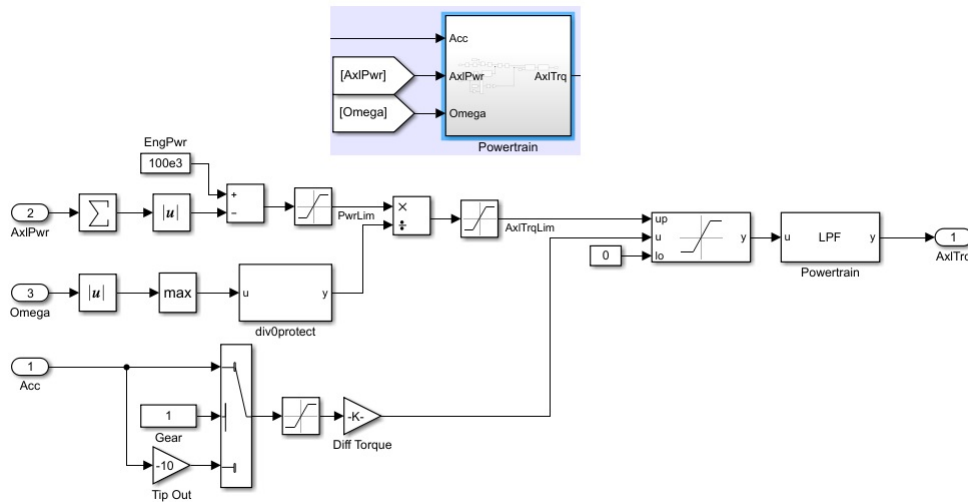


Figura 3.49: Configuración interna de bloque Powertrain.

Entonces como ya se menciona, el bloque de desplazamiento combinado para las llantas del vehículo es capaz de interpretar una fuerza de torque axial para implementar un desplazamiento y poder devolver una velocidad angular en las llantas y poder ser capaz de entregar fuerzas frontales y traseras para el cuerpo del vehículo. El bloque puede ser configurado con distintos tipos de freno, existen cuatro posibilidades, sin freno, freno de disco, freno de tambor, y mapeado a través de una tabla de velocidades y presiones de frenado. Para nuestro sistema elegimos un sistema de frenado por disco, a continuación comenzaremos a describir la ecuaciones del modelo para poder implementar el desplazamiento. Comenzaremos con la ecuación que determina la entrada del torque, donde  $T_i$  (entrada neta de torque)  $T_a$  (torque axial sobre el giro de la rueda),  $T_b$  (torque de frenado),  $T_d$  (torque de llanta combinado).

$$T_i = T_a - T_b + T_d \quad (3.9)$$

Para definir el torque de llanta combinado, el bloque implementa la dinámica de primer orden para la tracción en las ruedas, la resistencia al rodamiento donde  $R_e$  (Radio efectivo de la llanta bajo carga a una presión dada),  $\omega$  (velocidad angular de la llanta),  $L_e$  (longitud de relajación de la llanta),  $F_x$  (Fuerza longitudinal desarrollada por el la llanta con el pavimento debido al desplazamiento),  $M_y$  (Resistencia al rodamiento).

$$T_d(s) = \frac{1}{\frac{|\omega|R_e}{L_e}s + 1} (F_x R_e + M_y) \quad (3.10)$$

En nuestro sistema elegimos un freno de disco por lo cual, para poder calcular el torque de frenado, el bloque utiliza el el siguiente modelo (figura 3.50), donde,  $T$  (torque de frenado),  $\mu$  (Coeficiente cinemático de fricción del disco),  $P$  (presión aplicada),  $B_a$  (Diámetro del orificio del actuador),  $N_{pads}$  (numero de almohadillas en el ensamblaje del disco),  $R_m$  (radio principal para la aplicación de fuerza en la almohadilla),  $R_o$  (radio externo de la almohadilla),  $R_i$  (radio interno de la almohadilla).

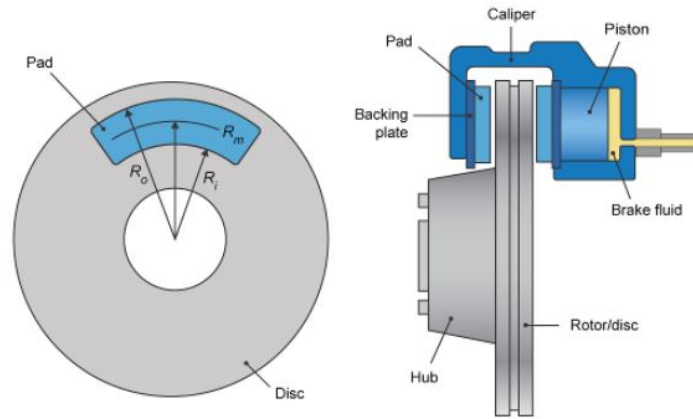


Figura 3.50: Modelo para freno de disco.

$$T = \frac{\mu P \pi B_a^2 R_m N_{pads}}{4} \quad \text{Cuando } N \neq 0 \quad (3.11)$$

$$T = \frac{\mu_{static} P B_a^2 \pi R_m N_{pads}}{4} \quad \text{Cuando } N = 0 \quad (3.12)$$

$$R_m = \frac{R_o + R_i}{2} \quad (3.13)$$

### 3.4.3. Cuerpo del Vehículo

El bloque de cuerpo rígido de vehículo (figura 3.51) calcula el movimiento longitudinal, lateral y de inclinación, puede ser configurado para utilizar dos modelos diferentes, el modelo de bicicleta (single), o el modelo de doble tracción (Dual track) el cual se eligió para este trabajo. Las entradas configuradas para funcionar en el bloque de nuestro sistema son el ángulo de volante para las llantas frontales, la fuerza total en las llantas frontales y la fuerza total en las llantas traseras, entre las cuales son posibles configurar. Para las salidas del bloque, dentro de las necesarias para llevar a cabo la ejecución del ambiente virtual en UE4 son, posición longitudinal (x), posición lateral (y), inclinación (psi), las cuales se encuentra dentro de un bus de información bastante completo ubicado en la salida con el nombre de Info, el cual se encuentra conectado en retroalimentación al bloque de tren motriz y transmisión, esto debido a que hay variable que se retro alimentan como por ejemplo la velocidad angular (omega), que es necesaria en la lectura de datos del bloque anterior.

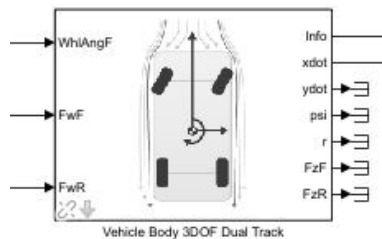


Figura 3.51: Bloque Vehicle Body 3DOF Dualtrack.

Entonces como se menciona, nos basamos en una elección de modelo de doble tracción tal y como se muestra en la figura 3.52, dentro del cual podemos utilizar ecuaciones para definir la dinámica del cuerpo rígido. A continuación se presentan dichas ecuaciones, es importante mencionar que no

se realiza en análisis de dichas ecuaciones, son utilizadas con el fin de comprender como funciona el bloque, que modelo utiliza, que variables afectan o aportan al modelo y de que manera podemos interpretarlo.

**Dual Track**

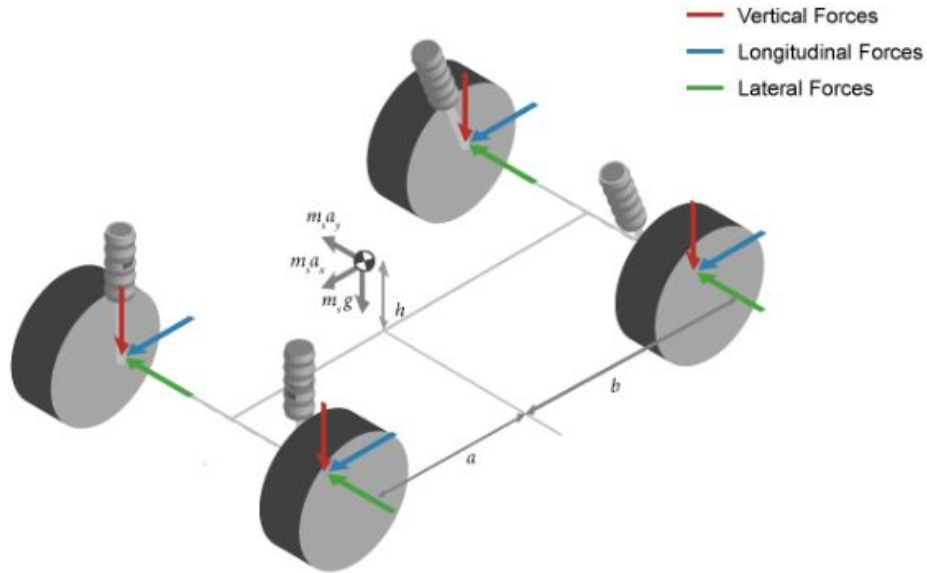


Figura 3.52: Modelo dinámico de Dualtrack.

Las ecuaciones dinámicas que son vinculadas al modelo, se presentan a continuación en donde,  $\ddot{x}$  (aceleración del vehículo en el eje x),  $\dot{y}$  (velocidad del vehículo en el eje y),  $r$  (velocidad angular en el eje z),  $m$  (masa del vehículo),  $F_{xfl}$  (Fuerza longitudinal aplicada al frente de lado izquierdo sobre el eje x),  $F_{xrl}$  (Fuerza longitudinal aplicada por detrás de lado izquierdo sobre el eje x),  $F_{xrr}$  (Fuerza longitudinal aplicada por detrás de lado derecho),  $F_{xext}$  (Fuerzas externas aplicadas a lo largo del eje x),  $F_{yfl}$  (Fuerza longitudinal aplicada al frente de lado izquierdo sobre el eje y),  $F_{yrl}$  (Fuerza longitudinal aplicada por detrás de lado derecho sobre el eje y),  $F_{yrr}$  (Fuerza longitudinal aplicada por detrás de lado derecho sobre el eje y),  $F_{yext}$  (Fuerza externa aplicada a lo largo del eje y),  $\dot{r}$  (Aceleración angular sobre el eje z),  $W_f$  (Velocidad del viento frontal),  $M_{zext}$  (Momento externo del vehículo sobre el eje z),  $a$  (Distancia entre las ruedas frontales de vehículo)  $I_{zz}$  (Momento de inercia sobre el vehículo en el eje z),  $r$  (Velocidad angular),  $\dot{\psi}$  (rotación del vehículo sobre el eje z).

$$\ddot{x} = \dot{y}r + \frac{F_{xfl} + F_{xfr} + F_{xrl} + F_{xrr} + F_{xext}}{m} \quad (3.14)$$

$$\ddot{y} = -\dot{x}r + \frac{F_{yfl} + F_{yfr} + F_{yrl} + F_{yrr} + F_{yext}}{m} \quad (3.15)$$

$$\dot{r} = \frac{a(F_{yfl} + F_{yfr}) - b(F_{yrl} + F_{yrr}) + \frac{W_f(F_{xfl} - F_{xfr})}{2} + \frac{W_r(F_{xrl} - F_{xrr})}{2} + M_{zext}}{I_{zz}} \quad (3.16)$$

$$r = \dot{\psi} \quad (3.17)$$

Una vez que se ha podido conocer los modelos dinámicos que corresponden a cada parte que utilizamos para la implementación de un vehículo, que se han revisado las ecuaciones fundamentales que ayudan a la implementación de su función como bloque, y que podemos tener un panorama mas amplio de como se pueden conectar los bloque entre si para poder llevar a cabo la implementación de un un vehículo completo, procedemos a realizar la conexión de todos los bloques tal y como se muestra en la figura 3.53.

Comenzamos con la parte correspondiente a la dirección del vehículo, para el ingreso de los datos al bloque del volante, primero colocamos un bloque de conversión de unidades a grados, debido a incompatibilidad entre lo que el usuario puede ingresar y los datos requeridos por el bloque, una vez que se han convertido, se puede proporcionar un ángulo de entrada al bloque, dicho bloque devuelve a su salida datos de ángulo al lado izquierdo y ángulo al lado derecho, datos que después de ser pasados por un multiplexor de 2 canales a 1 nos brinda una señal de ángulo frontal para las ruedas del vehículo, señal que es ingresada al bloque del cuerpo del vehículo.

Por otro lado bloque de tren motriz y transmisión, reciben a su entrada los datos que provienen del conjunto de pedales que es utilizado por el usuario durante la conducción, estas señales necesitan estar limitadas entre valores limitados desde 0 y hasta 1 en el caso del acelerador, para la señal de freno, únicamente es posible recibir una señal booleana 0 o 1, es importante tomar en cuenta lo anterior. Colocamos una mascara que engloba dos constantes una con valor de 1 para la constante de fricción y el segundo con un valor de 4, para el numero de ruedas. Es importante observar también que este bloque requiere de la retroalimentación que proviene de salida Info del bloque de cuerpo del vehículo, debido a que trabajan de manera conjunta. Este bloque devuelve a su salida dos variables de fuerza, la primera para las llantas delanteras y la segunda es la fuerza para las llantas traseras, señales que son conectadas a la entrada del bloque del cuerpo del vehículo.

por ultimo podemos colocar entonces el bloque del cuerpo del vehículo, ahora que tenemos disponibles los datos necesarios para su entradas, lo cuales ya conocemos de donde provienen y que nos están representando. a su salida este bloque nos arroja una salida de bus llamada info, la cual contiene gran cantidad de variable de salida y sus datos contenidos en un mismo canal, de esta información, surge la retroalimentación para el bloque de transmisión y tren motriz, así como también las salidas para el bloque que realiza la interpretación de estos datos para brindar la posición necesaria del vehículo en UE4.

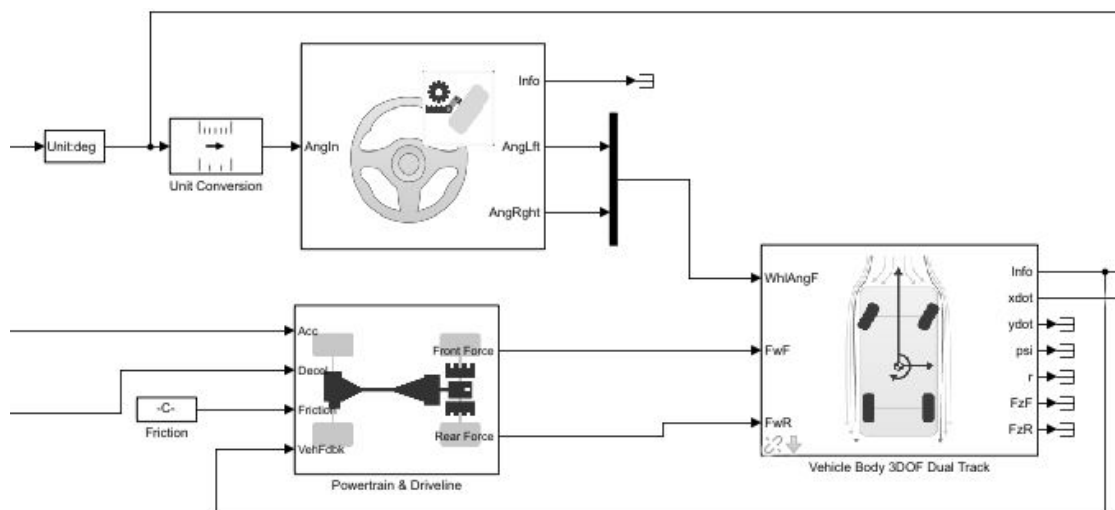


Figura 3.53: Disposición de bloques para el modelo completo de vehículo.

### 3.5. Desarrollo de estrategia de control

Se decidió implementar una estrategia de control mediante lógica difusa para poder controlar el sistema de iluminación, esta estrategia permite realizar un proceso de control a un sistema que se presume como conocido y que se puede saber a que parámetros de salida se desea llegar y como hacerlo. Para proceder con el desarrollo de esta estrategia de control comenzaremos decidiendo como deseamos que nuestro sistema opere, bajo que circunstancias de entrada funcionara y que deseamos obtener a la salida. Esos datos los tenemos bien identificados tanto por la parte del modelo dinámico del vehículo que responde a parámetros de entrada ya establecidos y que opera con rangos de salida conocidos, como también por el estudio que se ha realizado previamente y del cual hemos podido determinar el funcionamiento deseado para los faros en cuantos a las condiciones de conducción que pudieran presentarse.

Comenzamos estableciendo premisas de situaciones que sabemos que pueden presentarse, ampliando estas situaciones a rangos con lo que se nos permite parametrizar los posibles escenarios de conducción, para esto creamos una tabla de premisas para situaciones dentro de las cuales se pudieran contemplar vueltas a la izquierda, creamos una tabla para el faro izquierdo y otra para el faro derecho, esta tabla se puede observar en la figura 3.54. En ella podemos apreciar las variaciones corriente para cada canal de LEDs resultado de las condiciones presentes, por ejemplo la premisa numero uno de lado izquierdo para el faro izquierdo nos dice que, si el vehículo se conduce a una velocidad menor de 50 km/h y el ángulo del volante con respecto al eje (AWRE) es menor a 20° las condiciones sugieren que se conduce a baja velocidad y sin un ángulo de volante pronunciado, se mantienen condiciones de manejo en recta, por lo tanto las corrientes permanecen en las necesarias para el modo de manejo clase V, entonces todos los canales presentan 300 mA de paso de corriente. Se contemplan casos también en los que el modo de manejo requiere activar el modo de iluminación clase E, por lo tanto, si aun las condiciones del ángulo del volante sugieren conducción en línea recta, la corriente a través de los LEDs se ajustara a 500 mA, debido a la necesidad de mayor intensidad de iluminación requerida. Para poder analizar esta tabla es importante resaltar que el valor del ángulo es con respecto de una posición central del ángulo de la llanta y que comienza a aumentar los grados hacia la izquierda.

Vuelta Izquierda											
Control de corriente mA para faro izquierdo						Control de corriente mA para faro Derecho					
La condicion sugiere que se maneja en recta						La condicion sugiere que debe activar iluminacion curva					
#	Premisa	canal 1	canal 2	canal 3	canal 4	#	Premisa	canal 1	canal 2	canal 3	canal 4
1	if velocidad < 50 km/h , Angulo ruedas Respecto Eje < 20°	300mA	300mA	300mA	300mA	1	if velocidad < 50 km/h , Angulo ruedas Respecto Eje < 20°	300mA	300mA	300mA	300mA
2	if 50km/h < velocidad<70km/h, AWRE < 10°	300mA	300mA	300mA	300mA	2	if 50km/h < velocidad<70km/h, AWRE < 10°	300mA	300mA	300mA	300mA
3	if 70km/h<velocidad<90km/h, AWRE < 50°	500mA	500mA	500mA	500mA	3	if 70km/h<velocidad<90km/h, AWRE < 50°	500mA	500mA	500mA	500mA
4	if 90km/h<velocidad<120km/h, AWRE< 2.8°	500mA	500mA	500mA	500mA	4	if 90km/h<velocidad<120km/h, AWRE< 2.8°	500mA	500mA	500mA	500mA
5	if 120km/h<velocidad, AWRE < 1.50°	500mA	500mA	500mA	500mA	5	if 120km/h<velocidad, AWRE < 1.50°	500mA	500mA	500mA	500mA
6	if 10km/h<velocidad,AWRE > 60°	300mA	250mA	250mA	200mA	6	if 10km/h<velocidad,AWRE > 60°	300mA	300mA	300mA	300mA
7	if 10km/h<velocidad<40km/h ,AWRE > 30°	300mA	250mA	250mA	200mA	7	if 10km/h<velocidad<40km/h ,AWRE > 30°	300mA	300mA	300mA	300mA
8	if 40km/h<velocidad<60km/h ,AWRE > 10°	300mA	250mA	250mA	200mA	8	if 40km/h<velocidad<60km/h ,AWRE > 10°	300mA	300mA	300mA	300mA
9	if 65km/h<velocidad<90km/h,AWRE>50°	300mA	250mA	250mA	200mA	9	if 65km/h<velocidad<90km/h,AWRE>50°	500mA	500mA	500mA	500mA
10	if 90km/h<velocidad<120km/h, AWRE>2.8°	300mA	250mA	250mA	200mA	10	if 90km/h<velocidad<120km/h, AWRE>2.8°	500mA	500mA	500mA	500mA
11	if 120km/h<velocidad, AWRE >1.50°	300mA	250mA	250mA	200mA	11	if 120km/h<velocidad, AWRE >1.50°	500mA	500mA	500mA	500mA

Figura 3.54: Tabla de premisas para el comportamiento de la corriente en cada canal, presentándose vueltas a la izquierda.

De la misma manera se generó una tabla de premisas para ángulo de giro que aumenta cuando el vehículo gira hacia la derecha, esta se puede observar en la figura 3.55. Analicemos en esta ocasión un caso de alta velocidad con vuelta a la derecha, de la tabla del lado derecho tomemos por ejemplo la premisa 4, para el faro derecho, si se conduce a una velocidad superior a los 90 km/h, no es posible girar de manera pronunciada el volante pues el carro volcaría, entonces de entrada sabemos que el movimiento necesario para una vuelta en alta velocidad es de mucho menor ángulo en el volante, a diferencia de las bajas velocidades, ahora si la condición de manejo dice que el ángulo del volante es menor a 1,5°, la condición nos sugiere que se conduce en recta, y la velocidad exige una iluminación de clase E , por lo que la corriente se ajusta a 500mA. Ahora imaginemos que giramos el volante mas de 2.8 grados a esa velocidad, comenzariamos a dar una curva al vehículo, lo cual nos llevaría a estar dentro de la premisa 10, el faro entraría en un modo de iluminación de curva.

Vuelta Derecha											
Control de corriente mA para faro izquierdo						Control de corriente mA para faro Derecho					
La condicion sugiere que se maneja en recta						La condicion sugiere que debe activar iluminacion curva					
#	Premisa	canal 1	canal 2	canal 3	canal 4	#	Premisa	canal 1	canal 2	canal 3	canal 4
1	if velocidad < 50 km/h , Angulo ruedas Respecto Eje < 20°	300mA	300mA	300mA	300mA	1	if velocidad < 50 km/h , Angulo ruedas Respecto Eje < 20°	300mA	300mA	300mA	300mA
2	if 50km/h < velocidad<70km/h, AWRE < 10°	300mA	300mA	300mA	300mA	2	if 50km/h < velocidad<70km/h, AWRE < 10°	300mA	300mA	300mA	300mA
3	if 70km/h<velocidad<90km/h, AWRE < 50°	500mA	500mA	500mA	500mA	3	if 70km/h<velocidad<90km/h, AWRE < 50°	500mA	500mA	500mA	500mA
4	if 90km/h<velocidad<120km/h, AWRE< 2.8°	500mA	500mA	500mA	500mA	4	if 90km/h<velocidad<120km/h, AWRE< 2.8°	500mA	500mA	500mA	500mA
5	if 120km/h<velocidad, AWRE < 1.50°	500mA	500mA	500mA	500mA	5	if 120km/h<velocidad, AWRE < 1.50°	500mA	500mA	500mA	500mA
6	if 10km/h<velocidad,AWRE > 60°	300mA	300mA	300mA	300mA	6	if 10km/h<velocidad,AWRE > 60°	300mA	250mA	250mA	200mA
7	if 10km/h<velocidad<40km/h, AWRE > 30°	300mA	300mA	300mA	300mA	7	if 10km/h<velocidad<40km/h, AWRE > 30°	300mA	250mA	250mA	200mA
8	if 40km/h<velocidad<60km/h, AWRE > 10°	300mA	300mA	300mA	300mA	8	if 40km/h<velocidad<60km/h, AWRE > 10°	300mA	250mA	250mA	200mA
9	if 65km/h<velocidad<90km/h,AWRE>50°	500mA	500mA	500mA	500mA	9	if 65km/h<velocidad<90km/h,AWRE>50°	300mA	250mA	250mA	200mA
10	if 90km/h<velocidad<120km/h, AWRE>2.8°	500mA	500mA	500mA	500mA	10	if 90km/h<velocidad<120km/h, AWRE>2.8°	300mA	250mA	250mA	200mA
11	if 120km/h<velocidad, AWRE >1.50°	500mA	500mA	500mA	500mA	11	if 120km/h<velocidad, AWRE >1.50°	300mA	250mA	250mA	200mA

Figura 3.55: Tabla de premisas para el comportamiento de la corriente en cada canal, presentándose vueltas a la derecha.

Como ya se explica en el punto 3.2.2 de este documento, en un modo de iluminación curva, cada canal de LEDs deberá ajustar su corriente de manera diferente. pero solo lo se ajustaran los canales que pertenecen al faro ubicado en el lado de la orientación de la vuelta, el faro del lado contrario, no entrará en modo de iluminación curva, si no mantendrá un modo de iluminación como si la condición sugiriera que se conduce en linea recta. Debido a esto en las figuras anteriores, el faro contrario al lado de la curva nunca entra en un modo de iluminación curva.

Para la función de orientación horizontal dinámica (swiveling) en los faros, también se generaron tablas de premisas las cuales se pueden observar en las figuras 3.56 y 3.57, dentro de las cuales podemos observar como si la condición sugiere que se conduce en curva, el faro que pertenece al mismo lado de la orientación de la curva, es el que adopta una función de Swiveling con dirección al mismo sentido de la curva. Mientras tanto el faro al que le corresponda estar al lado contrario al sentido de la curva, aun que las condiciones sugieran conducción en curva, permanecerá adoptando las características de conducción en recta.

Movimiento Horizontal Motores Vuelta Izquierda											
Posicionamiento motor faro izquierdo						Posicionamiento motor faro derecho					
La condicion sugiere que se maneja en recta						La condicion sugiere que debe activar iluminacion curva					
#	Premisa	Grados ← Izq				#	Premisa	Grados → der			
1	if velocidad < 30 km/h , Angulo ruedas Respecto Eje < 20°	9°				1	if velocidad < 30 km/h , Angulo ruedas Respecto Eje < 20°	6°			
2	if 31km/h < velocidad<40km/h, AWRE < 20°	7°				2	if 31km/h < velocidad<40km/h, AWRE < 20°	5°			
3	if 41km/h<velocidad<50km/h, AWRE < 20°	6°				3	if 41km/h<velocidad<50km/h, AWRE < 20°	5°			
4	if 51km/h<velocidad<70km/h, AWRE < 10°	0°				4	if 51km/h<velocidad<70km/h, AWRE < 10°	0°			
5	if 71km/h<velocidad<90km/h, AWRE < 50°	0°				5	if 71km/h<velocidad<90km/h, AWRE < 50°	0°			
6	if 91km/h<velocidad<120km/h,AWRE >2.8°	0°				6	if 91km/h<velocidad<120km/h,AWRE >2.8°	0°			
7	if 121km/h<velocidad,AWRE >1.50°	0°				7	if 121km/h<velocidad,AWRE >1.50°	0°			
8	if velocidad < 30 km/h , AWRE > 60°	15°				8	if velocidad < 30 km/h , AWRE > 60°	0°			
9	if 31km/h < velocidad<40km/h, AWRE > 30°	13°				9	if 31km/h < velocidad<40km/h, AWRE > 30°	0°			
10	if 41km/h<velocidad<50km/h, AWRE >20°	11°				10	if 41km/h<velocidad<50km/h, AWRE >20°	0°			
11	if 51km/h<velocidad<70km/h, AWRE >10°	9°				11	if 51km/h<velocidad<70km/h, AWRE >10°	0°			
12	if 71km/h<velocidad<90km/h, AWRE >50°	7°				12	if 71km/h<velocidad<90km/h, AWRE >50°	0°			
13	if 91km/h<velocidad<120km/h,AWRE >2.8°	6°				13	if 91km/h<velocidad<120km/h,AWRE >2.8°	0°			
14	if 121km/h<velocidad,AWRE >1.50°	5°				14	if 121km/h<velocidad,AWRE >1.50°	0°			

Figura 3.56: Tabla de premisas para el posicionamiento horizontal de los faros, presentándose vueltas a la derecha.

Movimiento Horizontal Motores Vuelta Derecha											
Posicionamiento motor faro izquierdo						Posicionamiento motor faro Derecho					
La condicion sugiere que se maneja en recta						La condicion sugiere que debe activar iluminacion curva					
#	Premisa	Grados ← Izq				#	Premisa	Grados → der			
1	if velocidad < 30 km/h , Angulo ruedas Respecto Eje < 20°	6°				1	if velocidad < 30 km/h , Angulo ruedas Respecto Eje < 20°	9°			
2	if 31km/h < velocidad<40km/h, AWRE < 20°	5°				2	if 31km/h < velocidad<40km/h, AWRE < 20°	7°			
3	if 41km/h<velocidad<50km/h, AWRE < 20°	5°				3	if 41km/h<velocidad<50km/h, AWRE < 20°	6°			
4	if 51km/h<velocidad<70km/h, AWRE < 10°	0°				4	if 51km/h<velocidad<70km/h, AWRE < 10°	0°			
5	if 71km/h<velocidad<90km/h, AWRE < 50°	0°				5	if 71km/h<velocidad<90km/h, AWRE < 50°	0°			
6	if 91km/h<velocidad<120km/h,AWRE >2.8°	0°				6	if 91km/h<velocidad<120km/h,AWRE >2.8°	0°			
7	if 121km/h<velocidad,AWRE >1.50°	0°				7	if 121km/h<velocidad,AWRE >1.50°	0°			
8	if velocidad < 30 km/h , AWRE > 60°	0°				8	if velocidad < 30 km/h , AWRE > 60°	15°			
9	if 31km/h < velocidad<40km/h, AWRE > 30°	0°				9	if 31km/h < velocidad<40km/h, AWRE > 30°	13°			
10	if 41km/h<velocidad<50km/h, AWRE >20°	0°				10	if 41km/h<velocidad<50km/h, AWRE >20°	11°			
11	if 51km/h<velocidad<70km/h, AWRE >10°	0°				11	if 51km/h<velocidad<70km/h, AWRE >10°	9°			
12	if 71km/h<velocidad<90km/h, AWRE >50°	0°				12	if 71km/h<velocidad<90km/h, AWRE >50°	7°			
13	if 91km/h<velocidad<120km/h,AWRE >2.8°	0°				13	if 91km/h<velocidad<120km/h,AWRE >2.8°	6°			
14	if 121km/h<velocidad,AWRE >1.50°	0°				14	if 121km/h<velocidad,AWRE >1.50°	5°			

Figura 3.57: Tabla de premisas para el posicionamiento horizontal de los faros, presentándose vueltas a la derecha.

Para la función leveling, la cual también utiliza motores para ajustar un posicionamiento vertical de los faros y por lo tanto de su línea de corte, también se realizó una tabla de premisas, la cual se observa en la figura 3.58, esta función de posicionamiento vertical no es dependiente de las curvas, esta función únicamente adapta los grados de inclinación vertical del haz de iluminación dependiendo de la velocidad que este adoptando el vehículo, el modo de manejo más dinámico es el modo clase E, debido a los distintos grados que deben adoptar ambos motores para distintos rangos de velocidad dentro de ese mismo modo. Es posible observar que tanto el motor izquierdo como el motor derecho adoptan el mismo nivel de elevación para el haz de luz, puesto que no importa el lado al que pertenezcan, los valores serán los mismos para ambos.

Movimiento Vertical Motores					
Control motor vertical faro izquierdo			Control motor vertical Derecho		
La condición sugiere que se maneja en recta			La condición sugiere que debe activar iluminación curva		
#	Premisa	Grados de inclinación	#	Premisa	Grados de inclinación
1	if velocidad < 30 km/h , Angulo ruedas Respecto Eje < 20°	0.57°	1	if velocidad < 30 km/h , Angulo ruedas Respecto Eje < 20	0.57°
2	if 31km/h < velocidad<40km/h , AWRE < 20°	0.57°	2	if 31km/h < velocidad<40km/h , AWRE < 20°	0.57°
3	if 41km/h< velocidad<50km/h , AWRE < 20°	0.57°	3	if 41km/h< velocidad<50km/h , AWRE < 20°	0.57°
4	if 51km/h<velocidad<70km/h , AWRE< 10°	0.54°	4	if 51km/h<velocidad<70km/h , AWRE< 10°	0.54°
5	if 71km/h<velocidad<90km/h , AWRE < 50°	0.45°	5	if 71km/h<velocidad<90km/h , AWRE < 50°	0.45°
6	if 91km/h<velocidad<120km/h,AWRE <2.8°	0.36°	6	if 91km/h<velocidad<120km/h,AWRE <2.8°	0.36°
7	if 121km/h<velocidad,AWRE <1.50°	0.24°	7	if 121km/h<velocidad,AWRE <1.50°	0.24°
8	if velocidad < 30 km/h , AWRE > 60°	0.54°	8	if velocidad < 30 km/h , AWRE > 60°	0.54°
9	if 31km/h < velocidad<40km/h , AWRE > 30°	0.54°	9	if 31km/h < velocidad<40km/h , AWRE > 30°	0.54°
10	if 41km/h< velocidad<50km/h , AWRE >20°	0.54°	10	if 41km/h< velocidad<50km/h , AWRE >20°	0.54°
11	if 51km/h<velocidad<70km/h , AWRE> 10°	0.54°	11	if 51km/h<velocidad<70km/h , AWRE> 10°	0.54°
12	if 71km/h<velocidad<90km/h , AWRE >50°	0.54°	12	if 71km/h<velocidad<90km/h , AWRE >50°	0.54°
13	if 91km/h<velocidad<120km/h,AWRE >2.8°	0.54°	13	if 91km/h<velocidad<120km/h,AWRE >2.8°	0.54°
14	if 121km/h<velocidad,AWRE >1.50°	0.54°	14	if 121km/h<velocidad,AWRE >1.50°	0.54°

Figura 3.58: Tabla de premisas para el posicionamiento vertical de los faros, en función leveling.

### 3.5.1. Definiendo el universo del discurso

Una vez que el sistema se conoce, comenzaremos con la etapa de fusificación para nuestro sistema, por lo cual debemos comenzar definiendo el universo del discurso, donde definimos nuestras dos entradas al sistema. La primera entrada al sistema es la velocidad del vehículo, como bien sabemos la velocidad comienza desde un valor de 0 km/h y la velocidad punta de un vehículo esta determinada por la potencia del motor y variables complejas que afectan al sistema, pero nuestro sistema es simulado, por lo cual es ideal y puede alcanzar velocidades muy altas, entonces para definir la velocidad punta nosotros limitamos la velocidad del vehículo utilizando un bloque de saturación dentro de la salida del modelo, entonces fijamos la velocidad punta en 180 km/h.

La segunda entrada al sistema es la posición del volante la cual conocemos y sabemos el rango de datos que podrá ser capaz de entregar, debido a que es necesario convertir esos datos a cantidades que el sistema pueda interpretar, también se decidió limitar la entrada con el uso de un bloque de saturación, en donde el valor más bajo es de -90 grados y avanzara pasando por 0 grados hasta llegar a un valor límite de 90 grados. Por lo tanto el universo del discurso para la segunda entrada llamada volante comienza en -90 y termina en 90.

Las salidas estarán separadas por un bloque de fusificación para cada una, así que el sistema contempla 4 bloques de lógica difusa. Los primeros dos de ellos se encargaran de determinar la salida de corriente necesaria para cada situación de conducción, por lo cual la salidas serán cantidades de miliamperios (mA) que deberá otorgar el sistema, dichas cantidades son definidas por la necesidad de la cantidad de lumenes que debe emitir el LED. Para nuestro dispositivo J5630 limitamos la salida máxima del bloque de control difuso será de 500 mA, como la cantidad necesaria para cumplir con los 120 lumenes que se exigen en el modo de iluminación más demandante, a partir de ahí tendremos que configurar también salidas de 300 mA, 250 mA y 200 mA, para poder cumplir con las demás necesidades de iluminación en los diferentes modos de manejo, con esto quedan definido nuestro universo de discurso para la iluminación.

Por último definiremos el universo de discurso necesario para el posicionamiento de los motores de swiveling y leveling , de los cuales los grados necesario para rotar los motores son muy pocos, y eso nos dificulta tener un amplio margen en la determinación de la salida, pero como esta salida es pensada para ser interpretada nuevamente a la salida de la PC durante una implementación

física podemos definir cualquier cantidad que queramos, puesto que nos servirá de referencia para asignar el valor corrector en grados posteriormente. Por eso multiplicamos los grados de orientación verticales por un factor de 100, para tener un universo del discurso a la salida del motor horizontal de 0 grados hasta 60 grados de inclinación vertical. Para nuestra salida horizontal tomaremos la misma estrategia, pero ahora los grados serán multiplicados únicamente por un factor de 10, con lo cual nuestras posibilidades de salida se encuentran contenidas dentro de un universo de 0 grados hasta 20 grados. La siguiente tabla (3.7) nos muestra de manera resumida el universo del discurso para todas las entradas y salidas del sistema.

Tipo de variable	Nombre	Rango
Entrada	Velocidad	0 - 180
Entrada	Volante	-90 - 90
Salida	Corriente de canal	0 - 500
Salida	Grados Swiveling	0 - 20
Salida	Grados Leveling	0 - 60

Cuadro 3.7: Universo del discurso

### 3.5.2. Variables lingüísticas de entrada y salida

Con base en el universo del discurso de cada variable podemos definir las variables lingüísticas de cada elemento variable del sistema, donde dichas variables lingüísticas resultan ser particiones del universo del discurso con los datos del sistema, las cuales nos permiten vincular nuestro lenguaje de alto nivel, con el sistema de lógica difusa, Comenzaremos definiendo las variables de entrada para la velocidad ( cuadro 3.8) y para la variable volante ( cuadro 3.13).

Variable lingüística	Significado
VmD	Velocidad menor a 10 km/h
VMDmCu	Velocidad mayor a 11 km/h y menor a 40 km/h
VMCmS	Velocidad mayor a 41 km/h y menor a 50 km/h
VMCmSS	Velocidad mayor a 51 km/h y menor a 70 km/h
VmSCmN	Velocidad mayor a 71 km/h y menor a 90 km/h
VMNmCcV	Velocidad mayor a 91 km/h y menor a 120 km/h
VMCmSS	Velocidad mayor a 120 km/h

Cuadro 3.8: Variables lingüísticas de la variable de entrada velocidad

Variable lingüística	Significado
AMS	Ángulo mayor que 60°
AMV	Ángulo mayor que 20°
AMDmD	Ángulo mayor que 10°
APPC	Ángulo de paso por cero 0°
NAMDmD	Ángulo negativo mayor que 10°
NAMV	Ángulo negativo mayor que 20°
NAMS	Ángulo negativo mayor que 60°

Cuadro 3.9: Variables lingüísticas de la variable de entrada volante

De la misma manera determinamos las variables lingüísticas de salida para las variables de salida que controlaran el sistema, las cuales para nuestro sistemas con tres, la primera es la variable de salida para la corriente de los canales de iluminación en cada faro (cuadro 3.10), la segunda es la variable que controlara los grados de orientación horizontal (Swiveling)(cuadro 3.11) y por ultimo tenemos las que describen a la salida para el posicionamiento del faro en el eje vertical, también llamado movimiento de leveling (cuadro 3.12).

Variable lingüística	Significado
DC	Corriente de salida 200 mA
DCC	Corriente de salida 250 mA
TC	Corriente de salida 300 mA
QC	Corriente de salida 500 mA

Cuadro 3.10: Variables lingüísticas de la variable de salida corriente de canal

Variable lingüística	Significado
GMN	Grados en eje horizontal 9°
GMS	Grados en eje horizontal 7°
GMSS	Grados en eje horizontal 6°
GMZ	Grados en eje horizontal 0°
GMQC	Grados en eje horizontal 15°
GMTC	Grados en eje horizontal 13°
GMOC	Grados en eje horizontal 11°
GMC	Grados en eje horizontal 5°

Cuadro 3.11: Variables lingüísticas de la variable de salida motor horizontal

Variable lingüística	Significado
PCS	Grados de Motor Vertical 57°
PCC	Grados de Motor Vertical 54°
PCCC	Grados de Motor Vertical 45°
PTS	Grados de Motor Vertical 36°
PVC	Grados de Motor Vertical 24°

Cuadro 3.12: Variables lingüísticas de la variable de salida motor vertical

### 3.5.3. Creación de tablas FAM

Después haber determinado las variables lingüísticas procedemos a crear las tablas FAM, estas tablas son la base para las reglas de inferencia de un sistema de lógica difusa, en estas tablas se involucran todas las combinaciones posibles que puedan presentarse en el proceso, como ya se ha estudiado el sistema y el comportamiento deseado ante las diferentes situaciones que pueden presentarse en la conducción del vehículo, es mas sencillo establecer la salida para cada una de las combinaciones. Cada una de las salidas del sistema requiere de la creación de su propia tabla FAM, el sistema cuenta con un total de 12 variables de salida, los 4 canales de iluminación para el faro izquierdo ( figuras 3.59, 3.60, 3.61, 3.62), los 4 canales de iluminación para el faro derecho ( figuras 3.63, 3.64, 3.65, 3.66), dos salidas para los motores de posicionamiento horizontal, uno izquierdo y otro derecho ( figuras 3.67, 3.68) y por ultimo los dos motores de posicionamiento vertical ( figura 3.69) para los cuales solo será necesario la creación de una tabla FAM, esto debido a que ambos

motores deben tener el mismo posicionamiento, así que basta con generar una salida, duplicarla y así poder tener la segunda salida necesaria.

Dentro de cada tabla FAM es posible observar que los encabezados de las columnas están divididos en dos colores, azul y verde olivo, las columnas con el color azul se presentan cuando el ángulo del volante es orientado al lado derecho, las columnas de color verde olivo representan un ángulo de volante orientado hacia una vuelta al lado izquierdo.

Faro Izquierdo CANAL 1							
Velocidad /AWRE	NAMS	NAMV	NAMdM	APPC	AMDmD	AMV	AMS
VmD	TC	TC	TC	TC	TC	TC	TC
VMDmCu	TC	TC	TC	TC	TC	TC	TC
VMCumS	TC	TC	TC	TC	TC	TC	TC
VMCmSS	TC	TC	TC	TC	TC	TC	TC
VMSCmN	TC	TC	QC	QC	QC	QC	QC
VMNmCcV	TC	TC	QC	QC	QC	QC	QC
VMCcV	TC	TC	TC	QC	QC	QC	QC

Figura 3.59: Tabla FAM para el canal 1 del faro izquierdo.

Faro Izquierdo CANAL 2							
Velocidad /AWRE	NAMS	NAMV	NAMdM	APPC	AMDmD	AMV	AMS
VmD	DCC	TC	TC	TC	TC	TC	TC
VMDmCu	DCC	DCC	TC	TC	TC	TC	TC
VMCumS	DCC	DCC	TC	TC	TC	TC	TC
VMCmSS	DCC	DCC	TC	TC	TC	TC	TC
VMSCmN	DCC	DCC	QC	QC	QC	QC	QC
VMNmCcV	DCC	DCC	QC	QC	QC	QC	QC
VMCcV	DCC	DCC	DCC	QC	QC	QC	QC

Figura 3.60: Tabla FAM para el canal 2 del faro izquierdo.

Faro Izquierdo CANAL 3							
Velocidad /AWRE	NAMS	NAMV	NAMdM	APPC	AMDmD	AMV	AMS
VmD	DCC	TC	TC	TC	TC	TC	TC
VMDmCu	DCC	DCC	TC	TC	TC	TC	TC
VMCumS	DCC	DCC	TC	TC	TC	TC	TC
VMCmSS	DCC	DCC	TC	TC	TC	TC	TC
VMSCmN	DCC	DCC	QC	QC	QC	QC	QC
VMNmCcV	DCC	DCC	QC	QC	QC	QC	QC
VMCcV	DCC	DCC	DCC	QC	QC	QC	QC

Figura 3.61: Tabla FAM para el canal 3 del faro izquierdo.

Faro Izquierdo CANAL 4							
Velocidad /AWRE	NAMS	NAMV	NAMdM	APPC	AMDmD	AMV	AMS
VmD	DC	TC	TC	TC	TC	TC	TC
VMDmCu	DC	DC	TC	TC	TC	TC	TC
VMCumS	DC	DC	TC	TC	TC	TC	TC
VMCmSS	DC	DC	TC	TC	TC	TC	TC
SMSCmN	DC	DC	QC	QC	QC	QC	QC
VMNmCcV	DC	DC	QC	QC	QC	QC	QC
VMCcV	DC	DC	DC	QC	QC	QC	QC

Figura 3.62: Tabla FAM para el canal 4 del faro izquierdo.

Faro Izquierdo CANAL 1							
Velocidad /AWRE	NAMS	NAMV	NAMdMd	APPC	AMDmD	AMV	AMS
VmD	TC	TC	TC	TC	TC	TC	TC
VMDmCu	TC	TC	TC	TC	TC	TC	TC
VMCumS	TC	TC	TC	TC	TC	TC	TC
VMCmSS	TC	TC	TC	TC	TC	TC	TC
VMScmN	TC	TC	QC	QC	QC	QC	QC
VMNmCcV	TC	TC	QC	QC	QC	QC	QC
VMccV	TC	TC	TC	QC	QC	QC	QC

Figura 3.63: Tabla FAM para el canal 1 del faro derecho.

Faro Izquierdo CANAL 2							
Velocidad /AWRE	NAMS	NAMV	NAMdMd	APPC	AMDmD	AMV	AMS
VmD	DCC	TC	TC	TC	TC	TC	TC
VMDmCu	DCC	DCC	TC	TC	TC	TC	TC
VMCumS	DCC	DCC	TC	TC	TC	TC	TC
VMCmSS	DCC	DCC	TC	TC	TC	TC	TC
VMScmN	DCC	DCC	QC	QC	QC	QC	QC
VMNmCcV	DCC	DCC	QC	QC	QC	QC	QC
VMccV	DCC	DCC	DCC	QC	QC	QC	QC

Figura 3.64: Tabla FAM para el canal 2 del faro derecho.

Faro Izquierdo CANAL 3							
Velocidad /AWRE	NAMS	NAMV	NAMdMd	APPC	AMDmD	AMV	AMS
VmD	DCC	TC	TC	TC	TC	TC	TC
VMDmCu	DCC	DCC	TC	TC	TC	TC	TC
VMCumS	DCC	DCC	TC	TC	TC	TC	TC
VMCmSS	DCC	DCC	TC	TC	TC	TC	TC
VMScmN	DCC	DCC	QC	QC	QC	QC	QC
VMNmCcV	DCC	DCC	QC	QC	QC	QC	QC
VMccV	DCC	DCC	DCC	QC	QC	QC	QC

Figura 3.65: Tabla FAM para el canal 3 del faro derecho.

Faro Izquierdo CANAL 4							
Velocidad /AWRE	NAMS	NAMV	NAMdMd	APPC	AMDmD	AMV	AMS
VmD	DC	TC	TC	TC	TC	TC	TC
VMDmCu	DC	DC	TC	TC	TC	TC	TC
VMCumS	DC	DC	TC	TC	TC	TC	TC
VMCmSS	DC	DC	TC	TC	TC	TC	TC
SMScmN	DC	DC	QC	QC	QC	QC	QC
VMNmCcV	DC	DC	QC	QC	QC	QC	QC
VMccV	DC	DC	DC	QC	QC	QC	QC

Figura 3.66: Tabla FAM para el canal 4 del faro derecho.

Motor HORIZONTAL faro izquierdo							
Velocidad /AWRE	NAMS	NAMV	NAMdMd	APPC	AMDmD	AMV	AMS
VmD	GMQC	GMQC	GMN	GMN	GMSS	GMSS	GMZ
VMDmCu	GMQC	GMTC	GMS	GMC	GMC	GMZ	GMZ
VMCumS	GMOC	GMOC	GMSS	GMC	GMC	GMZ	GMZ
VMCmSS	GMOC	GMOC	GMZ	GMZ	GMZ	GMZ	GMZ
VMScmN	GMS	GMS	GMS	GMZ	GMZ	GMZ	GMZ
VMNmCcV	GMS	GMS	GMS	GMZ	GMZ	GMZ	GMZ
VMccV	GMC	GMC	GMC	GMC	GMZ	GMZ	GMZ

Figura 3.67: Tabla FAM para el motor horizontal izquierdo.

Motor HORIZONTAL faro Derecho							
Velocidad /AWRE	NAMS	NAMV	NAMdD	APPC	AMDmD	AMV	AMS
VmD	GMZ	GMSS	GMSS	GMN	GMN	GMQC	GMQC
VMDmCu	GMZ	GMZ	GMC	GMC	GMS	GMTC	GMQC
VMCumS	GMZ	GMZ	GMC	GMC	GMSS	GMOC	GMOC
VMCmSS	GMZ	GMZ	GMZ	GMZ	GMZ	GMOC	GMOC
VMScmN	GMZ	GMZ	GMZ	GMZ	GMS	GMS	GMS
VMNmCcV	GMZ	GMZ	GMZ	GMZ	GMS	GMS	GMS
VMccV	GMZ	GMZ	GMZ	GMC	GMC	GMC	GMC

Figura 3.68: Tabla FAM para el motor horizontal derecho.

Motores VERTICALES faro izquierdo y derecho							
Velocidad /AWRE	NAMS	NAMV	NAMdD	APPC	AMDmD	AMV	AMS
VmD	PCC	PCC	PCS	PCS	PCS	PCC	PCC
VMDmCu	PCC	PCC	PCS	PCS	PCS	PCC	PCC
VMCumS	PCC	PCC	PCC	PCC	PCC	PCC	PCC
VMCmSS	PCC	PCC	PCC	PCC	PCC	PCC	PCC
VMScmN	PCC	PCC	PCCC	PCCC	PCCC	PCC	PCC
VMNmCcV	PCC	PCC	PCC	PTS	PCC	PCC	PCC
VMccV	PCC	PCC	PCC	PUC	PCC	PCC	PCC

Figura 3.69: Tabla FAM para ambos motores verticales.

### 3.5.4. Funciones de membresía y grado de pertenencia

Una vez que se han definido las tablas FAM del sistema, tenemos casi todos los datos disponibles para poder realizar una implementación del control de lógica difusa mediante los bloques Fuzzy. pero aun debemos definir las funciones y su grado de pertenencia para ser evaluados por el sistema difuso. Tomaremos las variables de entrada y de salida, las cuales ya han sido definidas dentro del universo del discurso, y comenzaremos a asignar las correspondientes funciones de pertenencia, estas funciones de pertenencia son curvas que definen el grado en que las variables pertenecen o no al conjunto, existen gran variedad de formas en las funciones de pertenencia, las mas comunes son la triangular, forma s o gauss(figura 3.70), Trapezoidal (figura 3.71) y forma singleton. Para definir las funciones de membresía de nuestro sistema elegimos trabajar con las formas gauss y trapezoidal para las variables de entrada, puesto que esto nos permitía entre otras cosas, poder definir mejor los grados de pertenencias y a su vez definir de manera mas refinada la inferencia del sistema. Lo anterior debido a que al definir las reglas de inferencias cuando se utilizaron estas formas, excluyen todo lo que se encuentra fuera de su forma, por tal se puede pensar de manera análoga a tener un valor verdadero de todo lo que se encuentre dentro de la forma y valor falso para todo lo demás que se encuentre fuera.

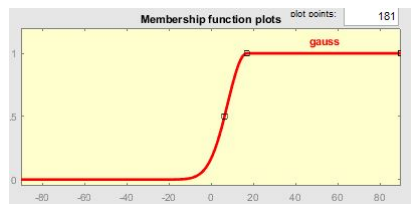


Figura 3.70: Función de membresía tipo Gauss.

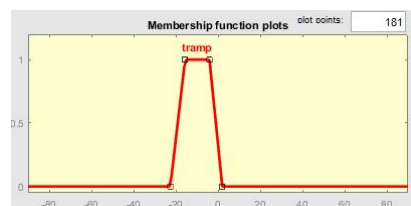


Figura 3.71: Función de membresía tipo Trapezoidal.

Entonces que para nuestra variable de entrada *Volante* tenemos un conjunto de funciones de membresía dentro de las cuales utilizamos en su mayoría funciones de tipo Gauss (figura 3.72), singleton y solamente utilizamos una función con forma triangular en el paso de cruce por el valor cero, en esta variable ajustamos la forma gauss a valores que se adaptan a los rangos contemplados dentro de las variables lingüísticas. Entonces tenemos como ajuste de los parámetros lo siguiente: NAMS [-90 -60] Singmf, NAMV [10 -90 -5 -33] gauss2mf, NAMDmD [1.699 -90 0.7474 -3.78] gauss2mf, APPC [-2.8 0 2.8] trimf, AMDmD [0.7474 3.78 1.699 90] gauss2mf, AMV [1 22 35 90] gauss2mf, AMS [30 60] sigmf.

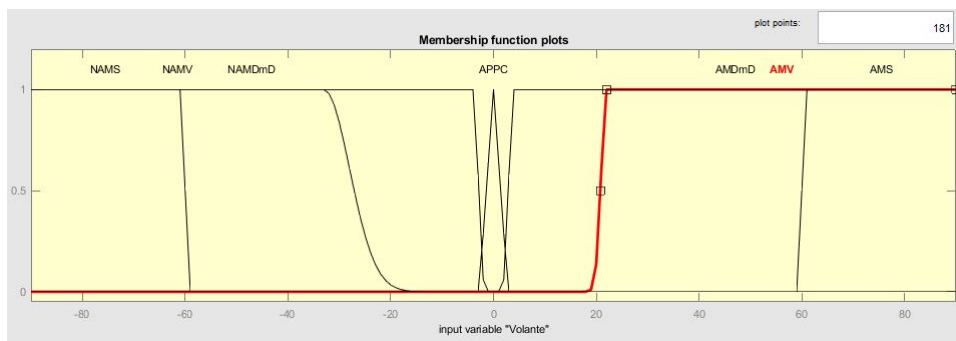


Figura 3.72: Función de membresía para variable de entrada *Volante*.

También tenemos que definir las funciones de membresía para nuestra segunda variable de entrada *Velocidad* (figura 3.73) en donde de la misma forma que en la variable anterior hay una forma que predomina, la forma gauss, de la misma forma que se explico anteriormente, se la forma se elige con base en que tan excluyente se necesita ser, los valores para ajustar las formas de las funciones de membresía se escriben a continuación: VmD [7 10] zmf, VMDmCu [1 10 1 40] gauss2mf, VMCumS [1 40 1 50] gauss2mf, VMCmSS [1 50 1 70] gauss2mf, VMSCmN [1 71 1 89] gauss2mf, VMNmCcV [1 90 1 120] gauss2mf, VMCCv [1 122] sigmf.

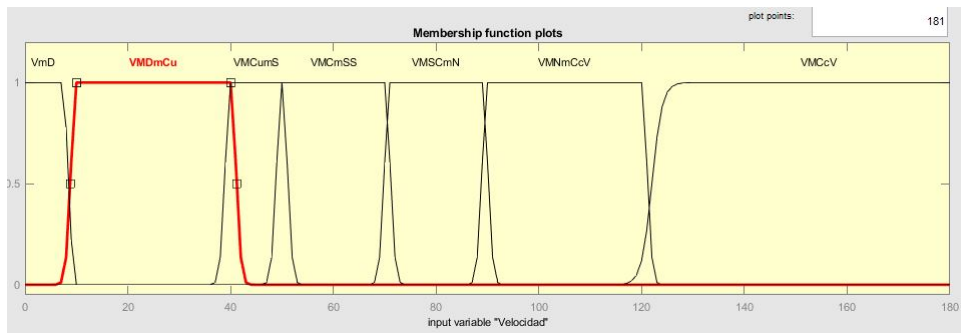


Figura 3.73: Función de membresía para variable de entrada *Velocidad*.

Para las primeras variables de salida también se deben definir las funciones de membresía, las cuales son los canales de corriente (figura 3.75) y se trata de 8 salidas, separadas en 2 grupos de 4 canales cada 1, y a su vez un grupo para cada faro, pero estas salidas funcionaran bajo el mismo universo del discurso, los mismos grados de pertenencias y las mismas características en general, la diferencias en la salida únicamente estará dada por la función de la lógica difusa, que deberá inferir el nivel de corriente adecuado. Para estas salidas, utilizamos únicamente formas de funciones triangulares, los ajustes para cada forma se escriben a continuación: DC [1 199 1 201] gauss2mf, DCC [1 249 1 250] gauss2mf, TC [1 299 1 300] gauss2mf, QC [1 499 1 500] gauss2mf.

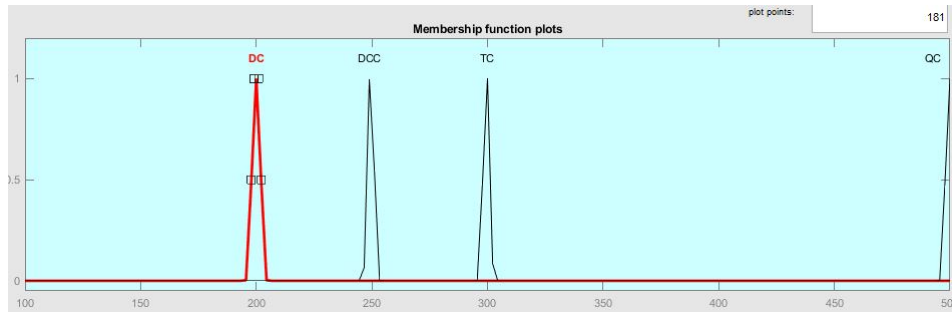


Figura 3.74: Función de membresía para variable de salida canal.

Para las salidas de los motores horizontales (figura ??) y verticales (figura 3.76) se realizo de la misma manera la definición de las funciones de membresía, para estas funciones la forma gauss2mf fue la que predomino nuevamente, los ajustes para las formas de las funciones de membresía de los motores horizontales se escriben a continuación: GMZ [0.05 0 0.05 0.1] gauss2mf, GMC [0.05 4.95 0.05 5] gauss2mf, GMSS [0.05 5.95 0.05 6] gauss2mf, GMS [0.05 6.95 0.05 7] gauss2mf, GMN [0.05 8.95 0.05 9] gauss2mf, GMOC [0.05 10.95 0.05 11] gauss2mf, GMTC [0.05 12.95 0.05 13] gauss2mf, GMQC [0.05 14.95 0.05 15] gauss2mf. Para los motores verticales de la misma manera, la forma que predomino fue gauss2mf, los ajustes para funciones de membresía se enuncias a continuación, PVC [0.05 23.99 0.05 24] gauss2mf, PTS [0.05 35.99 0.05 36] gauss2mf, PCCC [0.05 44.99 0.05 45] gauss2mf, PCC [0.05 53.99 0.05 54] gauss2mf, PCS [0.05 56.99 0.05 57] gauss2mf.

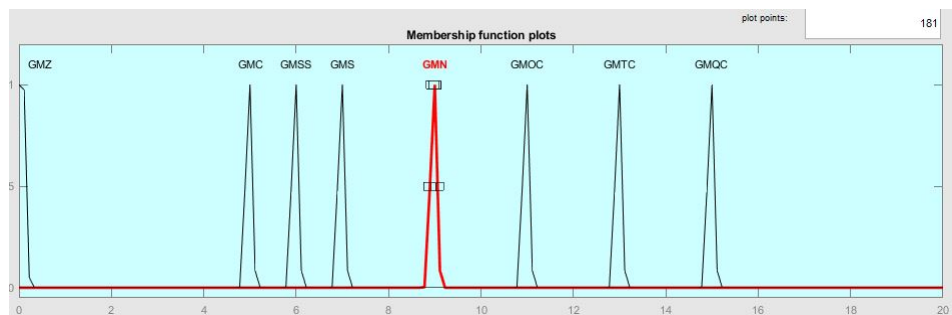


Figura 3.75: Función de membresía para variable de salida motor horizontal.

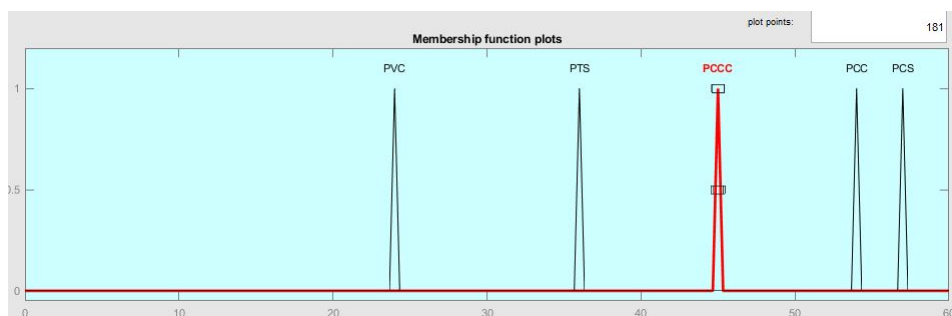


Figura 3.76: Función de membresía para variable de salida motor vertical.

### 3.5.5. Reglas de inferencia

Una vez que se cuenta con todos los elementos anteriores, se pueden determinar las reglas de inferencia y como ellas funcionarían dentro del sistema, esta tarea se basa en convertir cada una de las combinaciones de las tablas FAM en una serie de sentencias if ( ) then ( ), debido a lo cual es apreciable que tendremos 49 combinaciones posibles en cada tabla FAM, por lo tanto, como resultado tendremos definidas 49 reglas de inferencia por cada uno de los bloques de control de lógica difusa. Comenzaremos mostrando las reglas de inferencia de los motores verticales (regmotver) y horizontales (regmothor). Dentro de cada figura es posible apreciar las 49 combinaciones del sistema bajo estos universos de discurso y variables lingüísticas.

1. If (Volante is AMV) and (Velocidad is VmD) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
2. If (Volante is NAMV) and (Velocidad is VmD) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
3. If (Volante is AMS) and (Velocidad is VmD) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
4. If (Volante is NAMS) and (Velocidad is VmD) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
5. If (Volante is NAMdD) and (Velocidad is VmD) then (motizqver is PCS)(motderver is PCS) (1)
6. If (Volante is AMDdD) and (Velocidad is VmD) then (motizqver is PCS)(motderver is PCS) (1)
7. If (Volante is APPC) and (Velocidad is VmD) then (motizqver is PCS)(motderver is PCS) (1)
8. If (Volante is AMV) and (Velocidad is VMDmCu) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
9. If (Volante is NAMV) and (Velocidad is VMDmCu) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
10. If (Volante is AMS) and (Velocidad is VMDmCu) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
11. If (Volante is NAMS) and (Velocidad is VMDmCu) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
12. If (Volante is NAMdD) and (Velocidad is VMDmCu) then (motizqver is PCS)(motderver is PCS) (1)
13. If (Volante is AMDdD) and (Velocidad is VMDmCu) then (motizqver is PCS)(motderver is PCS) (1)
14. If (Volante is APPC) and (Velocidad is VMDmCu) then (motizqver is PCS)(motderver is PCS) (1)
15. If (Volante is AMV) and (Velocidad is VMCumS) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
16. If (Volante is NAMV) and (Velocidad is VMCumS) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
17. If (Volante is AMS) and (Velocidad is VMCumS) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
18. If (Volante is NAMS) and (Velocidad is VMCumS) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
19. If (Volante is NAMdD) and (Velocidad is VMCumS) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
20. If (Volante is AMDdD) and (Velocidad is VMCumS) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
21. If (Volante is APPC) and (Velocidad is VMCumS) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
22. If (Volante is AMV) and (Velocidad is VMcmSS) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
23. If (Volante is NAMV) and (Velocidad is VMcmSS) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
24. If (Volante is AMS) and (Velocidad is VMcmSS) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
25. If (Volante is NAMS) and (Velocidad is VMcmSS) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
26. If (Volante is NAMdD) and (Velocidad is VMcmSS) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
27. If (Volante is AMDdD) and (Velocidad is VMcmSS) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
28. If (Volante is APPC) and (Velocidad is VMcmSS) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
29. If (Volante is AMV) and (Velocidad is VMScmN) then (motizqver is PCCC)(motderver is PCCC) (1)
30. If (Volante is NAMV) and (Velocidad is VMScmN) then (motizqver is PCCC)(motderver is PCCC) (1)
31. If (Volante is AMS) and (Velocidad is VMScmN) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
32. If (Volante is NAMS) and (Velocidad is VMScmN) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
33. If (Volante is NAMdD) and (Velocidad is VMScmN) then (motizqver is PCCC)(motderver is PCCC) (1)
34. If (Volante is AMDdD) and (Velocidad is VMScmN) then (motizqver is PCCC)(motderver is PCCC) (1)
35. If (Volante is APPC) and (Velocidad is VMScmN) then (motizqver is PCCC)(motderver is PCCC) (1)
36. If (Volante is AMV) and (Velocidad is VMNmCcV) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
37. If (Volante is NAMV) and (Velocidad is VMNmCcV) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
38. If (Volante is AMS) and (Velocidad is VMNmCcV) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
39. If (Volante is NAMS) and (Velocidad is VMNmCcV) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
40. If (Volante is NAMdD) and (Velocidad is VMNmCcV) then (motizqver is PTS)(motderver is PTS) (1)
41. If (Volante is AMDdD) and (Velocidad is VMNmCcV) then (motizqver is PTS)(motderver is PTS) (1)
42. If (Volante is APPC) and (Velocidad is VMNmCcV) then (motizqver is PTS)(motderver is PTS) (1)
43. If (Volante is AMV) and (Velocidad is VMccV) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
44. If (Volante is NAMV) and (Velocidad is VMccV) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
45. If (Volante is AMS) and (Velocidad is VMccV) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
46. If (Volante is NAMS) and (Velocidad is VMccV) then (motizqver is PCC)(motderver is PCC) (1)
47. If (Volante is NAMdD) and (Velocidad is VMccV) then (motizqver is PVC)(motderver is PVC) (1)
48. If (Volante is AMDdD) and (Velocidad is VMccV) then (motizqver is PVC)(motderver is PVC) (1)
49. If (Volante is APPC) and (Velocidad is VMccV) then (motizqver is PVC)(motderver is PVC) (1)

Figura 3.77: Reglas de inferencia para la de salida motor vertical.

1. If (Volante is AMS) and (Velocidad is VmD) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMQC) (1)
2. If (Volante is AMV) and (Velocidad is VmD) then (motizqver is GMSS)(motderver is GMQC) (1)
3. If (Volante is AMDmD) and (Velocidad is VmD) then (motizqver is GMSS)(motderver is GMN) (1)
4. If (Volante is APPC) and (Velocidad is VmD) then (motizqver is GMN)(motderver is GMN) (1)
5. If (Volante is NAMdM) and (Velocidad is VmD) then (motizqver is GMN)(motderver is GMSS) (1)
6. If (Volante is NAMV) and (Velocidad is VmD) then (motizqver is GMQC)(motderver is GMSS) (1)
7. If (Volante is NAMS) and (Velocidad is VmD) then (motizqver is GMQC)(motderver is GMZ) (1)
8. If (Volante is AMS) and (Velocidad is VMDmCu) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMQC) (1)
9. If (Volante is AMV) and (Velocidad is VMDmCu) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMTc) (1)
10. If (Volante is AMDmD) and (Velocidad is VMDmCu) then (motizqver is GMC)(motderver is GMS) (1)
11. If (Volante is APPC) and (Velocidad is VMDmCu) then (motizqver is GMC)(motderver is GMC) (1)
12. If (Volante is NAMdM) and (Velocidad is VMDmCu) then (motizqver is GMS)(motderver is GMC) (1)
13. If (Volante is NAMV) and (Velocidad is VMDmCu) then (motizqver is GMTc)(motderver is GMZ) (1)
14. If (Volante is NAMS) and (Velocidad is VMDmCu) then (motizqver is GMQC)(motderver is GMZ) (1)
15. If (Volante is AMS) and (Velocidad is VMcUmS) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMOC) (1)
16. If (Volante is AMV) and (Velocidad is VMcUmS) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMOC) (1)
17. If (Volante is AMDmD) and (Velocidad is VMcUmS) then (motizqver is GMC)(motderver is GMSS) (1)
18. If (Volante is APPC) and (Velocidad is VMcUmS) then (motizqver is GMC)(motderver is GMC) (1)
19. If (Volante is NAMdM) and (Velocidad is VMcUmS) then (motizqver is GMSS)(motderver is GMC) (1)
20. If (Volante is NAMV) and (Velocidad is VMcUmS) then (motizqver is GMOC)(motderver is GMZ) (1)
21. If (Volante is NAMS) and (Velocidad is VMcUmS) then (motizqver is GMOC)(motderver is GMZ) (1)
22. If (Volante is AMS) and (Velocidad is VMcMSS) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMOC) (1)
23. If (Volante is AMV) and (Velocidad is VMcMSS) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMOC) (1)
24. If (Volante is AMDmD) and (Velocidad is VMcMSS) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMZ) (1)
25. If (Volante is APPC) and (Velocidad is VMcMSS) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMZ) (1)
26. If (Volante is NAMdM) and (Velocidad is VMcMSS) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMZ) (1)
27. If (Volante is NAMV) and (Velocidad is VMcMSS) then (motizqver is GMOC)(motderver is GMZ) (1)
28. If (Volante is NAMS) and (Velocidad is VMcMSS) then (motizqver is GMOC)(motderver is GMZ) (1)
29. If (Volante is AMS) and (Velocidad is VMScmN) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMS) (1)
30. If (Volante is AMV) and (Velocidad is VMScmN) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMS) (1)
31. If (Volante is AMDmD) and (Velocidad is VMScmN) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMS) (1)
32. If (Volante is APPC) and (Velocidad is VMScmN) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMZ) (1)
33. If (Volante is NAMdM) and (Velocidad is VMScmN) then (motizqver is GMS)(motderver is GMZ) (1)
34. If (Volante is NAMV) and (Velocidad is VMScmN) then (motizqver is GMS)(motderver is GMZ) (1)
35. If (Volante is NAMS) and (Velocidad is VMScmN) then (motizqver is GMS)(motderver is GMZ) (1)
36. If (Volante is AMS) and (Velocidad is VMNmCcV) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMS) (1)
37. If (Volante is AMV) and (Velocidad is VMNmCcV) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMS) (1)
38. If (Volante is AMDmD) and (Velocidad is VMNmCcV) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMS) (1)
39. If (Volante is APPC) and (Velocidad is VMNmCcV) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMZ) (1)
40. If (Volante is NAMdM) and (Velocidad is VMNmCcV) then (motizqver is GMS)(motderver is GMZ) (1)
41. If (Volante is NAMV) and (Velocidad is VMNmCcV) then (motizqver is GMS)(motderver is GMZ) (1)
42. If (Volante is NAMS) and (Velocidad is VMNmCcV) then (motizqver is GMS)(motderver is GMZ) (1)
43. If (Volante is AMS) and (Velocidad is VMcCv) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMC) (1)
44. If (Volante is AMV) and (Velocidad is VMcCv) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMC) (1)
45. If (Volante is AMDmD) and (Velocidad is VMcCv) then (motizqver is GMZ)(motderver is GMC) (1)
46. If (Volante is APPC) and (Velocidad is VMcCv) then (motizqver is GMC)(motderver is GMC) (1)
47. If (Volante is NAMdM) and (Velocidad is VMcCv) then (motizqver is GMC)(motderver is GMZ) (1)
48. If (Volante is NAMV) and (Velocidad is VMcCv) then (motizqver is GMC)(motderver is GMZ) (1)
49. If (Volante is NAMS) and (Velocidad is VMcCv) then (motizqver is GMC)(motderver is GMZ) (1)

Figura 3.78: Reglas de inferencia para la de salida motor horizontal.

Como es posible observar en las figuras anteriores, el numero de combinaciones es demasiado grande y resulta ser el mismo para el numero de reglas de inferencia, por tal motivo analizamos ampliamente las tablas FAM para los faros izquierdo y derecho. Derivado de ese análisis realizado a las tablas FAM correspondientes, pudimos observar que hay combinaciones y situaciones de conducción que se vuelven reiterativas cuando se realiza la generación de las reglas. Por ejemplo si en una velocidad de 60 km/h no existen giros del volante mayor a 20 grados, y solo es posible que a esa velocidad se entre a un modo de iluminación curva cuando si el ángulo es mayor que 15 grados, todas las combinaciones que estén por delante de ese numero de grados o velocidad no se podrán entrarían a modo de iluminación curva, si el anterior no lo logro. Es así como logramos reducir el numero de reglas para cada faro, logramos pasar de 49 reglas a tan solo 14 reglas de inferencia. Esto se puede apreciar en las figuras 3.79 para faros izquierdos y 3.80 para faros derechos.

1. If (Volante is NAMS) and (Velocidad is VmD) then (CH1 is TC)(CH2 is DCC)(CH3 is DCC)(CH4 is DC) (1)
2. If (Volante is NAMV) and (Velocidad is VMDmCu) then (CH1 is TC)(CH2 is DCC)(CH3 is DCC)(CH4 is DC) (1)
3. If (Volante is not NAMV) and (Velocidad is VMDmCu) then (CH1 is TC)(CH2 is TC)(CH3 is TC)(CH4 is TC) (1)
4. If (Volante is NAMV) and (Velocidad is VMCumS) then (CH1 is TC)(CH2 is DCC)(CH3 is DCC)(CH4 is DC) (1)
5. If (Volante is not NAMV) and (Velocidad is VMCumS) then (CH1 is TC)(CH2 is TC)(CH3 is TC)(CH4 is TC) (1)
6. If (Volante is NAMV) and (Velocidad is VMcmSS) then (CH1 is TC)(CH2 is DCC)(CH3 is DCC)(CH4 is DC) (1)
7. If (Volante is not NAMV) and (Velocidad is VMcmSS) then (CH1 is TC)(CH2 is TC)(CH3 is TC)(CH4 is TC) (1)
8. If (Volante is NAMV) and (Velocidad is VMScmN) then (CH1 is TC)(CH2 is DCC)(CH3 is DCC)(CH4 is DC) (1)
9. If (Volante is not NAMV) and (Velocidad is VMScmN) then (CH1 is QC)(CH2 is QC)(CH3 is QC)(CH4 is QC) (1)
10. If (Volante is NAMV) and (Velocidad is VMNmCcV) then (CH1 is TC)(CH2 is DCC)(CH3 is DCC)(CH4 is DC) (1)
11. If (Volante is not NAMV) and (Velocidad is VMNmCcV) then (CH1 is QC)(CH2 is QC)(CH3 is QC)(CH4 is QC) (1)
12. If (Volante is NAMdM) and (Velocidad is VMccV) then (CH1 is TC)(CH2 is DCC)(CH3 is DCC)(CH4 is DC) (1)
13. If (Volante is AMV) and (Velocidad is VMccV) then (CH1 is QC)(CH2 is QC)(CH3 is QC)(CH4 is QC) (1)
14. If (Volante is not NAMS) and (Velocidad is VmD) then (CH1 is TC)(CH2 is TC)(CH3 is TC)(CH4 is TC) (1)
15. If (Volante is not NAMdM) and (Velocidad is VMccV) then (CH1 is QC)(CH2 is QC)(CH3 is QC)(CH4 is QC) (1)

Figura 3.79: Reglas de inferencia para la de salida en corriente de faro izquierdo.

1. If (Volante is AMS) and (Velocidad is VmD) then (CH1 is TC)(CH2 is DCC)(CH3 is DCC)(CH4 is DC) (1)
2. If (Volante is not AMS) and (Velocidad is VmD) then (CH1 is TC)(CH2 is TC)(CH3 is TC)(CH4 is TC) (1)
3. If (Volante is AMV) and (Velocidad is VMDmCu) then (CH1 is TC)(CH2 is DCC)(CH3 is DCC)(CH4 is DC) (1)
4. If (Volante is not AMV) and (Velocidad is VMDmCu) then (CH1 is TC)(CH2 is TC)(CH3 is TC)(CH4 is TC) (1)
5. If (Volante is AMV) and (Velocidad is VMCumS) then (CH1 is TC)(CH2 is DCC)(CH3 is DCC)(CH4 is DC) (1)
6. If (Volante is not AMV) and (Velocidad is VMCumS) then (CH1 is TC)(CH2 is TC)(CH3 is TC)(CH4 is TC) (1)
7. If (Volante is AMV) and (Velocidad is VMcmSS) then (CH1 is TC)(CH2 is DCC)(CH3 is DCC)(CH4 is DC) (1)
8. If (Volante is not AMV) and (Velocidad is VMcmSS) then (CH1 is TC)(CH2 is TC)(CH3 is TC)(CH4 is TC) (1)
9. If (Volante is AMV) and (Velocidad is VMScmN) then (CH1 is TC)(CH2 is DCC)(CH3 is DCC)(CH4 is DC) (1)
10. If (Volante is not AMV) and (Velocidad is VMScmN) then (CH1 is QC)(CH2 is QC)(CH3 is QC)(CH4 is QC) (1)
11. If (Volante is AMV) and (Velocidad is VMNmCcV) then (CH1 is TC)(CH2 is DCC)(CH3 is DCC)(CH4 is DC) (1)
12. If (Volante is not AMV) and (Velocidad is VMNmCcV) then (CH1 is QC)(CH2 is QC)(CH3 is QC)(CH4 is QC) (1)
13. If (Volante is AMDmD) and (Velocidad is VMccV) then (CH1 is TC)(CH2 is DCC)(CH3 is DCC)(CH4 is DC) (1)
14. If (Volante is not AMDmD) and (Velocidad is VMccV) then (CH1 is QC)(CH2 is QC)(CH3 is QC)(CH4 is QC) (1)

Figura 3.80: Reglas de inferencia para la de salida en corriente para el faro derecho.

### 3.6. Circuito electrónico del sistema de iluminación AFS

Comenzamos el desarrollo de un circuito electrónico adecuado a las necesidades de este trabajo, partiendo de la selección de los dispositivos necesarios para poder realizar las funciones requeridas (alimentación, iluminación, control de potencia, generación de pulso PWM) como se muestra en la figura 3.81, gracias a esto podemos tener una integración adecuada para su funcionamiento en conjunto. Consideramos que la metodología adecuada para el desarrollo, es comenzar con la alimentación de los dispositivos de manera adecuada, posterior a esto, asegurar la alimentación adecuada para los dispositivos de iluminación, para concluir con la generación de pulsos PWM para el control de la frecuencia de los pulsos de alimentación y la atenuación necesaria para los dispositivos de iluminación.

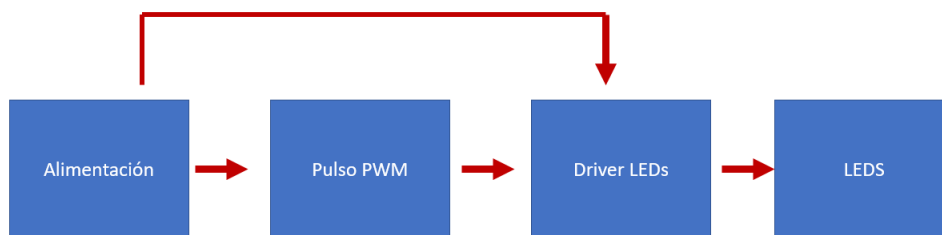


Figura 3.81: Bloques de funciones necesarias para el sistema de iluminación.

El planteamiento del funcionamiento para este circuito parte de la necesidad de controlar cuatro canales de iluminación con dispositivos LED, cada canal requiere de ocho dispositivos conectados en serie, sumando todos los canales tendríamos la necesidad de alimentar 32 LEDs en total, por lo tanto es necesario poder tener un control de potencia adecuado, tanto para asegurar la integridad de los dispositivos LED y no superar sus niveles máximos en corriente y voltaje, así como también para poder asegurar niveles adecuados de esas mismas propiedades físicas a las necesidades de iluminación. Para esto comenzaremos con la configuración del driver LED, El dispositivo LED driver LM3409 nos ayudara controlar el flujo de corriente para los LED de un solo canal ( 8 LEDs) y podrán ser atenuados mediante un pulso de PWM externo a este dispositivo.

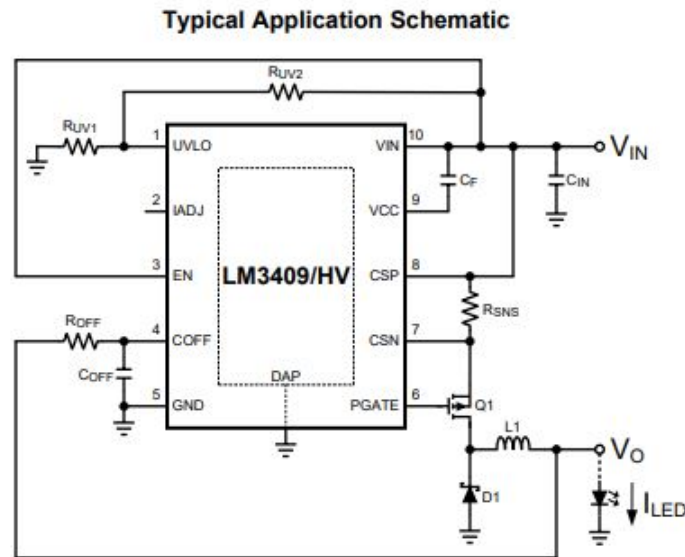


Figura 3.82: Aplicación típica de dispositivo LM3409.

			Pin Functions
NAME	PIN		DESCRIPTION
	PDIP	HVSSOP	
UVLO	1	1	Input undervoltage lockout. Connect to a resistor divider from $V_{IN}$ and GND. Turn-on threshold is 1.24 V and hysteresis for turnoff is provided by a 22 $\mu$ A current source.
IADJ	3	2	Analog LED current adjust. Apply a voltage from 0 to 1.24 V, connect a resistor to GND, or leave open to set the current sense threshold voltage.
EN	4	3	Logic level enable and PWM dimming. Apply a voltage >1.74 V to enable device, a PWM signal to dim, or a voltage < 0.5 V for low-power shutdown.
COFF	5	4	Off-time programming. Connect resistor from $V_O$ , capacitor to GND to set off-time.
GND	6	5	Connect to system ground.
PGATE	9	6	Gate drive. Connect to gate of external P-channel MOSFET.
CSN	10	7	Negative current sense. Connect to negative side of sense resistor.
CSP	11	8	Positive current sense. Connect to positive side of sense resistor (also to $V_{IN}$ ).
VCC	12	9	$V_{IN}$ -referenced linear regulator output. Connect at least a 1- $\mu$ F ceramic capacitor to $V_{IN}$ . The regulator provides power for the P-channel MOSFET drive.
VIN	14	10	Input voltage. Connect to the input voltage.
Thermal pad	—		Connect to GND pin. Place 4 to 6 vias from thermal pad to GND plane.

Figura 3.83: Descripción de pines de dispositivo LM3409.

La configuración de aplicación típica para el dispositivo LM3409 se muestra en la figura 3.82, donde las funciones de los pines y su descripción son mostrados en la figura 3.83, conocido lo anterior comenzaremos por determinar los valores necesarios para los elementos de la frecuencia nominal de conmutación ( $f_{sw}$ ).

La frecuencia de conmutación en el dispositivo puede alcanzar frecuencias de hasta 5 MHz (aunque en la práctica, las frecuencias por encima de 1 MHz son difíciles de alcanzar) y es directamente dependiente del voltaje a la entrada  $V_{in}$  (Cuando  $V_{in}$  incrementa, la frecuencia de conmutación aumenta). Para poder definir la frecuencia de conmutación en un modo continuo de conducción (CCM), utilizaremos la siguiente ecuación:

$$f_{sw} = \frac{1 - D}{t_{off}} = \frac{1 - \left(\frac{V_o}{\eta \times V_{in}}\right)}{t_{off}} \quad (3.18)$$

Donde  $D$  es el ciclo de trabajo y  $\eta$  es la eficiencia del sistema.

Esta frecuencia puede comenzar a determinarse obteniendo los valores de los elementos para el tiempo de apagado controlado del transistor Q1 (Controlled Off-Time  $C_{off}$ ), esto a su vez puede representar la constante tiempo ( $t_{off}$ ) en la que el transistor Q1 permanece apagado, esta constante esta dada por un resistor externo ( $R_{off}$ ), un capacitor externo ( $C_{off}$ ) y el voltaje de salida ( $V_o$ ). Un circuito de control, interno en el dispositivo LM3409 (figura 3.84) compara el voltaje entre el resistor y el capacitor a la entrada, con un voltaje de 1.24 volts, el tiempo que se toma el capacitor en completar su ciclo de carga, es el mismo tiempo en el que el tiempo de apagado del transistor Q1 termina. Este tiempo esta definido por la ecuación 3.19.

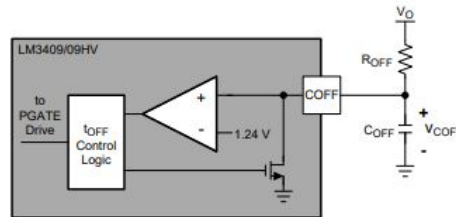


Figura 3.84: Circuito interno de control Time off .

$$T_{off} = -R_{off} \times (C_{off} + 20pF) \times \ln \left(1 - \frac{1,24V}{V_o}\right) \quad (3.19)$$

Entonces derivado de la ecuación anterior nosotros podemos determinar el valor adecuado para la resistencia  $R_{off}$  resolviendo de la siguiente manera, donde proponemos un valor de  $C_{off} = 470pF$ ,  $f_{sw} = 525 KHz$ ,  $V_{in} \max = 45 V$ ,  $V_o = 35 V$  suficiente para alimentar hasta 10 LEDs y un valor de  $\eta = 0,95$ :

$$R_{off} = \frac{-\left(1 - \frac{V_o}{\eta \times V_{in}}\right)}{(C_{off} + 20pF) \times f_{sw} \times \ln \left(1 - \frac{1,24V}{V_o}\right)} \quad (3.20)$$

Sustituimos los valores conocidos y obtenemos el valor para  $R_{off}$

$$R_{off} = \frac{-\left(1 - \frac{35}{0,95 \times 48}\right)}{(470pF + 20pF) \times 525KHz \times \ln \left(1 - \frac{1,24V}{35V}\right)} = 25,1K\Omega \quad (3.21)$$

Posterior a esto, determinaremos el valor de la inductancia que necesitamos, A partir de la siguiente ecuación, donde  $\Delta i_{L-pp}$  es el rizado permitido en la corriente de la inductancia:

$$L1 = \frac{V_o \times t_{off}}{\Delta i_{L-pp}} = \frac{35V \times 440ns}{0,5A} = 30,8uH \quad (3.22)$$

Existe una corriente máxima de LED que puede presentarse debido al rizado en el inductor, por lo que debemos estimar una resistencia necesaria para contener el aumento de corriente no deseado  $R_{sns}$ , entonces comenzamos a partir de la siguiente ecuación:

$$I_{L-max} = I_{LED} + \frac{\Delta i_{L-pp}}{2} = 0,75A \quad (3.23)$$

Asumiendo que el voltaje de ajuste  $V_{ADJ} = 1.24$ , resolvemos la siguiente ecuación para  $R_{sns}$

$$R_{sns} = \frac{V_{ADJ}}{5 \times I_{L-max}} = \frac{1,24V}{5 \times 0,75} = 0,33\Omega \quad (3.24)$$

A partir de aquí tomaremos los valores de resistencias y capacitores sugeridos por el fabricante de dispositivo, donde tenemos capacitores de entrada  $C_{IN1}$  y  $C_{IN2}$  los cuales se recomienda tengan un valor de  $2.2\mu F$ , un transistor MOSFET de 3.8 A y hasta 100V, un diodo de al menos 3A y 100V, resistencias  $R_{UV1} = 6.98 K\Omega$  y  $R_{UV2} = 49.9 K\Omega$ .

El dispositivo LED Driver Lm3409 tiene la capacidad de realizar una atenuación en los LED mediante su pin (EN) compatible con valores TTL y señales de PWM, donde la habilitación puede ser operada de 3 formas distintas. La primera de ellas es una función continua de operación donde basta conectar el pin EN directamente a voltajes por arriba de 1.74 V , la siguiente es que el driver permanezca deshabilitado, conectando (EN) a Voltajes por debajo de 0.5V. Por ultimo existe la posibilidad de controlar la corriente de operación mediante un modulador de pulsos PWM, en la figura 3.85 se muestra el comportamiento de la corriente de un LED ( $i_{LED}$ ) durante una atenuación de PWM , donde el ciclo de trabajo ( $D_{DIM}$ ) es el porcentaje del periodo de atenuación ( $T_{DIM}$ ) en el que el PFET se encuentra conmutando, el resto del tiempo el PFET se encuentra deshabilitado, entonces el resultado es una atenuación promedio en LED ( $I_{DIM-LED}$ ) la cual se describe de la siguiente forma:

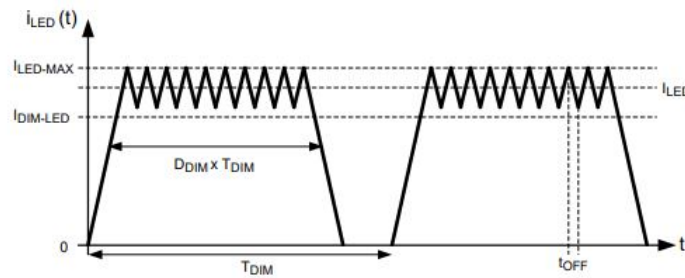


Figura 3.85: Gráfica de corriente en un LED aplicando modulación PWM.

$$I_{DIM-LED} = D_{DIM} \times I_{LED} \quad (3.25)$$

Para poder implementar un PWM externo, ocuparemos el dispositivo TL5001, dispositivo diseñado principalmente para control de fuentes de alimentación. Comenzaremos tomando como base el diagrama para una aplicación típica PWM recomendada por el fabricante del dispositivo, tal y como se muestra en la figura 3.86.

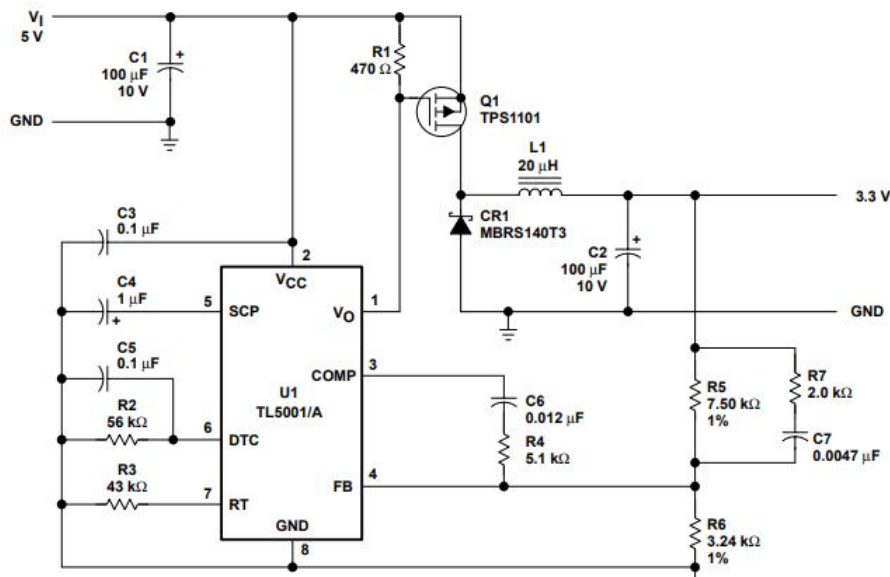


Figura 3.86: Diagrama de LM5001 para aplicación típica de PWM.

El diagrama anterior nos muestra un PWM configurado para una frecuencia de trabajo de 200 KHz, con un ciclo de trabajo del 90 %, el valor asignado al ciclo de trabajo esta dado por la resistencia y el capacitor conectados al pin numero 6 DTC bajo una conexión en paralelo, pero es importante resaltar que el elemento principalmente involucrado el el tiempo muerto DTC continuo es la resistencia, por lo cual podemos modificar el ciclo de trabajo determinando el valor de la resistencia. Esto se realiza principalmente a partir de la ecuación que se describe a continuación :

$$R_{DT} = (R_t + 1250)(D(V_{oscmax} - V_{oscmin}) + V_{oscmin}) \quad (3.26)$$

Sabemos que el circuito propuesto tiene un ciclo de trabajo definido directamente por la resistencia  $R_{DT}$ , entonces sabemos que con un valor de 56 KΩ tenemos un 90 % del ciclo de trabajo, podemos aplicar una regla de tres y obtener el valor necesario de resistencia para diferentes ciclos de trabajo. Este trabajo contará con 4 diferentes niveles de corriente en los LED del sistema, QC, TC, DCC y DC, quienes nos representas estas diferentes corrientes moduladas por PWM, en otras palabras, tendremos 4 PWM con diferentes porcentajes de ciclo de trabajo. Entonces calculamos los valores de resistencias necesarios para poder tener los 4 PWM configurados de manera adecuada. Mediante un análisis breve podemos determinar que si la resistencia conectada al pin de control de tiempo muerto (DTC) con un valor de 56 KΩ nos permite tener una señal PWM con un ciclo de trabajo del 90 %, que al ser conectada al dispositivo LM3409 configuraría un nivel de atenuación tal que se entreguen a la salida 450 mA, es posibles determinar los valores de resistencia que necesitamos configurar distintos porcentajes de ciclo de trabajo que se verían reflejados en diferentes niveles de corriente en nuestros LED, es entonces que podemos determinar con estos datos valores de resistencias necesarios, tal y como se muestra en el siguiente cuadro.

Valor de resistencia	Ciclo de Trabajo	Corriente de salida
56KΩ	90 %	450 mA
37.3KΩ	60 %	300 mA
31.2KΩ	50 %	250 mA
24.8Ω	45 %	200 mA

Cuadro 3.13: Variables lingüísticas de la variable de entrada volante

Una vez que hemos diseñado los elementos necesarios para el circuito electrónico que controlará nuestros LEDs, comenzamos la integración de estos mismos dispositivos dentro de una tarjeta PCB

que nos permita reducir las dimensiones de nuestro sistema y que nos brinde un buen rendimiento para el circuito. Para esto se planea el circuito con base en el diagrama de bloques que se muestra en la figura 3.87, en donde decidimos crear dos tarjetas diferentes en lugar de una sola. La primera tarjeta contiene los dispositivos de iluminación LED, Los driver y sus elementos necesarios de configuración, además de 8 transistores MOSFET de canal N que funcionaran como como selectores o conmutadores para poder seleccionar la entrada de PWM adecuada dentro de las 4 disponibles.

Únicamente son necesarios 8 selectores debido a que el primer canal de LEDs solamente podrá funcionar entre 2 señales diferentes de PWM (QC y TC), pues son las únicas necesarias en cualquier modo de iluminación. Los canales 2 y 3 comparten el mismo comportamiento, por lo tanto pueden compartir los mismos selectores, en ningún modo de manejo requieren de una función de iluminación distinta entre ellos, las señales requeridas en cualquier modo de manejo son únicamente 3, puesto que en ningún momento necesitas de la señal de DC. El ultimo canal requiere de 3 señales diferentes de PWM, ningún modo de manejo o situación de iluminación , requiere que deba utilizar la señal DCC

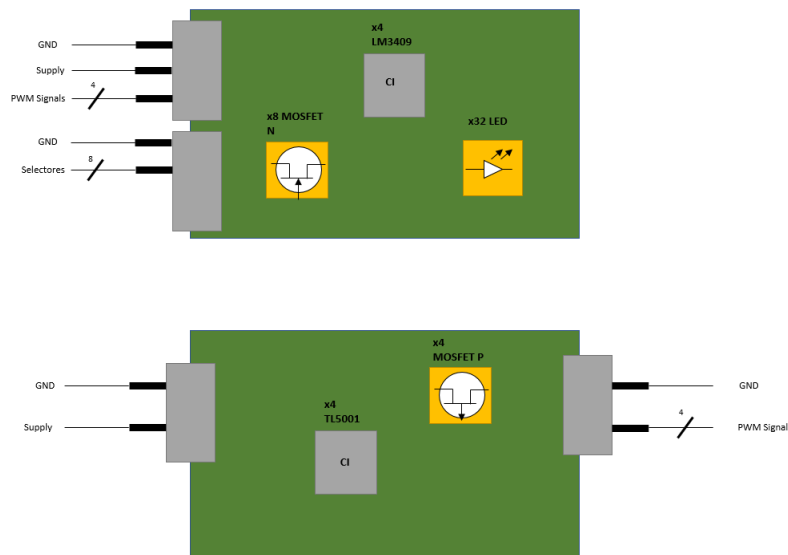


Figura 3.87: Diagrama de bloques de PCBs para circuito electrónico.

La segunda tarjeta PCB, contiene los dispositivos para generar las señales PWM de manera externa a los driver LED, estos son 4 generadores de pulsos son configurados con los diferentes ciclos de trabajo que se mostraron en el cuadro 3.13, cada dispositivo TL5001 necesita de un transistor MOSFET de canal P, los canales de alimentación son distintos para cada tarjeta PCB, debido a los niveles de voltaje distintos con los que trabajan sus elementos. Entonces, es por cuestiones de espacio y de voltajes de alimentación diferentes que se definió que los circuitos se realizaran en tarjetas diferentes.

Definida la manera en que se realizarían las tarjetas electrónicas, la distribución de funciones en ellas y con todos los dispositivos seleccionados, procedimos con la tarea de realizar los diagramas esquemáticos que integraran todos los elementos en ellos, con la finalidad de llevar a cabo la ubicación de cada footprint de todos los elementos de manera adecuada así como las conexiones que existen entre cada uno de los elementos, estos diagramas esquemáticos son creados desde el software Altium Designer , un poderoso paquete de software dedicado al diseño de circuitos electrónicos para placas impresas, el primer diagrama se muestra en la figura 3.88.

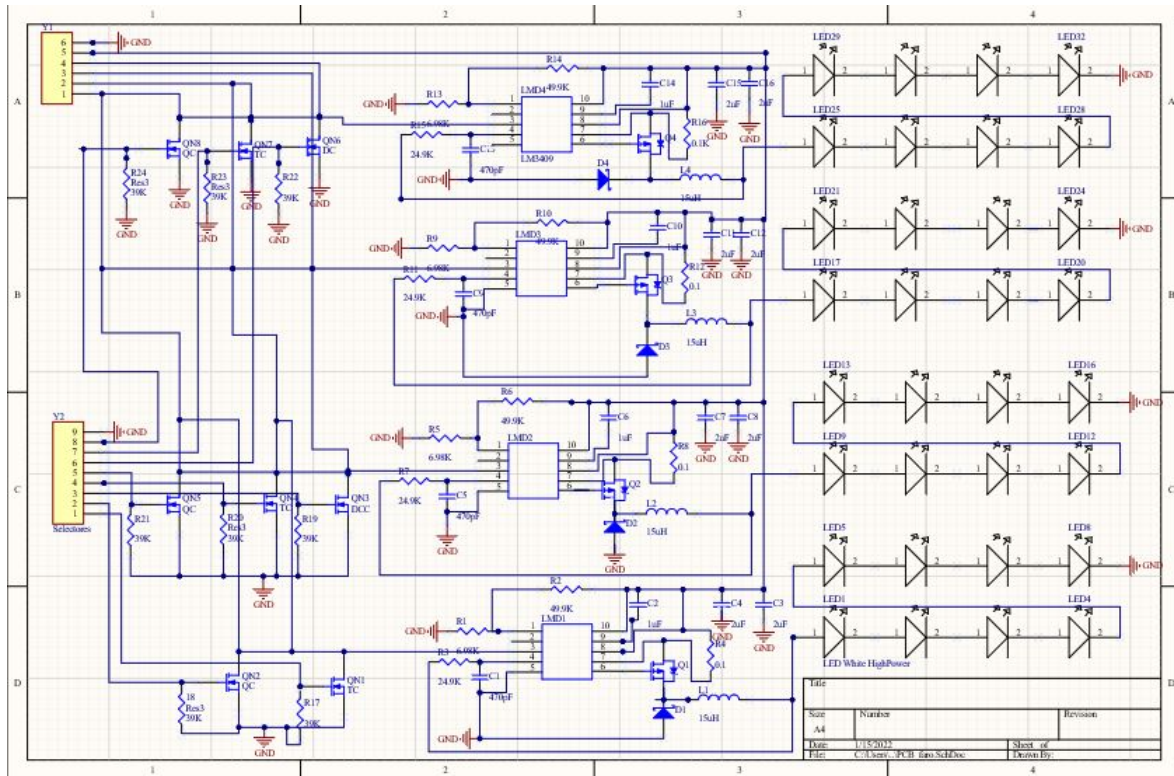


Figura 3.88: Diagrama esquemático para tarjeta impresa de sistema de iluminación.

En el diagrama esquemático de la figura 3.88 podemos observar los puertos de entrada que tendría la tarjeta del sistema de iluminación, estos puertos son los que se encuentran de la izquierda, que a su vez fueron divididos en 2 partes, el conector de 9 pines que se encuentra en la parte inferior, es un conector a señales TTL provenientes de alguna unidad de control, desde este puerto ingresan las señales que se dirigen a los 8 transistores, que como ya mencionamos actúan como selectores entre las distintas señales PWM para su posterior ingreso en el dispositivo LED driver, cada uno de los 4 dispositivos LED driver es capaz de manejar un canal de iluminación, que a su vez cuenta con 8 dispositivos LED. En el conector superior se encuentra la llegada de línea de alimentación, GND, y la conexión de las 4 señales de PWM.

Para el lector puede resultar de importancia observar que la cantidad de conexiones a GND es alta y que eventualmente podrían causar confusión, es por eso que resaltamos el hecho de que las tierras compartirán un modo de conexión común, por lo que puede ser posible modificar los planos y poder entonces crear planos de tierra común que puedan facilitar el trazado de cables de conducción. También es necesario comentar que para la creación de tarjetas de circuitos impresos existen diferentes homologaciones y estándares tales como los estándares IEC 61188 entre muchos otros, los cuales no fueron considerados en el momento del diseño de este circuito, los cuales posibilitan desarrollos de mayor calidad, tomando como base el uso de buenas practicas de diseño que pueden ser encontradas en este tipo de homologaciones y estándares.

De igual manera realizamos el diagrama esquemático para la segunda tarjeta, en la cual podemos observar del lado izquierdo la llegada de la línea de alimentación, del lado derecho tenemos las salidas de las líneas de señales de pulso PWM, acompañados de una salida de tierra común (GND). Como es posible de apreciar, podemos visualizar los 4 dispositivos TL5001, el primer dispositivo del lado inferior de la tarjeta será el dispositivo encargado de generar la señal de pulso con un 90 % del ciclo de trabajo, el segundo dispositivo que se encuentra por arriba de la ubicación del primer dispositivos se encargara de generar la señal de pulso de 60 % y así sucesivamente de manera ascendente. También nos es posible observar ubicación de los elementos como el transistor de MOSFET de canal P, los diodos schottky y los elementos inductivos. De la misma manera que para la tarjeta

PCB anterior, no se tomaron en cuenta para el diseño, las buenas practicas de diseño recomendadas en estándares y homologaciones, las conexiones a tierra también se conectan a un plano común, lo cual nos facilita realizar la conexión de elementos ubicados en el medio de la tarjeta y sin un plano de tierra cercanos a ellos. Posterior al termino del diseño, se procedió a llevar a cabo la conexión de alambres necesarios y todo el resto de los componentes para poder entonces tener realizado el diseño completo de nuestra tarjeta PCB el cual se mencionará mas adelante, dentro del capítulo 4 resultados.

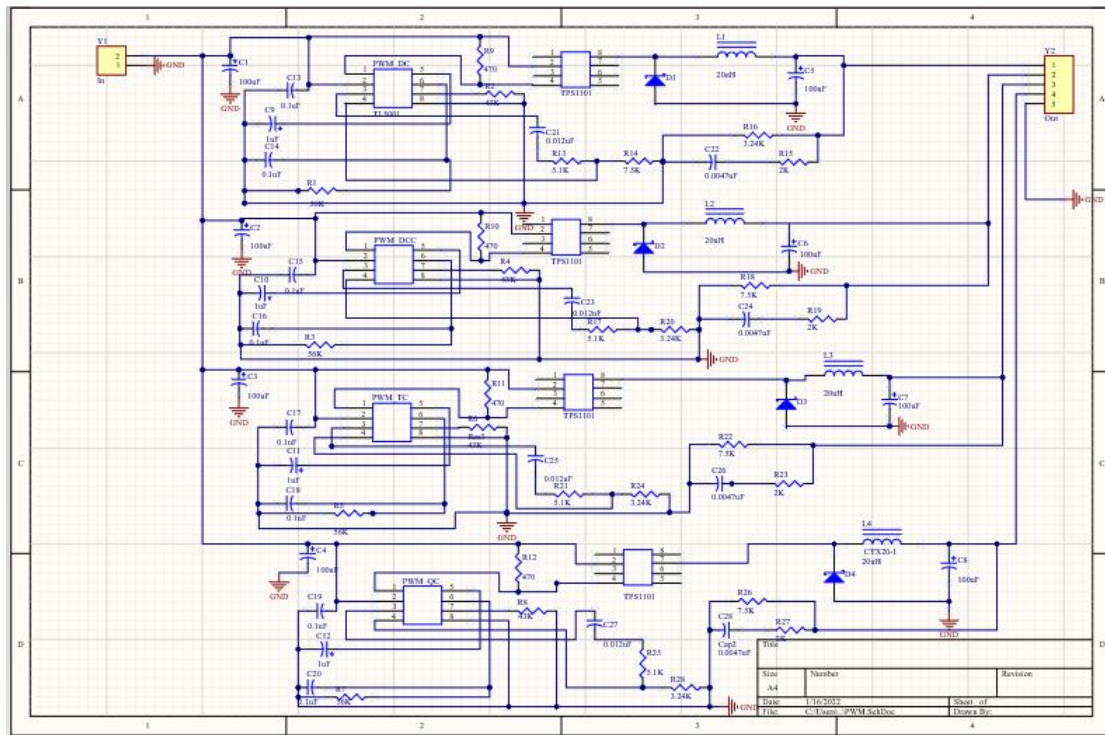


Figura 3.89: Diagrama esquemático para tarjeta impresa de generación de pulsos PWM.

### 3.7. Desarrollo de modelo CAD

Para poder tener un desarrollo mas completo de todo el sistema de faros frontales adaptativos, se planeo diseñar una carcasa completa para el faro, cuya estética y dimensiones, además de proteger a los elementos de las tarjetas de control brindaran una buena imagen al faro frontal, este diseño se realizo en el software de modelado CAD llamado SolidWorks, dentro del cual existían dos enfoques de diseño posibles, la primera, probablemente la mas sencilla, hacerlo de manera manual mediante extracciones cortes y diseño a través de planos sencillos paralelos a los ejes de diseño y con menos posibilidad de añadir un grado alto a la complejidad del diseño. La segunda opción, realizar un diseño a partir de una técnica con base en el diseño de superficies, la cual permite realizar diseños de mayor grado de dificultad, tanto en su diseño, como en su complejidad, pero que claro demanda un nivel de conocimiento sobre el software es necesario, como también del uso de las herramientas que permiten un diseño mas detallado. La selección de técnica utilizada es en base a los conocimientos y experiencia que nos es posible adquirir en poco tiempo.

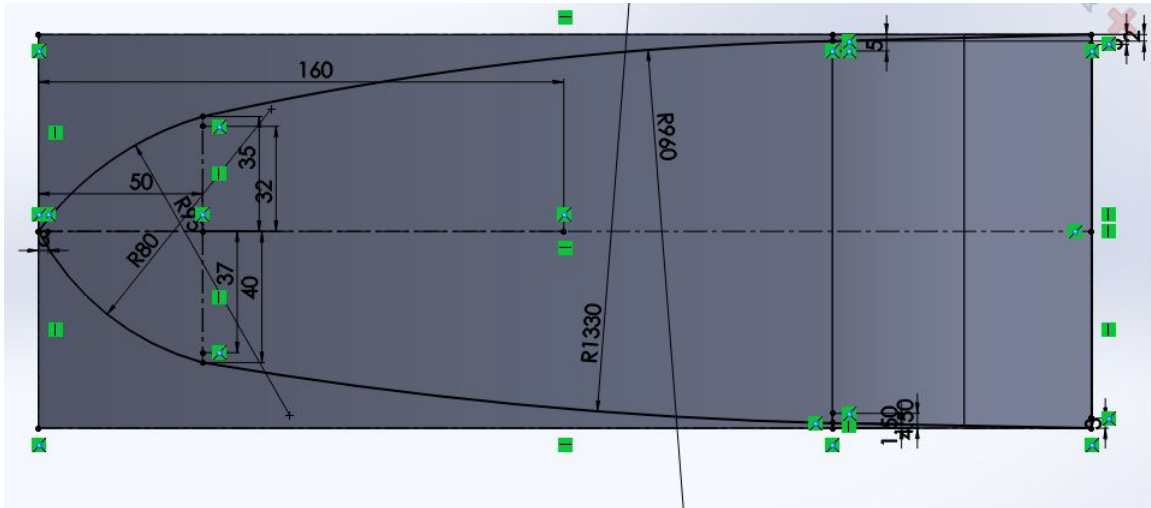


Figura 3.90: Bloque solido con plano para modelado y extrusión del mismo.

Comenzamos el diseño generando un un bloque solido rectangular sin material asignado, para las medidas de dicho bloque se buscó que fueran lo mas cercanas posibles a la realidad , a partir de este solido gris, podremos realizar cortes y extrusiones al bloque, tal y como se puede observar en la figura 3.90. Se puede apreciar el plano flotado con cada uno de las medidas que fueron planeadas para cumplir de manera adecuada con una buena en proporciones y estética.

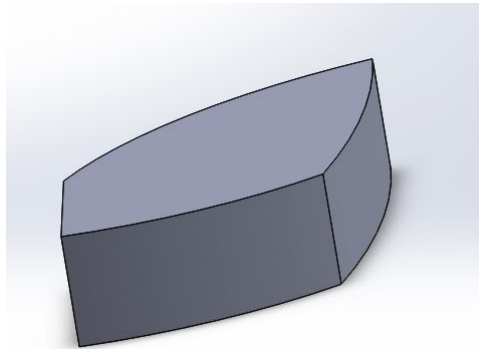


Figura 3.91: Bloque solido extruido, con la forma principal de la carcasa.

Después de haber concluido la parte del solido, de haberlo extruido y que este prácticamente listo, podemos pasar a desarrollar una carcasa exterior basada en un material de policarbonato . Esta carcasa es diseñada a partir del plano de de cortes y extrusiones para el solido anterior, pero esta vez , se deben expandir un poco las medidas para que la carcasa sea capas de encapsular la parte trasera del faro y poder crear un alojamiento de los componentes electrónicos, que sea capaz de prevenir la entrada a líquidos y polvo del exterior. La expansión en las medidas de la carcasa son cercanas a 1.5 mm desde el borde interior que es el que tiene el contacto con la parte del alojamiento del faro y de ahí hacia el borde exterior, lo anterior para no interferir con las medidas iniciales proyectadas en boceto y que existieran colisiones al realizar el ensamble de los elementos. También se le adhirieron pestañas de sujeción al diseño, estas pestañas son las que permitirían sujetar la carcasa el alojamiento de manera rígida, 4 pestañas se agregaron del lado frontal para brindar una buena sujeción y 6 pestañas mas de lado lateral por tener una mayor longitud y para no comprometer el estado de la sujeción para fuerzas normales o perpendiculares a la trayectoria del vehículo.

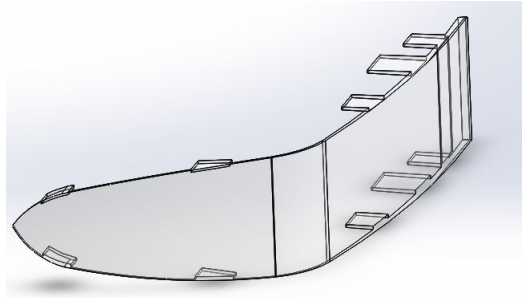


Figura 3.92: Carcasa de Policarbonato.

La siguiente fase, después de tener la carcasa de policarbonato y el alojamiento de plástico duro, es presentar ambas piezas para verificar que no existen errores en las medidas entre un elemento y otro, errores de colisiones que no pueden observarse cuando se diseñan las piezas por separado, también se puede comenzar a tener una vista general de como puede observarse ambos elementos, este acercamiento previo al ensamblaje se puede observar en la figura 3.92.

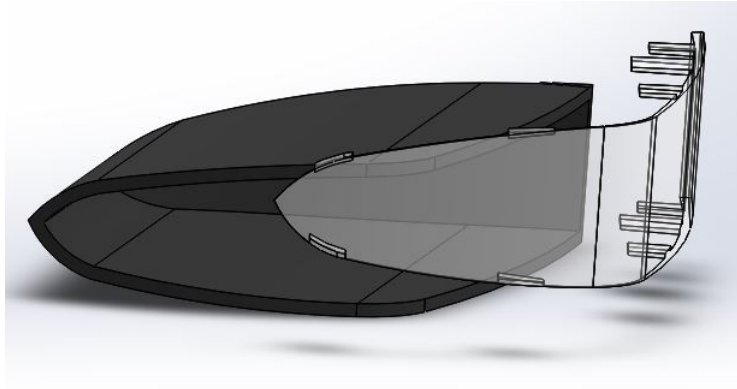


Figura 3.93: Presentación de piezas previo ensamblaje.

Verificadas las condiciones de los elementos, corregidas las discrepancias de medidas y teniendo certeza de que no existen colisiones entre ambas piezas, realizamos el ensamble. Pudimos obtener un agradable resultado de lo que nosotros planeamos para el alojamiento de los componentes electrónicos. Se busca que se un precedente para trabajos futuros, pues se trata únicamente de un alojamiento, el cual puede contener desde una simple tarjeta electrónica y motores de movimiento, hasta alojar módulos de iluminación mediante proyectores de lentes ópticos. El resultado de este ensamble puede visualizarse en la figura 3.94.

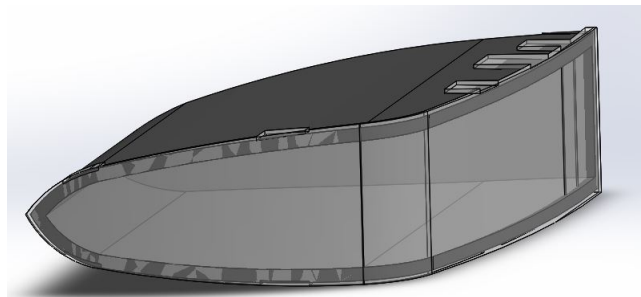


Figura 3.94: Carcasa en ensamblaje final.

## Capítulo 4

# Resultados

*En este capítulo se da paso a la presentación de los resultados obtenidos durante el desarrollo del presente trabajo, mismos que fueron descritos en metodología y/o procedimientos en el capítulo anterior. Se recompilan los datos obtenidos, se analizan y si es posible se comparan dichos datos, con la finalidad de brindar al lector un panorama a detalle de los datos y estudios recopilados en este trabajo.*

## 4.1. Circuito virtual para conducción

Se llevo a cabo la implementación de dos circuitos de conducción diferentes, como ya fue mencionado, el primero de ellos fue diseñado por nosotros mismos, el segundo de ellos fue utilizado bajo licencia, en ambos se logró la conducción del vehículo virtual de manera correcta, sin embargo, dentro de una tarea comparativa sobre el desempeño de ambos pudimos determinar características principales que nos brindan un panorama más completo de los beneficios y limitaciones que tienen el uno frente al otro.

En la figura 4.1 podemos observar ambos resultados obtenidos del uso/implementación de los escenarios virtuales, para poder ser tomadas como referencia de las características que se pretenden comparar. Además el cuadro 4.1, también nos brinda un resumen de la información comparada en este breve análisis, se trata de características puntuales, que si se cuenta con ellas se marcan con una X, en caso de no contar con la característica o desempeñarse de manera inferior se marca con un -, o si las características son directamente cuantificables, se escriben las cantidades y/o unidades correspondientes.



Figura 4.1: Imagen comparativa de los ambientes virtuales (Superior - desarrollado bajo código libre, Inferior - Utilizado bajo el uso de licencia).

Comenzaremos comparando el diseño de los ambientes simulados, el circuito bajo licencia presenta la opción de tener hasta 6 escenarios prediseñados disponibles para ser utilizados en cualquier momento, basta con configurar el bloque de simulation 3D Scene configuration para poder utilizar el que deseemos, mientras que el circuito bajo código abierto necesita de editar directamente el escenario para poder obtener un cambio en las características deseadas, lo cual implica la necesidad de tiempo en el desarrollo. También podemos ver que el nivel de detalle en el circuito bajo el uso de licencia es mucho mayor que el del circuito de código abierto, la definición en los materiales, los acabados de diseño en las superficies son visiblemente más trabajados, mientras que en el circuito de código abierto pueden existir errores estéticos por parte del diseñador que pueden ser visibles al momento de la conducción.

El tiempo de desarrollo en el diseño es más prolongado si utilizamos el circuito de código libre, puesto que cualquier cambio en el ambiente requiere modificaciones directas por parte del diseñador, eso también influye en la cantidad de elementos y opciones que están disponibles para elección del usuario, por ejemplo la cantidad de modelos de vehículos entre los cuales es posible elegir, el circuito bajo licencia dispone de 7 modelos prediseñados listos para poder ser utilizados en cualquier momento, con una estética detallada y que brindan mayor realismo al entorno de conducción, por

Característica	Circuito bajo licencia	Circuito código libre
Opciones de vehículo	7	1
Superior en nivel de detalle	X	-
Gratuito	-	X
Requiere tiempo de diseño	-	X
Representación de dinámica detallada	X	-
Facilidad de conducción	X	-
Escenarios disponibles	6	1
Velocidad tope de vehículo	180 Km/h	200 Km/h

Cuadro 4.1: Comparación entre características ofrecidas por el circuito bajo licencia y el circuito de código libre.

su parte, el circuito de código libre únicamente cuenta con un vehículo limitado en estética y de poco detalle en el modelo, incluir otro modelo prediseñado es complicado además de que consume mucho tiempo para poder integrarlo al ambiente virtual.

La representación virtual de la dinámica física del modelo es quizá el punto más relevante en las diferencias profundas que existen entre ambas opciones. Todos los circuitos, cualquiera que sea su naturaleza, libre o bajo licencia, tienen una codificación encargada de vincular y sincronizar los datos de posición en los 3 ejes de orientación (X,Y,Z) con la representación gráfica del ambiente virtual. El grado de detalle con el cual fueron vinculados los vehículos y escenarios prediseñados del circuito bajo licencia, además de ser más avanzados, se adecuan perfectamente a los datos obtenidos del modelo dinámico del vehículo simulado en Simulink. Por su parte, un circuito de código abierto mantiene dificultades al sincronizar los datos de posición al momento de la simulación, esto debido claramente al nivel de desarrollo en código dentro de UE4 por parte del diseñador del circuito. Esto, sumado a la poca flexibilidad de modificación en la dinámica del vehículo representativo en el código abierto, derivan en una conducción un tanto complicada y poco estable, que da sensación de bajo realismo en la simulación. Otra característica que se ve involucrada con la dinámica vinculada a los vehículos simulados, es que bajo el código abierto, el vehículo puede alcanzar velocidades muy altas de hasta 200 km/h y en muy poco tiempo, que lo hacen difícil de conducir y que también restan la sensación de realismo en la simulación.

Por todo lo anterior que se ha mencionado, se justifica la decisión de utilizar el circuito bajo licencia, y se presentan las ventajas que otorga por encima de los escenarios diseñados bajo código libre, ventajas que pueden ser observadas y sostenidas gracias a este breve análisis comparativo.

## 4.2. Reglas en la lógica difusa e inferencias de salida

Al desarrollar e implementar reglas de inferencia para un sistema de lógica difusa, podemos evaluar dichas reglas implementadas y visualizar los resultados que el sistema asigna bajo la inferencia de sus salidas. De esta manera podemos conocer de manera previa el comportamiento que presentaran las reglas establecidas al ser evaluadas dentro del sistema.

Para presentar los resultados obtenidos previo a la implementación del sistema completo comenzaremos por verificar los resultados de cada bloque de lógica difusa, recordando que el sistema implementa 4 bloques diferentes. Los primeros resultados que presentaremos pertenecen al faro derecho, la salida en sus 4 canales de iluminación sin presentar un ángulo de vuelta en el volante, evaluando 4 velocidades distintas, las cuales pertenecen a rangos de velocidades para diferentes modos de manejo, con el fin de conocer la respuesta inferida para diferentes modos de iluminación cuando varía solamente la velocidad.

## Reglas de inferencia para Faro Derecho

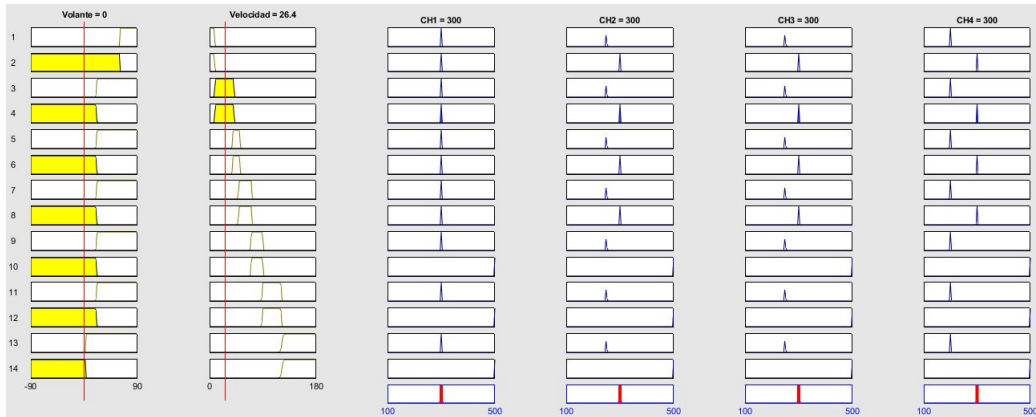


Figura 4.2: Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación (corriente a través de LEDs) en faro derecho bajo conducción sin giro en el volante a 26.4 km/h.

Cuando el vehículo viaja a una velocidad de 26.4 km/h, en dirección recta por como lo sugiere la posición del volante, tal y como se observa en la figura 4.2, el sistema de lógica difusa infiere como salida la misma corriente para los cuatro canales de iluminación del faro derecho, ya que las condiciones no sugieren una conducción en curva que sea capaz de activar un modo de iluminación curva. Se corrobora que la salida presenta la entrega de corriente necesaria para iluminación requerida cumple con las necesidades del modo de iluminación clase V, para velocidades menores a 51 Km/h sin iluminación curva.

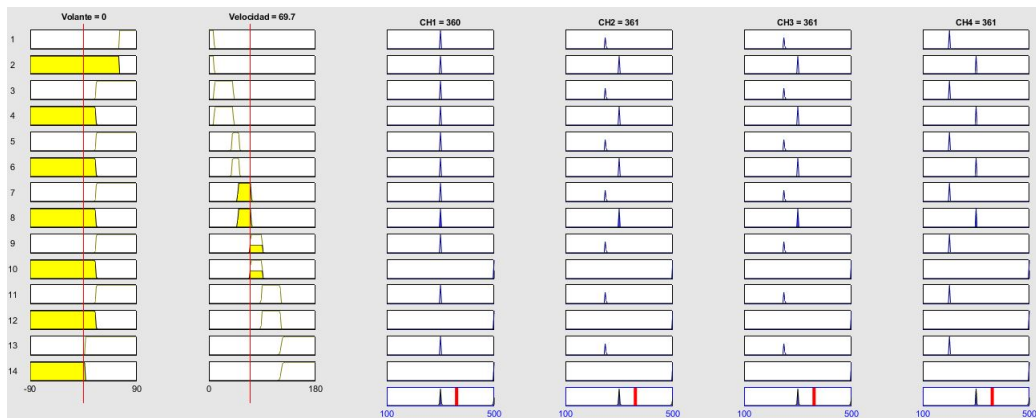


Figura 4.3: Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro derecho bajo conducción sin giro en el volante a 69.7 km/h.

En la figura 4.3 se puede observar el resultado de la inferencia realizada por el bloque de lógica difusa, donde la entrada del volante nuevamente sugiere una conducción en línea recta a una velocidad de 69.7 Km/h. Esta velocidad se encuentra muy cercana salir del rango de velocidad del modo de iluminación de clase C, es por esto que el sistema difuso infiere el cambio en la clase de iluminación a una clase E y comienza a elevar los valores en la corriente de cada canal de iluminación. Para esta inferencia de salida, el sistema esta entregando 60 mA de los que corresponden a la clase C y presenta un déficit de 140 mA como para entrar en un modo clase E.

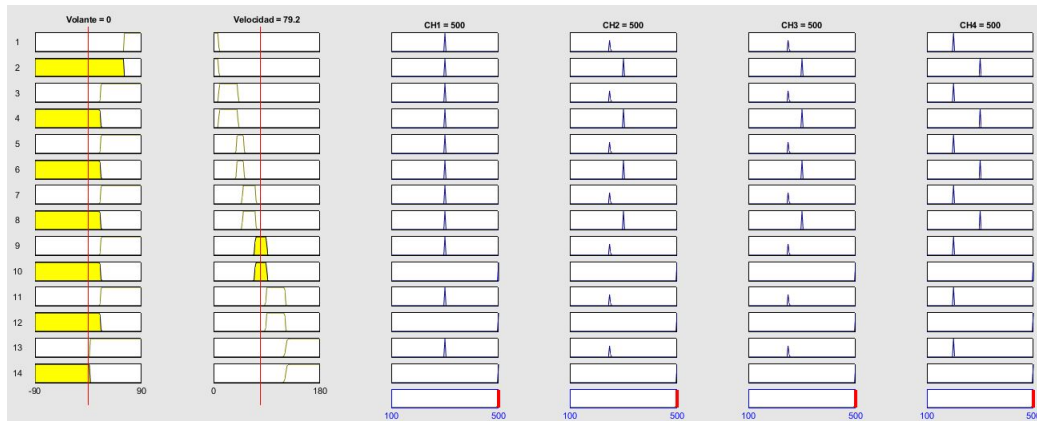


Figura 4.4: Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro derecho bajo conducción sin giro en el volante a 79.2 km/h.

Cuando las condiciones del ángulo del volante permanecen como el caso anterior, pero la velocidad continúa aumentando, sucede un cambio en el modo de iluminación, ahora se necesita de la clase E, la cual a la salida debe proporcionar una corriente de 500 mA para cada canal de iluminación, tal y como se muestra en la figura 4.4, ahora se alcanza una velocidad de 79.2 Km/h y los valores de salida inferidos por el sistema de lógica difusa no varían a lo requerido.

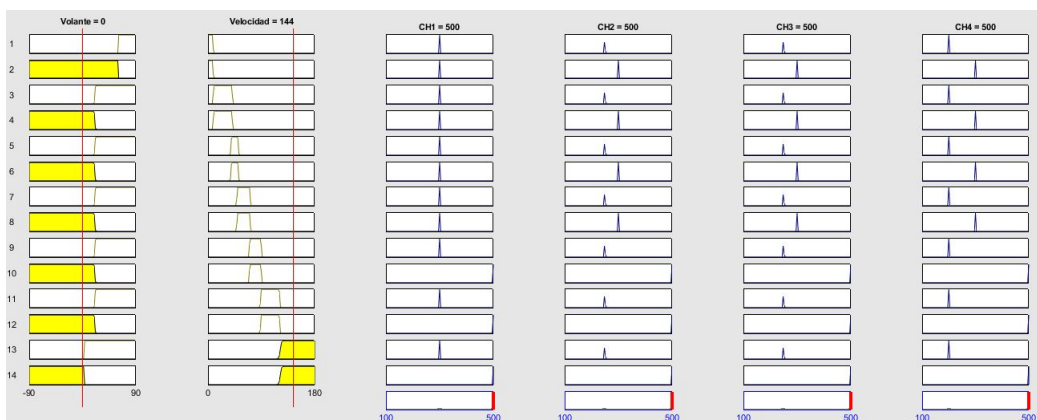


Figura 4.5: Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro derecho bajo conducción sin giro en el volante a 144 km/h..

Como una última prueba para las reglas de inferencia del sistema de lógica difusa con una conducción sin curva, para el faro derecho, se ingresa una velocidad de vehículo de 144 Km/h como se muestra en la figura 4.5, donde la inferencia del sistema devuelve un valor de 500 mA para cada canal de iluminación, tal y como se requiere en la clase E de iluminación que corresponde al rango de velocidad en donde se encuentran los 144 Km/h.



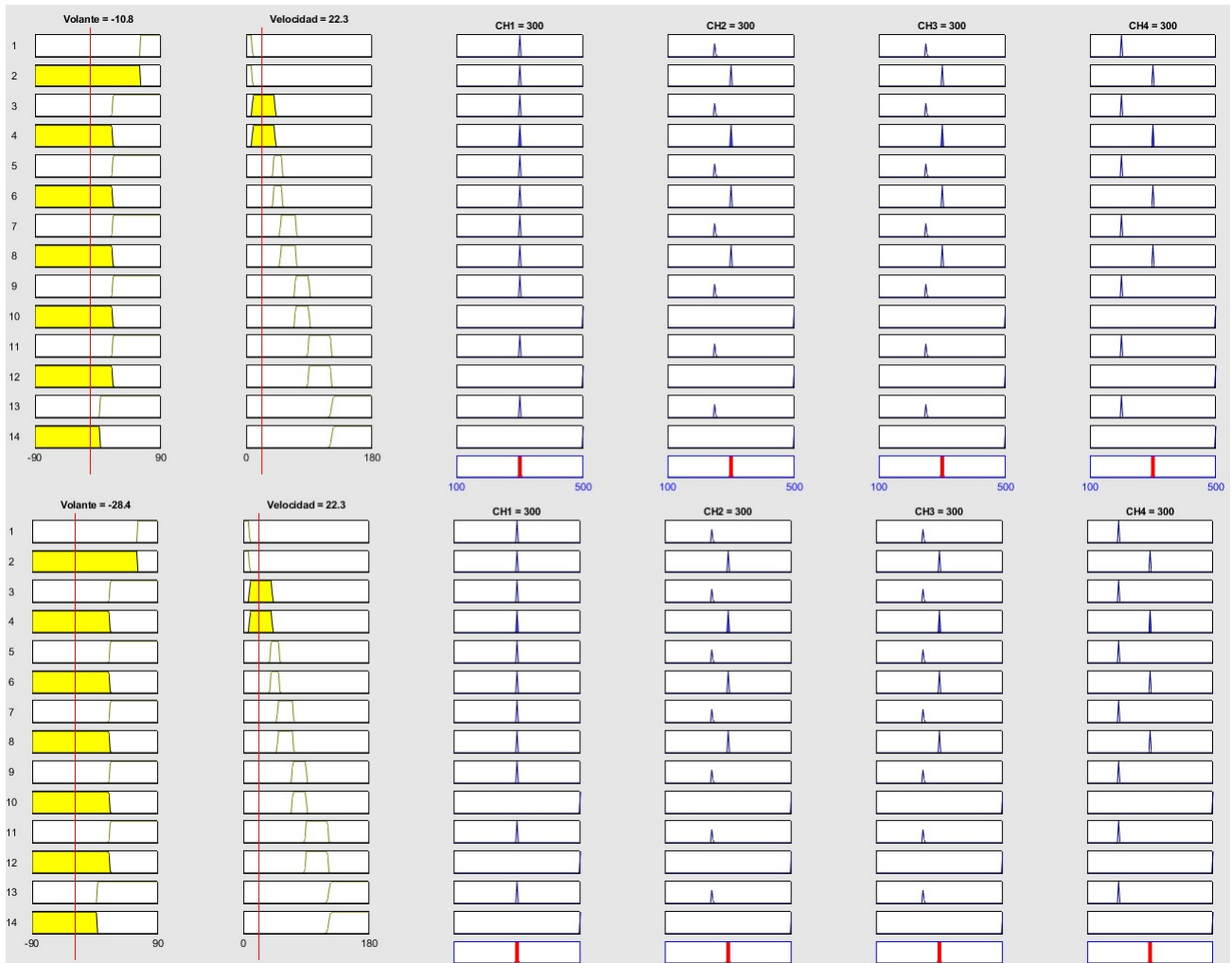


Figura 4.7: Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro derecho bajo conducción con vuelta a la izquierda a 22.3 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido -10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado -28.4 grados (inferior).

En la figura 4.7 se muestran los resultados de las reglas de inferencias cuando se mantiene una velocidad de 22.3 Km/h, pero un ángulo en el volante que sugiere una vuelta a la izquierda, de la misma manera que en la figura anterior, primero se presenta un ángulo pequeño pero ahora hacia la izquierda, con lo cual el sistema de lógica difusa infiere que el modo de iluminación permanece en clase V, con lo cual todos los canales de iluminación presentan la misma salida de 300 mA, pero no se debe confundir el valor inferido con alguna relación al ángulo pequeño en el volante, pues se trata del comportamiento de un faro derecho, el cual no debe entrar en modo de iluminación de curva durante curvas hacia el lado izquierdo. Por lo tanto el resultado de la regla de inferencia es correcto, un mayor ángulo de volante como el de -28.4 grados, tampoco resulta en un modo de iluminación curva para la salida de corriente en los canales de iluminación, como logra observar se mantiene el valor de 300 mA para todos los canales de iluminación.

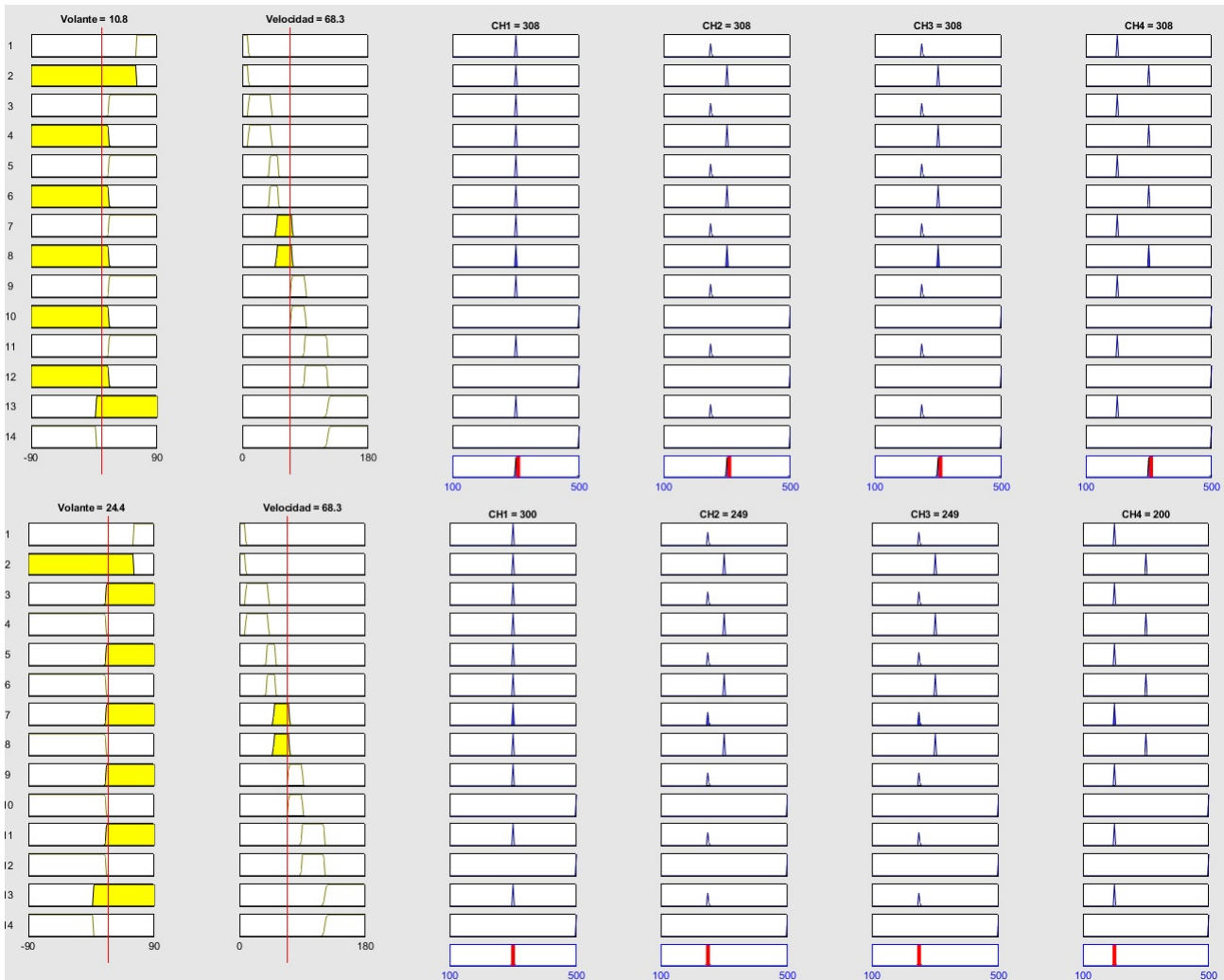


Figura 4.8: Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro derecho bajo conducción con vuelta a la derecha a 68.3 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido 10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado 24.4 grados(inferior).

Ahora configuramos una velocidad de 68.3 Km/h en la velocidad que debería presentar el vehículo para continuar analizando el desempeño de las reglas de inferencia de nuestro sistema de lógica difusa. Como podemos observar en la figura 4.8, nuevamente se configura un ángulo de volante poco pronunciado hacia el lado derecho, que aunado a la velocidad, no es capaz de llevar el faro a un modo de iluminación curva, pues el sistema infiere que a esa velocidad probablemente un giro en el volante de ese tamaño no represente una conducción en curva, por lo que se mantiene una misma salida de 300 mA para todos los canales de iluminación. Pero una vez que se configura un ángulo de volante mas grande, como lo representan 24.4 grados, el sistema de lógica difusa infiere que se conduce en una curva, por lo cual lleva las salidas del sistema a un modo de iluminación curva, por lo que podemos observar los respectivos 300 mA, 250 mA, 250 mA y 200 mA para cada canal de iluminación.

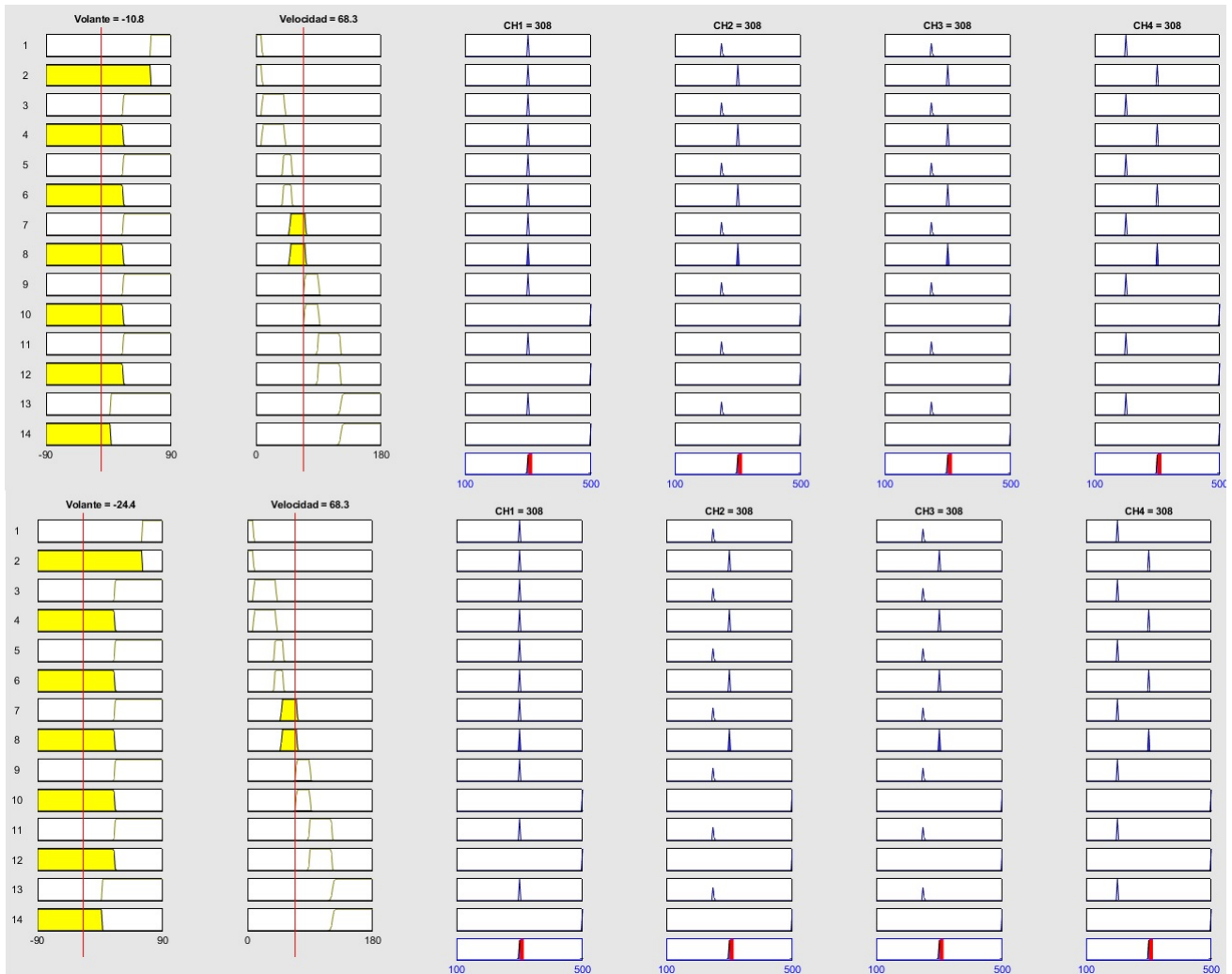


Figura 4.9: Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro derecho bajo conducción con vuelta a la izquierda a 68.3 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido -10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado -68.3 grados(inferior).

La figura 4.9 configura la misma velocidad de entrada para evaluar ahora la respuesta de las reglas de inferencia para una vuelta a la izquierda en el faro derecho, como es posible observar, para un ángulo de volante reducido de -10.8 grados, la salida se mantiene en un modo de iluminación correspondiente a la clase C, el cual proporciona en la salida 300 mA para cada canal de iluminación. Sucede lo mismo cuando se configura un ángulo de volante más pronunciado de -24.4 grados, donde el sistema de lógica difusa nuevamente infiere que el faro derecho no debe activar un modo de iluminación curva debido al lado donde se encuentra posicionado el faro. Por lo tanto la salida otorga 300 mA para cada uno de los canales de iluminación.



Figura 4.10: Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro derecho bajo conducción con vuelta a la derecha a 112 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido 9.47 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado 23 grados(inferior).

Esta ocasión se configura una velocidad de 112 Km/h para poder visualizar como el sistema de lógica difusa logra inferir un nuevo modo de iluminación, el modo de iluminación de clase E, el cual requiere a la salida 500 mA en cada uno de los canales de iluminación. Configuramos un ángulo poco pronunciado en la entrada del volante, el cual es de 9.47 grados hacia la derecha, las reglas de inferencia determinan de manera correcta que no se debe activar un modo de iluminación curva, que la necesidad del faro derecho es cambiar de clase de iluminación, por lo cual se ajusta una salida de 500 mA necesarios en cada uno de los canales de iluminación. Posteriormente se configura un ángulo de volante mas pronunciado de 23 grados, en el cual el sistema de lógica difusa infiere que se debe activar un modo de iluminación curva, pues las condiciones así lo sugieren, es entonces cuando la salida del sistema se ajusta para entregar 300 mA, 250 mA, 250 mA y 200 mA respectivamente para cada uno de los canales de iluminación.



Figura 4.11: Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro derecho bajo conducción con vuelta a la izquierda a 112 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido -10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado -22 grados (inferior).

Ahora continuaremos con la configuración de velocidad para el sistema de la misma manera que se realizó en la figura 4.10, pero esta vez configuramos una vuelta hacia el lado izquierdo, donde el sistema de lógica difusa debe ser capaz de inferir que en ningún momento se debe activar un modo de iluminación curva por ser un faro derecho. Entonces como se puede observar en la figura 4.11 se configura una entrada del ángulo de volante poco pronunciado, de -10.8 grados hacia el lado izquierdo, aquí se puede apreciar como el sistema mantiene la misma salida de 500 mA para cada uno de los canales de iluminación, cantidad de corriente que resulta adecuada para un modo de iluminación de clase E, esto nos permite ver que el sistema infiere de manera correcta que no debe activar un modo de iluminación curva. Posteriormente se configura a la entrada del ángulo de volante un valor más grande que el anterior, con -22 grados hacia la izquierda, con el cual el sistema nuevamente responde de manera adecuada, puesto que mantiene una salida de 500 mA para cada uno de los canales de iluminación.



Figura 4.12: Imagen comparativa de los resultados de inferencia en un mismo ángulo de volante a la derecha reducido, a 112 Km/h y a 128 Km/h.

Comprobamos también la capacidad del sistema para inferir de manera adecuada la respuesta del sistema cuando realiza un cambio de velocidad ante un mismo ángulo en el volante, especialmente con los ángulos pequeños y las altas velocidades. Cuando se presentan altas velocidades de conducción el modo de iluminación curva se activa con ángulos mas pequeños, puesto que tomar una curva muy pronunciada a alta velocidad significaría una volcadura del vehículo, entonces las reglas deben inferir que a una alta velocidad se puede suscitar el momento en que se tome una curva amplia sin disminuir la velocidad y donde el ángulo de volante es pequeño. En la figura 4.12 podemos observar como al configurar un ángulo pequeño de 9.47 grados a la derecha, el sistema infiere dos salidas distintas dependientes cada una de la velocidad configurada, donde únicamente cuando el vehículo supera los 120 Km/h, el sistema infiere una salida en modo de iluminación curva. Para una velocidades por debajo de los 120 Km/h, el sistema infiere para ángulos pequeños un modo de conducción en recta y mantiene a la salida los niveles de corriente correspondientes al modo de iluminación adecuado al rango de velocidad.

## Reglas de inferencia para Faro Izquierdo

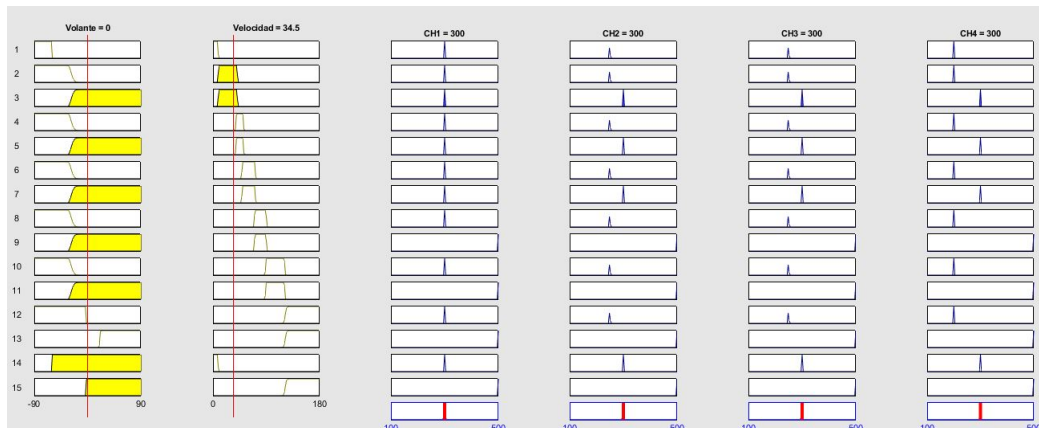


Figura 4.13: Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro izquierdo bajo conducción sin giro en el volante a 34.5 km/h.

Cuando el vehículo viaja a una velocidad de 34.5 km/h, en dirección recta por como lo sugiere la posición del volante, tal y como se observa en la figura 4.13, el sistema de lógica difusa infiere como salida la misma corriente para los cuatro canales de iluminación del faro izquierdo, ya que las condiciones no sugieren una conducción en curva que sea capaz de activar un modo de iluminación curva. Se corrobora que la salida presenta la entrega de corriente necesaria para iluminación requerida cumple con las necesidades del modo de iluminación clase V, para velocidades menores a 51 Km/h sin iluminación curva.

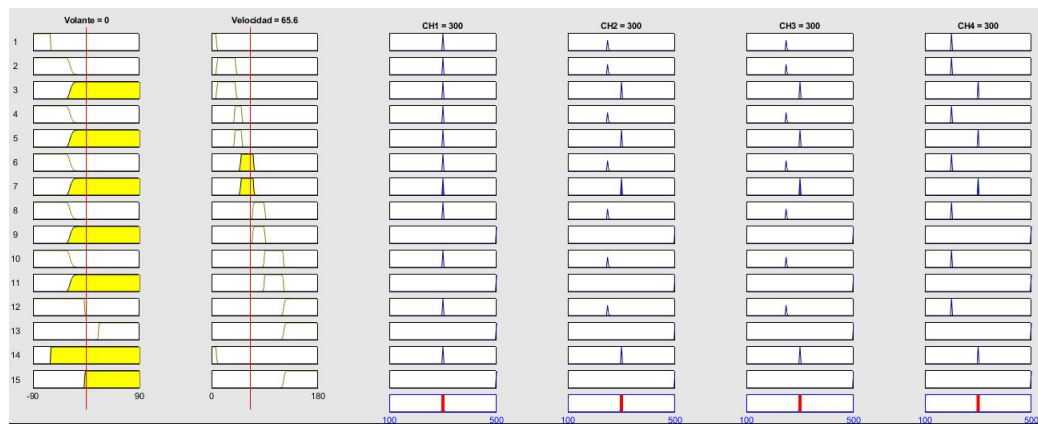


Figura 4.14: Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro izquierdo bajo conducción sin giro en el volante a 65.6 km/h.

En la figura 4.14 se puede observar el resultado de la inferencia realizada por el bloque de lógica difusa, donde la entrada del volante nuevamente sugiere una conducción en línea recta a una velocidad de 65.6 Km/h. Esta velocidad se encuentra muy cercana salir del rango de velocidad del modo de iluminación de clase C, pero el sistema continua entregando a la salida una corriente de 300 mA para cada canal de iluminación.

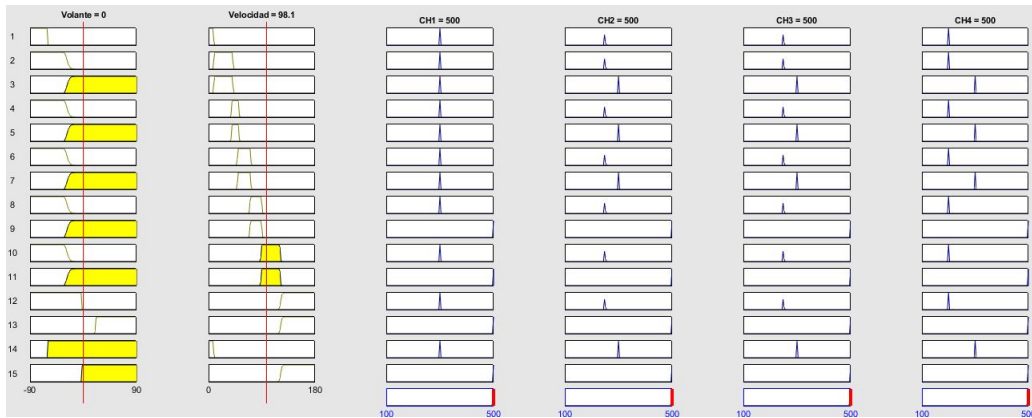


Figura 4.15: Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro izquierdo bajo conducción sin giro en el volante a 98.1 km/h.

Cuando las condiciones del ángulo del volante permanecen como el caso anterior, pero la velocidad continúa aumentando, sucede un cambio en el modo de iluminación, ahora se necesita de la clase E, la cual a la salida debe proporcionar una corriente de 500 mA para cada canal de iluminación, tal y como se muestra en la figura 4.15, ahora se alcanza una velocidad de 98.1 Km/h y los valores de salida inferidos por el sistema de lógica difusa no varían a lo requerido.



Figura 4.16: Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro izquierdo bajo conducción sin giro en el volante a 133 km/h.

Como una última prueba para las reglas de inferencia del sistema de lógica difusa con una conducción sin curva, para el faro izquierdo, se ingresa una velocidad de vehículo de 133 Km/h como se muestra en la figura 4.16, donde la inferencia del sistema devuelve un valor de 500 mA para cada canal de iluminación, tal y como se requiere en la clase E de iluminación que corresponde al rango de velocidad en donde se encuentran los 133 Km/h.

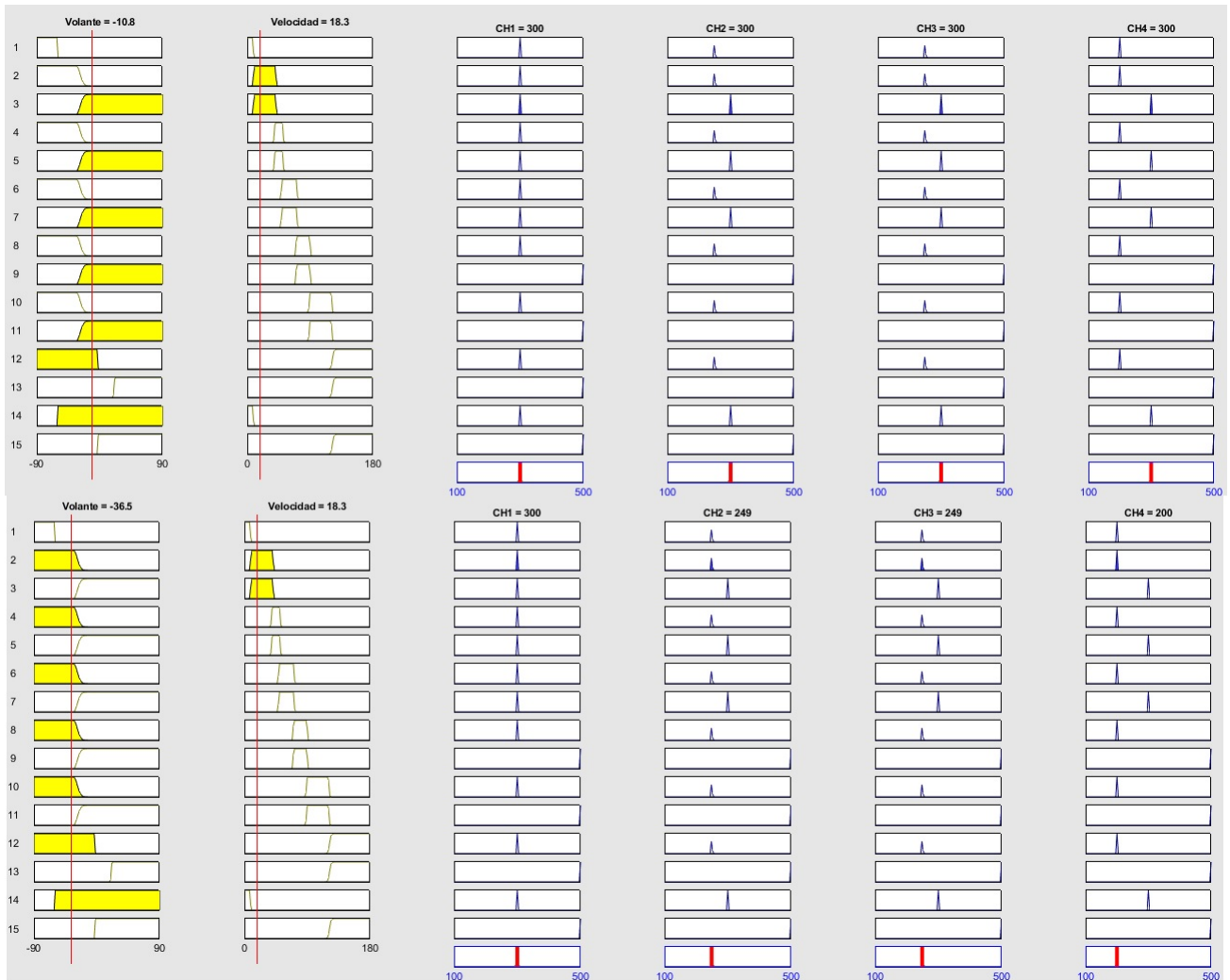


Figura 4.17: Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro izquierdo bajo conducción con vuelta a la derecha a 18.3 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido -10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado -36.5 grados (inferior).

En las siguientes figuras se presenta una comparación del comportamiento a la salida del faro izquierdo, el cual fue inferido por la lógica difusa y que es comparado para el mismo faro, en el mismo rango de velocidad, con un primer ángulo de vuelta pequeño y otro ángulo de vuelta pronunciado. Como se observa en la figura 4.17, se ingresa un rango de velocidad de clase V, con un primer ángulo de -10.8 grados en el volante, que no es capaz de activar un modo de iluminación curva, manteniendo una misma salida de corriente para todos los canales de iluminación, la cual es correspondiente a la clase V, puesto que a bajas velocidades se necesita de un ángulo más pronunciado para que el sistema infiera que se encuentra en una curva, tal y como sucede a -36.5 grados en el volante, donde el sistema infiere que se da una vuelta a la izquierda y activa el modo de iluminación para el faro izquierdo, asignando los diferentes niveles de corriente en cada canal ya mencionados.

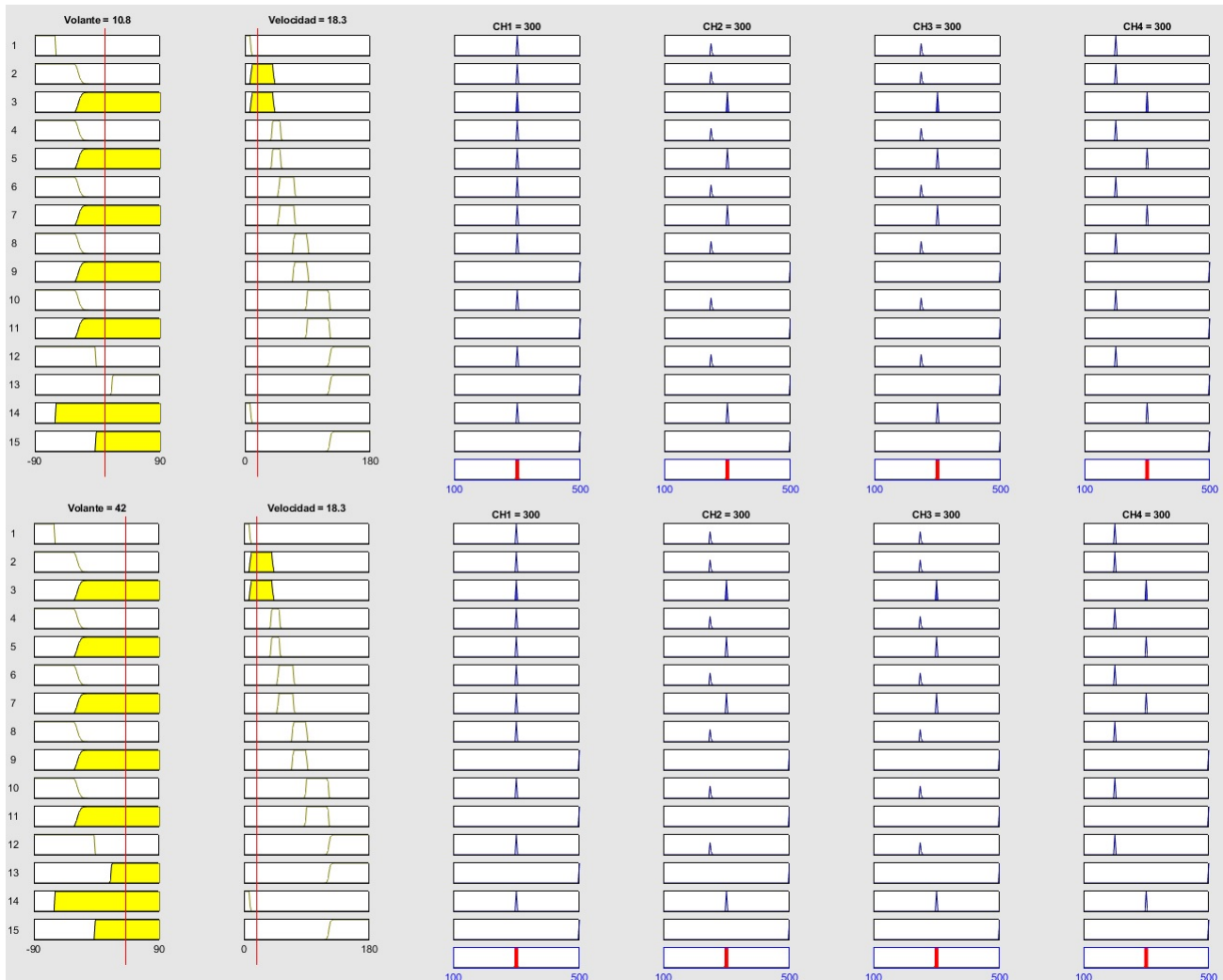


Figura 4.18: Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro izquierdo bajo conducción con vuelta a la derecha a 18.3 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido 10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado 42 grados (inferior).

En la figura 4.18 se muestran los resultados de las reglas de inferencias cuando se mantiene una velocidad de 18.3 Km/h, pero un ángulo en el volante que sugiere una vuelta a la derecha, de la misma manera que en la figura anterior, primero se presenta un ángulo pequeño pero ahora hacia la derecha, con lo cual el sistema de lógica difusa infiere que el modo de iluminación permanece en clase V, con lo cual todos los canales de iluminación presentan la misma salida de 300 mA, pero no se debe confundir el valor inferido con alguna relación al ángulo pequeño en el volante, pues se trata del comportamiento de un faro izquierdo, el cual no debe entrar en modo de iluminación de curva durante curvas hacia el lado derecho. Por lo tanto el resultado de la regla de inferencia es correcto, un mayor ángulo de volante como el de 42 grados, tampoco resulta en un modo de iluminación curva para la salida de corriente en los canales de iluminación, como logra observar se mantiene el valor de 300 mA para todos los canales de iluminación.

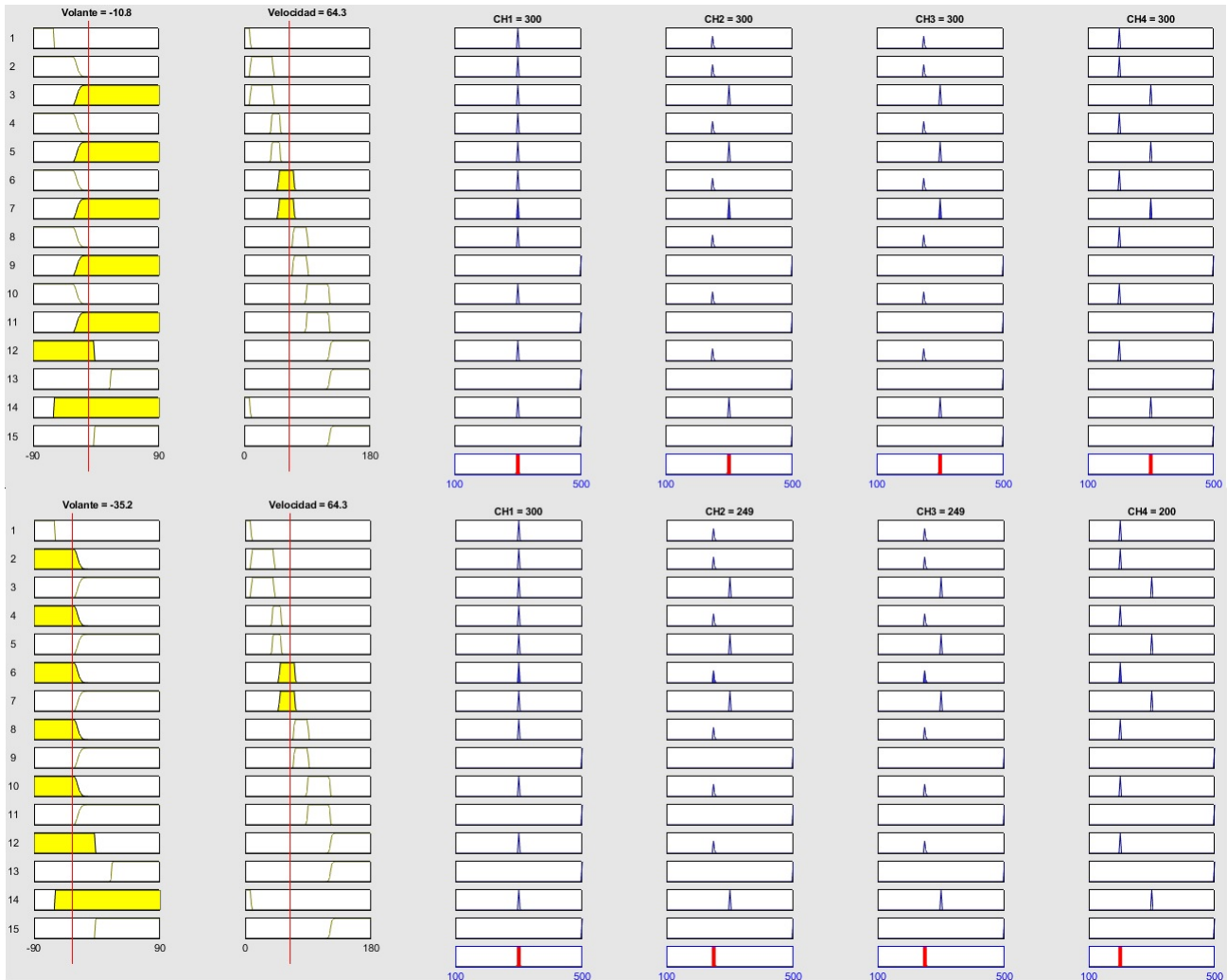


Figura 4.19: Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro izquierdo bajo conducción con vuelta a la derecha a 64.3 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido -10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado -35.2 grados (inferior).

Ahora configuramos una velocidad de 64.3 Km/h en la velocidad que debería presentar el vehículo para continuar analizando el desempeño de las reglas de inferencia de nuestro sistema de lógica difusa. Como podemos observar en la figura 4.19, nuevamente se configura un ángulo de volante poco pronunciado hacia el lado izquierdo, que aunado a la velocidad, no es capaz de llevar el faro a un modo de iluminación curva, pues el sistema infiere que a esa velocidad probablemente un giro en el volante de ese tamaño no represente una conducción en curva, por lo que se mantiene una misma salida de 300 mA para todos los canales de iluminación. Pero una vez que se configura un ángulo de volante mas grande, como lo representan -35.2 grados, el sistema de lógica difusa infiere que se conduce en una curva, por lo cual lleva las salidas del sistema a un modo de iluminación curva, por lo que podemos observar los respectivos 300 mA, 250 mA, 250 mA y 200 mA para cada canal de iluminación.

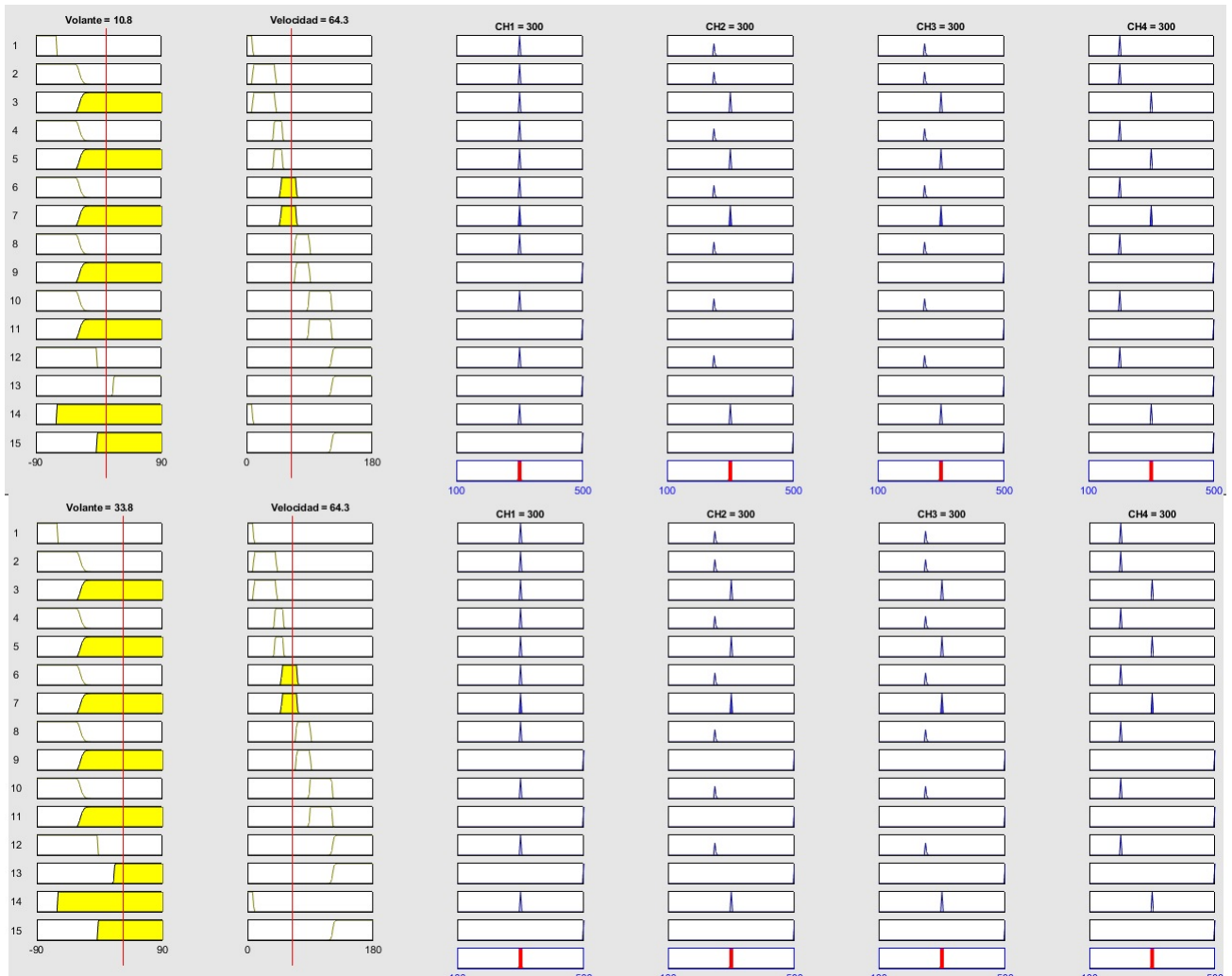


Figura 4.20: Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro izquierdo bajo conducción con vuelta a la derecha a 64.3 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido 10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado 33.8 grados (inferior).

La figura 4.20 configura la misma velocidad de entrada para evaluar ahora la respuesta de las reglas de inferencia para una vuelta a la derecha en el faro izquierdo, como es posible observar, para un ángulo de volante reducido de 10.8 grados, la salida se mantiene en un modo de iluminación correspondiente a la clase C, el cual proporciona en la salida 300 mA para cada canal de iluminación. Sucede lo mismo cuando se configura un ángulo de volante más pronunciado de 33.8 grados, donde el sistema de lógica difusa nuevamente infiere que el faro izquierdo no debe activar un modo de iluminación curva debido al lado donde se encuentra posicionado el faro. Por lo tanto la salida otorga 300 mA para cada uno de los canales de iluminación.

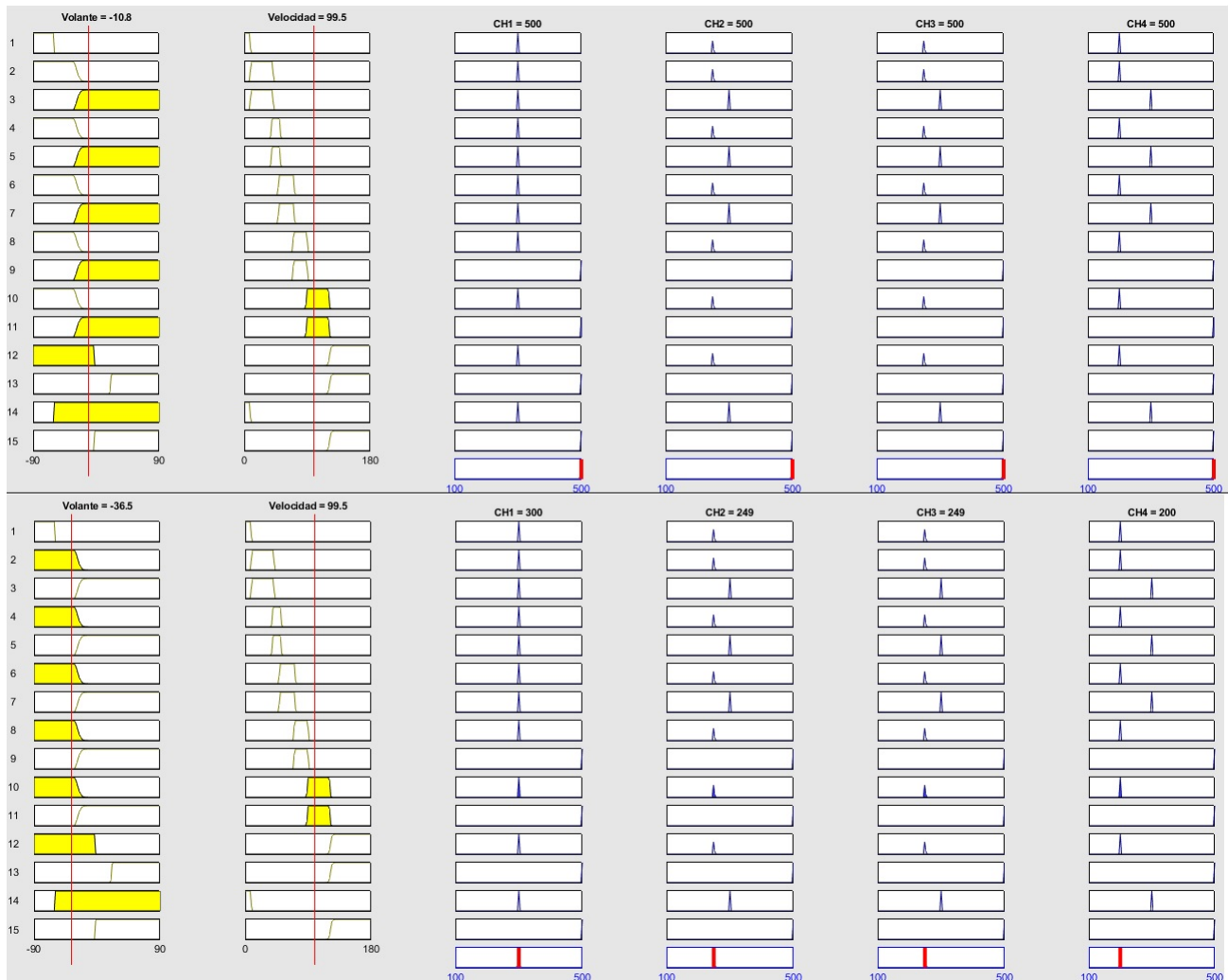


Figura 4.21: Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro izquierdo bajo conducción con vuelta a la derecha a 99.5 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido -10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado -36.5 grados (inferior).

Esta ocasión se configura una velocidad de 99.5 Km/h para poder visualizar como el sistema de lógica difusa logra inferir un nuevo modo de iluminación, el modo de iluminación de clase E, el cual requiere a la salida 500 mA en cada uno de los canales de iluminación. Configuramos un ángulo poco pronunciado en la entrada del volante, el cual es de -10.8 grados hacia la izquierda, las reglas de inferencia determinan de manera correcta que no se debe activar un modo de iluminación curva, que la necesidad del faro izquierdo es cambiar de clase de iluminación, por lo cual se ajusta una salida de 500 mA necesarios en cada uno de los canales de iluminación. Posteriormente se configura un ángulo de volante mas pronunciado de -36.5 grados, en el cual el sistema de lógica difusa infiere que se debe activar un modo de iluminación curva, pues las condiciones así lo sugieren, es entonces cuando la salida del sistema se ajusta para entregar 300 mA, 250 mA, 250 mA y 200 mA respectivamente para cada uno de los canales de iluminación.

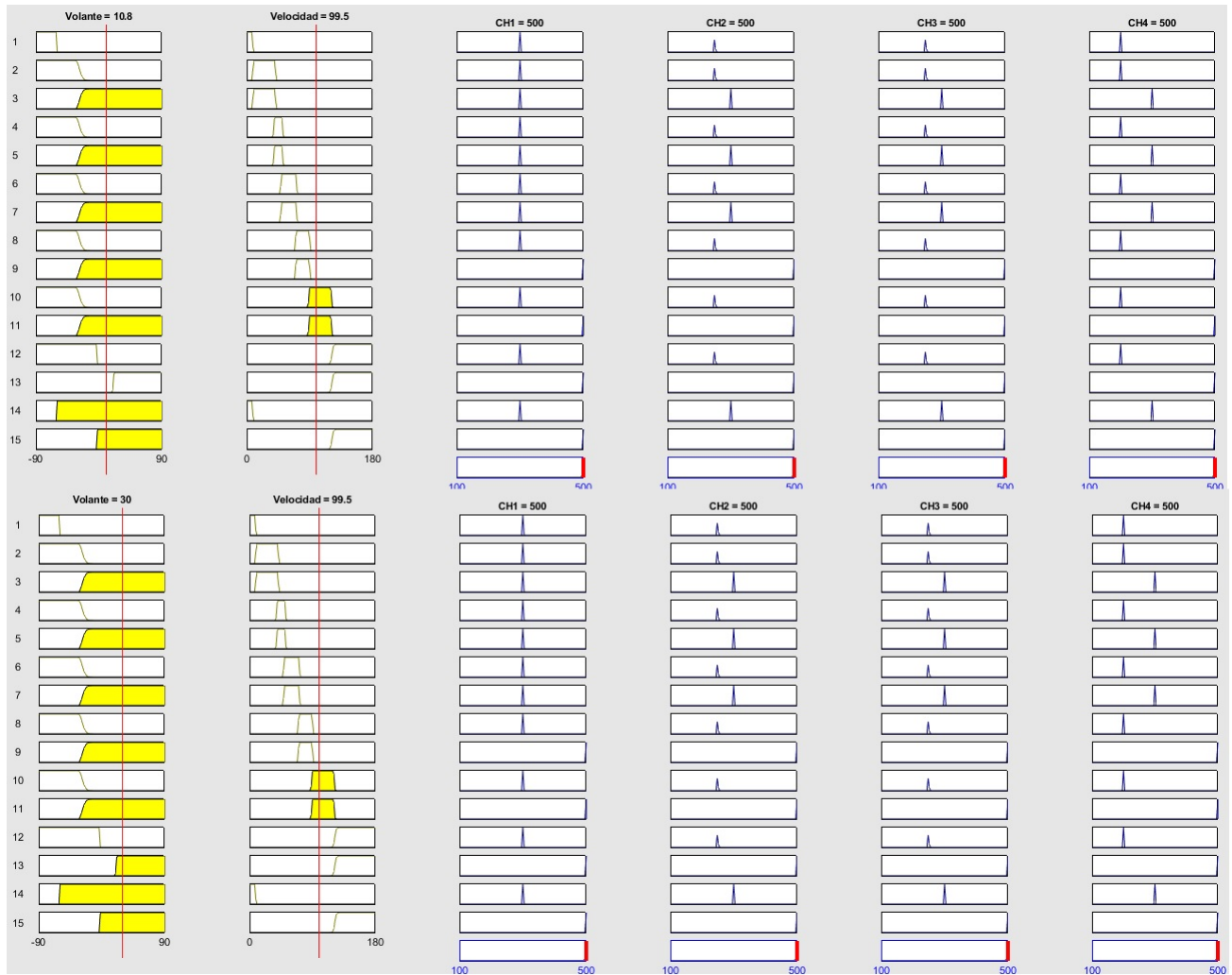


Figura 4.22: Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro izquierdo bajo conducción con vuelta a la derecha a 99.5 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido 10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado 30 grados (inferior).

Ahora continuaremos con la configuración de velocidad para el sistema de la misma manera que se realizó en la figura 4.21, pero esta vez configuramos una vuelta hacia el lado derecho, donde el sistema de lógica difusa debe ser capaz de inferir que en ningún momento se debe activar un modo de iluminación curva por ser un faro izquierdo. Entonces como se puede observar en la figura 4.22 se configura una entrada del ángulo de volante poco pronunciado, de 10.8 grados hacia el lado derecho, aquí se puede apreciar como el sistema mantiene la misma salida de 500 mA para cada uno de los canales de iluminación, cantidad de corriente que resulta adecuada para un modo de iluminación de clase E, esto nos permite ver que el sistema infiere de manera correcta que no debe activar un modo de iluminación curva. Posteriormente se configura a la entrada del ángulo de volante un valor mas grande que el anterior, con 30 grados hacia la derecha, con el cual el sistema nuevamente responde de manera adecuada, puesto que mantiene una salida de 500 mA para cada uno de los canales de iluminación.

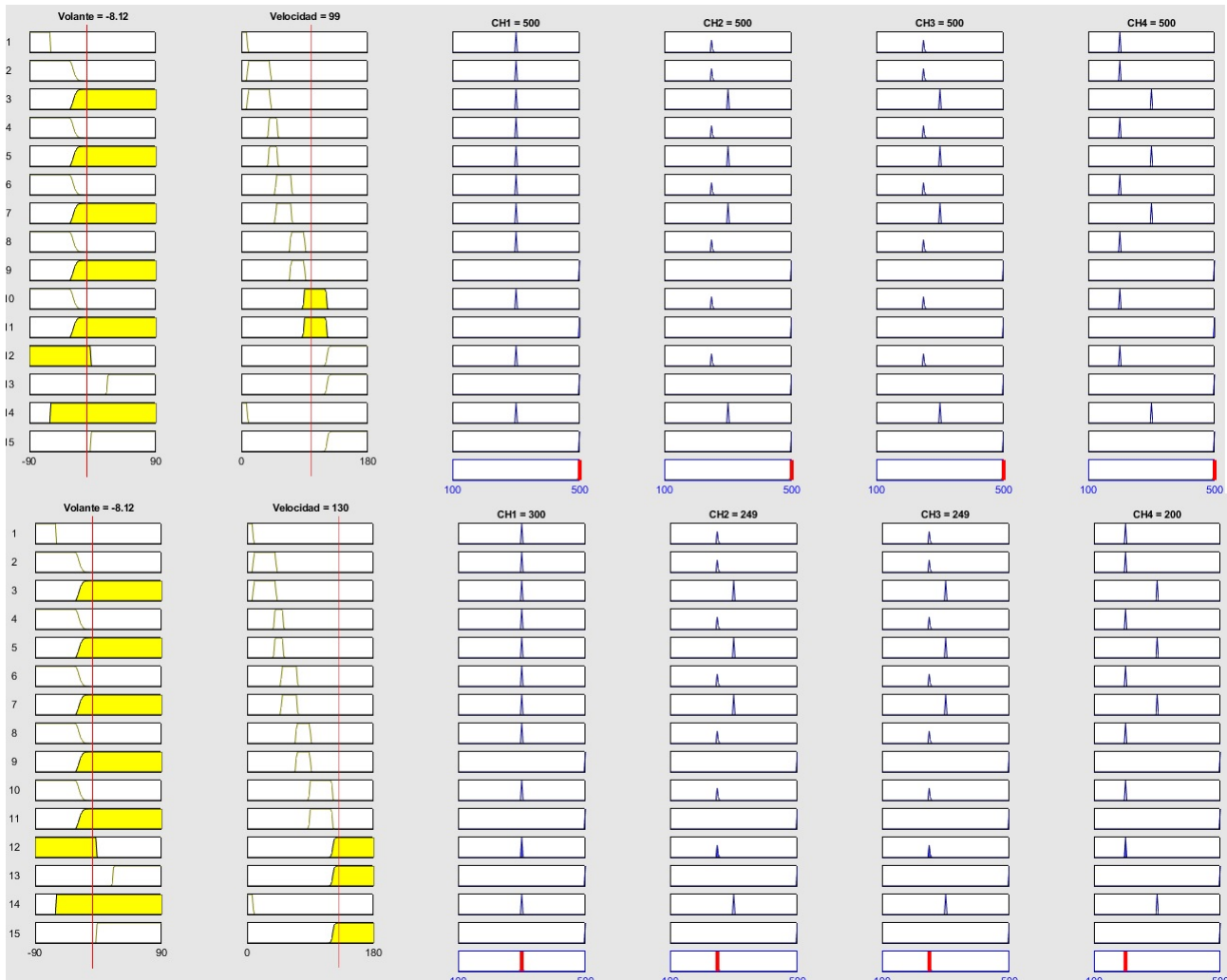


Figura 4.23: Imagen comparativa de los resultados de inferencia en un mismo ángulo a la izquierda reducido, a 99 Km/h y a 130 Km/h.

Cuando se presentan altas velocidades de conducción el modo de iluminación curva se activa con ángulos mas pequeños, puesto que tomar una curva muy pronunciada a alta velocidad significaría una volcadura del vehículo, entonces las reglas deben inferir que a una alta velocidad se puede suscitar el momento en que se tome una curva amplia sin disminuir la velocidad y donde el ángulo de volante es pequeño. En la figura 4.23 podemos observar como al configurar un ángulo pequeño de -8.12 grados a la izquierda, el sistema infiere dos salidas distintas dependientes cada una de la velocidad configurada, donde únicamente cuando el vehículo supera los 120 Km/h, el sistema infiere una salida en modo de iluminación curva. Para una velocidades por debajo de los 120 Km/h, el sistema infiere para ángulos pequeños un modo de conducción en recta y mantiene a la salida los niveles de corriente correspondientes al modo de iluminación adecuado al rango de velocidad.

## Reglas de inferencia para Motores horizontales

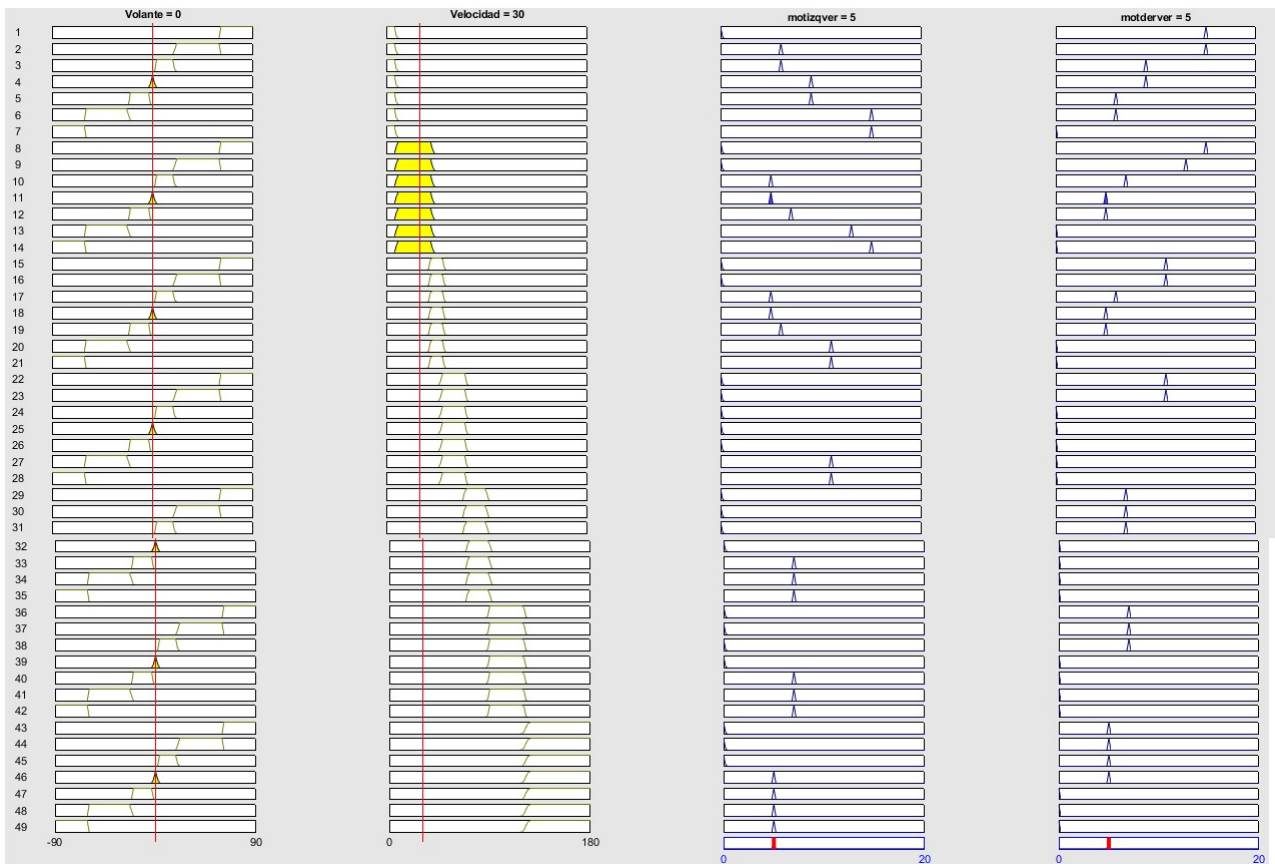


Figura 4.24: Resultado de inferencias para los motores horizontales, con un ángulo de volante en 0 grados y una velocidad de 30 Km/h.

Como es posible ver en la figura(4.24) se ingreso a la configuración una velocidad de 30 km/h, con la cual se obtendrán los resultados de inferencia para 3 modos de conducción posibles, cuando el ángulo en el volante se encuentra en cero grados, la salida inferida es un desplazamiento de 5 grados hacia el lado al que pertenece cada faro, también es posible observar como este bloque de lógica difusa contiene las 49 reglas de inferencia para el ajuste en la posición horizontal.

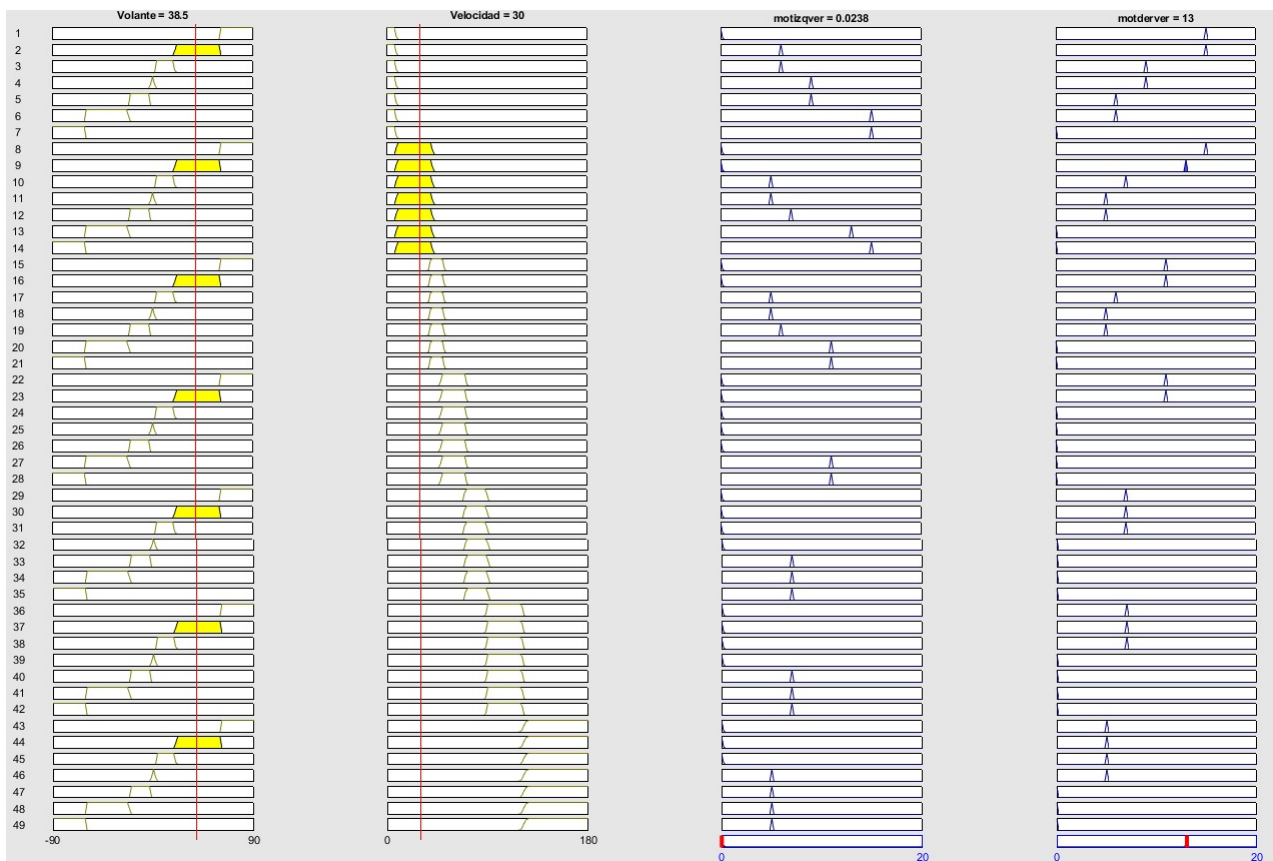


Figura 4.25: Resultado de inferencias para los motores horizontales, con un ángulo de volante en 38.5 grados a la derecha y una velocidad de 30 Km/h.

En la figura 4.25 se observa el ajuste de la entrada del volante a 38.5 grados , condición que sugiere una vuelta a la derecha, y como es posible observar, el motor del faro izquierdo permanece en 0 grados de desplazamiento, mientras que el faro de lado derecho activa un modo de iluminación curva, por lo cual tiene un desplazamiento horizontal de 13 grados a partir de su línea central, con lo cual se corrobora una inferencia adecuada de la salida por parte del sistema de lógica difusa.

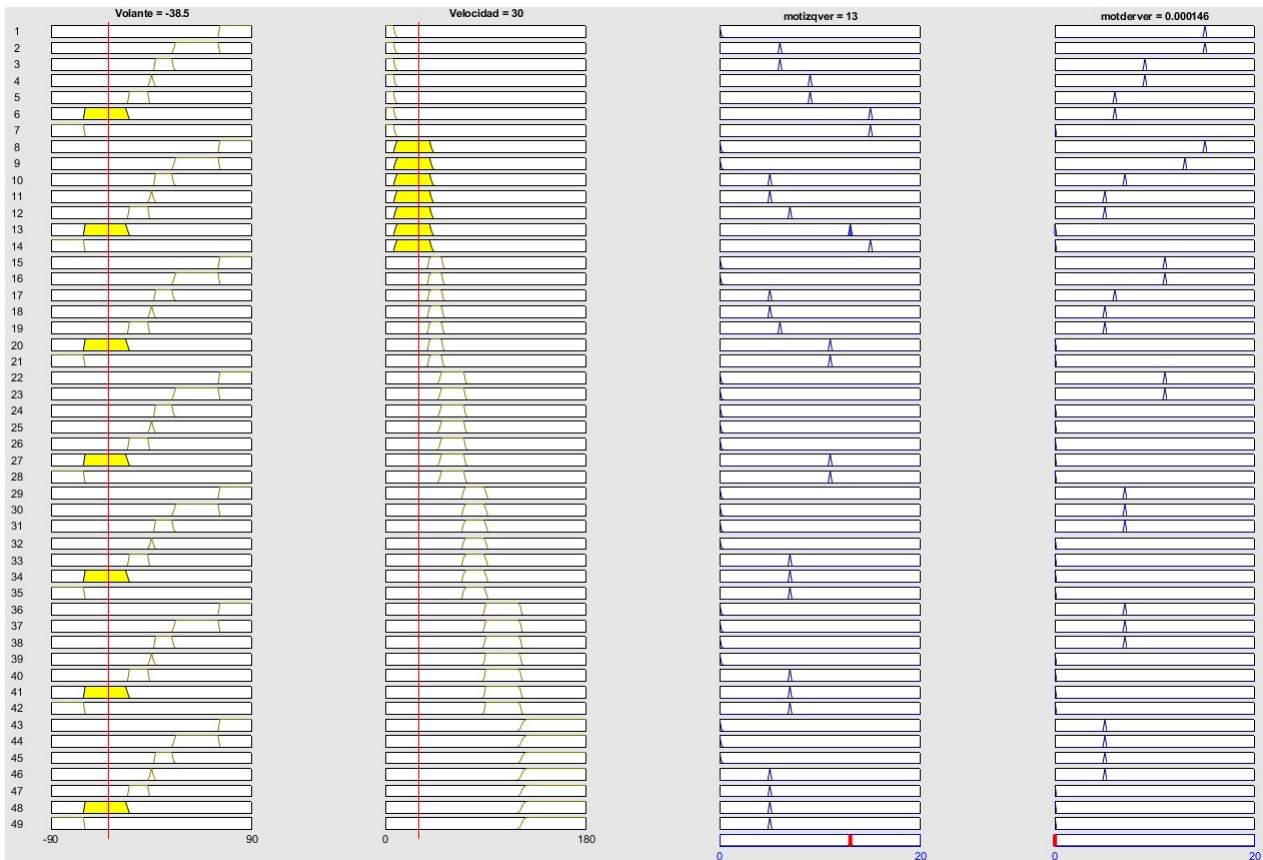


Figura 4.26: Resultado de inferencias para los motores horizontales, con un ángulo de volante en -38.5 grados a la izquierda y una velocidad de 30 Km/h.

En la figura 4.26, se configura el sistema para que manteniendo la velocidad de 30 Km/h y una entrada de -38.5 grados para el ángulo en el volante que sugiere una conducción con vuelta a la izquierda. De lo cual el sistema infiere una salida con 13 grados de desplazamiento horizontal para el faro de lado izquierdo, mientras que el motor de lado contrario al sentido de la curva, no tiene un desplazamiento en su sistema.

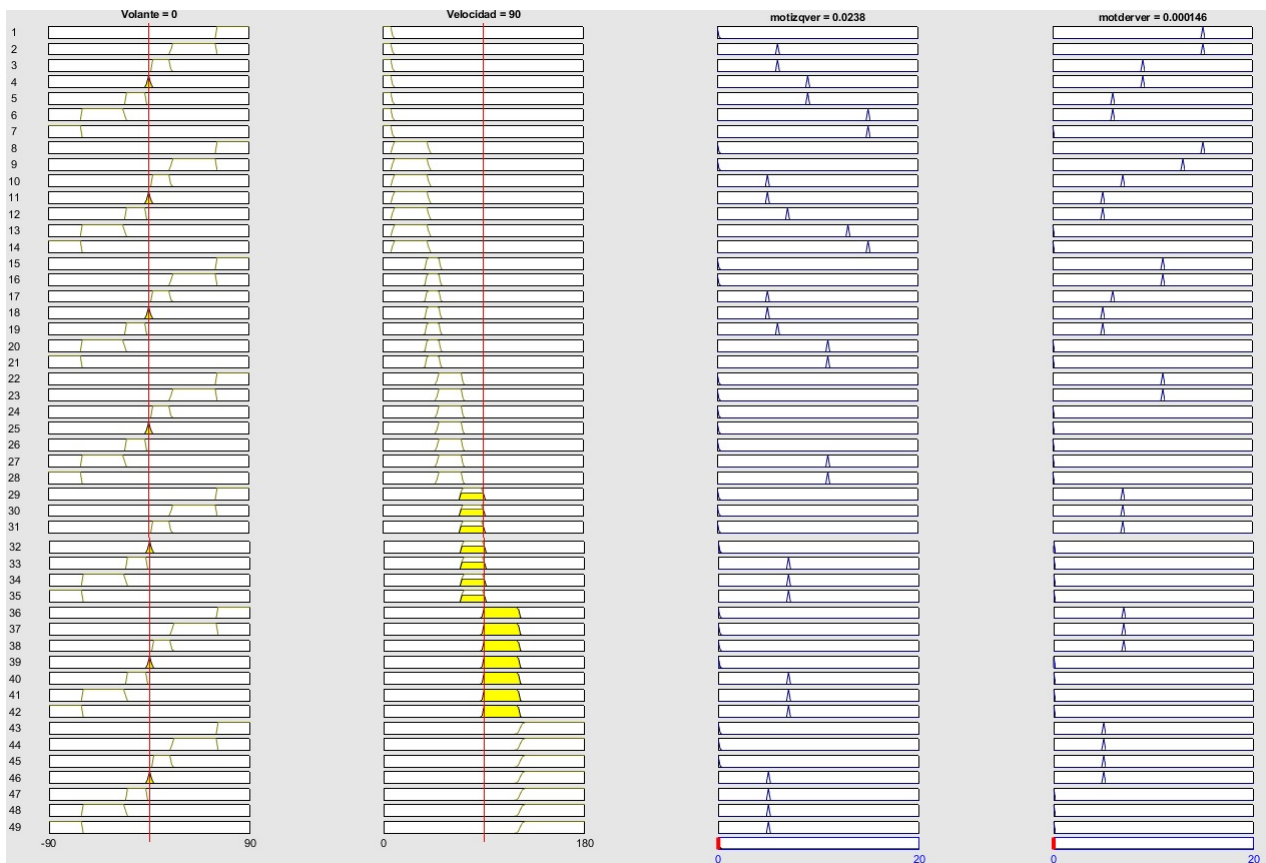


Figura 4.27: Resultado de inferencias para los motores horizontales, con un ángulo de volante en 0 grados y una velocidad de 90 Km/h.

Como es posible ver en la figura(4.27) se ingreso a la configuración una velocidad de 90 km/h, con la cual se obtendrán los resultados de inferencia para los 3 modos de conducción posibles, cuando el ángulo en el volante se encuentra en cero grados, la salida inferida es un desplazamiento de 0 grados debido a que el rango de velocidad así lo requiere, como se puede apreciar en la tabla 3.15 del capítulo 3 de este trabajo, también es posible observar como este bloque de lógica difusa contiene las 49 reglas de inferencia para el ajuste en la posición horizontal, resultado de involucrar toda la tabla FAM de manera completa.

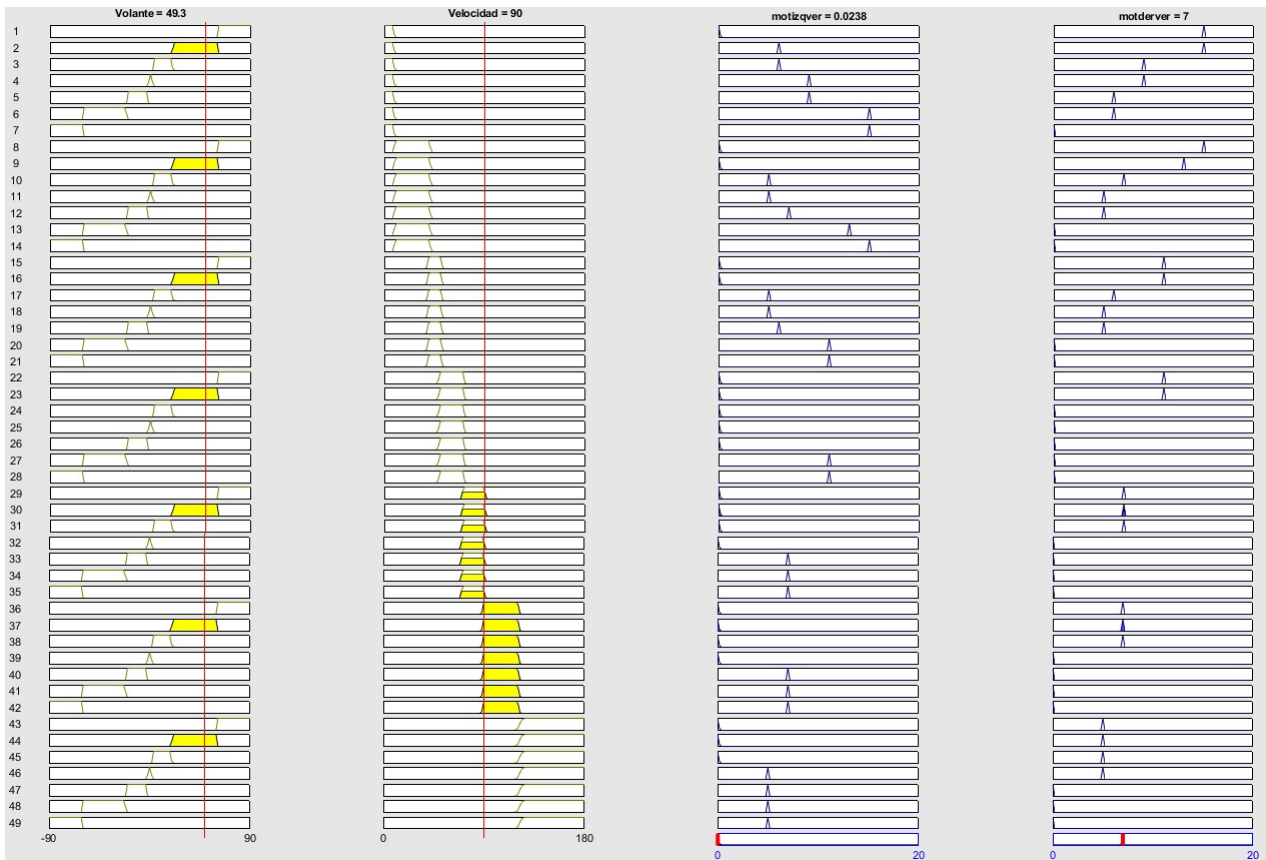


Figura 4.28: Resultado de inferencias para los motores horizontales, con un ángulo de volante en 49.3 grados a la derecha y una velocidad de 90 Km/h.

En la figura 4.28 se observa el ajuste de la entrada del volante a 49.3 grados , condición que sugiere una vuelta a la derecha, y como es posible observar, el motor del faro izquierdo permanece en 0 grados de desplazamiento, mientras que el faro de lado derecho activa un modo de iluminación curva, por lo cual tiene un desplazamiento horizontal de 7 grados a partir de su línea central, con lo cual se corrobora una inferencia adecuada de la salida por parte del sistema de lógica difusa. Los resultados son corroborados con el comportamiento esperado que se plantea en la figura 3.15 del capítulo 3 de este trabajo.

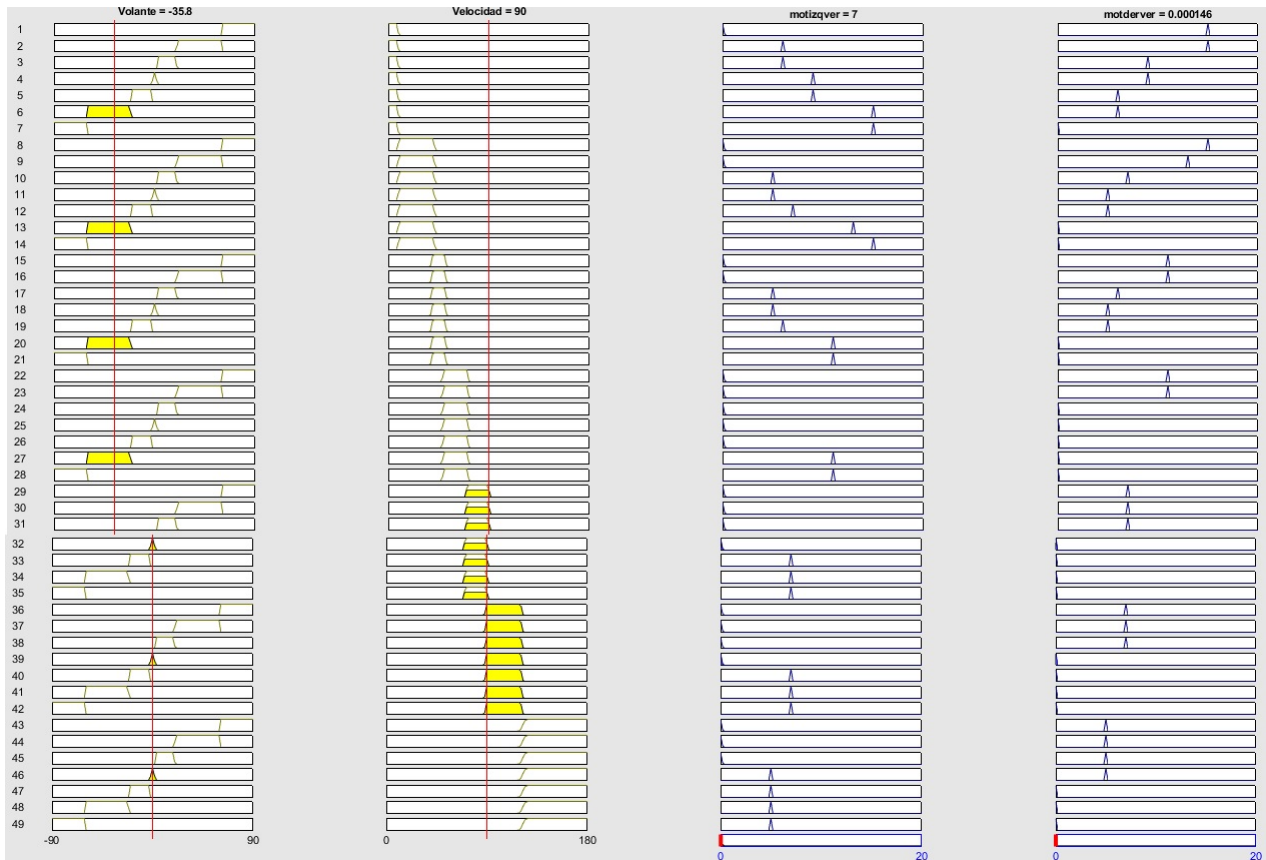


Figura 4.29: Resultado de inferencias para los motores horizontales, con un ángulo de volante en -35.8 grados a la izquierda y una velocidad de 90 Km/h.

En la figura 4.29, se configura el sistema para que manteniendo la velocidad de 90 Km/h y una entrada de -35.8 grados para el ángulo en el volante que sugiere una conducción con vuelta a la izquierda. De lo cual el sistema infiere una salida con 7 grados de desplazamiento horizontal para el faro de lado izquierdo, mientras que el motor de lado contrario al sentido de la curva, no tiene un desplazamiento en su sistema. Esto verifica las condiciones propuestas en la figura 3.15 del capítulo 3 de este trabajo.

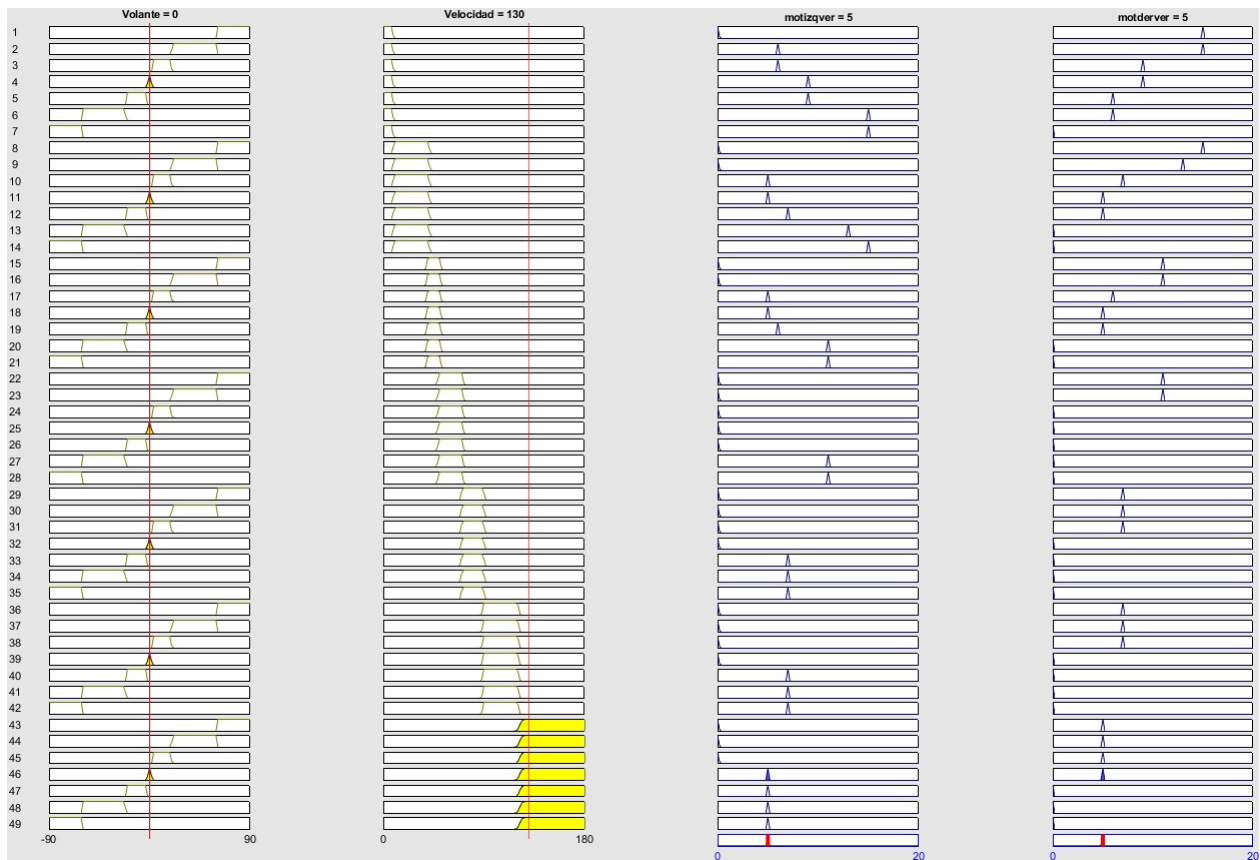


Figura 4.30: Resultado de inferencias para los motores horizontales, con un ángulo de volante en 0 grados y una velocidad de 130 Km/h.

Como es posible ver en la figura(4.24) se ingreso a la configuración una velocidad de 130 km/h, con la cual se obtendrán los resultados de inferencia para 3 modos de conducción posibles, cuando el ángulo en el volante se encuentra en cero grados, la salida inferida es un desplazamiento de 5 grados hacia el lado al que pertenece cada faro, con lo cual se corrobora una inferencia adecuada de la salida por parte del sistema de lógica difusa. Los resultados son corroborados con el comportamiento esperado que se plantea en la figura 3.15 del capítulo 3 de este trabajo. también es posible observar como este bloque de lógica difusa contiene las 49 reglas de inferencia para el ajuste en la posición horizontal.

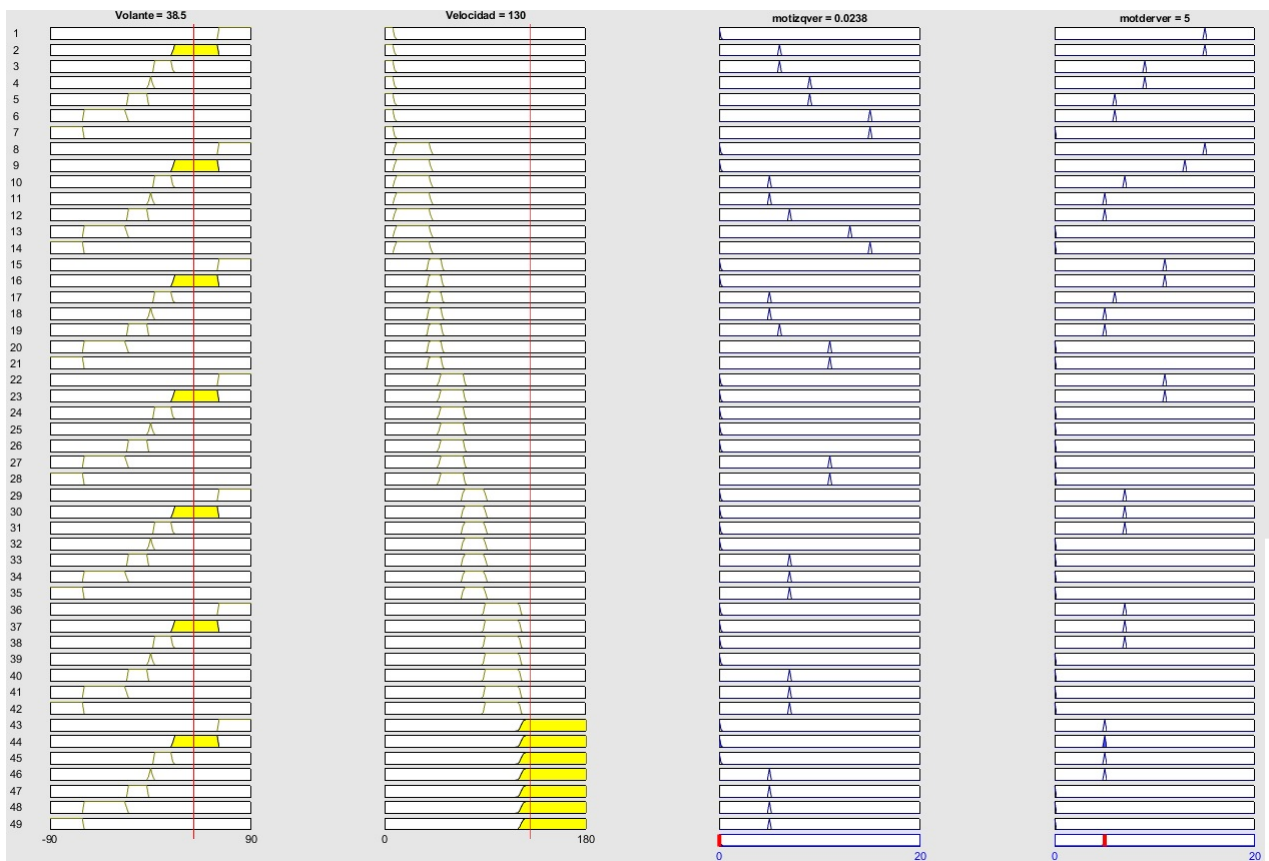


Figura 4.31: Resultado de inferencias para los motores horizontales, con un ángulo de volante en 38.5 grados a la derecha y una velocidad de 130 Km/h.

En la figura 4.31 se observa el ajuste de la entrada del volante a 38.5 grados , condición que sugiere una vuelta a la derecha, y como es posible observar, el motor del faro izquierdo permanece en 0 grados de desplazamiento, mientras que el faro de lado derecho activa un modo de iluminación curva, por lo cual tiene un desplazamiento horizontal de 5 grados a partir de su línea central, con lo cual se corrobora una inferencia adecuada de la salida por parte del sistema de lógica difusa. Los resultados son corroborados con el comportamiento esperado que se plantea en la figura 3.15 del capítulo 3 de este trabajo.

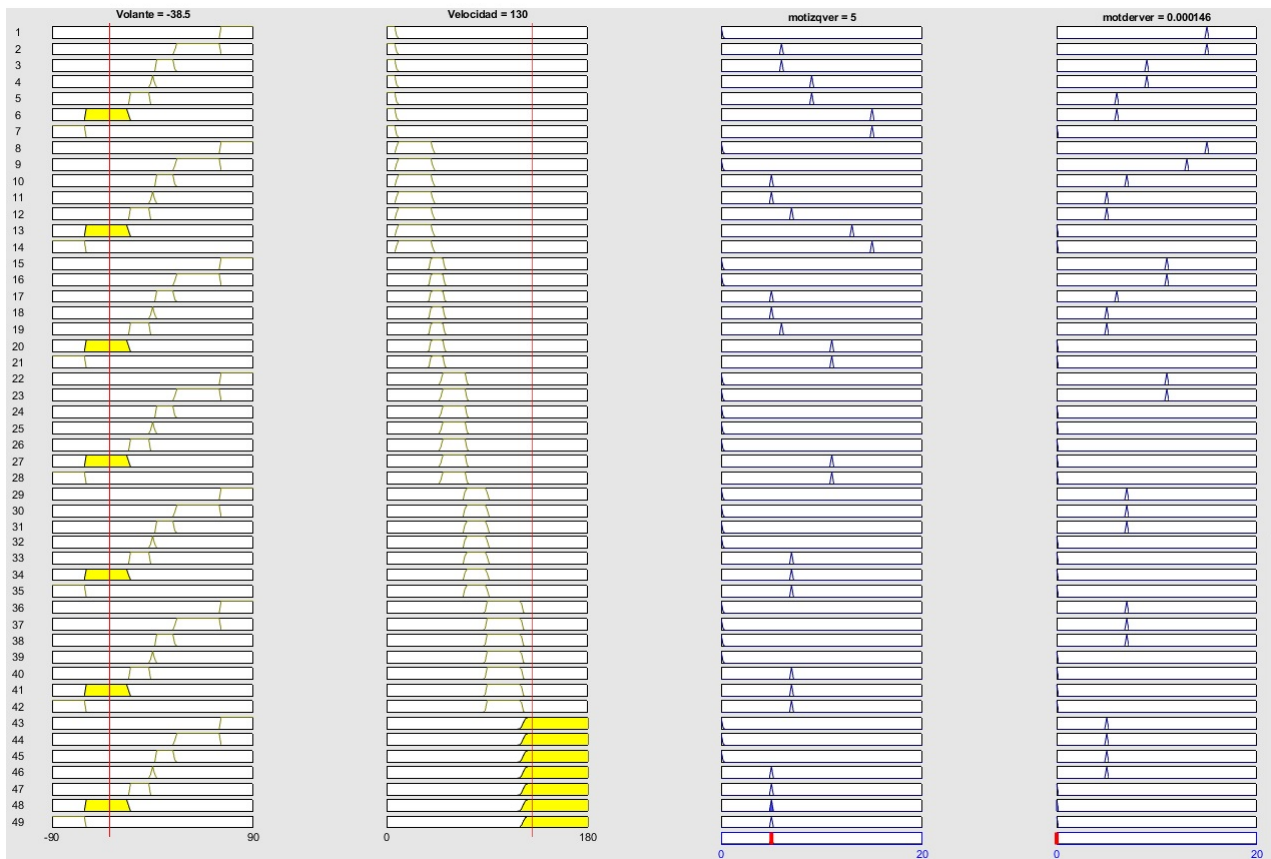


Figura 4.32: Resultado de inferencias para los motores horizontales, con un ángulo de volante en -35.8 grados a la izquierda y una velocidad de 130 Km/h.

En la figura 4.32, se configura el sistema para que manteniendo la velocidad de 130 Km/h y una entrada de -38.5 grados para el ángulo en el volante que sugiere una conducción con vuelta a la izquierda. De lo cual el sistema infiere una salida con 5 grados de desplazamiento horizontal para el faro de lado izquierdo, mientras que el motor de lado contrario al sentido de la curva, no tiene un desplazamiento en su sistema. Esto verifica las condiciones propuestas en la figura 3.15 del capítulo 3 de este trabajo.

## Reglas de inferencia para Motores Verticales

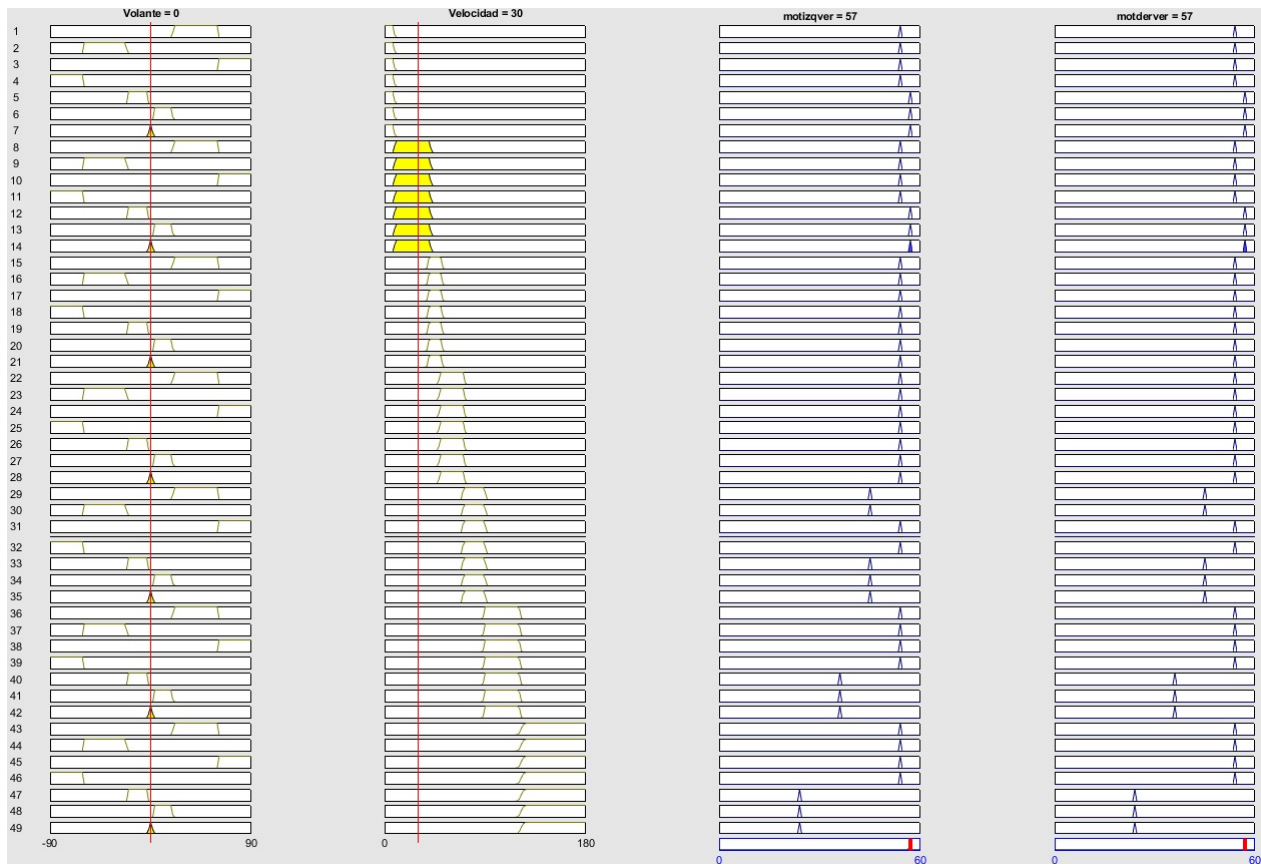


Figura 4.33: Resultado de inferencias para la posición de los motores verticales a una velocidad de 30 Km/h.

Los motores de ajuste en la posición vertical, siempre se ajustaran de la misma manera su elevación, además, su ajuste en inclinación depende de la velocidad del vehículo, por lo cual un modo de iluminación curva no es distinguible de la posición vertical que adopte el faro en un modo de conducción en línea recta. Por tal motivo, estas pruebas solo se realizaron configurando diferentes velocidades de entrada.

Es entonces que podemos observar en la figura 4.33 un ajuste en la velocidad de 30 Km/h, lo cual hace que el sistema de lógico difusa infiera una salida de 57 grados, los cuales, al ser divididos por el factor de  $\times 100$  con el que se encuentran multiplicados, obtenemos el resultado deseado de 0.57 grados, el cual es un valor para un modo de iluminación de clase V, para rangos de velocidad menores a 50 Km/h corroborando un funcionamiento adecuado del sistema.

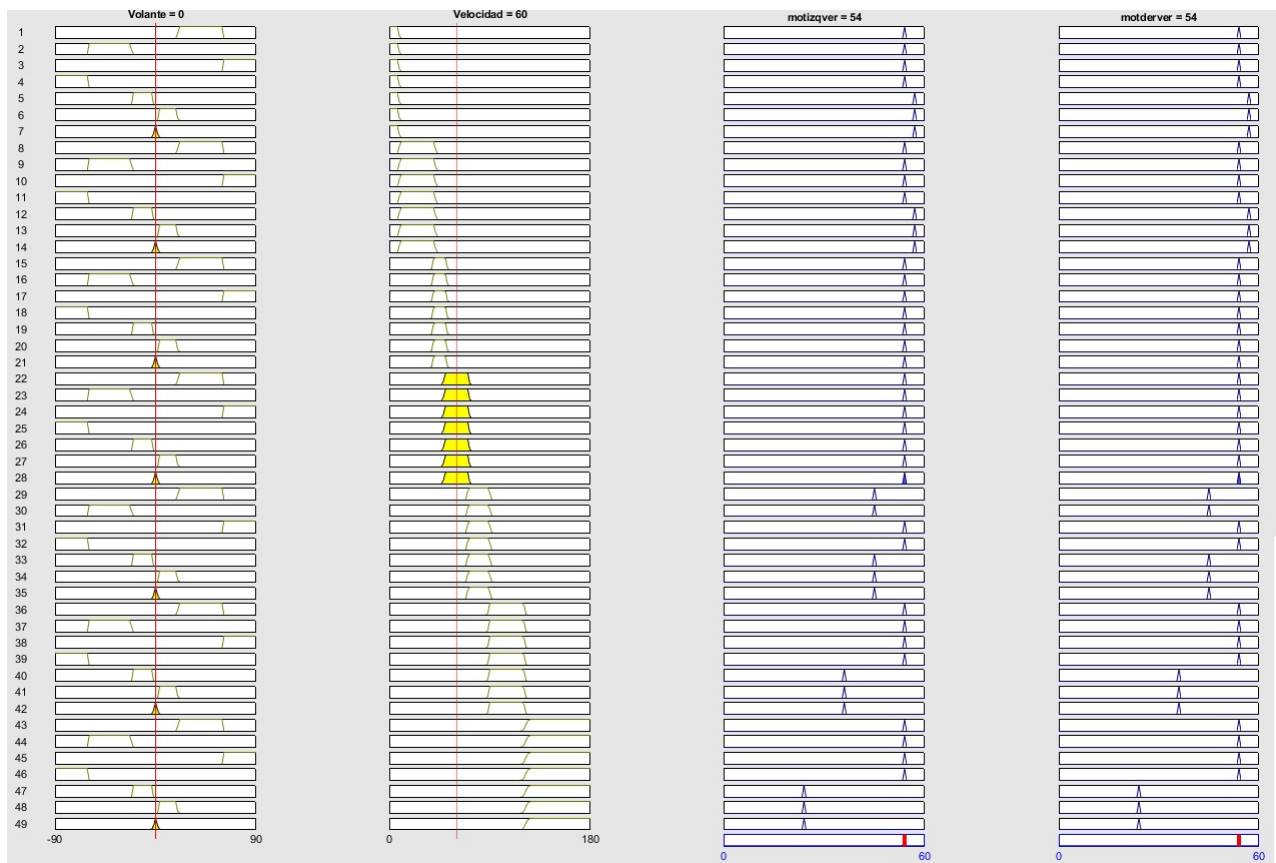


Figura 4.34: Resultado de inferencias para la posición de los motores verticales a una velocidad de 60 Km/h.

En la figura 4.34 se configura una velocidad del vehículo de 60 Km/h, la cual es una velocidad dentro del rango de iluminación en modo clase C, la cual requiere de un ajuste vertical para la iluminación, de 0.54 grados de elevación. Con lo anterior es posible corroborar el buen desempeño de la inferencia del sistema de lógica difusa, puesto que la salida inferida es de 54 grados, que se encuentran multiplicados por el factor  $\times 100$ , lo cual al dividir esa cantidad obtenemos los 0.54 grados adecuados para el sistema. Los datos pueden ser corroborados en la sección 3.2 del capítulo 3 de este trabajo.

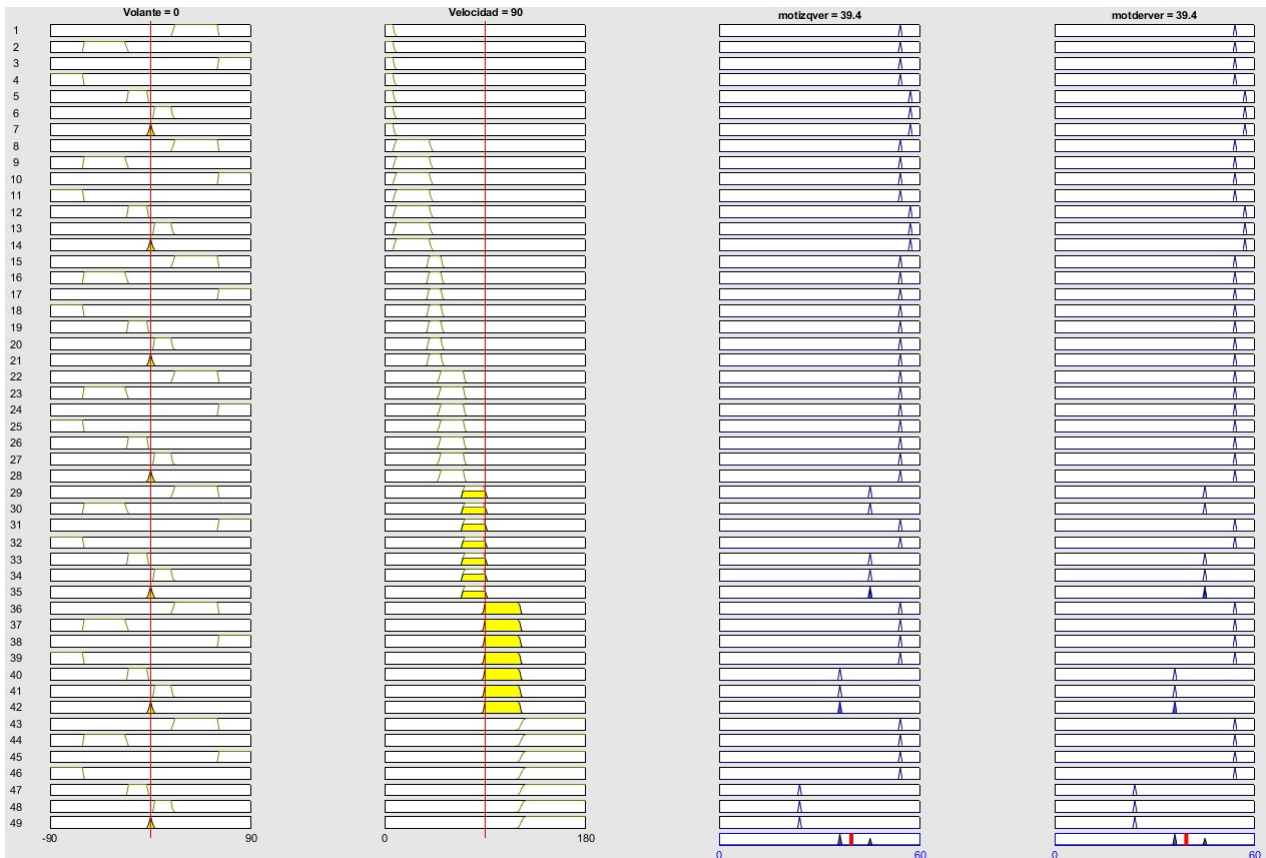


Figura 4.35: Resultado de inferencias para la posición de los motores verticales a una velocidad de 90 Km/h.

En la figura 4.35 se configura una velocidad del vehículo de 90 Km/h, la cual es una velocidad dentro del rango de iluminación en modo clase E, la cual requiere de un ajuste vertical para la iluminación, de 0.36 grados de elevación. Con lo anterior es posible corroborar un desempeño aceptable aun que no exacto de la inferencia del sistema de lógica difusa, puesto que la salida inferida es de 39.4 grados, que se encuentran multiplicados por el factor  $\times 100$ , lo cual al dividir esa cantidad obtenemos los 0.394 grados adecuados para el sistema. Los datos pueden ser corroborados en la sección 3.2 del capítulo 3 de este trabajo.

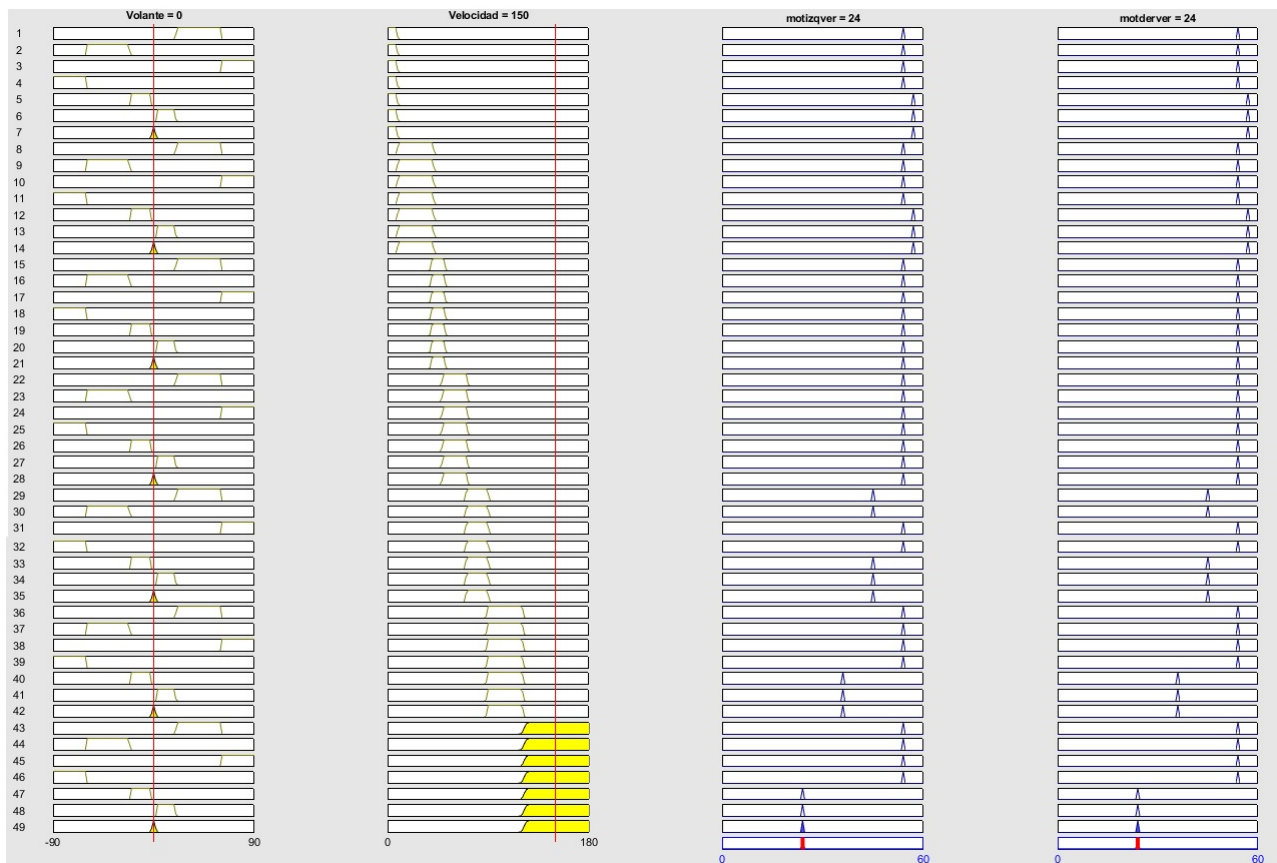


Figura 4.36: Resultado de inferencias para la posición de los motores verticales a una velocidad de 150 Km/h.

En la figura 4.36 se configura una velocidad del vehículo de 90 Km/h, la cual es una velocidad dentro del rango de iluminación en modo clase E, la cual requiere de un ajuste vertical para la iluminación, de 0.24 grados de elevación para velocidades por encima de los 120 Km/h. Con lo anterior es posible corroborar un buen desempeño de la inferencia del sistema de lógica difusa, puesto que la salida inferida es de 24 grados, que se encuentran multiplicados por el factor x100, lo cual al dividir esa cantidad obtenemos los 0.24 grados adecuados para el sistema. Los datos pueden ser corroborados en la sección 3.2 del capítulo 3 de este trabajo.

### 4.3. Integración del sistema de simulación

Se llevo a cabo la integración completa del sistema de simulación dentro del entorno del software Simulink, en la figura 4.37 se muestra la disposición completa de los bloques, incluyendo las conexiones realizadas. Nuestro sistema puede ser visto como un conjunto de bloques que pertenecen a cuatro grupos de funciones principales, la adquisición de los dato de entrada externos (Volante y pedales), el modelo dinámico del vehículo, La estrategia de control basada en lógica difusa y el despliegue de información de salida.

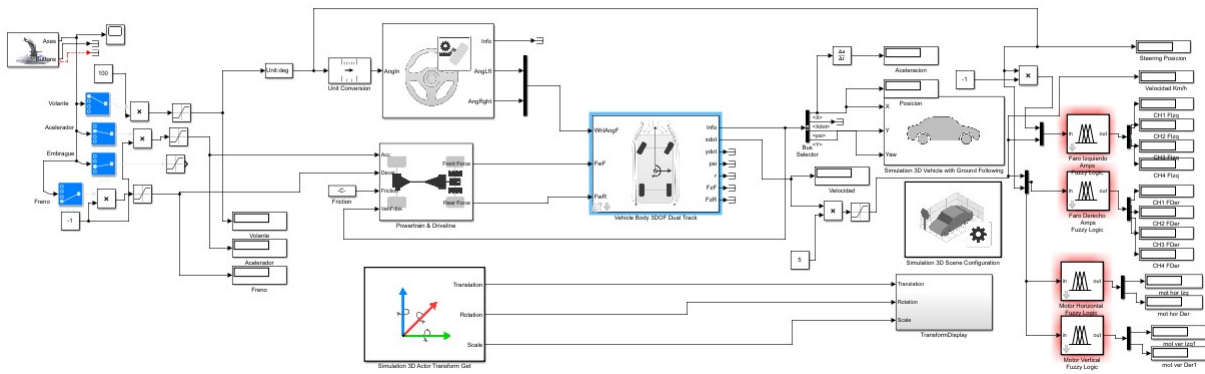


Figura 4.37: Disposición de bloques de Simulink para el sistema de simulación completo.

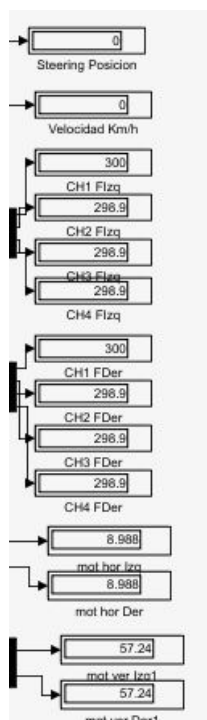


Figura 4.38: Salida de datos para el sistema de simulación en ejecución y en estado inicial (Posición de volante, Velocidad de vehículo, canales de iluminación en faro izquierdo, canales de iluminación en faro derecho, posición de motores horizontales, posición de motores verticales).

Una vez que se realiza la ejecución del sistema de simulación, el sistema presenta un estado inicial como el que se muestra en la figura 4.38, donde es posible visualizar la posición angular del volante,

la velocidad del vehículo, las salidas de valores en mA de los cuatro canales de iluminación para el faro izquierdo, las salidas de valores en mA los cuatro canales de iluminación para el faro derecho, las salidas en grados de rotación y posicionamiento horizontal izquierdo, las salidas en grados de rotación y posicionamiento horizontal derecho, así como también las salidas en grados multiplicados por un factor de x100 para los motores de posicionamiento vertical, izquierdo y derecho.

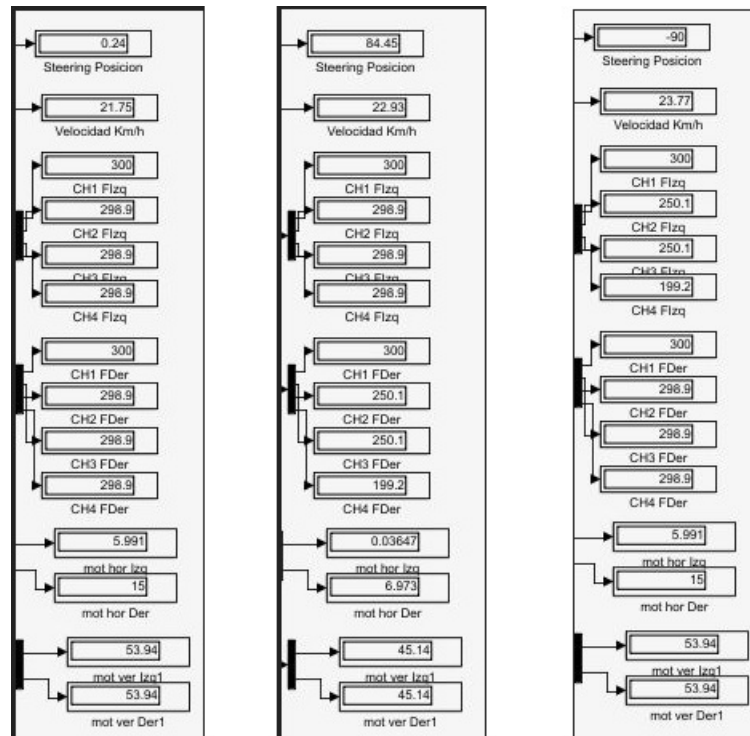


Figura 4.39: Salida de datos para el sistema de simulación en ejecución y en un rango cercano a 20 Km/h de velocidad, con un ángulo de giro en el volante de cero grados, con un ángulo de giro hacia la derecha de 84.45 grados (activando modo de iluminación curva) y un ángulo de giro a la izquierda de -90 grados (activando modo de iluminación curva).

Durante la ejecución del sistema de simulación completamente integrado, es posible obtener los resultados que se muestra en la figura 4.39, dentro de la cual se busco alcanzar una velocidad cercana a los 20 Km/h , donde se corroboraron las 3 situaciones posibles a presentarse. La primera de ellas ubicada de lado izquierdo, nos muestra una situación en donde se conduce en linea recta y es posible observar los valores de salida de 300 mA en ambos faros y todos sus canales de iluminación, necesarios para ese modo de iluminación clase V, también es posible apreciar el posicionamiento horizontal del faro izquierdo con un desplazamiento del haz de casi 6 grados y el faro derecho con un desplazamiento del haz de 15 grados.

En la parte central se puede observar un modo de iluminación en curva hacia el lado derecho, donde es posible observar los valores de salida de 300 mA necesarios para ese modo de iluminación clase V para el faro izquierdo, y un modo de iluminación curva para el faro derecho con valores de 300 mA, 250 mA, 250 mA y 200mA, para sus cuatro canales respectivamente, también es posible apreciar el posicionamiento horizontal del faro izquierdo con un desplazamiento del haz de 0 grados y el faro derecho con un desplazamiento del haz cercano a los 7 grados.

En la parte derecha se puede observar un modo de iluminación en curva hacia el lado izquierdo, donde es posible observar los valores de salida de 300 mA necesarios para ese modo de iluminación clase V para el faro derecho, pues es el que en esta ocasión no entra en un modo de iluminación curva, y un modo de iluminación curva para el faro izquierdo con los respectivos valores de 300 mA, 250 mA, 250 mA y 200mA, para sus cuatro canales, también es posible apreciar el posicionamiento

horizontal del faro izquierdo con un desplazamiento del haz de casi 6 grados y el faro derecho con un desplazamiento del haz cercano a los 15 grados.

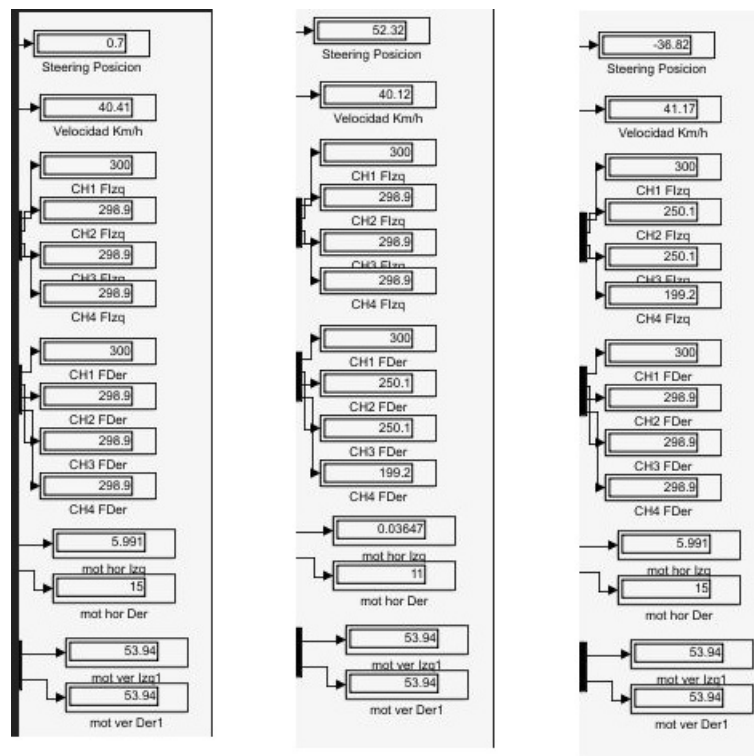


Figura 4.40: Salida de datos para el sistema de simulación en ejecución y en un rango cercano a 40 Km/h de velocidad, con un ángulo de giro en el volante de cero grados, con un ángulo de giro hacia la derecha de 52.32 grados (activando modo de iluminación curva) y un ángulo de giro a la izquierda de -36.82 grados (activando modo de iluminación curva).

Se realizó una segunda captura de valores de salida (figura 4.40), donde nuevamente se corrobora el desempeño del sistema con las tres situaciones que pueden presentarse en la simulación de conducción, posición de volante en conducción de línea recta, volante con giro en curva hacia el lado derecho y volante con giro en curva hacia el lado izquierdo, donde se buscó alcanzar una velocidad que ronde los 40 Km. La primera de ellas ubicada de lado izquierdo, nos muestra aquella situación en donde se conduce en línea recta y es posible observar los valores de salida de 300 mA en ambos faros y todos sus canales de iluminación, necesarios para ese modo de iluminación clase V, también es posible apreciar el posicionamiento horizontal del faro izquierdo con un desplazamiento del haz de casi 6 grados y el faro derecho con un desplazamiento del haz de 15 grados, los motores de posicionamiento vertical tienen a la salida un ángulo de inclinación de casi 54 grados, los cuales al dividir entre el factor x100, tenemos como resultado los 0.54 grados de inclinación adecuados al modo de iluminación en el que se encuentra.

En el centro de la figura 4.40 se encuentra la situación donde el volante mantiene un ángulo de vuelta en curva, el cual es capaz de activar el modo de iluminación en el faro derecho, tal y como se observa los canales del lado derecho muestran la salida con 300 mA, 250 mA, 250 mA y 200 mA, respectivamente, mientras que los canales del faro de lado izquierdo mantienen los niveles de iluminación con 300 mA, adecuados para el modo de iluminación en el que se encuentran.

Por último de lado derecho tenemos la situación que describe una conducción en vuelta con curva a la izquierda, en donde es posible observar como en los canales de iluminación de lado del faro izquierdo se activa un modo de iluminación curva, mientras que el faro derecho ahora pertenece con los niveles de corriente adecuados al modo de iluminación que corresponde a su conducción.

los niveles de inclinación vertical para ambos motores, muestran la salida cercana a los 0.54 grados.



Figura 4.41: Imagen de referencia sobre la implementación del sistema de simulación.

Por ultimo, aquí en la figura 4.41 se observa una fotografía que funciona como muestra de la disposición del setup que se tiene dispuesto para el sistema de simulación completo, debemos recordar que el set de volante y pedales tiene una conexión hacia la computadora via USB. es posible poder alcanzar a observar de manera breve una parte de la simulación que se encuentra en ejecución. Desde esta estación se llevo a cabo las simulaciones de conducción para la validación del desempeño del sistema. Se realizaron todas las simulaciones anteriores, además de la implementación principal.

#### 4.4. Diseño de tarjetas PCB

Una vez que se diseñó el circuito electrónico a nivel esquemático, fue posible comenzar el desarrollo de un prototipo funcional de tarjeta PCB , estas tarjetas son diseñadas desde el software Altium Desiger 19 versión 20.0.10. Se desarrollaron 2 tarjetas, una con la funcionalidad de los pulsos PWM y otra con la funcionalidad de driver LED y los dispositivos LED correspondientes, ambas tarjetas son diseñadas en placas con de 15 cm x 10cm, el material sugerido para las tarjetas es FR-4 de una sola capa con 1.6 mm de grosor. Una vez que se a realizado todo el proceso de ingresar las especificaciones del material, el software puede comenzar a realizar las líneas de conexiones provistas en los diagramas esquemáticos, en este punto es importante decir que un proceso de auto ruteo no se recomienda nunca., es por esto que debemos realizar el ruteo de manera individual dispositivos a dispositivo. Finalizado el proceso de ruteo, el software nos da las herramientas necesarias para obtener la información de fabricación de nuestras tarjetas.

En la figura 4.42 se muestra el layout de la capa superior de nuestra tarjeta que contiene los LED driver y los correspondientes LEDs,. Se permitió que cada uno de los LEDs tuviera 1 cm de separación con los elementos a su alrededor, con la finalidad de tener una disipación térmica que proteja la integridad de estos dispositivos. Se pueden apreciar todos los Footprints de los elementos

que serán ensamblados en esta tarjeta, la cual fue diseñada sin un plano de tierra, debido a que la mayoría de dispositivos son de empaquetados de montaje superficial (SMD), por lo tanto no tiene lugar el tener un plano de tierra en la parte inferior de la placa.

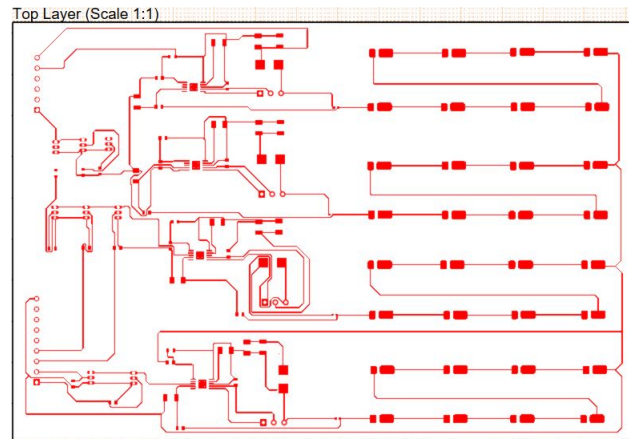


Figura 4.42: Diagrama de conexiones (pistas) entre los elementos, insertadas sobre la capa superior, para la fabricación de la tarjeta del circuito impreso de cada faro.

La siguiente placa en diseñarse fue la que contiene los elementos para la tarea de generar las señales PWM, en la figura 4.43 se muestra el layout del diseño de la PCB, a diferencia de la tarjeta anterior, esta tarjeta cuenta con una amplia cantidad de elementos de empaquetado through hole, por lo tanto es posible diseñar un plano de tierra en la capa inferior de esta tarjeta, lo cual puede facilitar el ruteo de los elementos. También cuenta con dispositivos de medidas grandes en comparación con los dispositivos SMD, por lo que es conveniente tener una tarjeta de las mismas dimensiones que la anterior.

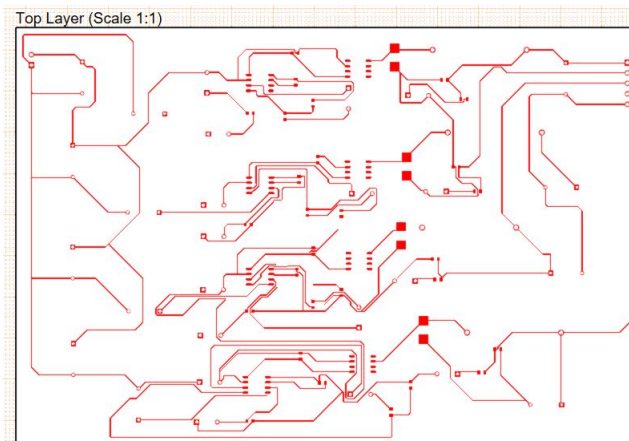


Figura 4.43: Diagrama de conexiones (pistas) entre los elementos, insertadas sobre la capa superior, para la fabricación de la tarjeta del circuito impreso de la generación de señales PWM para cada faro.

Al igual que los diagramas de Layout para cada tarjeta, es posible obtener información sobre la vista ensamblaje para los dispositivos que son incluidos en cada una de las tarjetas, a diferencia de los diagramas anteriores, estos nos permiten tener una idea mas general de la ubicación final de cada uno de los dispositivos desde una vista superior, es entonces que la figura 4.43, nos muestra una vista superior de la tarjeta que contiene los driver LED y cada unos de los dispositivos LED.

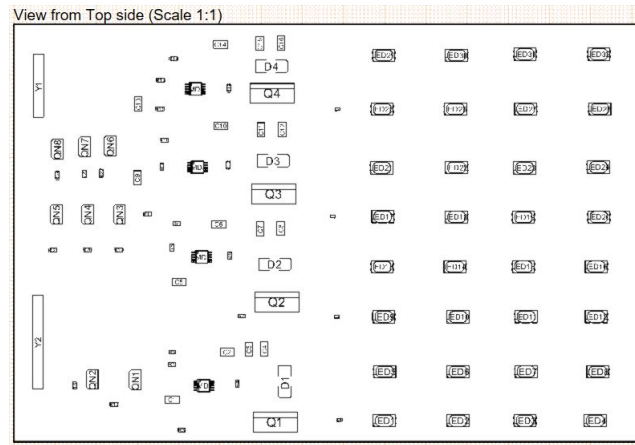


Figura 4.44: Diagrama esquemático de referencia para la ubicación de cada uno de los elementos para el ensamblaje de las tarjetas de circuito impreso de cada faro.

Una vez que todos los diagramas anteriores son generados, también es posible realizar un render de las tarjetas PCB con una vista en 3D que nos permite ver de manera mas cercana a la realidad el resultado final de la tarjeta después de ser fabricada y ensamblada. Para poder visualizar todos los elementos como si estos ya fueran ensamblados, es necesario que dentro de la información de cada dispositivo se vincule un archivo que contenga el modelo CAD de ese elemento, como existen elementos que no contienen este archivo nuestra tarjeta tiene una apariencia de ensamblaje sin terminar.

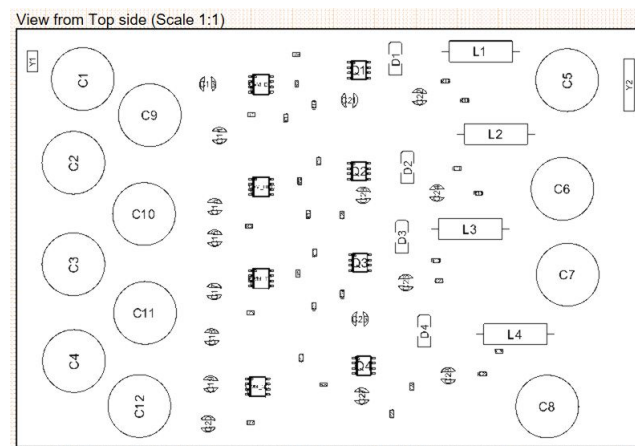


Figura 4.45: Diagrama esquemático de referencia para la ubicación de cada uno de los elementos para el ensamblaje de las tarjetas de circuito impreso de generación de señales PWM para cada faro.

La figura 4.45, nos muestra la vista superior de la tarjeta PCB que se encarga de generar las señales PWM, es posible apreciar la ubicación espacial de cada dispositivo incluido en las tarjetas, podemos también apreciar las dimensiones reales de las tarjetas y sus elementos dado que se maneja una escala 1:1 que nos permite tener esa relación directa con las medidas reales.

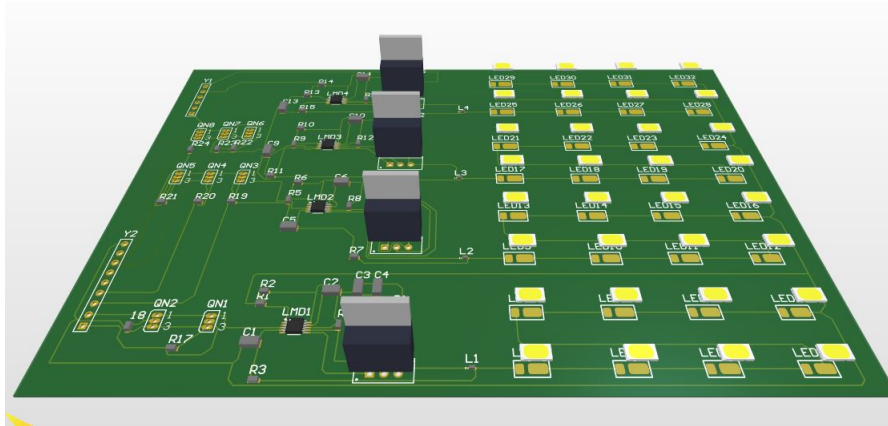


Figura 4.46: Imagen renderizada en vista 3D del resultado de la fabricación de la tarjeta de circuito impreso de cada faro.

La figura 4.46 nos muestra el render en vista 3D de la tarjeta que contiene los dispositivos LED driver y cada uno de los LED, podemos observar entonces gran parte de los elementos de esta tarjeta, resulta posible visualizar la distancia predispuesta entre cada dispositivo LED, como también observar que el dispositivo de mayores medidas son los transistores que tienen la necesidad de contar con un disipador amplio por seguridad contra altas temperaturas.

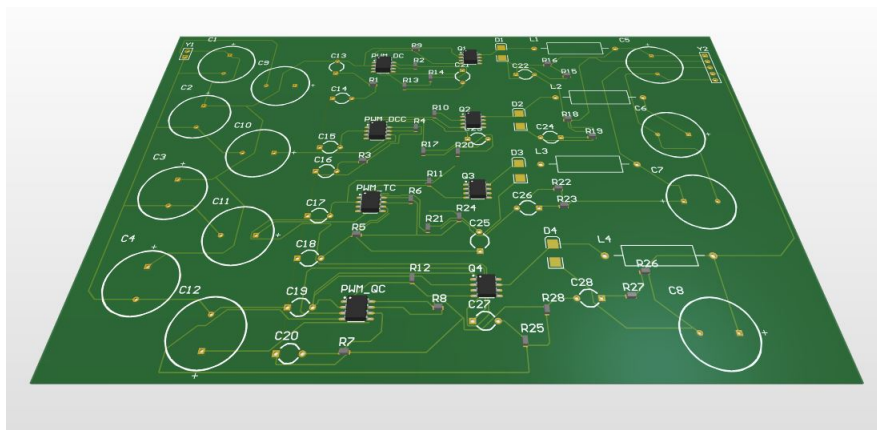


Figura 4.47: Imagen renderizada en vista 3D del resultado de la fabricación de la tarjeta de circuito impreso para la generación de señales PWM de cada faro.

En la figura 4.47 se observa el resultado obtenido del render de la tarjeta PCB encargada de la generación de las señales PWM, en la cual los dispositivos inductores y capacitores son los que ocupan mayor área debido a sus dimensiones, realmente se trata de una tarjeta que podría ser diseñada en un espacio menor si el empaquetado de los dispositivos fuera del tipo SMD, pero es recomendación del fabricante del dispositivo TL5001, utilizar estos dispositivos en ese empaquetado.

## 4.5. Comparación Cualitativa

Para realizar una comparación cualitativa de nuestro trabajo con respecto a otros trabajos reportados y utilizados como fundamento de este trabajo, fue necesario puntualizar las características fundamentales de nuestro sistema de simulación, esto nos permite conocer cualidades y rangos de desempeño comparables entre los diferentes trabajos. Se tomaron en consideración un total de 23 artículos de investigación reportados y directamente relacionados con los sistemas AFS, dentro de los cuales se encontraron 5 trabajos que contemplan la lógica difusa como su estrategia de control fundamental, lo que vuelve a dichos trabajos altamente comparables con nuestro trabajo. Esta cantidad de artículos que se tomaron en consideración para la comparación cualitativa, representan entonces el 22 por ciento del total de los trabajos analizados y relacionados con los sistemas AFS (figura 4.48).



Figura 4.48: Porcentaje de los 23 trabajos de investigación reportados y relacionados con sistemas AFS, que contemplan lógica difusa como estrategia de control.

La tabla que se muestra en la figura 4.49 nos muestra las características y los rangos de desempeño considerados altamente comparables entre todos los trabajos que son basados en lógica difusa. comenzaremos por comparar las variables de entrada al sistema, en donde es posible observar que en general que son 4 los trabajos que consideran como entrada únicamente las variables de velocidad y el ángulo de volante, mientras que existen trabajos que agregan los datos provenientes de un sensor de inclinación como una variable mas al sistema y únicamente un trabajo del año 2014 [j.Liu, K.cheng, j Zenj, 2014] contemple 6 variables mas dentro de sus entrada.

Nuestro trabajo tiene un rango de velocidad admitida de 0 a 180 Km/h dividida en 5 niveles de velocidad diferentes, [j.Liu, K.cheng, j Zenj, 2014] es un trabajo que contempla una velocidad de hasta 240 Km/h dividida en 20 niveles diferentes siendo así el trabajo que contempla mayor cantidad niveles para la conformación de reglas, con respecto a los demás trabajos, la velocidad admitida en ellos es hasta los 120 Km/h o contemplan menos de 4 niveles de velocidad diferentes. Para la entrada a una curva, los trabajos varían entre 2 formatos de datos, 4 de los 6 trabajos incluyendo el nuestro, utilizan un formato de entrada basado en los grados del ángulo del volante, mientras que dos trabajos restantes toman los datos del radio de la curva dado en metros. Dentro de los 4 trabajos que utilizan un formato de datos dado en grados, nuestro trabajo es el que contempla un rango menor en los ángulos del volante, siendo que comienza en el lado izquierdo a -90 grados, pasando por los 0 grados en el centro y terminando en 90 grados a lado derecho, [H. Rong, J. Gong, W. Wang, 2012] es el trabajo que mayor rango a la entrada contempla, comenzando en -160 grados al lado izquierdo pasando por 0 grados y terminando en 205 grados al lado derecho.

Después de reconocer las características puntuales de nuestro sistema y compararlas con otros trabajos, nos fue posible observar , que es el único trabajo que realiza un control sobre las 3 funciones distintas, los otros trabajos, únicamente controlan posicionamiento de motores horizontales y verticales, o la modulación de la corriente de iluminación en el sistema, pero nunca todas las funciones.

Comparación sobre trabajos considerados que son basados en lógica difusa										
Trabajo	Referencia	estrategia	Entradas	rangos de velocidad (Km/h)	Formato de entrada de curva	Rango	Salidas de control	rango de corriente (mA)	rango de swiveling (degrees)	rango de leveling (degrees)
Nuestro trabajo		logica difusa	Velocidad volante	0 - 40 40-60 70-90 91-120 120-180	grados (angulo de volante)	[-90 90]	Corriente swiveling leveling	200 -500	[0 15]	[24 57]
Implications and Outcomes of Controlling a LED AFS Using FUZZY LOGIC for the south american markets[3]	Lukacs, L., Fontes, C., Embirucu, M., and Pepe, I., "Implications and outcomes of controlling a LED AFS (Adaptive Front-Lighting System) using fuzzy logic for the Souths", SAE Technical Paper 2009-36-0027, 2009, Available:#doi.org/10.4271/2009-36-0027	logica difusa	Velocidad volante	0-40 0-90 >90	metros (radio de curva)	[0 - 280]	Corriente	0-1,750	n/a	n/a
Kinematics Model and Control Strategy of Adaptive Front Lighting System[45]	H. Hong, J. Gong, W. Wang, "Kinematics Model and Control Strategy of Adaptive Front Lighting System", 2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2012	logica difusa	Velocidad volante Inclinacion	0-5 6-20 21-40 41-60 61-80 81-100 101-120	grados (angulo de volante)	[-160 205]	swiveling Leveling	n/a	[0 15]	[-15 9.3]
Design And Implementation Of Intelligent Headlamps Control System Based On CAN Bus[6]	Y. Guo, Q. Wu and H. Wang, "Design and implementation of intelligent headlamps control system based on CAN bus", 2012 International Conference on Systems and Informatics (ICSAI2012), Yantai, 2012, pp. 385-389, Available:10.1109/ICSAI	logica difusa	Velocidad volante	[0 120]	grados (angulo de volante)	[-100 100]	swiveling Leveling	n/a	[-15 15]	[0 4]
A novel multi-sensors fusion framework based on Kalman filter and neural network For AFS application[8]	J. Liu, K. Cheng and J. Zeng, "A novel multi-sensors fusion framework based on Kalman Filter and neural network for AFS application", Transactions of the Institute of Measurement and Control, vol. 37, no. 8, pp. 1049-1059, 2014, Available: 10.1177/0142331214555	logica difusa	Aceleracion sensor Velocidad Luz ambiental sensor Imagen sensor Inclinacion Giro GPS	[0 240] (20 levels)	grados (angulo de volante)	[0 80]	swiveling Leveling	n/a	[-15 20]	[0 22]
Design of a Fuzzy Based AFS (Advanced Front Lightning System) to Improve Night-Time Driving for Truck Drivers: Foreseeing its Use in Emerging Markets	Lukacs, L., Fontes, C., Embirucu, M., and Pepe, I., "Design of a Fuzzy Based AFS (Advanced Front Lightning System) to Improve Night-Time Driving for Truck Drivers: Foreseeing its Use in Emerging Markets	logica difusa	Velocidad volante	0-40 0-90 >90	metros (radio de curva)	[0 - 280]	Corriente	0-1,750	n/a	n/a

Figura 4.49: Tabla comparativa de características y rangos de desempeño de los trabajos de investigación considerados y que utilizan una estrategia de control de lógica difusa.

En comparación con los trabajos que realizan una modulación de corriente para el sistema de iluminación, nuestro sistema contempla únicamente un rango de 200mA hasta 500 mA, siendo que los trabajos [Lukacs, L., Fontes, C., Embirucu, M., and Pepe, I., 2012] y [Lukacs, L., Fontes, C., Embirucu, M., and Pepe, I. 2014] utilizan corrientes de hasta 1750 mA, lo que podría representar un sistema de iluminación basado en LED menos eficiente, completamente entendible por como ha sido la evolución de los dispositivos hasta estos días.

Por ultimo, realizando una comparación en los grados de movimiento de Swiveling entre los trabajos que realizan un control de esta función, es posible observar que casi todos contemplan un rango

de hasta  $15^\circ$  de desplazamiento hacia ambos lados respectivamente, siendo [J. Liu, K. Cheng and J. Zeng, 2014] quien aumenta este rango de desplazamiento hasta 20 grados únicamente hacia el lado contrario del sentido del conductor, pero permaneciendo con un límite de desplazamiento de  $-15$  grados del lado de conductor.

Dentro de la comparación de los grados de desplazamiento utilizados en el movimiento de leveling, se pudo observar que es la función en donde mayor discrepancia existe entre todos los trabajos, asumimos que esta amplia discrepancia es resultado de los diferentes enfoques en que cada trabajo busca adaptar la inclinación del haz a la velocidad del vehículo. existen autores como [Y. Guo, Q. Wu and H. Wang, 2012] que no definen la base de su elección en que únicamente la altura varíe 4 grados.

Esta comparación cualitativa que se realizó nos brinda la oportunidad de dimensionar las características de nuestro trabajo con respecto a los otros trabajos de investigación consultados, además de brindarnos la posibilidad de observar que es un trabajo que utilizando la estrategia de control basada en lógica difusa, controla las 3 funciones diferentes, con lo cual se confirma una aportación al estado del arte actual, que será comentada más adelante en el capítulo de conclusiones.

## Capítulo 5

# Conclusiones

*Con este capítulo se finaliza este trabajo de tesis, un capítulo donde se presentan conclusiones con base en los resultados obtenidos, se comentan algunas comparaciones y se proponen posibles trabajos futuros.*

## Conclusiones

Un sistema de simulación completo, se comprende de muchos elementos que brindan la posibilidad de acercarnos mediante múltiples herramientas, a la recreación de situaciones reales en un contexto artificial. Estos sistemas de simulación pueden volverse tan complejos como nuestra capacidad de análisis de modelos, desarrollo e implementación nos lo permitan. Nuestro sistema de simulación, aunque limitado por su implementación a nivel hardware, integra en si mismo un desarrollo en múltiples software tal que le permiten dar al usuario un alto nivel de recreación en los modelos matemáticos que describen a los sistemas, así como también, una respuesta de control adecuada derivada de un sistema bien estudiado.

Los modelos dinámicos de un vehículo, descritos de manera matemática, son piezas fundamentales para el desarrollo de un sistema de simulación altamente detallado y realista, conforme el modelo dinámico, se vuelve mas complejo, el sistema de simulación puede tener la capacidad de volverse mas detallado en su representación artificial, por consiguiente también se vuelve mas complejo. Nuestro modelo dinámico es lo bastante detallado como para alcanzar un alto nivel de representación artificial, pero de la misma manera, se pueden omitir variables del modelo, para reducir el nivel de detalle. Debido a la estructura modular que conforma el sistema y nos describe el modelo dinámico completo del vehículo, se goza de la posibilidad de incluir modelos de partes individuales específicas, mucho mas detallados, que podrían además de brindar mayor grado de cercanía a la realidad, dar la posibilidad al usuario, de replicar escenarios puntuales y particulares, programados a través de tablas o de variables actualmente despreciadas, todo con la finalidad de estudiar acontecimientos suscitados o de especial interés.

Los faros frontales adaptativos AFS se vuelven cada vez mas, un elemento de mayor interés entre los fabricantes de automóviles, como también de los desarrolladores de tecnología de iluminación automotriz. Se trata de un elemento que en la ultima década se ha desarrollado muy rápidamente, todos los sistemas actuales se encuentran evolucionando de una manera asombrosa, con nuevas funciones, nuevas tecnologías en fuentes de iluminación mas eficientes, diseños completamente revolucionarios que son permitidos con base en las nuevas tecnologías y sus virtudes en tamaño como también en eficiencia. Nuestro sistema de simulación, puede ser capaz de funcionar como una herramienta que permita una reducción en el tiempo de prototipado para las estrategias de control que son necesarias tanto en las tecnologías pasadas, como lo serán para las tecnologías futuras.

El diseño adecuado del hardware electrónico que funciona como el encargado del control, la alimentación y soporte físico de las fuentes de iluminación es una parte critica en el desarrollo de un faro automotriz, generalmente se menosprecia esta parte fundamental del proceso completo de diseño y fabricación. Además de la responsabilidad inherente que mantiene el hardware en la iluminación, sufre de un nivel de complejidad en su desarrollo que de igual manera suele ser tomado a la ligera. Un sistema de simulación como el que se presenta en este trabajo, puede contribuir nuevamente a la reducción en el tiempo de prototipado para las tarjetas electrónicas, o hardware electrónico del faro, brindando además, la bondad de poder funcionar como una herramienta de validación para un funcionamiento adecuado del hardware. Por otra parte es importante mencionar que las tarjetas electrónicas PCB por ejemplo, deben cumplir con ciertos estándares de fabricación automotriz que no fueron implementados en este trabajo de tesis, además de practicas de diseño adecuadas que deben ser contempladas para prevenir problemas de compatibilidad electromagnética con el resto de los sistemas que se integran en los vehículos y pruebas de desempeño ambiental en donde se evalúan atributos como la rigidez de las tarjetas, la disposición de los elementos electrónicos en ellas y su vulnerabilidad a desprenderse por vibraciones, pruebas de tolerancia al polvo, a la humedad y a las altas temperaturas.

Las interfaces gráficas dentro de los sistemas de simulación se vuelven fundamentales y necesarias con los objetivos de cada sistema. Si el sistema de simulación, requiere de una interfaz gráfica que permita el uso de un ambiente artificial detallado, recreado de manera virtual, con la finalidad de probar o evaluar características de desempeño en software o hardware, un ambiente prediseñado aun cuando se encuentre bajo el uso de una licencia, puede resultar una opción adecuada, puesto

que, además de incluir características que brinden mayor sensación de realidad, al estética en el diseño y múltiples posibilidades de configuración rápida, puede ayudar a alcanzar una disminución muy significativa en los tiempos de diseño, desarrollo y configuración de un proyecto de simulación. Aun que si el proyecto no cuenta con los recursos necesarios para poder adquirir una licencia para su desarrollo, tenemos la certeza de que es posible llevar a cabo un desarrollo sin costos de licencia, a través de software de código abierto o gratuitos.

El uso de la lógica difusa como una herramienta en el diseño de una estrategia de control resulto ser adecuada, toda vez que tanto el sistema a controlar como el desempeño requerido es bien conocido por el diseñador, sus parámetros entradas y de salidas son conocidos, existen dentro de un rango de valores finito y limitado, así como también se conocen estrechamente la relación entre las posibles funciones de membresía y las reglas de inferencia del sistema de control. Por todo lo anterior, un control mediante lógica difusa se adapto de manera adecuada a las necesidades presentes en este trabajo. Este método de control puede también desempeñarse de manera adecuada en un sistema de lazo abierto que no cuenta con retroalimentación, como es el caso de nuestro trabajo. La lógica difusa como estrategia de control requiere de un trabajo amplio en la tarea de definir el funcionamiento de las reglas de inferencia, los grados de pertenencia para cada variable, y sus funciones de membresía, pero herramientas como Fuzzy logic designer de Matlab reducen en buena medida las tareas de definición de la estrategia de control, también cuenta a su vez con una herramienta que nos permite visualizar las reglas establecidas dentro de nuestra lógica difusa, sin la necesidad de una implementación completa, pues permite variar los valores de entrada para poder observar los resultados en las salida.

El desarrollo de un sistema en tiempo real requiere de hardware altamente capacitado para desempeñar las tareas necesarias en la simulación, un sistema como el que nosotros implementamos requiere de un alto nivel de procesamiento y por lo tanto un amplio grado de recursos computacionales para llevar a cabo las iteraciones necesarias de manera eficiente y veloz. Las condiciones que se viven actualmente en el mundo, limitaron el acceso a material y recursos que nos permitieran realizar simulaciones de alta demanda de recursos computacionales, además de limitar también la posibilidad de una implementación física acorde a lo esperado. Es entonces que se toma la decisión de simular todo cuanto fuera posible para nuestro sistema, por lo tanto este trabajo puede asimilarse como una técnica de software in the loop, puesto que el hardware no fue implementado ni evaluado dentro del lazo, se trabajo con el mayor esfuerzo posible y ante los recursos que se tuvieron disponibles, cabe mencionar que nuestro equipo de computo tampoco cuenta con el poder de realizar tareas que demanden grandes recursos de procesamiento y recursos de computo en general.

Con los resultados obtenidos, se pudo validar el funcionamiento de la estrategia de control con lógica difusa para el sistema de simulación de conducción, a partir de un escenario virtual pre-diseñado y que interactúa de manera adecuada con los modelos dinámicos que representan a un vehículo, una estación con volante y pedales para el usuario y la integración de estos subsistemas en un sistema único. Se realizaron diseños de las tarjetas electrónicas PCB para los sistemas de iluminación, que son completamente funcionales y que pueden ser implementados de manera física en cualquier momento, de igual manera se diseño el modelo de un alojamiento de plástico y policarbonato para el sistema de iluminación. Consideramos a este sistema de simulación un trabajo medible y que puede ser reproducible en cualquier momento, presentando los mismos desempeños.

### **Aportación al estado del arte**

Nuestro trabajo es basado en una estrategia de control por lógica difusa que si bien, no es la única estrategia utilizada en desarrollos de sistemas de faros frontales adaptativos, es una de las mas utilizadas, lo que ubica a este trabajo en una posición de necesidad de alta competencia para lograr ser relevante. Sin embargo, gracias a la comparación cualitativa realizada y documentada en el capítulo anterior, es posible visualizar el aporte que nuestro trabajo brinda al estado del arte en materia.

El sistema de simulación para faros frontales adaptativos, utiliza bloques de lógica difusa como

estrategia de control, la cual es capaz de inferir las salidas de control para 3 funciones distintas. La primera de ellas, es un control sobre la corriente que ingresa a los canales de iluminación de cada faro, con lo cual se logra tener a la salida de los faros distintos niveles de iluminación y/o atenuación para cada clase en los diferentes modos de iluminación. La segunda, se trata del posicionamiento horizontal de los faros a través de un movimiento de swiveling que nos brinda un modo de iluminación de curva dinámica. La tercera, un ajuste en la inclinación vertical de haz de iluminación, por medio de un movimiento de leveling, para ajustar la altura necesaria, que se requiere en cada modo de iluminación.

De los trabajos analizados dentro de la revisión al estado del arte, cuyo funcionamiento y/o implementación es basado en el uso de lógica difusa, no se encontró un trabajo reportado que involucre el control de las 3 funciones distintas ya mencionadas en la misma investigación. Pudimos observar que dichos trabajos únicamente se enfocan en controlar la corriente para el sistema de iluminación y poder adaptar así el haz de luz a las condiciones requeridas, o en poder lograr ajustar la posición horizontal y vertical del haz de iluminación, mediante un movimiento a través de actuadores mecánicos.

Por lo tanto nuestro aporte al estado del arte, es un sistema de simulación para el control de la correcta adaptación del haz luminoso a las diferentes condiciones de iluminación y posicionamiento, dependientes de las situaciones de conducción, basado en lógica difusa y de lo cual no se ha reportado un trabajo similar hasta ahora.

### **Sugerencias de trabajo futuro**

Como trabajo futuro se plantean las siguientes directrices que podrían contribuir al desarrollo del trabajo presente, se propone elevar el desempeño del sistema de control utilizando una estrategia de control en lazo cerrado y que pueda involucrar nuevas herramientas como la inteligencia artificial, cuya cualidad sea aprender las diferentes situaciones de conducción y adaptarlas en una respuesta más exacta, que sea capaz de adaptarse a nuevas tecnologías de reconocimiento de imágenes en la vialidad, que brinden mayor soporte en la asistencia al conductor.

Se propone también considerar la tecnología de iluminación píxel, la cual puede ser integrada al sistema mediante el uso y programación de dispositivos LMMs (LED Matrix Manager), la consideración de dispositivos LED más eficientes y con mayor potencia lumínica, lo cual también implicaría en un rediseño de las tarjetas de los circuitos electrónicos para poder satisfacer necesidades puntuales de los nuevos sistemas, como el monitoreo de temperatura de la tarjeta PCB para prevenir un daño a los LEDs y LMMs, que puede ser implementado mediante resistencias NTC. Considerar una estrategia de current derating (utilizada en la industria) para altas temperaturas y bajas temperaturas. Analizar y considerar nuevas tecnologías vanguardistas en iluminación, por ejemplo el procesado digital de luz (DLP tecnología desarrollada por Texas Instruments), la cual es capaz de proyectar imágenes con alta resolución y esta siendo utilizada para señalización, sugerencias y advertencias al conductor.

Continuar con la implementación del sistema de simulación en tiempo real, necesario para realizar evaluaciones y validaciones rápidas. Se recomienda no consumir demasiado tiempo y recursos en los circuitos de conducción, se puede dar seguimiento a las opciones sugeridas en este trabajo de tesis. La estrategia de control es importante, pero se debe poner también bastante atención a los aspectos que involucran las tarjetas PCB, las buenas prácticas de diseño, los estándares de compatibilidad electromagnética (EMC) y pruebas ambientales para circuitos electrónicos requeridos en el estándar automotriz, todo lo anterior con la finalidad de lograr un trabajo más cercano a la actualidad de la industria automotriz.

# Bibliografía

- [1] S. Magar, “Adaptive Front Light Systems of Vehicle for Road Safety”, 2015 International Conference on Computing Communication Control and Automation, 2015. Available: 10.1109/iccubea.2015.113.
- [2] J. Sullivan and M. Flannagan, “The role of ambient light level in fatal crashes: inferences from daylight saving time transitions”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 34, no. 4, pp. 487-498, 2002. Available: 10.1016/s0001-4575(01)00046-x.
- [3] Lukacs, L., Fontes, C., Embirucu, M., and Pepe, I., “Implications and outcomes of controlling a LED AFS (Adaptive Front-Lighting System) using fuzzy logic for the South American Markets”, SAE Technical Paper 2009-36-0027, 2009, Available://doi.org/10.4271/2009-36-0027.
- [4] C. Schmidt, F. Kaize, K. Eichhorn, “Adaptive Front-lighting System in LED Technology Initial Steps and the Future”, *SAE Transactions*, vol. 116, pp. 332-342, 2007, Available: www.jstor.org/stable/44719898.
- [5] H. Rong, J. Gong, “Study on intelligent control of road condition perception and forward collision warning system”, *International Conference on Intelligent Computing and Integrated Systems*, Guilin, 2010, pp. 285-289, Available:10.1109/ICISS.2010.5657155.
- [6] Y. Guo, Q. Wu and H. Wang, “Design and implementation of intelligent headlamps control system based on CAN bus”, 2012 International Conference on Systems and Informatics (ICSAI2012), Yantai, 2012, pp. 385-389, Available:10.1109/ICSAI.2012.6223640.
- [7] F. Guo, H. Xiao and S. Tang, “Research of modeling and simulation on adaptive front-lighting system for corner based on CCD,”2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Guiyang, 2013, pp. 3598-3602, Available:10.1109/CCDC.2013.6561572.
- [8] J. Liu, K. Cheng and J. Zeng, “ A novel multi-sensors fusion framework based on Kalman Filter and neural network for AFS application”, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 37, no. 9, pp. 1049-1059, 2014. Available: 10.1177/0142331214555213.
- [9] Z. Gao, Y. Li, “ A Study of Bending Mode Algorithm of Adaptive Front-Lighting System Based on Driver Preview Behavior”, *Mathematical Problems in Engineering*, vol.2014, pp.1-11, 2014, Available: 10.1155/2014/939218.
- [10] L. Lifu, Y. Mingjun, “ Dynamic bending Mathematical Model of vehicle adaptive front-lighting system based on rolling characteristics”,*Applied Mechanics and Materials*, Vols. 644-650, pp. 117-121, 2014,Available: 10.4028/www.scientific.net/AMM.644-650.117.
- [11] X. Zhu, C. Wang, H. Wu, L. Jiang, “ Optical design of an adaptive front-lighting system with high energy efficiency”,*International Symposium on Photonics and Optoelectronics 2014*, Vol. 9233, pp. 9233201 - 9233206, 2014, Available: 10.1117/12.2065539.
- [12] X. Li, X. Xue, Y. Min, “Research on Front Lighting System of Automobile, .*Applied Mechanics and Materials*, Vols 668-669 (2014) , pp. 848-851, 2014, Available: 10.4028/www.scientific.net/AMM.668-669.848.

- [13] L.Lifu, Y.Mingium, Z. Jinyong, "The Bending Mode Control Method of AFS System Based on Preview Control," *INTERNATIONAL JOURNAL ON SMART SENSING AND INTELLIGENT SYSTEMS*, VOL. 8, pp. 637-657, 2015.
- [14] H. Lee, J. Byeon, D.J. Go, R.Park, "Automotive Adaptive Front Lighting Requiring Only On/Off Modulation of Multi-array LEDs," *Current Optics and Photonics*, Vol. 1, pp.207-214, 2017, Available: 10.3807/COPP.2017.1.3.207.
- [15] H. Moon, J. Cho, D. Park, "Effective Validation Framework Using Wheel-Microcontroller Co-Emulation of Safe Adaptive Front Light Controller," *IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE) Nagoya 2017*, pp. 1-2, 2017, Available: 10.1109/GCCE.2017.8229328.
- [16] Nandyala, S., Santhapur, S., Kumar, K., Manalikandy, M., "Controlling LED Based Adaptive Front-Lighting System Using Machine Learning," *SAE Technical Paper 2018-01-1040*, 2018, Available: 10.4271/2018-01-1040.
- [17] H. Dahou, R. El Gouri, Mohammed A., K. Mateur, A. Mezouari, A. Zemmouri, L. Hlou, "Design and Implementation Intelligent Adaptive Front-lighting System of Automobile using Digital Technology on Arduino board," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, Vol. 8, pp. 521-529, 2018, Available: 10.11591/ijece.v8i1.pp521-529.
- [18] S. Park, B.Im, D. Park, "Model Based Optimum PID Gain Design of Adaptive Front Lighting System," *International Journal of Automotive Technology*, Vol.19, pp. 923-933, 2018, Available: 10.1007/s12239.018.0089.x
- [19] G. Munoz-Hernandez, S. Mansoor and D. Jones, "Modelling and controlling hydropower plants". London: Springer, 2013.
- [20] Q. Wu, L. Lei, J. Chen, W. Wang and E. Wang, "Design of Advanced Front-lighting Control Unit and Hardware-in-the-Loop Simulation", *Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp.1773-1776, 2009. Available: 10.1109/VPPC.2009.5289700
- [21] Nandyala, S., Santhapur, S., Kumar, K., and Manalikandy, M., "Controlling LED Based Adaptive Front-Lighting System Using Machine Learning". *SAE Technical Paper 2018-01-1040*, 2018, Available:10.4271/2018-01-1040.
- [22] W. Tomasi, *Sistemas de comunicaciones electrónicas*. México: Prentice-Hall, 2003.
- [23] P. Tippens, "Física conceptos y aplicaciones", México: McGraw Hill Hispanoamerica, 2007.
- [24] J.Loiseleux, *La luz en el cine*, Barcelona: Paidós, 2008.
- [25] H.E.White, "Física moderna", México: Limusa, 2001.
- [26] P.zelanski, *Color*, Trescantos, Madrid: Tursten/H. Blume, 2001.
- [27] E.F. Schumbert, *Light-emitting diodes*, Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [28] B. Wördenweber, J. Wallaschek, P. Boyce, D. Hoffman, "Automotive Lighting and Human Vision", Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [29] D. J. Simons, C. F. Chabris, *Gorillas in our midst: sustained inattentive blindness for dynamic events*, *Perception*, volume 28, pages 1059 - 1074, 1999.
- [30] L. Gila, A. Villanueva, R. Cabeza, "Physiopathology and recording techniques of ocular movements". *An. Sist. Sanit. Navar*, Vol. 32, Suplemento 3, 2009.
- [31] P. Albou, "LED Module for Headlamp", *SAE Transactions*, vol. 112, pp. 658-663, 2003.
- [32] Press release. NobelPrize.org. Nobel Media AB 2020. Sat. 14 Nov 2020. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2014/press-release/>
- [33] D. Chowdhury, S. Garner. S.Lewis, "Application of OLED for Automotive Lighting", *International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (AM-FPD)*, julio, 2019.

- [34] C. Altingoz, “Laser technology in automotive lighting”, High-Power Diode Laser Technology and Applications XII, Vol. 8965, 896518, 2014.
- [35] T. Beléndez, A. Beléndez, “Fotometría resumen”, Física general, tema 28-ITOP, 2002.
- [36] D. Pérez, (2017, Marzo 17) El primer automóvil de México [online]. Available: <https://www.atraccion360.com/el-primer-auto-en-mexico>
- [37] H. Mendoza, “El automóvil y los mapas en la integración del territorio mexicano, 1929-1962”, Investigaciones geográficas, boletín del instituto de geografía, vol.2015, num.88, pp.91-108, 2015.
- [38] S. Salinas Alvarez, “Historia de los caminos de México”, Mexico: Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos, 1a ed., 2015.
- [39] J.J. Moskwa, “Automotive Engine Modeling for Real Time Control”, Ph.D thesis, Massachusetts Institute of Technology, EEUU, 1988.
- [40] S. Alles, C. Swick, S.Mahud, F. Lin, “Real Time Hardware-in-the-Loop Vehicle Simulation”, Electrical Computer Engineering Dept. Wayne State University, Detroit, 1992.
- [41] C. Kohler, “Enhancing Embedded Systems Simulation, A Chip-Hardware-in-the-Loop Simulation Framework”, Dissertation Technische Universität München, VIEWEG+TEUBNER RESEARCH, 1a ed., 2011.
- [42] G. Morales-Luna, “Introducción a la lógica difusa”, Centro de Investigación y Estudios Avanzados del IPN, Mexico DF, 2002
- [43] G. Sepulvera Cervantes, E. Vega Alvarado, E.A. Portilla Flores, “Machine Learning para Robots, del Entrenamiento Virtual a la Tarea Real”, Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico en Computo del Instituto Politécnico Nacional, Publicación Semestral Padi Vol. 7 No. Especial 2019.
- [44] A. Cookson, R. DowlingSoka, C. Crumpler, “Sams Teach Yourself Unreal Engine 4 Game Development 24 hours”, Pearson Education, Indiana, United States, Primera ed. 2016.
- [45] H. Rong, J. Gong, W. Wang, “Kinematics Model and Control Strategy of Adaptive Front Lighting System”, 2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2012 Tianjin, China
- [46] Lukacs, L., Fontes, C., Embirucu, M., and Pepe, I., “Design of a Fuzzy Based AFS (Advanced Front Lightning System) to Improve Night-Time Driving for Truck Drivers: Foreseeing its Use in Emerging Markets, 2014, SAE Technical Paper 2014-01-0435, 2014, doi:10.4271/2014-01-0435.

# Índice de figuras

1.1.	Diagrama a bloques del sistema de simulación. . . . .	8
1.2.	Bloque de la estación de trabajo. . . . .	9
1.3.	Bloque de simulación de volante y pedales. . . . .	9
1.4.	Bloque de Faros AFS. . . . .	10
1.5.	Bloque que alberga las ecuaciones que describen a la planta. . . . .	10
1.6.	Bloque que contiene el algoritmo de control. . . . .	10
2.1.	Espectro Electromagnético . . . . .	14
2.2.	Elementos anatómicos básicos del ojo humano. . . . .	15
2.3.	Curva de luminosidad, Sensibilidad del ojo(eje ordenado izquierdo), eficiencia luminosa medida en lumen por watt (eje ordenado derecho), donde el mayor valor obtenido es para $\lambda = 555$ . [27] . . . . .	16
2.4.	Curvas de visión fotópica(color) y escotópica(gris). . . . .	17
2.5.	Diagrama cromático CIE 1931 propuesto por la C.I.I. . . . .	18
2.6.	Diagrama cromático CIE 1931 con temperaturas de colores blancos. . . . .	19
2.7.	Flujo óptico en la percepción visual del movimiento. . . . .	20
2.8.	Luces Secuenciales que producen el efecto de movimiento estroboscópico. . . . .	21
2.9.	Ejemplo del efecto de movimiento inducido. . . . .	21
2.10.	Ejemplo del efecto de movimiento de estructura estática en un ambiente oscuro. . . . .	21
2.11.	Ejemplo comúnmente utilizado para mostrar el efecto posterior al movimiento. . . . .	22
2.12.	La ilusión del blanco. . . . .	22
2.13.	Cuadro de Koenderink. . . . .	23
2.14.	paraboloide hiperbólico formado a partir de imagen de dos dimensiones. . . . .	24
2.15.	Movimientos sacádicos y de fijación voluntaria para fijar una imagen. . . . .	26
2.16.	Registro gráfico de un movimiento sacádico horizontal. . . . .	26
2.17.	Proceso de escaneo secuencial de una escena visual por el sistema visual humano. . . . .	27
2.18.	Percepción de continuidad y discontinuidad de un flujo luminoso. . . . .	28
2.19.	Bombilla halógena y las partes que la conforman. . . . .	32
2.20.	Bombilla de xenón y las partes que la conforman. . . . .	33
2.21.	Unión PN con polarización directa. . . . .	34
2.22.	Modelo de bandas energéticas en un semiconductor y proceso de recombinación. . . . .	35
2.23.	Heteroestructura con InGaN para conseguir luz azul. . . . .	35
2.24.	Típico diseño de un panel de iluminación OLED. . . . .	36
2.25.	Estructura básica del principio fundamental del láser. . . . .	37
2.26.	Cavidad con geometría fabry-perot. . . . .	38
2.27.	Principio de formación de luz blanca con diodo láser azul y fósforo. . . . .	38
2.28.	Tipos haz luminoso, su áreas y rangos de alcance. . . . .	40
2.29.	Ejemplificación de linea de corte para luz baja. . . . .	40
2.30.	Ejemplificación de linea de corte para luz de niebla. . . . .	40
2.31.	Diagrama esquemático de las referencias para las mediciones de iluminación. . . . .	41
2.32.	Ubicación espacial de puntos fotométricos específicos. . . . .	42
2.33.	Carta fotométrica de luz de haz bajo para fuentes Halógenas y LED (ECE R112). . . . .	43
2.34.	Cilindro pulido utilizado para la reflexión luminosa. . . . .	43
2.35.	Diseño asistido por computadora en tecnología de reflexión segmentada. . . . .	44

2.36. Reflector elíptico complejo fundamental en la generación de patrones del haz luminoso.	44
2.37. Mecanismo obturador de dispositivo bi-función.	45
2.38. Aberración en la apertura de la lente esférica que produce un haz colimado.	45
2.39. Relación entre el escenario de conducción y la proporción del flujo de iluminación.	48
2.40. Reglas determinadas para los modelos difusos y sus posibles escenarios.	48
2.41. Superficie generada por el modelo de lógica difusa tipo-2.	49
2.42. Arquitectura de sistema AFS reportado en 2010.	49
2.43. Implementación de sistema AFS en planta física.	50
2.44. Vista general del sistema de control inteligente para faros.	50
2.45. Reglas para lógica difusa en control horizontal.	51
2.46. Reglas para lógica difusa en control vertical.	51
2.47. Disposición de elementos para el sistema basado en sensor CCD.	52
2.48. Resultados de la simulación del sistema basado en CCD.	52
2.49. Conformación de sistema con múltiples sensores fusionados una red conjunta de filtro Kalman y red neuronal difusa.	53
2.50. Flujo de señales para el sistema con múltiples sensores fusionados una red conjunta de filtro Kalman y red neuronal difusa.	53
2.51. Flujo de señales para el sistema con estudio previo del comportamiento del conductor.	54
2.52. Representación gráfica del modelo matemático para la deflexión del haz luminoso, del sistema con predicción de la trayectoria.	54
2.53. Marco de referencia en sistema de coordenadas rectangulares para el desarrollo del modelo matemático para luz de curva dinámica.	55
2.54. Resultados de simulación en matlab para modelo matemático para luz de curva dinámica.	55
2.55. Diseño óptico propuesto para un sistema AFS con alta eficiencia de energía.	56
2.56. Comparación de resultados obtenidos mediante simulación y los establecidos en la regulación para un haz luminoso de clase V.	56
2.57. Diagrama de bloques del algoritmo de control para un movimiento rotacional en AFS[12].	57
2.58. Resultado de la simulación del algoritmo de control para rotación horizontal del faro[2].	57
2.59. Diagrama de bloques del modelo de control con modulo de corrección.	58
2.60. Disposición de los elementos para la implementación física del sistema de control presentado en [13].	58
2.61. Resultados obtenidos a una velocidad de 40 Km/h para el ángulo de faro.	58
2.62. Disposición de los arreglos ópticos avanzados para la generación de los patrones de iluminación.	59
2.63. Arreglo de LED con micro lentes individuales para generar la fuente de iluminación.	59
2.64. Resultados en la generación de los patrones de iluminación mediante el arreglo óptico.	59
2.65. Disposición de los elementos para la plataforma de prueba de AFS de respaldo . . .	60
2.66. Resultados de la función principal de AFS de respaldo obtenidos en la simulación.	60
2.67. Resultados de la función principal de AFS de respaldo obtenidos en la simulación.	61
2.68. Resultados de la función principal de AFS de respaldo obtenidos en la simulación.	61
2.69. Arquitectura propuesta de iluminación paralela fijada con distinta rotación horizontal.	62
2.70. Posición del volante convertida mediante un ADC de 10 bits.	62
2.71. Linealización de la velocidad angular de un motor DC.	62
2.72. Diagrama de bloques de controlador PID con lazo de retroalimentación para AFS.	63
2.73. Resultados obtenidos comparando el desempeño del sistema con controlado PID y sin el controlador PID.	63
2.74. Diagrama de bloques para los elementos del sistema AFS.	64
2.75. Carta fotométrica guía para haz clase V . . . . .	65
2.76. Patrón de Haz modo clase V. . . . .	66
2.77. Carta fotométrica guía para haz clase C. . . . .	67
2.78. Patrón de Haz modo clase C. . . . .	67
2.79. Carta fotométrica guía para haz clase E. . . . .	68
2.80. Patrón de Haz modo clase E. . . . .	68

2.81. Carta fotométrica guía para haz clase W. . . . .	69
2.82. Patrón de Haz modo clase W. . . . .	69
2.83. Patrón de Haz modo curva. . . . .	70
2.84. Patrón de Haz antideslumbramiento multibeam. . . . .	71
2.85. Patrón de Haz antideslumbramiento SailBeam. . . . .	71
2.86. Patrón de Haz antideslumbramiento sombra dinámica. . . . .	72
2.87. Patrón de Haz antideslumbramiento matrix beam. . . . .	72
2.88. Patrón de Haz antideslumbramiento Pixel light. . . . .	73
2.89. Curva de voltaje(V) contra corriente(I) de LED. . . . .	74
2.90. Representación de una conexión adecuada para un LED. . . . .	74
2.91. Diagrama esquemático de controlador PWM para AFS. . . . .	75
2.92. Fuentes de iluminación en los modelos disponibles del mercado. . . . .	77
2.93. Fuentes de iluminación de cada marca utilizadas en los modelos disponibles. . . . .	77
2.94. Disponibilidad de los sistemas AFS en el mercado Mexicano. . . . .	77
2.95. Cantidad de modelos equipados con AFS en cada marca. . . . .	78
2.96. Los 3 modelos con sistemas AFS mas accesibles del mercado. . . . .	78
2.97. Equipamiento de serie contra equipamiento opcional. . . . .	79
2.98. Cantidad de Versiones y el tipo de equipamiento AFS en cada marca. . . . .	79
2.99. Países cuyas marcas ofertan modelos con AFS en México. . . . .	80
2.100Arquitectura HIL con planta simulada. . . . .	82
2.101Arquitectura HIL con ECU simulada.. . . . .	82
2.102Diagrama de control de lazo cerrado con bloque de lógica difusa. . . . .	84
2.103Tabla FAM para establecer reglas de inferencia. . . . .	85
2.104Biblioteca de diseño Machine Learning TensorFlow. . . . .	86
2.105UE4 Logotipo. . . . .	87
3.1. Características principales de LEDs de la serie J. . . . .	89
3.2. LED de la serie J 5630 SMD. . . . .	89
3.3. Características y valores absolutos de transistor MOSFET TPS1101 . . . . .	90
3.4. Funciones de las terminales del dispositivo LM3409. . . . .	91
3.5. Condiciones de Funcionamiento Sugeridas para el dispositivo TL5001. . . . .	91
3.6. Diagrama simplificado de DRV8823. . . . .	92
3.7. Desplazamientos en gráfica del haz luminoso para el 1er rango de velocidad en el modo clase V. . . . .	94
3.8. Desplazamientos en gráfica del haz luminoso para el modo clase C. . . . .	95
3.9. Ejemplo de desplazamientos en gráfica del haz luminoso para el modo clase E en su ultimo rango de velocidad. . . . .	96
3.10. Movimiento rotacional de faro izquierdo o derecho en iluminación dinámica de curva, donde únicamente uno de los dos faros adopta el movimiento. . . . .	97
3.11. Distribución de la iluminación en los 4 canales del faro izquierdo para la iluminación de curva. . . . .	98
3.12. Distribución de la iluminación en los 4 canales del faro derecho para la iluminación de curva. . . . .	98
3.13. Vista general del funcionamiento de la iluminación mediante Leds y su atenuación para el modo de iluminación de curva. . . . .	98
3.14. Sentido de movimiento y rango de posicionamiento en grados permitido para cada faro ( trazo rojo). . . . .	99
3.15. Tabla de grados de posicionamiento sugeridos para actuador izquierdo (Azul sugiere conducción en curva, Gris sugiere conducción en recta) con base en el estado actual de las señales de entrada. . . . .	99
3.16. Tabla de grados de posicionamiento sugeridos para el actuador derecho (Azul sugiere conducción en curva, Gris sugiere conducción en recta) con base en el estado actual de las señales de entrada. . . . .	100
3.17. Interface de simulador para conducción MonoDrive. . . . .	101
3.18. Malla prediseñada de cinta asfáltica. . . . .	102
3.19. Malla prediseñada de una barra de contención. . . . .	102

3.20. Algoritmo de repetición de mallas Spline. . . . .	103
3.21. Modificación de detalles en el Blueprint actor para la malla de cinta asfáltica. . . .	103
3.22. Modificación de detalles en el Blueprint actor para la malla de cinta asfáltica. . . .	104
3.23. Modificación de detalles en el Blueprint actor para la malla de cinta asfáltica. . . .	104
3.24. Modificación de detalles en el Blueprint actor para la malla de cinta asfáltica. . . .	104
3.25. Menú de proyectos en UE4 para insertar vehículo. . . . .	105
3.26. Apariencias y características visuales de vehículo predeterminado UE4. . . . .	105
3.27. Menú contextual de componentes (Vehicle Movement). . . . .	106
3.28. Menú de detalles para el componente Vehicle Movement. . . . .	106
3.29. Programación del Blueprintlevel para la conducción del vehículo. . . . .	107
3.30. Disposición mínima de bloques y conexiones para escena 3D. . . . .	109
3.31. Configuraciones disponibles en el bloque Simulation 3D with Ground Following. . . . .	110
3.32. Configuraciones disponibles en el bloque Simulation 3D Scene Configuration. . . . .	110
3.33. Configuraciones en el bloque Simulation 3D Actor Transform Get. . . . .	110
3.34. Disposición de bloques de escenario 3D dentro del sistema de simulación. . . . .	111
3.35. Resultado en la creación de circuito de conducción licenciado. . . . .	111
3.36. Diagrama de estados para la adquisición, acondicionamiento y envío de datos. . . . .	112
3.37. Disposición de bloques de función para el inicio y fin de la conexión con el mando de Xbox one. . . . .	113
3.38. El eje $x$ de la palanca de mando izquierda brindara la dirección del vehículo, el eje $y$ la aceleración, los datos del mando son convertidos a un rango útil y diferente cada uno, para ser transmitidos. . . . .	114
3.39. Disposición de bloques de función para el inicio y fin de la transmisión de datos por protocolo TCP/IP. . . . .	114
3.40. Bloque de Función Joystick. . . . .	115
3.41. Librería que contiene el bloque de Función Joystick. . . . .	115
3.42. Configuración para el Bloque de Función Joystick. . . . .	116
3.43. Disposición de bloques utilizados para integración de volante y pedales. . . . .	116
3.44. Bloque de modelo Kinematic Steering. . . . .	117
3.45. Modelo ideal de Ackerman. . . . .	118
3.46. Modelo de piñón y cremallera. . . . .	119
3.47. Modelo Paralelo. . . . .	119
3.48. Disposición de bloques internos de tren motriz y transmisión. . . . .	120
3.49. Configuración interna de bloque Powertrain. . . . .	121
3.50. Modelo para freno de disco. . . . .	122
3.51. Bloque Vehicle Body 3DOF Dualtrack. . . . .	122
3.52. Modelo dinamico de Dualtrack. . . . .	123
3.53. Disposición de bloques para el modelo completo de vehículo. . . . .	124
3.54. Tabla de premisas para el comportamiento de la corriente en cada canal, presentándose vueltas a la izquierda. . . . .	125
3.55. Tabla de premisas para el comportamiento de la corriente en cada canal, presentándose vueltas a la derecha. . . . .	126
3.56. Tabla de premisas para el posicionamiento horizontal de los faros, presentándose vueltas a la derecha. . . . .	126
3.57. Tabla de premisas para el posicionamiento horizontal de los faros, presentándose vueltas a la derecha. . . . .	126
3.58. Tabla de premisas para el posicionamiento vertical de los faros, en función leveling. . . . .	127
3.59. Tabla FAM para el canal 1 del faro izquierdo. . . . .	130
3.60. Tabla FAM para el canal 2 del faro izquierdo. . . . .	130
3.61. Tabla FAM para el canal 3 del faro izquierdo. . . . .	130
3.62. Tabla FAM para el canal 4 del faro izquierdo. . . . .	130
3.63. Tabla FAM para el canal 1 del faro derecho. . . . .	131
3.64. Tabla FAM para el canal 2 del faro derecho. . . . .	131
3.65. Tabla FAM para el canal 3 del faro derecho. . . . .	131
3.66. Tabla FAM para el canal 4 del faro derecho. . . . .	131
3.67. Tabla FAM para el motor horizontal izquierdo. . . . .	131

3.68. Tabla FAM para el motor horizontal derecho. . . . .	132
3.69. Tabla FAM para ambos motores verticales. . . . .	132
3.70. Función de membresía tipo Gauss. . . . .	132
3.71. Función de membresía tipo Trapezoidal. . . . .	132
3.72. Función de membresía para variable de entrada Volante. . . . .	133
3.73. Función de membresía para variable de entrada Velocidad. . . . .	133
3.74. Función de membresía para variable de salida canal. . . . .	134
3.75. Función de membresía para variable de salida motor horizontal. . . . .	134
3.76. Función de membresía para variable de salida motor vertical. . . . .	134
3.77. Reglas de inferencia para la de salida motor vertical. . . . .	135
3.78. Reglas de inferencia para la de salida motor horizontal. . . . .	136
3.79. Reglas de inferencia para la de salida en corriente de faro izquierdo. . . . .	137
3.80. Reglas de inferencia para la de salida en corriente para el faro derecho. . . . .	137
3.81. Bloques de funciones necesarias para el sistema de iluminación. . . . .	137
3.82. Aplicación típica de dispositivo LM3409. . . . .	138
3.83. Descripción de pines de dispositivo LM3409. . . . .	138
3.84. Circuito interno de control Time off . . . . .	139
3.85. Gráfica de corriente en un LED aplicando modulación PWM. . . . .	140
3.86. Diagrama de LM5001 para aplicación típica de PWM. . . . .	141
3.87. Diagrama de bloques de PCBs para circuito electrónico. . . . .	142
3.88. Diagrama esquemático para tarjeta impresa de sistema de iluminación. . . . .	143
3.89. Diagrama esquemático para tarjeta impresa de generación de pulsos PWM. . . . .	144
3.90. Bloque solido con plano para modelado y extrusión del mismo. . . . .	145
3.91. Bloque solido extruido, con la forma principal de la carcasa. . . . .	145
3.92. Carcasa de Policarbonato. . . . .	146
3.93. Presentación de piezas previo ensamblaje. . . . .	146
3.94. Carcasa en ensamblaje final. . . . .	146
4.1. Imagen comparativa de los ambientes virtuales (Superior - desarrollado bajo código libre, Inferior - Utilizado bajo el uso de licencia). . . . .	148
4.2. Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación (corriente a través de LEDs) en faro derecho bajo conducción sin giro en el volante a 26.4 km/h. . . . .	150
4.3. Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro derecho bajo conducción sin giro en el volante a 69.7 km/h. . . . .	150
4.4. Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro derecho bajo conducción sin giro en el volante a 79.2 km/h. . . . .	151
4.5. Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro derecho bajo conducción sin giro en el volante a 144 km/h. . . . .	151
4.6. Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro derecho bajo conducción con vuelta a la derecha a 22.3 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido 10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado 28.4 grados (inferior). . . . .	152
4.7. Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro derecho bajo conducción con vuelta a la izquierda a 22.3 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido -10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado -28.4 grados (inferior). . . . .	153
4.8. Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro derecho bajo conducción con vuelta a la derecha a 68.3 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido 10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado 24.4 grados(inferior). . . . .	154
4.9. Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro derecho bajo conducción con vuelta a la izquierda a 68.3 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido -10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado -68.3 grados(inferior). . . . .	155
4.10. Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro derecho bajo conducción con vuelta a la derecha a 112 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido 9.47 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado 23 grados(inferior). . . . .	156

4.11. Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro derecho bajo conducción con vuelta a la izquierda a 112 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido -10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado -22 grados (inferior). . . . .	157
4.12. Imagen comparativa de los resultados de inferencia en un mismo ángulo de volante a la derecha reducido, a 112 Km/h y a 128 Km/h. . . . .	158
4.13. Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro izquierdo bajo conducción sin giro en el volante a 34.5 km/h. . . . .	159
4.14. Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro izquierdo bajo conducción sin giro en el volante a 65.6 km/h. . . . .	159
4.15. Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro izquierdo bajo conducción sin giro en el volante a 98.1 km/h. . . . .	160
4.16. Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro izquierdo bajo conducción sin giro en el volante a 133 km/h. . . . .	160
4.17. Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro izquierdo bajo conducción con vuelta a la derecha a 18.3 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido -10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado -36.5 grados (inferior). . . . .	161
4.18. Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro izquierdo bajo conducción con vuelta a la derecha a 18.3 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido 10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado 42 grados (inferior). . . . .	162
4.19. Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro izquierdo bajo conducción con vuelta a la derecha a 64.3 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido -10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado -35.2 grados (inferior). . . . .	163
4.20. Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro izquierdo bajo conducción con vuelta a la derecha a 64.3 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido 10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado 33.8 grados (inferior). . . . .	164
4.21. Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro izquierdo bajo conducción con vuelta a la derecha a 99.5 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido -10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado -36.5 grados (inferior). . . . .	165
4.22. Resultado de inferencia para los 4 canales de iluminación en faro izquierdo bajo conducción con vuelta a la derecha a 99.5 km/h de velocidad, con ángulo de volante reducido 10.8 grados (superior) y con ángulo de volante pronunciado 30 grados (inferior). . . . .	166
4.23. Imagen comparativa de los resultados de inferencia en un mismo ángulo a la izquierda reducido, a 99 Km/h y a 130 Km/h. . . . .	167
4.24. Resultado de inferencias para los motores horizontales, con un ángulo de volante en 0 grados y una velocidad de 30 Km/h. . . . .	168
4.25. Resultado de inferencias para los motores horizontales, con un ángulo de volante en 38.5 grados a la derecha y una velocidad de 30 Km/h. . . . .	169
4.26. Resultado de inferencias para los motores horizontales, con un ángulo de volante en -38.5 grados a la izquierda y una velocidad de 30 Km/h. . . . .	170
4.27. Resultado de inferencias para los motores horizontales, con un ángulo de volante en 0 grados y una velocidad de 90 Km/h. . . . .	171
4.28. Resultado de inferencias para los motores horizontales, con un ángulo de volante en 49.3 grados a la derecha y una velocidad de 90 Km/h. . . . .	172
4.29. Resultado de inferencias para los motores horizontales, con un ángulo de volante en -35.8 grados a la izquierda y una velocidad de 90 Km/h. . . . .	173
4.30. Resultado de inferencias para los motores horizontales, con un ángulo de volante en 0 grados y una velocidad de 130 Km/h. . . . .	174
4.31. Resultado de inferencias para los motores horizontales, con un ángulo de volante en 38.5 grados a la derecha y una velocidad de 130 Km/h. . . . .	175

4.32. Resultado de inferencias para los motores horizontales, con un ángulo de volante en -35.8 grados a la izquierda y una velocidad de 130 Km/h. . . . .	176
4.33. Resultado de inferencias para la posición de los motores verticales a una velocidad de 30 Km/h. . . . .	177
4.34. Resultado de inferencias para la posición de los motores verticales a una velocidad de 60 Km/h. . . . .	178
4.35. Resultado de inferencias para la posición de los motores verticales a una velocidad de 90 Km/h. . . . .	179
4.36. Resultado de inferencias para la posición de los motores verticales a una velocidad de 150 Km/h. . . . .	180
4.37. Disposición de bloques de Simulink para el sistema de simulación completo. . . . .	181
4.38. Salida de datos para el sistema de simulación en ejecución y en estado inicial (Posición de volante, Velocidad de vehículo, canales de iluminación en faro izquierdo, canales de iluminación en faro derecho, posición de motores horizontales, posición de motores verticales). . . . .	181
4.39. Salida de datos para el sistema de simulación en ejecución y en un rango cercano a 20 Km/h de velocidad, con un ángulo de giro en el volante de cero grados, con un ángulo de giro hacia la derecha de 84.45 grados (activando modo de iluminación curva) y un ángulo de giro a la izquierda de -90 grados (activando modo de iluminación curva).182	182
4.40. Salida de datos para el sistema de simulación en ejecución y en un rango cercano a 40 Km/h de velocidad, con un ángulo de giro en el volante de cero grados, con un ángulo de giro hacia la derecha de 52.32 grados (activando modo de iluminación curva) y un ángulo de giro a la izquierda de -36.82 grados (activando modo de iluminación curva). . . . .	183
4.41. Imagen de referencia sobre la implementación del sistema de simulación. . . . .	184
4.42. Diagrama de conexiones (pistas) entre los elementos, insertadas sobre la capa superior, para la fabricación de la tarjeta del circuito impreso de cada faro. . . . .	185
4.43. Diagrama de conexiones (pistas) entre los elementos, insertadas sobre la capa superior, para la fabricación de la tarjeta del circuito impreso de la generación de señales PWM para cada faro. . . . .	185
4.44. Diagrama esquemático de referencia para la ubicación de cada uno de los elementos para el ensamblaje de las tarjetas de circuito impreso de cada faro. . . . .	186
4.45. Diagrama esquemático de referencia para la ubicación de cada uno de los elementos para el ensamblaje de las tarjetas de circuito impreso de generación de señales PWM para cada faro. . . . .	186
4.46. Imagen renderizada en vista 3D del resultado de la fabricación de la tarjeta de circuito impreso de cada faro. . . . .	187
4.47. Imagen renderizada en vista 3D del resultado de la fabricación de la tarjeta de circuito impreso para la generación de señales PWM de cada faro. . . . .	187
4.48. Porcentaje de los 23 trabajos de investigación reportados y relacionados con sistemas AFS, que contemplan lógica difusa como estrategia de control. . . . .	188
4.49. Tabla comparativa de características y rangos de desempeño de los trabajos de investigación considerados y que utilizan una estrategia de control de lógica difusa. 189	189

## Apéndice A

# Artículos presentados

A continuación se anexan los dos artículos de investigación que fueron realizados durante el desarrollo de esta trabajo de tesis y los cuales fueron publicados en un congreso oficial.

# Plataforma Virtual e Interactiva para la Conducción de Vehículo Basado en Modelo 3D de Unreal Engine Mediante Transmisión de Datos TCP/IP

1<sup>st</sup> Erick Gómez López

2<sup>nd</sup> Roberto Carlos Ambrosio Lázaro

3<sup>th</sup> Ivan Cañedo Farfan

*Facultad de Ciencias de la Electrónica. Facultad de Ciencias de la Electrónica. Facultad de Ciencias de la Electrónica. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla Benemérita Universidad Autónoma de Puebla Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*  
Puebla, México

erick.gomezlo@alumno.buap.mx

roberto.ambrosio@correo.buap.mx

ivan.canedo@alumno.buap.mx

**Abstract**—En el siguiente trabajo se presenta el desarrollo de una plataforma virtual e interactiva para la conducción de un vehículo. Se establece una comunicación de datos entre LabVIEW y Unreal Engine 4, para la adquisición y envío de información al modelo virtual 3D de un vehículo dentro de un escenario similar a un circuito de conducción. Esta manera de transmitir los datos entre ambos software descarta el uso de archivos dll(Dynamic Link Library), en su lugar se utiliza hardware para lograr una transmisión mediante el protocolo de red TCP/IP, y una conexión serial. El hardware utilizado se basa en el dispositivo SoC(System on Chip) ESP32. El vehículo y el escenario son diseñados y visualizados a través del motor de videojuegos, mientras que el mando de velocidad y dirección del vehículo es gestionado desde el software de automatización y control.

**Index Terms**—Conducción de vehículo, virtual, Protocolo de red TCP/IP, ESP32, Unreal Engine 4, LabVIEW, Transmisión de datos.

## I. INTRODUCCIÓN

Un simulador de manejo es una herramienta que recrea, en un contexto artificial, la situación de conducción de un vehículo[1]; los simuladores de manejo son herramientas fundamentales para estudios regionales, nacionales e internacionales que buscan probar la eficiencia de programas de entrenamiento para conductores, aptitudes para manejar en pacientes con distintos trastornos, efectos en la capacidad de conducción de los individuos que se encuentran bajo los efectos de algún medicamento, impacto de señalamientos en el comportamiento del conductor, analizar estrategias con el fin de disminuir los accidentes, y validar ventajas y desventajas de nuevas tecnologías introducidas al vehículo [2][3]. En el campo de la investigación, los trabajos más comunes sobre simuladores de manejo son principalmente dirigidos hacia el software, varias universidades han realizado sus propias versiones basadas en motores gráficos como Unity, Unreal Engine, etc. En su desarrollo han dejado de lado el diseño de los estimuladores y la comunicación vía remota [4][5][6][7][8].

Por otro lado, un software con enormes capacidades de desarrollo en áreas de control, automatización e

instrumentación electrónica entre muchas otras, puede en ocasiones encontrarse muy limitado al realizar animaciones en 3D, puesto que no esta enfocado y especializado en estas tareas. Si se logra una colaboración entre este tipo de software y otro especializado en animaciones 3D, el universo de posibilidades se incrementa. De manera general, cuando pensamos en utilizar dos software distintos que trabajen en conjunto, lo primero en mente es utilizar algún complemento que permita conectar de manera sencilla a ambos. Para lograr la colaboración, la manera mas fundamental sería desarrollar una gestión de archivos dll(Dynamic Link Library) para vínculos dinámicos entre ambos software, lo cual implicaría entre otras cosas, la necesidad de conocimientos avanzados en este tipo de archivos, un amplio panorama de la arquitectura de los software con los que se desea trabajar y un mayor tiempo de desarrollo[9]. Por otro lado existe la posibilidad de adaptar herramientas de software y complementos disponibles para otras finalidades, aprovechando sus características y logrando que trabajen de la manera en que lo necesitamos, lo cual brinda una posibilidad mas rápida para resolver la necesidad, y representa un nivel de desarrollo de software menos exigente.

En este trabajo establecemos una comunicación de datos entre LabVIEW y Unreal Engine 4, logrando que ambos funcionen de manera colaborativa para conseguir conducir un vehículo dentro de un entorno virtual. Tanto la dirección de giro, como el avance frontal, son adquiridos desde LabVIEW, por medio de un mando de Xbox One compatible con windows, posteriormente son transmitidos a la red a través del protocolo TCP/IP. LabVIEW es una plataforma de programación gráfica desarrollada por National Instruments para el diseño de sistemas de pruebas y mediciones, el cual debido a su naturaleza gráfica hace que tareas como la vinculación y transferencia de datos con hardware externo a la PC sean mas sencillas[10].

La animación en 3D del vehículo como de su entorno son diseñados y renderizados desde Unreal Engine 4(UE4),

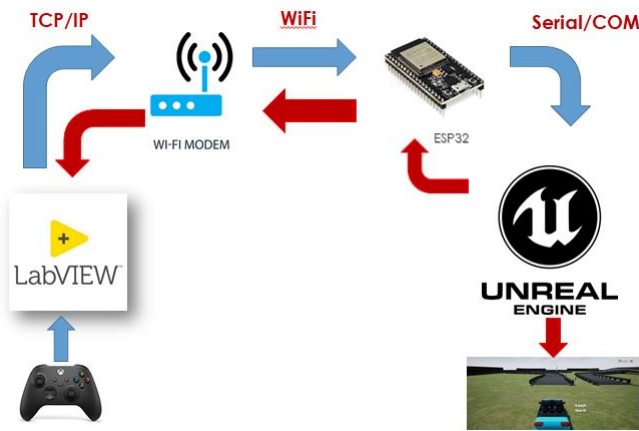


Fig. 1. Flujo de transmisión y recepción de datos a través del hardware para la comunicación entre los dos software.

un motor y editor de videojuegos gratuito desarrollado por la empresa Epic Games, utilizado para la producción de distintos tipos de videojuegos y aplicaciones, el cual tiene la posibilidad de desarrollar proyectos basados en C++, o como es el caso de este trabajo, proyectos basados en blueprints los cuales utilizan un ambiente de scripts visuales, en los que se programan funciones de una manera similar a la programación por bloques[11]. Parte de la comunicación de datos esta apoyada en el uso de UE4Duino un complemento para UE4, el cual permite establecer una conexión serial con un puerto COM. Cuando los datos son recibidos, UE4 se encarga de ejecutar las acciones necesarias para convertirlos en información y así renderizar la animación que obedece la nueva posición del vehículo.

Con el aumento de las necesidades de realizar actividades de manera remota, una transmisión de datos a través de la red utilizando un protocolo TCP/IP se vuelve bastante conveniente. Este tipo de transmisiones de datos se vuelven cada vez mas sencillas de implementar gracias a los avances que han sucedido en dispositivos pensados para proyectos de IoT, como lo es el desarrollo del ESP32, un SoC que involucra un procesador de doble núcleo, altas prestaciones en sus interfaces periféricas, tecnologías de comunicación WiFi y Bluetooth de modo dual, bajo consumo de energía y un bajo costo[12]. Dentro del trabajo que aquí se presenta, el ESP32 tiene la función de recibir mediante su conexión WiFi los datos provenientes de labVIEW que fueron enviados a través de la red, posteriormente los transmite hacia UE4 por medio de una comunicación serial en un puerto COM a través de un cable USB. El flujo de la transmisión y recepción de datos entre los diferentes elementos del sistema puede visualizarse en la figura 1.

## II. DESARROLLO

### A. Adquisición de datos del mando

La adquisición de datos se realiza con base en los estados que se muestra en la figura 2, para comenzar se conecta el mando de Xbox One a la PC, posteriormente dentro de un proyecto se inserta un ciclo while que permita una ejecución continua, fuera de este ciclo iniciamos el reconocimiento del mando insertando la función *Open* que pertenece al grupo de herramientas *Maker Hub interface for Xbox One controller* y permitimos que permanezca en Auto Detect, dentro del ciclo while se anida un *eventstructur* para reconocer cuando sucede un evento en en mando de Xbox, dentro de esta estructura se agrega la función *Read* y por ultimo, fuera del ciclo infinito se cierra la conexión con el mando insertando la función *Close*, esta disposición de los bloques de funciones se muestra en la figura 3.

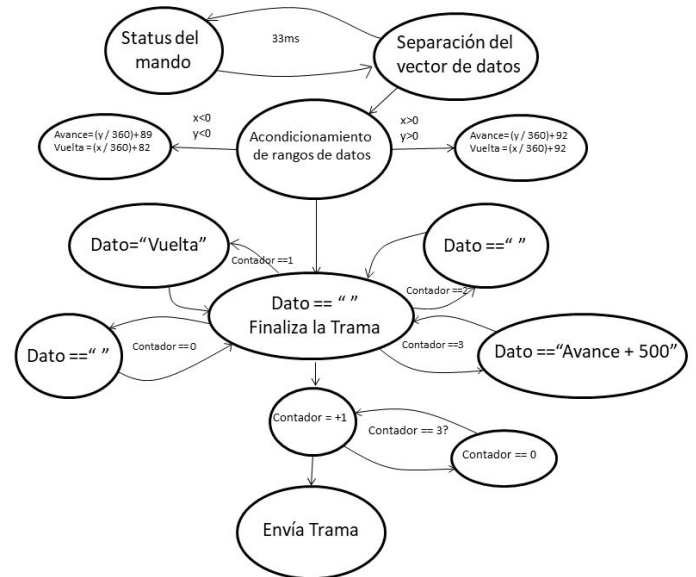


Fig. 2. Diagrama de estados para la adquisición, acondicionamiento y envío de datos.

Las palancas del mando tienen una resolución de 16 bits para cada eje, por lo que los datos de lectura en labVIEW, pueden tomar valores desde -32768 hasta 32768 en cada uno de los ejes y son entregados por medio de un vector de datos que incluye todos los valores de posición, de las palancas de mando, gatillos y D-pad. Se deben separar los datos del vector y deben ser convertidos en información útil. Así que tal y como se observa en la figura 3, al vector de datos se le aplica un primer bloque de función *Unbundle*, lo que separa los datos de la palanca de mando izquierda, un segundo *Unbundle* entrega los datos separados del eje  $x$  y el eje  $y$ , los cuales brindaran el giro y la aceleración respectivamente. Para obtener la información que será enviada, convertimos los datos del rango de 16 bits a un rango simple de 1 a 180, esto lo logramos con la ayuda de un bloque de función *Case structure*, el cual separa los numero negativos de los

numero positivos, los cuales dividimos entre 360, sumamos la cantidad de 89 para los datos negativos y 92 para los datos positivos, de esta manera y repitiéndolo para cada eje, obtenemos los valores que se envían. Cada eje obtendrá un rango de valores diferentes en labVIEW y serán utilizados para ser transmitidos hacia UE4(figura 4).

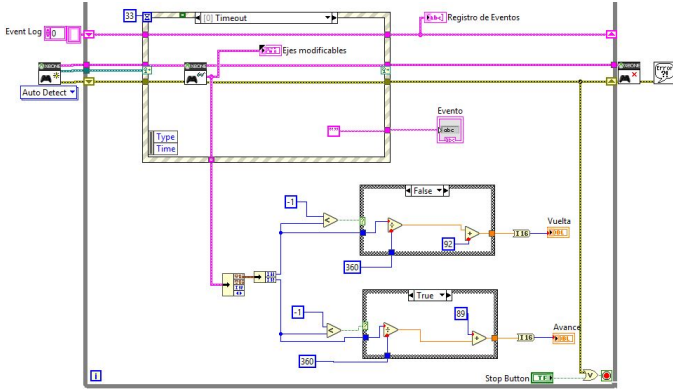


Fig. 3. Disposición de bloques de función para el inicio y fin de la conexión con el mando de Xbox one.

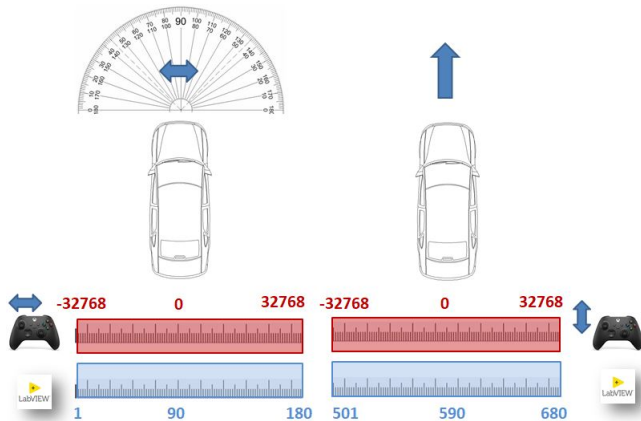


Fig. 4. El eje x de la palanca de mando izquierda brindara la dirección del vehículo, el eje y la aceleración, los datos del mando son convertidos a un rango útil y diferente cada uno, para ser transmitidos.

### B. Transmisión de datos en red mediante protocolo TCP/IP

Para transmitir los datos se utiliza el protocolo TCP/IP, para lo cual desde el proyecto en labVIEW se inicia configurando fuera del ciclo while, un bloque de función *TCP Open connection*, en el cual se coloca la dirección IP (192.168.0.13) asignada por el módem de conexión al dispositivo ESP32, un numero de puerto de servicio (8888) que coincide con el que se elige de manera deliberada en el programa que se carga en el dispositivo ESP32, además un valor de 60000 ms para el timeout. Posterior a esto, se coloca un bloque de función *TCP Write* dentro del ciclo while del proyecto, y se cierra la conexión colocando fuera del ciclo el bloque de función *TCP Close connection*, en la figura 5 se

puede observar esta configuración utilizada.

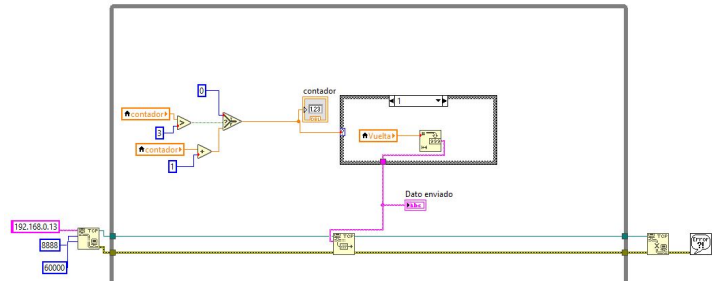


Fig. 5. Disposición de bloques de función para el inicio y fin de la transmisión de datos por protocolo TCP/IP.

La transmisión de datos se realiza cuando Labview da por finalizada una trama, para poder finalizar la trama de información que sera transmitida, es necesario enviar un carácter de espacio vacío. Para poder realizar esta tarea se implemento un contador ascendente que va de 0 a 3, a su vez el valor de este contador es conectado a una estructura de control *case structure* de 4 con cuatro casos posibles, de manera que cada ciclo de programa el contador ira variando los casos a ejecutar de una manera secuencial, en los casos 0 y 2, el dato que se envía será un carácter de espacio vacío que indicara la finalización de la trama, el caso 1 el dato que se enviara será el valor de la variable local *Vuelta*, en el caso 3 el dato que se envía será el valor de la variable local *Avance* sumando la cantidad de 500, logrando un rango distinto que pueda servir a identificar que datos pertenecen a cada eje. Todo lo anterior se puede apreciar en el diagrama de estados que se muestra en la figura2, la codificación de dicho diagrama corresponde a la disposición de los bloques en la parte superior de la figura 5.

### C. Programación de ESP32

Para programar el dispositivo desde el IDE de arduino, es necesario, instalar la biblioteca WiFi.h y el gestor de tarjetas ESP32, una vez realizando lo anterior, procedemos a codificar el algoritmo que se describe en el diagrama de flujo de la figura 6. En la codificación del programa se comienza incluyendo la biblioteca WiFi.h con la que se trabaja, definimos las variables que usaran como también las constantes para el SSID y el Password del módem al que se conectará, de igual manera definimos un puerto de servicio de manera arbitraria que en este caso será 8888, dentro del void setup se configura la conexión serial a 9600 baudios y se inicializa la conexión WiFi. Una vez que el ESP32 se conecta al módem, se le asigna una dirección IP al dispositivo, la cual es necesaria para vincular con LabVIEW, para poder visualizar esta dirección es necesario imprimirla en el monitor serial. Posterior a la configuración inicial el void loop que se estará ejecutando continuamente realiza la tarea de búsqueda del cliente con el que se conectara, una vez

conectado consultara si existe un dato disponible a la entrada, los datos que se reciben se almacenan en una variable, en seguida el valor contenido en esa variable es transmitido por la conexión serial, se detiene la conexión con el cliente y el proceso se vuelve a repetir.

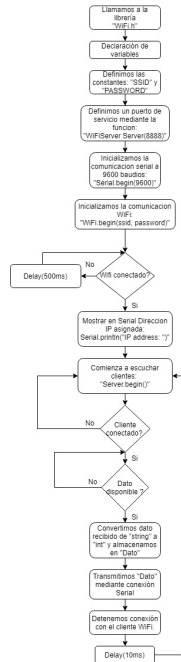


Fig. 6. Disposición de bloques de función para el inicio y fin de la transmisión de datos por protocolo TCP/IP.

#### D. Comunicación Serial desde UE4

Para realizar la comunicación serial se trabaja con el complemento de distribución libre llamado UE4Duino, el cual permite establecer comunicaciones seriales a través de los puertos COM. Para la instalación de este complemento, se crea una carpeta en el directorio del proyecto la cual albergue los archivos del complemento y se edita el archivo necesario.



Fig. 7. Diseño del Widget Blueprint que permite al usuario seleccionar el puerto COM.

Una vez instalado el complemento, se crea un *Widget Blueprint* (figura 7) que permita seleccionar el puerto COM por el cual se establecerá la comunicación de los datos, este widget se trata de una ventana flotada sobre el escenario que permite una interfaz con el usuario desde la cual se puede realizar una selección desde un combo box desplegable.

La programación de este blueprint se muestra en la figura 8, al existir un evento *On selection*, inicia una rutina para inicializar el puerto COM del numero seleccionado, por otro lado si existe un evento *On Clicked* sobre el boton con la X, la comunicación con el puerto COM debe finalizar y se cierra el juego.

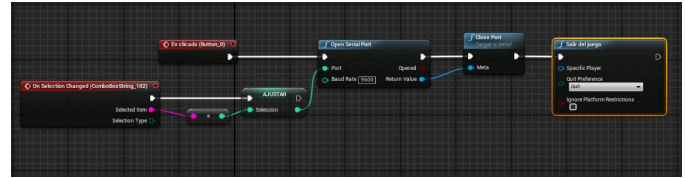


Fig. 8. Programación del Widget Blueprint que permite al usuario seleccionar el puerto COM.

Es necesario programar adecuadamente las tareas que se ejecutaran una vez que se inicia el juego y en que momento se ejecutaran dichas tareas, para esto es importante editar adecuadamente el *Blueprint del nivel* desde el cual se comienza por inicializar todas las variables en un valor de 0, posterior a esto se establece que el widget desde el cual se selecciona el numero de puerto COM se añada al primer plano de la ventana gráfica, además de especificar también que aparezca el cursor del mouse. Lo siguiente es extraer el dato entero seleccionado en el widget para poder inicializar la conexión con el puerto COM adecuado, este dato entero se almacena en una variable llamada *numero puerto*. Ajustado el valor de la variable, se procede a inicializar la conexión con el puerto serial, hacia el cual una vez iniciada la comunicación se envía el valor contenido en la variable salida, después de un breve retardo de 20 ms, se procede a leer los valores que estén siendo recibidos para comenzar a trabajar con ellos. La programación de este Blueprint se muestra en la figura 9.

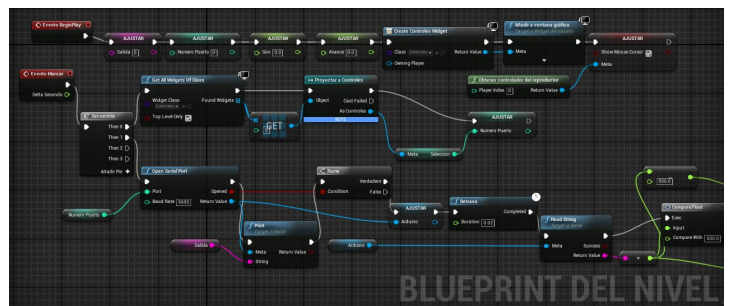


Fig. 9. Programación del Blueprint del nivel.

Una vez que es posible recibir los datos, estos deben ajustarse a la manera en que se trabajara con ellos, lo primero es convertir la cadena en valores de tipo flotante, después de que estos son convertidos se tendrá entonces valores que pertenecerán a dos diferentes rangos, el primero entre 1 y 180 , el segundo entre 501 y 680, entonces se realiza una comparación del valor para distinguir el eje de la palanca de

mando del cual proviene, en el caso del segundo rango, una vez distinguido es posible restar las 500 unidades que se le agregaron para su distinción, hecho esto, se almacenan los datos en sus variables correspondientes y se repite el ciclo. Esto se realiza de la manera que se muestra en la figura 10.

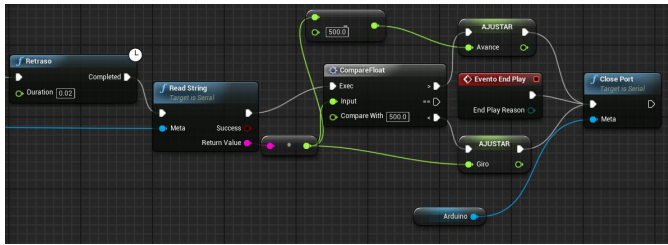


Fig. 10. Distinción de los datos de rangos distintos y su almacenamiento en las variables correspondientes a cada uno.

Los valores de las variables que ya almacenan los datos provenientes desde LabVIEW son utilizadas para dar la dirección al vehículo (figura 11) y la aceleración (figura 12), estas funciones para la entrada del volante y el avance son editadas desde el blueprint del vehículo sedan del proyecto.

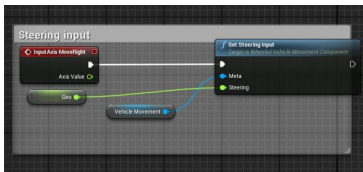


Fig. 11. Entrada para la dirección del volante desde la variable Giro.

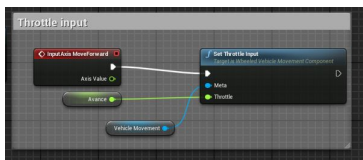


Fig. 12. Entrada para la aceleración del vehículo desde la variable Avance.

### E. Diseño de escenario de conducción

El escenario de conducción es estructurado a partir del uso de dos mallas prediseñadas, diferentes texturas y un algoritmo de creación de Spline. Las mallas prediseñadas son las formas básicas para la construcción de una carretera dentro de UE4, tanto la cinta asfáltica como las barras de contención presentan texturas repetitivas que pueden ser replicadas múltiples veces. Con la ayuda de un algoritmo para la creación de un Spline es posible insertar de manera más fácil estructuras repetitivas como puentes, tuberías y en nuestro caso una carretera, facilitando en gran medida el diseño de nuestro entorno de conducción. Las texturas precargadas por el mismo UE4, nos ayudan a dar un entorno más realista, en este trabajo se agregaron texturas de césped en el suelo y

piedra en las paredes que rodean el escenario (figura 13).



Fig. 13. Perspectiva de edición en el diseño para el escenario de conducción.

## III. RESULTADOS

Se realizó la adquisición de los datos del mando de Xbox one desde el software de LabVIEW, se acondicionaron los valores de la resolución de 16 bits en rangos de 1 a 180 para el eje X, de 501 a 680 para el Y, ambos ejes pertenecientes a la palanca de mando izquierda. La estrategia de utilizar diferentes rangos de números para distinguir entre diferentes ejes de una misma palanca de mando fue adecuada para el envío de la información hacia el software Unreal Engine 4, en la figura 14 es posible observar los datos obtenidos desde el palanca de mando.



Fig. 14. Resultado obtenido al colocar la palanca de mando izquierda situada al extremo derecho en el eje X y en el medio de la altura en el eje Y.

La comunicación de datos a través de protocolo TCP/IP presenta un buen desempeño en la transmisión de información entre ambos software, no se presentó un retardo importante entre un movimiento en el mando y la respuesta de la animación en el motor de videojuegos. Además de lograr establecer la comunicación sin el uso de archivos dll, fue posible conducir el vehículo virtual de manera satisfactoria (figuras 15, 16).

## CONCLUSIONES

Un trabajo colaborativo entre LabVIEW y Unreal Engine 4, sin el uso de archivos dll y sin complementos específicos para la simulación virtual de la conducción de un vehículo, es completamente posible de realizar, funciona de manera adecuada y es estable, lo cual incrementa en gran medida el universo de posibilidades en animaciones 3D que pueden realizarse en desarrollos de control, automatización entre otros. Parte de los



Fig. 15. Conducción de vehículo virtual a través del escenario diseñado.



Fig. 16. Conducción de vehículo virtual sobre puente elevado dentro del escenario de conducción.

beneficios en este desarrollo son que el complemento utilizado en este trabajo y el IDE de arduino, son de distribución libre, además de que el hardware utilizado es de bajo costo, y tener la posibilidad de realizar un transmisión de datos que permita un mando a distancia con una implementación rápida lo pueden volver una posibilidad relevante.

## REFERENCES

- [1] H. Arioui and L. Nehaoua, Driving simulation. London: CPI Group, 2013
- [2] F. H. Administration, "Roadway Human Factors and Behavioral Safety in Europe," 2015. [Online]. Available: <http://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf>.
- [3] D. L. Fisher, M. Rizzo, J. K. Caird, and J. D. Lee, Handbook of driving simulation for engineering, medicine, and psychology. CRC Press, 2011.
- [4] Q. Yao, "A Compact Driving Simulator to Support Research and Training Needs - Hardware , Software , and Assessment," Clemson University, 2015.
- [5] E. S. Batalla Goinzález, "Desarrollo de un Simulador 3d de Manejo Para la Capacitación de Conductores Del Sistema de Transporte Colectivo Metropolitano," Instituto Politécnico Nacional, 2012.
- [6] A. Dosovitskiy, G. Ros, F. Codevilla, A. Lopez, and V. Koltun, "CARLA: An Open Urban Driving Simulator," no. CoRL, pp. 1–16, 2017
- [7] O. A. Perez Reyes, "Desarrollo de un Simulador de Tractocaminos Utilizando un Ambiente Inmersivo 3D," Instituto Politecnico Nacional, 2012.
- [8] K. Guldbrand and R. B. Gustafson, "Developing a low-cost driving simulator and the physical components effect on validity," Aalborg University, 2011.
- [9] J. A. Hernandez, "Desarrollo de aplicaciones dinámicas dll, en lenguaje visual C++," Proyecto de fin de ingeniería, Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Chis, México, 2014.
- [10] R. Bitter, T. Mohiuddin, M. Nawrocki, LabVIEW advanced programming techniques, 2nd ed., vol. 1., Boca Raton, Florida: CRC Press, 2007.
- [11] A. Cookson, R. DowlingSoka, C. Crumpler, Unreal Engine 4 game development in 24 hours, United States of America: Pearson Education, Inc. 2016.

- [12] N. Cameron, Electronics Projects with the ESP8266 and ESP32, Building web pages, Applications and WiFi Enabled Devices, Edinburgh, UK: Apress Media LLC, 2021.

# Modelo y simulación de un sistema de luces frontales adaptivas AFS virtual

Juan Carlos Lanzagorta Rojo  
Facultad de Ciencias de la  
Electrónica  
Benemérita Universidad  
Autónoma de Puebla (BUAP)  
Puebla, México  
juancarloslanzagortarojo@gmail.com

José Emanuel López González  
Facultad de Ciencias de la  
Electrónica  
Benemérita Universidad  
Autónoma de Puebla (BUAP)  
Puebla, México.  
jose.lopezgonza@alumno.buap.mx

Alberto Torres Victorino  
Facultad de Ciencias de la  
Electrónica  
Benemérita Universidad  
Autónoma de Puebla (BUAP)  
Puebla, México.  
atvictorino@hotmail.com

Erick Gómez López  
Facultad de Ciencias de la  
Electrónica  
Benemérita Universidad Autónoma  
de Puebla (BUAP)  
Puebla, México.  
erick.gomezlo@alumno.buap.mx

Filiberto García Candia  
Facultad de Ingeniería  
Benemérita Universidad  
Autónoma de Puebla (BUAP)  
Puebla, México.  
filiberto.candia@correo.buap.mx

Roberto Carlos Ambrosio Lázaro  
Facultad de Ciencias de la  
Electrónica  
Benemérita Universidad  
Autónoma de Puebla (BUAP)  
Puebla, México.  
roberto.ambrosio@correo.buap.mx

**Resumen**— Las luces frontales de un automóvil juegan un papel crucial en la visibilidad del conductor y por lo tanto en su seguridad, el sistema de iluminación delantera de faros frontales adaptativos AFS (Adaptive Front lighting System), optimiza la distribución de la luz de los faros según las circunstancias de conducción. Dependiendo de la velocidad del vehículo y la entrada de la dirección, el sistema apunta las luces de cruce en la dirección en la que el conductor tiene la intención de viajar. En este trabajo se presenta el modelado para el control de un AFS virtual en carreteras con trayectorias curvas. Dentro del proceso de modelo virtual del sistema de iluminación se emulan las variables que una unidad de control electrónica (ECU) toma en cuenta para estos sistemas como son: el radio de curvatura, la distancia de paro, el ángulo de rotación de los faros a través de la velocidad, la dinámica de las ruedas utilizando el modelo de la bicicleta y la amplitud del haz luminoso, la simulación se llevó a cabo en software de programación gráfica y de laboratorio virtual LabVIEW. El modelo y la simulación virtual pueden encontrar aplicaciones didácticas para el área de ingeniería, así como la implementación de este control para sistemas AFS.

**Keywords**— *virtual, AFS, Luces frontales adaptivas, diagrama de bloques, radio de curvatura, iluminación automotriz*

## I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de iluminación automotriz son uno de los principales componentes en términos de seguridad activa con los que se cuenta al manejar un vehículo, además de hacer posible al conductor ver claramente el camino cuando hay condiciones climatológicas adversas o de baja iluminación, permiten, a su vez, que los peatones u otros conductores se enteren de la presencia, dirección, velocidad y dimensiones del vehículo en cuestión. Los sistemas de iluminación en la actualidad no se encuentran conformados únicamente por un

par de luces de cruce y carretera, luces traseras de freno, reversa o direccionales, sino que introducen además tecnologías que tienen la función de apuntar el haz de luz inteligentemente hacia dónde va el camino como son el AFS. Este sistema puede realizar sus tareas debido a que cuentan con diversos sensores que permiten determinar hacia dónde sería óptimo apuntar tanto en dirección como en ángulo el haz de luz y obtener la máxima iluminación sobre el camino [1].

Por ejemplo, en 2003 los vehículos como el Opel Signum incorporaron la luz dinámica de curva como se muestra en la Figura 1 y la luz estática de giro de 90 grados - para intersecciones y giros cerrados con faros xenón. Otra funcionalidad de confort adicional del ALS era la luz de autopista: a velocidades próximas a los 120 km/h practicando una conducción en línea constante, la altura de las luces cortas se ajustaba automáticamente y se elevaba ligeramente para mejorar la visión a larga distancia [2].

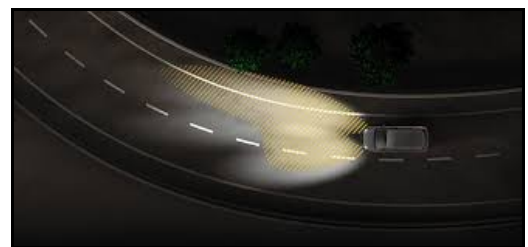


Fig. 1. Iluminación AFS vs Iluminación tradicional.

El sistema AFS necesita ser controlado mediante sistemas electrónicos los cuales cuentan con algoritmos de control que permiten un funcionamiento con un alto grado de autonomía y

muy poca intervención humana, asistiendo de la mejor manera al conductor, reduciendo el factor de distracción y aumentando la capacidad de visibilidad del entorno.

En la actualidad se sigue realizando trabajos de investigación para la tecnología AFS. Por ejemplo, se ha reportado un algoritmo de control para AFS basado en lógica difusa que contempla únicamente los parámetros de entrada de la velocidad del vehículo y el ángulo de la curva en el camino para tomar la acción de salida, que determino la velocidad y la intensidad total de los LED e iluminar la curva en el camino y poder así curvar el haz [3]. Otros esquemas de control, tales como el diseño de un algoritmo de control enfocado en optimización, mediante una red neuronal difusa y un filtro kalman, utilizando un doble lazo de retroalimentación y así controlar la posición de los faros halógenos y la velocidad de los actuadores en el AFS fue reportado en [4]. Otros trabajos han reportaron estudios matemáticos para determinar las ecuaciones que describen la dinámica que gobierna un automóvil al momento de girar en una curva donde se reportó la relación entre las características de giro en el vehículo y la dinámica del ángulo y la distribución de la luz en los faros [5]. El enfoque AFS ha suscitado un interés comercial en la iluminación curva. La mayoría de los trabajos reportados implican implementaciones solo de desplazamientos horizontales o verticales del patrón de haz de luz. Específicamente, la iluminación de la curva (también llamada luz de flexión o giro) implica controlar el objetivo horizontal del patrón del haz (o una parte de él) dependiendo de variables tales como el radio de la curva y la velocidad del vehículo; sin embargo para el desarrollo de plataformas de simulación de conducción del vehículo pocos trabajos se han reportado usando ambientes virtuales con AFS. En el presente trabajo se presenta el modelado y simulación para un sistema AFS virtual mediante el entorno de LabVIEW donde se considera la curvatura del camino, la distancia de frenado del vehículo, la dinámica vehicular entre otras variables.

## II. DESARROLLO

### A. Metodo aplicado

Se partió realizando una investigación del principio de funcionamiento del Sistema de iluminación frontal adaptativa. Esta tecnología fue patentada en 2003 por la empresa Hella, por tanto los parámetros de control dinámico para estos dispositivos se encuentran bajo patente. Sin embargo, se pueden desarrollar el análisis de los algoritmos que controlan el desplazamiento de la dirección del faro en un automóvil gracias a las señales de entrada y salidas de los controladores para los motores a pasos o los servomotores.

Cuando un vehículo está desplazándose sobre una carretera y se acerca hacia una curva, podemos llamar posición A, a este punto, como se muestra en la Figura 2. En este momento el sistema AFS empezará a tomar información generada por los sensores en el automóvil y generará los parámetros que se listan en la tabla 1.

TABLA I. PARÁMETROS INICIALES EN EL CONTROL AFS

Elemento	Parámetro de salida
1	Imágenes del sensor fotográfico
2	Velocidad del automóvil
3	Longitud del vehículo
4	Peso del vehículo
5	Radio de la curva
6	Ángulo de las ruedas

Toda esta información de control se envía a una unidad de control electrónico (ECU) que procesa los datos, y genera una señal enviada a la tarjeta controladora en un determinado periodo de tiempo (llamado intervalo D), para que cuando el vehículo entre a la curva (Llamado punto B) (Véase Fig. 2) el ajuste de los faros AFS esté completo, y se adapte a las condiciones del camino proporcionando una mayor visibilidad que una iluminación convencional, eliminando puntos muertos en el camino.

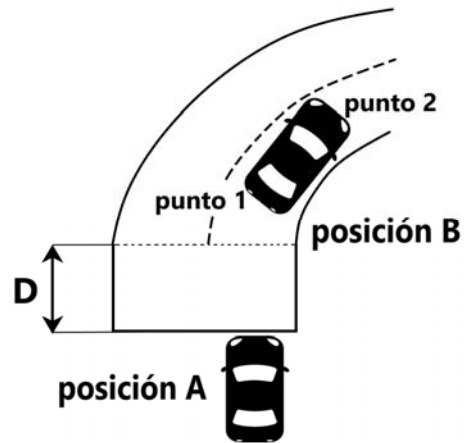


Fig. 2. Diagrama esquemático del manejo durante una curva

Para este trabajo se tomarán en cuenta las variables físicas entregadas a la ECU que a su vez generará una señal PWM para el control de los motores en las lámparas del vehículo. De esta manera el modelo virtual para el AFS está basado en una simulación; las variables físicas de los diferentes sensores también son emuladas en el entorno de programación grafica de LabVIEW, y se describen en las siguientes secciones.

### B. Implementación de la variable de velocidad

Para la simulación de la variable de velocidad y tomando en consideración un entorno de simulación virtual se usó la configuración de los parámetros en NI MAX, un complemento de LabVIEW que permite trabajar con tarjetas de adquisición virtuales. Para la implementación de la señal de velocidad se configuró una variación senoidal con una amplitud de 10 V, y un ruido característico de la adquisición de señales analógicas, como se muestra en la Figura 3.

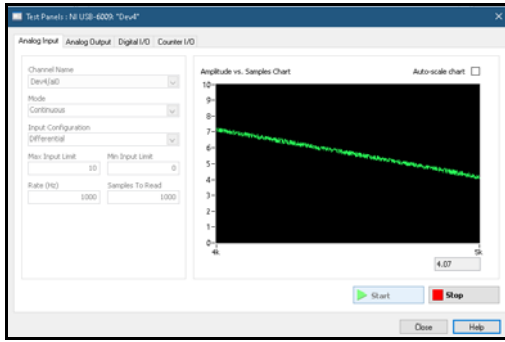


Fig. 3. Parámetros de simulación para una señal analógica establecida en el pin AI0 de una tarjeta USB-6009.

La señal de voltaje en este caso emula a la variable de velocidad con el propósito de emular los cambios de velocidad en el sistema AFS. En el diagrama de bloques del programa (VI) en LabVIEW se agregó un bloque de asistente virtual de adquisición de datos "DAQ Assistant". A la salida del bloque de simulación se agregó una función de PID para obtener una señal procesada y se aplicó una ganancia de 10 para generar un rango de velocidad de entre 0-100 km/h, como se muestra en la Figura 4.

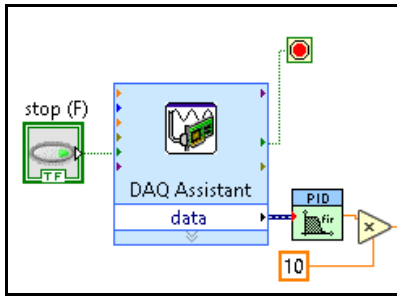


Fig. 4. Diagrama a bloques de la señal simulada de la velocidad del automóvil (Km/h).

### C. Simulación de los parámetros de la curva del camino.

Como siguiente paso se requiere la sustitución de los parámetros del camino generados por el sensor de imagen. Este sensor entrega características intrínsecas de la posición del vehículo con respecto a la curva y es necesaria la relación de las ecuaciones dinámicas del automóvil para generar los parámetros del control AFS. En este punto se implementó un indicador numérico. Una Gráfica que cambia en función del tiempo (Waveform Chart) y un indicador de tipo perilla (knob) personalizado como se muestra en la Figura 5.



Fig. 5. Indicador personalizado tipo Knob.

### D. Distancia visual de frenado

En el proceso de manejo, al encontrar obstáculos en el camino, será necesaria una distancia mínima para darle la oportunidad al conductor de tomar acciones y así evitar accidentes. La distancia total denominada distancia visual de frenado (Stopping sight Distance) toma en cuenta la distancia de reacción, la distancia de frenado, y la distancia segura de conducción, el esquema se muestra en la Figura 6.



Fig. 6. Distancia visual de frenado (Stopping Sight Distance).

El código de diseño de ruta de autopista JTG D20-2017 [6] y la norma técnica de ingeniería de carreteras JTG B01-2014 [7-8] establece a partir de tablas y gráficas la relación existente entre la distancia ideal de frenado en función de la velocidad del automóvil y del radio mínimo ideal en las curvas.

TABLA II. RELACIONES CORRESPONDIENTES ENTRE LA VELOCIDAD, LA DISTANCIA SEGURA DE FRENADO Y EL RADIO MÍNIMO EN CURVAS

Velocity: v(km/h)	120	100	80	60	40	30
Stopping sight distance: S(m)	210	160	110	75	40	30
Minimum radius of general circular curve "General value": Ro(m)	1000	700	400	200	100	65

La tabla II muestra que cuando la velocidad sea muy grande, el radio de la curva debe ser muy grande (Mayor a 500 metros), y la distancia segura de frenado debe incrementarse para reducir accidentes y mantener una velocidad constante.

De acuerdo con las características proporcionadas las normas mencionadas anteriormente, y a lo reportado por G. Guo et al en [9], donde se propuso el método de mínimos cuadrados para el ajuste cuadrático, se puede obtener relaciones aproximadas entre estos datos conocidos en MATLAB usando la ecuación (1)

$$S=0.0094v^2+0.5882v+3.8060 \quad (1)$$

$$Ro=0.08v^2-2.0304v+45.9701 \quad (2)$$

Donde S es la distancia de paro, v es velocidad actual y Ro radio mínimo "valor general" de circular. Estas igualdades permiten una relación entre la velocidad y los parámetros de seguridad por medio de ecuaciones de segundo orden.

Con el parámetro de la velocidad conocida implementado a través de un bloque de entrada de control en LabVIEW, se

procedió a la implementación de los bloques de control dinámico correspondientes a las ecuaciones 1 y 2, como se muestra en las figuras 7 y 8, posteriormente se agrupan en subprogramas (sub-VI), como se muestra en la figura 9.

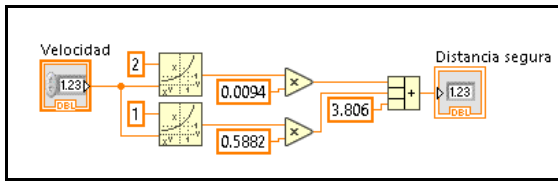


Fig. 7. Diagrama a bloques para la distancia de frenado segura.

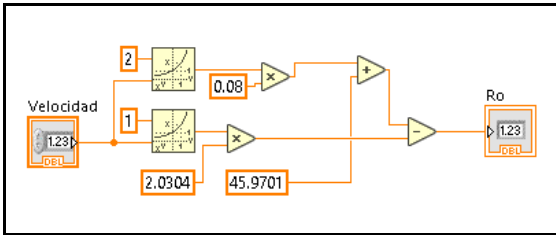


Fig. 8. Diagrama a bloques para el radio mínimo en las curvas.

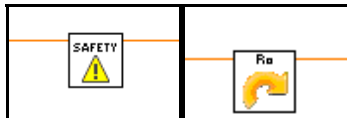


Fig. 9. Iconos de los subVI's: la distancia de frenado segura, e Icono del subVI del radio mínimo en las curvas.

Estos SubVI son parámetros importantes en la simulación que permiten controlar en ángulo indicado a la ECU para modificar la posición de las lámparas automotrices.

### E. Parámetro de la orientación de los neumáticos con respecto al camino.

Este parámetro es un modelo conocido en la dinámica vehicular, para hacer un análisis de una manera simple se determinó usar el modelo de bicicleta [10], como se muestra en la figura 12.

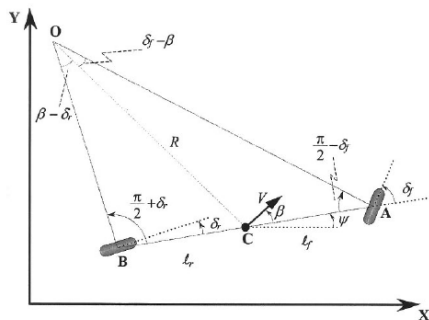


Fig. 10. Modelo de bicicleta del movimiento lateral del vehículo.

Este modelo establece un solo ángulo de desplazamiento de las ruedas el cual, para fines de simplificación, se determinará como el mismo ángulo del volante del automóvil y está dado por la siguiente igualdad.

$$\delta \cong L/R \quad (3)$$

Donde  $\delta$  es el ángulo de las ruedas con respecto al eje longitudinal del vehículo,  $L$  es la longitud del automóvil (4.7m a 5 m dependiendo del vehículo),  $R$  es el radio del vehículo (Obtenido a partir de las ecuaciones que relacionan el radio de la curva con la velocidad y las distancias de seguridad). Por tanto, este parámetro se incluyó en el VI de LabVIEW con un acomodo de bloques conectado a un indicador personalizado de tipo perilla (Knob) como se muestra en las figuras 11 y 12 respectivamente, tomando en cuenta la conversión necesaria del valor obtenido de Radianes a Grados sexagesimales.

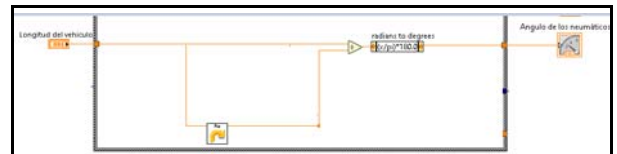


Fig. 11. Disposición de los bloques para la implementación del parametro de orientación de los neumáticos

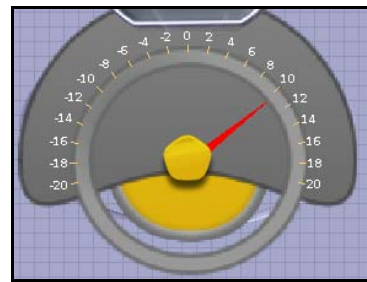


Fig. 12. Indicador personalizado de tipo Knob

### F. Parámetro de la amplitud del haz de iluminación

A lo largo del desplazamiento del automóvil la iluminación frontal adaptativa se caracteriza por el control electrónico del haz de luz el cual se ensancha o se extiende dependiendo de la velocidad del vehículo y de las características del camino, como se ilustra en la figura 13.



Fig. 13. Control automático del haz de Luz por AFS.

Este parámetro es controlado por la velocidad del automóvil, obviamente, el ángulo visual se estrecha bruscamente con el aumento de la velocidad. A este fenómeno se le conoce como efecto túnel [11]. De acuerdo con W. Wang, y colaboradores [12] el control del ángulo de irradiación horizontal  $\alpha_0$  se puede obtener mediante ecuación (4) de ajuste de velocidad

$$\alpha_0 = -0.0002v^3 + 0.0503v^2 - 4.4036v + 210.0376 \quad (4)$$

Este valor está dado en grados y se enviará a la ECU, la cual debe procesar la información y generar un control en la relación entre el ángulo de irradiación y la longitud del haz del faro automotriz respecto a la velocidad del automóvil.

En LabVIEW se implementó un SubVI con la igualdad de la ecuación dependiente de la velocidad del automóvil, el cual se muestra en la figura 14.

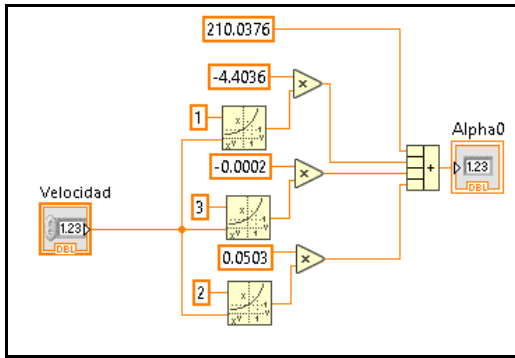


Fig. 14. Diagrama de bloques en LabVIEW para la obtención del ángulo de irradiación horizontal.

Se utiliza una gráfica de onda “WaveformChart” como indicador para observar el cambio del haz horizontal con respecto a la velocidad del automóvil. Se incluye un controlador booleano, como se muestra en la figura 15, para simular la proximidad de un vehículo, que normalmente sería alertada por un sensor tipo CCD [9], el haz se acorta y se ensancha 170.832 grados para eliminar el deslumbramiento al vehículo que se aproxima.



Fig. 15. Controlador booleano que simula proximidad

### G. Configuración para la implementación del sistema AFS.

El modelo emula en LabVIEW el comportamiento de los parámetros de la iluminación AFS de un vehículo desplazándose a velocidad variable a lo largo de una carretera con curvas consecutivas, esto generó un análisis en tiempo y proporciona la oportunidad de configurar la dirección de las curvas sobre las que se desplaza el automóvil por medio de un control de tipo selector, direccionando la iluminación y la trayectoria de las ruedas, el selector se muestra en la figura 16.

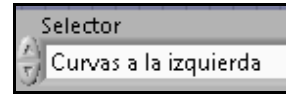


Fig. 16. Selector de la trayectoria del automóvil.

## III. RESULTADOS

La simulación en LabVIEW contempla todos los parámetros determinados en el desarrollo de este trabajo, simulando un camino con curvas consecutivas con diferentes radios y tomadas a diferente velocidad, de esta manera se obtienen los siguientes resultados.

### A. Ángulo deseado de los faros automotrices a través de las curvas (en grados)

El ángulo deseado en las curvas está determinado por una relación de los parámetros conocidos

$$\Theta = \arcsin(S/2R) \quad (5)$$

Donde S es la distancia de seguridad de frenado para que un vehículo pueda desplazarse a velocidad constante y R es el radio de las curvas (En la simulación de este proyecto dependiente de la velocidad del vehículo) como se muestra en la figura 17, en la figura 18 se muestra el diagrama de bloques para la ecuación 5 que incluye un control PID para el control de trayectoria.

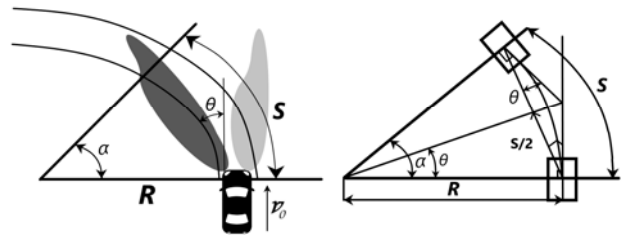


Fig. 17. Relación entre el ángulo de la iluminación deseada en función de los parámetros de la curva.

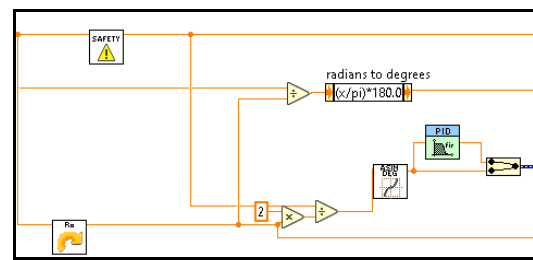


Fig. 18. Diagrama de bloques para la implementación del ángulo de control deseado de las lámparas en función de la curva.

El ángulo indicado que deben tomar los motores de los faros automotrices en la mayoría de las veces está controlado por una señal PWM, usando el modelo propuesto se muestran los resultados en la interfaz gráfica (panel frontal).

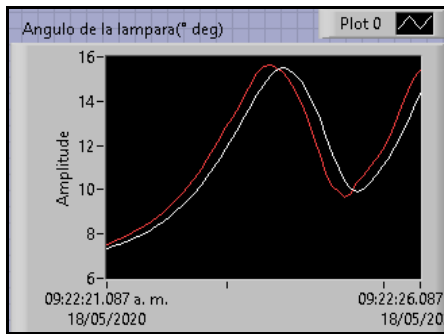


Fig. 19. Indicador de la forma de onda para el ángulo de la lámpara en función de la velocidad del automóvil con PID (Línea roja) y sin PID(Línea blanca)

En la figura 19 se observa que cuando la velocidad es muy alta (Cercana a los 100 Km por hora), el radio de la curva debe ser muy grande, y entonces el ángulo de los faros es aproximadamente de 7 grados. El punto ciego del camino se reduce y se puede conducir con seguridad. También se observa que con la reducción de la velocidad (Hasta aproximadamente 20 km por hora), se reduce el radio de la curva y el ángulo demandado por los faros automotrices aumenta hasta un pico máximo de 16 grados aumentando el punto ciego del camino.

Cuando la velocidad es muy pequeña (Cercana a 10 km/h que es la velocidad mínima aproximada a la cual se desplaza un vehículo) El radio de la curva demandada permite un desplazamiento seguro, el punto muerto de visibilidad es menor ante la mayor facilidad de reacción para el conductor, y el ángulo de la iluminación AFS se reduce una pequeña proporción. Sin embargo, en las tecnologías adaptativas actuales, en este punto el controlador de los faros activa una lámpara auxiliar establecida a un ángulo fijo cuando se le indica un cambio brusco de dirección en la trayectoria del automóvil

Cuando la velocidad del vehículo vuelve a aumentar, el ángulo de los faros vuelve hasta su punto máximo superior y después disminuye conforme la velocidad aumenta

Finalmente se implementa un control con un filtro PID que autoajusta las ganancias proporcional integradora y derivativa para generar una respuesta anticipada a los valores deseados del ángulo del faro automotriz AFS, y así poder calcular valores futuros en función de los valores actuales y pasados en un menor periodo de tiempo, aumentando la eficacia del control dinámico.

### B. Amplitud del haz de iluminación

Este parámetro controla el ángulo de iluminación del camino dependiente de la velocidad del automóvil. En la figura 20 se observa un estrechamiento en el ángulo del haz luminoso cuando la velocidad del automóvil es muy alta, y un ensanchamiento en este mismo parámetro cuando la velocidad de conducción es baja.

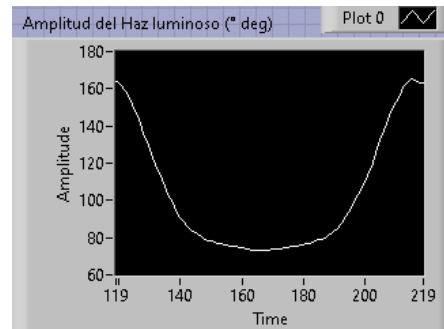


Fig. 20. Indicador de la forma de onda para la amplitud del haz de lámpara en función de la velocidad del automóvil.

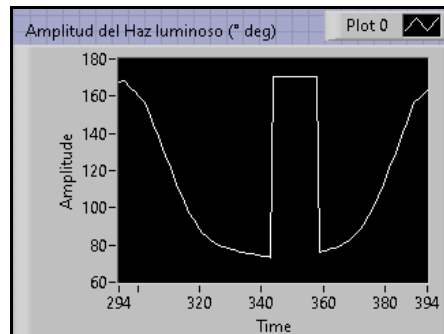


Fig. 21. Indicador de la forma de onda para la amplitud del haz de la lámpara cuando un vehículo se aproxima.

Cuando un vehículo se aproxima, un sensor tipo CCD (Simulado en LabVIEW como un controlador de tipo Booleano) manda una señal automática que se procesa y acorta el haz de la lámpara para evitar el deslumbramiento, como se observa en la figura 21. Cuando nuevamente el camino se encuentra despejado el ángulo del haz vuelve a su valor correspondiente.

El panel frontal para la interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW se muestra en la figura 22, se tienen indicadores y botones que permiten interactuar y observar el comportamiento del AFS ante posibles situaciones en el camino.

En la Fig. 23 se observa el diagrama de bloques completo de programación para el sistema AFS.

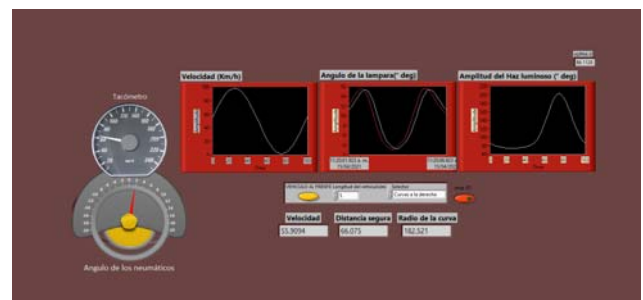


Fig. 22. Vista general del panel frontal desarrollado en LabVIEW

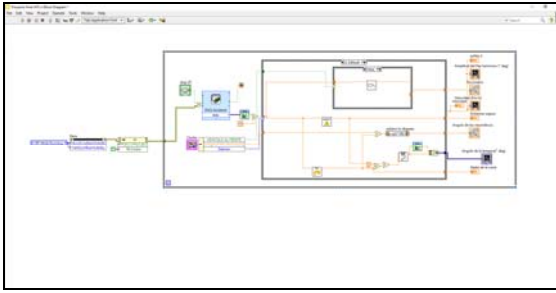


Fig. 23. Vista general del Diagrama de bloques desarrollado en LabVIEW

### CONCLUSIONES

Se realizó el modelo de un control de iluminación frontal adaptativa virtual que simula las condiciones del automóvil a través de ecuaciones desarrolladas en Matlab y se realizó la simulación estructurada completamente en el ambiente de LabVIEW de un vehículo desplazándose en un camino de curvas. Se emularon las variables de salida que se procesarán en unidades de control electrónico que adquieren señales y controlan el movimiento de los motores a pasos o los servomotores para modelos específicos del vehículo. Como trabajo futuro se puede incorporar este modelo a un sistema de adquisición de datos para tener un prototipo de control de iluminación AFS.

### REFERENCIAS

- [1] B. Wördenweber, J. Wallaschek, P. Boyce and D. Hoffman, *Automotive Lighting and Human Vision*, Germany: Springer, 2007.
- [2] Fernandez, Patentmotorwagen: cuando los coches iluminaban con velas, *abc.es*, Apr. 9, 2019. Accessed on: Mar. 20, 2021. [Online]. Available: <https://cutt.ly/evyUriv>
- [3] L. Lukacs., C. Fontes, M. Embirucu, and Pepe, I., "Implications and outcomes of controlling a LED AFS (Adaptive Front-Lighting System) using fuzzy logic for the South American Markets", *SAE Technical Paper 2009-36-0027*, 2009, Available://doi.org/10.4271/2009-36-0027P,
- [4] J. Liu, K. Cheng and J. Zeng, "A novel multi-sensors fusion framework based on Kalman Filter and neural network for AFS application", *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 37, no. 9, pp. 1049-1059, 2014.
- [5] L. Lifu, Y. Mingjun, "Dynamic bending Mathematical Model of vehicle adaptive front-lighting system based on rolling characteristics", *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 644-650, pp. 117-121, 2014,
- [6] "Automotive Adaptive Front-lighting System Reference Design" Jul., 2013. Accessed on: Mar. 20, 2021. [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ug/spruhp3/spruhp3.pdf>
- [7] "Design Specification for Highway Alignment" Sept. 28, 2017. Accessed on: Mar. 20, 2021. [Online]. Available: <https://www.codeofchina.com/standard/JTGD20-2017.html>
- [8] "Technical Standard of Highway Engineering" Sept. 30, 2014. Accessed on: Mar. 20, 2021. [Online]. Available: <https://www.codeofchina.com/standard/JTGB01-2014.html>
- [9] F. Guo, H. Xiao and S. Tang, "Research of modeling and simulation on adaptive front-lighting system for corner based on CCD," 2013 25th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Guiyang, China, 2013, pp. 3598-3602, doi: 10.1109/CCDC.2013.6561572
- [10] R. Rahamani, *Vehicle Dynamics and Control*, Springer.com, Apr., 2012.
- [11] "Efecto tunel en la conducción" Dic. 15, 2015. Accessed on: Mar. 20, 2021. [Online]. Available: <http://www.conduccionresponsable.com/e-efecto-tunel-en-la-conduccion/>
- [12] W. Wang, Q. Wu, Z. Lu and X. Chu, "Control model and simulation for Adaptive Frontlight System of vehicle on curve roads," 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, China, 2008, pp. 1-4, doi: 10.1109/VPPC.2008.46776