



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Diseño e Implementación de  
un Vehículo Terrestre no  
Tripulado con Sistema de  
Navegación Autónomo**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Mecatrónico**

**P R E S E N T A**

Jorge Isaac Cordero Enriquez

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Carlos Romo Fuentes



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



# Resumen

Esta investigación desarrolla un sistema de navegación para el control de un vehículo terrestre, culminando en la implementación física de una plataforma móvil de pruebas.

La navegación autónoma es una tarea de alta complejidad debido a que es necesario determinar la posición, dirección y distancia recorrida, con el propósito de moverse a un destino en un tiempo determinado.

Para cumplir con los requerimientos, un sistema de navegación fue desarrollado para tomar decisiones y maniobrar un vehículo terrestre holonómico, basado en retroalimentación proporcionada por una unidad de medición inercial, un sensor magnético y un sistema global de navegación por satélite.

Un algoritmo para localización absoluta fue desarrollado, cuyo margen de error bajo las condiciones probadas fue menor a 1.5 [m]. Dos controladores fueron desarrollados e implementados: para la dirección un controlador personalizado y para la velocidad un controlador proporcional.

Un módulo para manejar mapas virtuales fue programado, permitiendo al sistema leer y escribir trayectorias.

El sistema final demostró ser capaz de seguir una trayectoria definida por un número finito de coordenadas. Además, el vehículo desarrollado finalizó en primer lugar en las ediciones 2016 y 2017 de la Autonomous Vehicle Competition Mexico.

El sistema es escalable y puede contribuir al futuro desarrollo de vehículos autónomos terrestres.



# Agradecimientos

A mi Papá,

Mi primera inspiración para ser ingeniero, mi mejor amigo, mi ejemplo a seguir.  
Gracias por iluminar siempre mi camino.

A mi Mamá,

La más bella, la más fuerte y noble, la del espíritu inquebrantable.  
Gracias por tu amor incondicional.

A mi Hermana,

Quien día con día me enseña dedicación y esfuerzo, quien me ha guiado desde mi primer día.  
Gracias por permitirme crecer a tu lado.

Ustedes tres son el mejor regalo que la vida pudo darme, gracias infinitas por estar siempre conmigo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México,

Mi Alma Máter, mi segundo hogar.  
Gracias, máxima casa de estudios, por brindarme la oportunidad de perseguir mis sueños.

Al Dr., Carlos Romo,

Gracias por el apoyo, motivación y consejos.

A la Ingeniería,

Mi pasión.  
Gracias por cambiar mi manera de ver el universo, por permitirme transformar mi imaginación en realidad.



# Contenido

Lista de Acrónimos.....	xi
Lista de Símbolos.....	xi
Lista de Figuras .....	xv
1 Introducción.....	1
1.1 Movimiento es Vida.....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Estructura del Trabajo .....	2
2 Vehículos Autónomos.....	5
2.1 Introducción.....	5
2.2 Navegación.....	5
2.2.1 Percepción.....	6
2.2.2 Localización y Manejo de Mapas .....	10
2.2.3 Cognición y Planeación de Movimientos .....	11
2.2.4 Control de Movimientos.....	13
2.3 Dinámica de Vehículos.....	14
2.3.1 Consideraciones .....	14
2.3.2 Masa no Suspendida.....	16
2.3.3 Suspensión .....	19
2.3.4 Dirección.....	20
2.3.5 Sistema de Propulsión .....	22
2.4 Ejemplos de Vehículos Autónomos .....	23
2.5 Resumen.....	24
3 Creando una Solución en Vehículos Autónomos.....	25
3.1 Introducción.....	25
3.2 Definición del Problema.....	25
3.3 Propuesta de Solución.....	26

---

3.4 Resumen.....	27
4 Sistema Mecánico.....	29
4.1 Introducción.....	29
4.2 Vehículo a Escala.....	29
4.3 Revisión del Sistema Mecánico.....	30
4.3.1 USM.....	31
4.3.2 Suspensión.....	31
4.3.3 Dirección.....	31
4.3.4 Sistema de Propulsión.....	32
4.4 Optimización del Sistema Mecánico.....	32
4.4.1 Masa no Suspendida.....	32
4.4.2 Suspensión.....	33
4.4.3 Dirección.....	34
4.4.5 Sistema de Propulsión.....	35
4.4 Resumen.....	35
5 Sistema Eléctrico-Electrónico.....	37
5.1 Introducción.....	37
5.2 Módulo de Adquisición de Datos.....	37
5.3 Módulo de Control.....	39
5.4 Energía.....	41
5.5 Implementación del DAQCON.....	42
5.6 Resumen.....	44
6 Plataforma Móvil de Pruebas.....	48
6.1 Introducción.....	48
6.2 Posición y Ensamble de Componentes.....	48
6.3 Revisión del Ensamble Completo.....	47
6.4 Resumen.....	47
7 Sistema de Navegación.....	51
7.1 Introducción.....	51
7.2 Percepción.....	51
7.2.1 IMU.....	51
7.2.2 MAG.....	52
7.2.3 Filtros Digitales.....	55
7.2.3 GPS.....	58



---

7.3 Localización y Manejo de Mapas .....	58
7.3.1 Localización Absoluta.....	58
7.3.2 Manejo de Mapas.....	60
7.4 Cognición .....	62
7.5 Low-Level Control.....	62
7.5.1 Modelo Cinemático de la PMP .....	62
7.5.2 Control Lateral .....	63
7.5.3 Control Longitudinal.....	65
7.6 Interfaz.....	67
7.7 Resumen.....	68
8 Pruebas y Resultados .....	67
8.1 Introducción.....	67
8.2 Pruebas en Situaciones Controladas.....	67
8.2.1 Acceleration.....	70
8.2.2 Skid Pad .....	70
8.2.3 Autocross .....	71
8.2.4 Endurance.....	71
8.3 Autonomous Vehicle Competition MX 2016.....	72
8.3.1 Pruebas Libres .....	73
8.3.2 Prácticas en Circuito .....	73
8.3.3 Eliminatorias .....	76
8.3.4 Finales.....	76
8.4 AUTONAV Mk. II .....	78
8.4.1 Fase 1, Mecánica: Revisión y Optimización .....	79
8.4.2 Fase 2, Eléctrica-Electrónica: Revisión y Optimización .....	79
8.4.3 Fase 3, PMP: Revisión y Optimización .....	80
8.4.5 Fase 4, Sistema de Navegación: Revisión y Optimización .....	80
8.5 AVCMX 2017 .....	81
8.5.1 Pruebas Libres .....	81
8.5.2 Prácticas en Circuito .....	81
8.5.3 Finales.....	82
8.6 Resumen.....	83
9 Conclusiones.....	86
9.1 Trabajo a Futuro.....	87

---

9.1.1 Percepción.....	87
9.1.2 Localización y Manejo de Mapas .....	87
9.1.3 Sistemas a Prueba de Fallas.....	88
9.1.4 Sistema de Telemetría.....	88
Bibliografía .....	89
Apéndice A .....	97
A.1 MAG.....	97
A.2 IMU .....	97
A.3 GNSS.....	97
A.4 GPS.....	98
A.5 Display.....	98
A.6 MCU.....	99
A.7 Regulador.....	99
A.8 BATT .....	99
A.9 Método de fabricación de la placa de sensores/control.....	100

# Lista de Acrónimos

Acrónimo	Descripción
ACCEL	Acelerómetro
AOM	Módulo de Orientación Absoluta
AUTONAV	Vehículo Autónomo Desarrollado
AVC	Autonomous Vehicle Competition
AVCMX	Autonomous Vehicle Competition Mexico
B - 1	AUTONAV en AVCMX
BATT	Baterías Recargables
BEC	Circuito Eliminador de Baterías
BLDC	Brushless DC
C	Capacidad de la BATT
CCD	Dispositivos de Carga Acoplada
CF	Filtro Complementario de Primer orden
CF2	Filtro Complementario de Segundo Orden
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CM	Centro de Masa
CMOS	Semiconductor Complementario de Óxido Metálico
CNC	Corte por Control Numérico
CON	Módulo de Control
CU	Ciudad Universitaria
CVD	Constant Velocity Drive
DAQ	Módulo de Adquisición de Datos
DAQCON	Módulo de Adquisición de Datos y Control
DARPA	Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa
DFMA	Diseño Para Manufactura y Ensamble
DGC	DARPA Grand Challenge
DMP	Procesador Digital de Movimiento
DUC	DARPA Urban Challenge
E1-E4	Esquinas del Circuito en AVCMX
ESCH	Controlador de Velocidades Electrónico Tipo Hobby
FS	Factor de Seguridad
FPV	Vista en Primera Persona
GLONASS	Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema

<b>Acrónimo</b>	<b>Descripción</b>
GNSS	Sistema Global de Navegación por Satélite
GPIO	Pines Generales de Entrada/Salida
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
GYRO	Giroscopio
I <sup>2</sup> C	Comunicación Circuito Interintegrado
ICM	Motor de Combustión Interna
IMU	Unidad de Medición Inercial
INS	Sistema de Navegación Inercial
ITESM	Instituto Tecnológico de Estudios Superiores Monterrey
ITM	Instituto Tecnológico de México
IPN	Instituto Politécnico Nacional
IW	Llanta de Dirección Interior a una Curva
LCD	Pantalla de Cristal Líquido
LED	Diodo Emisor de Luz
LiDAR	Detección por Láser
LiPo	Polímero de litio
LLC	Convertidor de Niveles Lógicos
MAG	Magnetómetro
MCU	Microcontrolador
ME	Motor Eléctrico
NAVSYS	Sistema de Navegación Autónomo
NiMh	Níquel - Hidruro Metálico
NMEA	National Marine Electronics Association
OW	Llanta de Dirección Exterior a una Curva
PCB	Circuito Impreso
PMP	Plataforma Móvil de Pruebas
PWM	Modulación por Ancho de Pulso
PWR	Módulo de Energía
RC	Radiocontrol
RDDF	Archivo de Datos de Definición de la Ruta
RF	Radiofrecuencia
RPM	Revoluciones por Minuto
R1-R4	Rectas del Circuito en AVCMX
SAE	Sociedad de Ingenieros Automotrices
SERVOH	Servomotor Tipo Hobby
SLAM	Localización y Mapeo Simultáneo
TD	Tasa de Descarga
TRK	Trayectoria Real Seguida
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
USM	Masa no Suspendida
UPIITA	Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas
VA	Valor de Activación
VE	Vehículo a Escala
VTRK	Track de un Vehículo
W	Llanta direccional
WP	Waypoint
YPR	Yaw, Pitch, Roll

# Lista de Símbolos

Símbolo	Descripción
---------	-------------

## PMP

$SE_U$	Sistema de ejes de la USM
$SE_S$	Sistema de ejes de la masa suspendida
$SE_{PMP}$	Sistema de ejes de la PMP
$O_{PMP}$	Origen del $SE_{PMP}$
$CM_{PMP}$	CM de la PMP
$HP$	Plano horizontal sobre el que se desplaza la PMP
$\psi_{PMP}$	Ángulo Yaw de la PMP
$\rho_{PMP}$	Ángulo Pitch de la PMP
$\varphi_{PMP}$	Ángulo Roll de la PMP
$\Psi_{PMP}$	Heading de la PMP
$RC_{PMP}$	Route Course de la PMP
$\overrightarrow{RC_{PMP}}^{HP}$	Proyección de $RC_{PMP}$ en $HP$
$WP_{RC}$	Punto intermedio de $\overrightarrow{RC_{PMP}}^{HP}$
$\overrightarrow{WP_{RC}}^{HP}$	Proyección de $WP_{RC}$ en $HP$
$TRK_{PMP}$	Trayectoria real seguida por la PMP
$\overrightarrow{TRK_{PMP}}^{HP}$	Proyección de $TRK_{PMP}$ en $HP$

## Llanta

$SE_W$	Sistema de ejes de la llanta
$O_W$	Origen del $SE_W$
$S_W$	Eje de giro de la llanta
$P_W$	Plano de la llanta
$X_W$	Eje X del $SE_W$
$\sigma_{IW}$	Ángulo steer interno
$\sigma_{EW}$	Ángulo steer externo

---

Símbolo	Descripción
$\zeta$	Slip angle
$K$	Ángulo camber
$IR_{PMP}$	Referencia inicial

## Dinámica de Vehículos

---

$M_T$	Par mecánico
$F_T$	Fuerza de tracción
$F_B$	Fuerza de frenado

## DAQCON

---

$SE_{HMC}$	Sistema de ejes del HMC5883L
$SE_{MPU}$	Sistema de ejes del MPU6050

## PWR

---

$V_{BATT}$	Voltaje de la BATT
$TD_{BATT}$	Tasa de descarga de la BATT
$C_{BATT}$	Capacidad de la BATT

## Percepción

---

$\theta$	Posición angular
----------	------------------

## GYRO

$t$	Tiempo
$\omega$	Velocidad angular
$T_s$	Tiempo de muestreo
$\Delta\theta$	Cambio angular

## ACCEL

$A_{x_{ACCEL}}$	Aceleración normalizada medida por el ACCEL en el eje $X_{ACCEL}$
$A_{y_{ACCEL}}$	Aceleración normalizada medida por el ACCEL en el eje $Y_{ACCEL}$
$A_{z_{ACCEL}}$	Aceleración normalizada medida por el ACCEL en el eje $Z_{ACCEL}$
$\rho_{ACCEL}$	Ángulo de pitch estimado por medio del ACCEL
$\varphi_{ACCEL}$	Ángulo de roll estimado por medio del ACCEL

## MAG

$\Psi_{mag}$	Heading de la PMP con respecto al Norte Magnético
--------------	---

Símbolo	Descripción
$H$	Vector de campo magnético
$SE_H$	Sistema de ejes de $H$
$H_x$	Componente de $H$ en $X_H$
$H_y$	Componente de $H$ en $Y_H$
$H_z$	Componente de $H$ en $Z_H$
$\vec{H}^{XY_H}$	Proyección de $H$ en $XY_H$
$\dot{\imath}$	Ángulo de inclinación de $H$
$\vec{H}^{HP}$	Proyección de $H$ en $HP$
$H_{HMC}$	$H$ de acuerdo a mediciones del MAG en una particular posición
$\overrightarrow{H_{HMC}}^{HP}$	Proyección de $H_{HMC}$ en $HP$
$H_{x_{HMC}}$	Componente de $H_{HMC}$ en $X_H$
$H_{y_{HMC}}$	Componente de $H_{HMC}$ en $Y_H$
$H_{z_{HMC}}$	Componente de $H_{HMC}$ en $Z_H$
$\Psi_{HMC}$	Heading de la PMP con respecto a $H_{HMC}$
$R_1$	Radical de compensación
$H_{y_{cmp}}$	$H_{y_{HMC}}$ compensado por inclinación
$H_{x_{cmp}}$	$H_{x_{HMC}}$ compensado por inclinación
$\delta_{dev}$	Ángulo de desviación magnética
<b>Filtros</b>	
$\theta_{CF}$	Estimación de $\theta$ por medio de CF
$\theta_{EBF}$	Estimación de baja frecuencia de $\theta$
$\theta_{EAF}$	Estimación de alta frecuencia de $\omega$
$a$	Parámetro de filtrado
$\tau$	Constante de tiempo
$\theta_{CF2}$	Estimación de $\theta$ por medio de CF2
$k_i, k_p$	Ganancias del CF2
<b>GPS</b>	
$\phi_{GPS}$	Latitud de la PMP en el SCG, de acuerdo al GPS
$\lambda_{GPS}$	Longitud de la PMP en el SCG, de acuerdo al GPS
$v_{GPS}$	Velocidad longitudinal de la PMP, de acuerdo al GPS

## Localización

### Localización

$L_{ABS}$	Localización absoluta de la PMP
$\phi_{PMP}$	Latitud de la PMP en el SCG.
$\lambda_{PMP}$	Longitud de la PMP en el SCG
$\Psi_{PMP}$	Heading de la PMP, con $X_{HP}$ apuntando al <i>norte geográfico</i> .

Símbolo	Descripción
$\delta_{dec}$	Ángulo de declinación
Manejo de mapas	
$\phi_{WP_{RC}}$	Latitud de un $WP_{RC}$ en el SCG
$\lambda_{WP_{RC}}$	Longitud de un $WP_{RC}$ en el SCG
$d_{WP_{RC}}$	Distancia entre dos $WP_{RC}$
$a$	Ecuación 1 del método de Haversine
$c$	Ecuación 2 del método de Haversine
$r_T$	Radio de la Tierra al aproximar su superficie como una esfera
$S_{RC}$	Segmento de trayectoria de $RC_{PMP}$
$\beta_{S_{RC}}$	Ángulo de $S_{RC}$ con respecto al norte geográfico
$e_{CT}$	Error de crosstrack
Low Level-Control	
$\sigma_w$	Ángulo steer
$e_{CT_w}$	Error de crosstrack de la llanta direccional
$e_{\psi_{PMP}}$	Error del heading de la PMP al segmento actual de trayectoria a seguir
$e_w$	Error de la llanta direccional al segmento actual de trayectoria a seguir
Control lateral	
$\sigma_{wmax}$	Ángulo máximo de viraje de W
$RO_{ser}$	Rango de operación del SERVOH
$D_{ser}$	Duración del pulso del SERVOH
$RD_{ser}$	Rango de duración del SERVOH
$F_{ser}$	Frecuencia de operación del SERVOH
$\sigma_{ser}$	Posición angular del SERVOH
Control longitudinal	
$RO_{ME}$	Rango de operación del ME
$VA_{ESCH}$	Valor de activación del ESCH
$D_{ESCH}$	Duración del pulso del ESCH
$RD_{ESCH}$	Rango de duración del ESCH
$F_{ESCH}$	Frecuencia de operación del ESCH



# Lista de Figuras

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>
Figura 1.1	Estructura del sistema final
Figura 2.1	Ciclo ver-pensar-actuar
Figura 2.2	Segmento espacial del GPS y GLONASS
Figura 2.3	Distribución típica de la medición en un sensor ultrasónico
Figura 2.4	Representación de terreno creada por LiDAR
Figura 2.5	Principio de funcionamiento de sensor CCD
Figura 2.6	Principio de funcionamiento de sensor CMOS
Figura 2.7	Errores acumulativos en posicionamiento
Figura 2.8	Descomposición por celdas
Figura 2.9	Hojas de ruta
Figura 2.10	Campos potenciales
Figura 2.11	Control retroalimentado
Figura 2.12	Sistema de dos masas
Figura 2.13	Sistema de ejes de la PMP
Figura 2.14	Sistema de ejes de la llanta
Figura 2.15	Roll, Pitch y Yaw
Figura 2.16	Conceptos fundamentales
Figura 2.17	Slip angle
Figura 2.18	Ángulo camber
Figura 2.19	Suspensión McPherson Strut
Figura 2.20	Configuraciones de brazos de suspensión
Figura 2.21	Configuraciones del mecanismo de dirección
Figura 2.22	Efecto del ángulo toe en la estabilidad de un vehículo
Figura 2.23	Sistema de propulsión
Figura 2.24	Diferencial de engranes
Figura 2.25	Stanley y Boss
Figura 2.26	Vehículo Made In Germany
Figura 2.27	Flotilla Waymo
Figura 2.28	Tesla Model S
Figura 3.1	Proceso del desarrollo del proyecto
Figura 4.1	Requerimientos del VE por sistema

<b>Figura</b>	<b>Descripción</b>
Figura 4.2	Opciones para el VE
Figura 4.3	Aprobación de mejoras para el sistema de USM
Figura 4.4	Steering blocks, wheel hubs y caster blocks
Figura 4.5	Aprobación de mejoras para el sistema de suspensión
Figura 4.6	Turnbuckles y torres de suspensión
Figura 4.7	Aprobación de mejoras para el sistema de dirección
Figura 4.8	Mecanismo de dirección y turnbuckles
Figura 4.9	Aprobación de mejoras para el sistema de propulsión
Figura 4.10	CVD y disipador de calor
Figura 5.1	MAG Honeywell HMC5883L
Figura 5.2	IMU MPU6050
Figura 5.3	Adafruit Ultimate GPS Module
Figura 5.4	Display LCD 20x4 y adaptador 16x8
Figura 5.5	MCU Arduino Mega 2560 R3
Figura 5.6	LLC BOB-12009
Figura 5.7	Voltaje y corriente de operación de los componentes
Figura 5.8	Regulador conmutado LM2596S
Figura 5.9	BATT Zippy Compact
Figura 5.10	Reglas para la implementación de la shield
Figura 5.11	Shield terminada
Figura 6.1	Consideraciones para la posición de los componentes
Figura 6.2	Ensamble de la base y soportes
Figura 6.3	Plataforma Móvil de Pruebas
Figura 7.1	Cálculo de los ángulos roll y pitch, por medio de ACCEL
Figura 7.2	Estimación de $\varphi$ a corto plazo, por medio de GYRO y ACCEL
Figura 7.3	Estimación de $\varphi$ a largo plazo, por medio de GYRO y ACCEL
Figura 7.4	Representación del campo magnético de la Tierra
Figura 7.5	Componentes del vector de campo magnético
Figura 7.6	Desviación magnética
Figura 7.7	Comparación de $\Psi$ a corto plazo, por medio de MAG y GYRO
Figura 7.8	Comparación del $\Psi$ a largo plazo, por medio de MAG y GYRO
Figura 7.9	Filtro complementario de primer orden
Figura 7.10	Filtro complementario de segundo orden
Figura 7.11	Comparación del ángulo Pitch por medio de CF, CF2 y DMP
Figura 7.12	Comparación del ángulo Roll por medio de CF, CF2 y DMP
Figura 7.13	Localización absoluta de la PMP
Figura 7.14	Diferencia $\delta$
Figura 7.15	Declinación magnética
Figura 7.16:	Route course
Figura 7.17	Geodésica y loxódromo
Figura 7.18	Generalización de Cognición
Figura 7.19	Modelo cinemático de la PMP
Figura 7.20	Retrato de fase de un vehículo con la ley de control lateral
Figura 7.21	Señal PDM
Figura 7.22	Regiones de viraje del mecanismo de dirección
Figura 7.23	Diagrama de bloques del control longitudinal
Figura 7.24	Efecto longitudinal en la PMP

---

Figura 7.25	Interconexión de los módulos por medio de la interfaz
Figura 8.1	Prueba Skid Pad
Figura 8.2	Prueba Autocross
Figura 8.3	Desempeño del controlador lateral en situaciones controladas
Figura 8.4	Representación aproximada del circuito en AVCMX 2016
Figura 8.5	Primeros 3 lugares de la etapa de eliminatorias en AVC MX 2016
Figura 8.6	Podio en AVC MX 2016
Figura 8.7	Distribución temporal del AUTONAV Mk.II
Figura 8.8	AUTONAV Mk.II
Figura 8.9	Representación aproximada del circuito en AVCMX 2017
Figura 8.10	Podio en AVC MX 2017



# Capítulo 1

## Introducción

*Movement is the essence of life.*

—Bernd Heinrich

### 1.1 Movimiento es Vida

El movimiento forma parte de la naturaleza y tarde o temprano todo cambia de posición.

Los seres vivos móviles se encuentran en una labor de constante navegación, ya sea para buscar comida, resguardo, entre otros, y el ser humano no es excepción.

Como seres pensantes, escoger una ruta, esquivar personas en nuestro camino, comenzar a mover nuestras piernas y saber cuándo hemos llegado nos parecen actividades triviales y no pensamos en el proceso necesario para lograrlo, sin embargo, inconscientemente nuestro cerebro está continuamente realizando cálculos, tomando decisiones y mandando señales eléctricas a numerosas partes de nuestros cuerpos para realizar dichas tareas.

Vivimos en un mundo que todo el tiempo crece en número de personas y con el paso de los años la movilidad en zonas pobladas se ha vuelto un problema de la vida diaria. Sin embargo, transportarse es una de las principales actividades que realizamos en el día, es una característica inherente de nuestra especie y como tal, una necesidad que es obligatorio cumplir.

Si pudiéramos replicar la capacidad humana para satisfacer sus necesidades de movilidad e implementarla en un vehículo, podríamos hablar de una revolución total de la movilidad, se podrían crear vehículos intercomunicados y sincronizados que redujeran el número de accidentes viales, el tiempo en los trayectos no sería más tiempo perdido pues los pasajeros podrían aprovecharlo realizando la actividad que deseen sin la necesidad de estar pendientes del camino.

Este mismo sistema podría ser replicado en cualquier actividad que necesite de transporte: en la agricultura con la construcción de tractores que apoyen en las tareas rutinarias de siembra y recolección, en la pesca se podrían recorrer rutas sin necesidad de que los marineros pasen días en el mar, rescate de personas en lugares peligrosos; numerosas industrias pueden ser beneficiadas por el desarrollo de los vehículos autónomos.

## 1.2 Objetivos

El presente trabajo se enfoca en el desarrollo e implementación de un sistema de navegación autónomo en un vehículo terrestre. Los principales objetivos son los siguientes:

- Diseñar e implementar un sistema de navegación autónomo (NAVSYS) que por medio de módulos de adquisición de datos (DAQ) y control (CON) obtenga información del ambiente, planee las tareas necesarias para dirigirse a una ubicación determinada y ejecute las acciones necesarias para cumplirlas.
- Diseñar e implementar una plataforma móvil de pruebas (PMP), para evaluar el NAVSYS.
- El vehículo autónomo resultante de la unión de la PMP con el NAVSYS (AUTONAV), debe ser capaz de navegar un entorno dinámico para seguir exitosamente una trayectoria.

La estructura del sistema final se muestra en la figura 1.1.

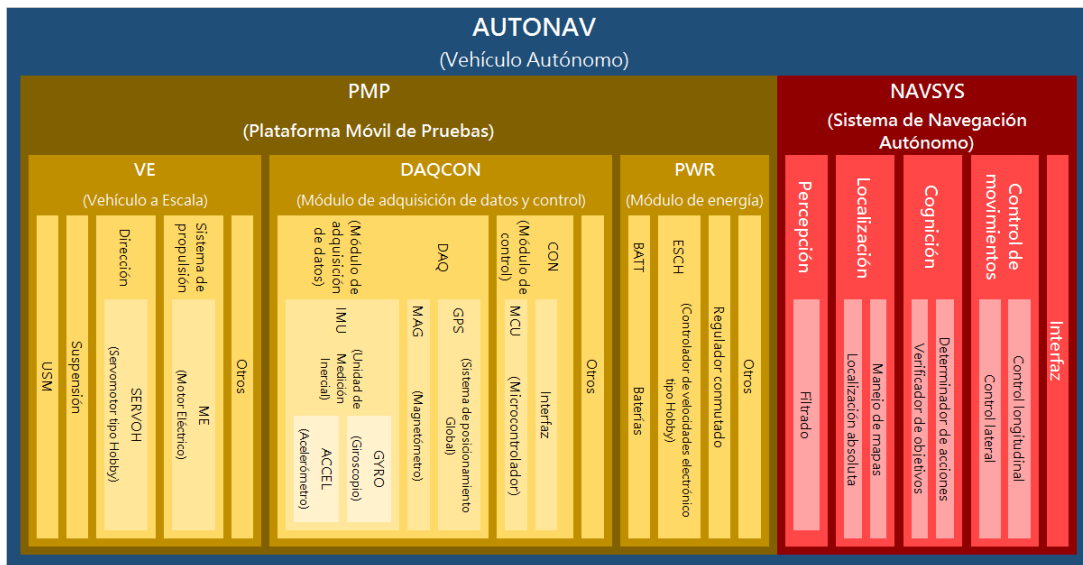


Figura 1.1: Estructura del sistema final (Cordero, 2016)

## 1.3 Estructura del Trabajo

El contenido del trabajo está estructurado de la siguiente manera:

- **Capítulo 2:** Proporciona una visión general del estado del arte en cuanto a vehículos autónomos. Apoya con conceptos preliminares de dinámica de vehículos necesarios para la optimización de un vehículo a escala.
- **Capítulo 3:** Formaliza la problemática presentada en la elaboración de un vehículo autónomo a escala, con la capacidad de ser escalable a tamaño real, presenta además la propuesta de solución y el proceso a seguir durante el desarrollo del proyecto.

- **Capítulo 4:** Con base en lo presentado en el Capítulo 2 referente a dinámica de vehículos, se aplican los conocimientos en la implementación mecánica del proyecto.
- **Capítulo 5:** Dadas las necesidades eléctrico-electrónicas presentadas en el Capítulo 2 referentes a un vehículo autónomo, se implementa una solución.
- **Capítulo 6:** Lo desarrollado en los dos capítulos anteriores se integra para formar la PMP. Se presenta el prototipo mecánico-eléctrico-electrónico terminado.
- **Capítulo 7:** Diseño e implementación del NAVSYS, creación de los módulos de percepción, localización y manejo de mapas, cognición y planeación de movimientos, y control de movimientos.
- **Capítulo 8:** Se realiza un análisis de los resultados obtenidos en pruebas dinámicas del sistema desarrollado, con base en ellos se realizan mejoras en el vehículo. Aborda también el desempeño del vehículo en competencias de vehículos autónomos.
- **Capítulo 9:** Conclusiones y trabajo a futuro.
- **Anexo A:** Contiene las matrices de decisión utilizadas para selección





## Capítulo 2

# Vehículos Autónomos

*This is the age of disruption.*  
–Sebastian Thrun

## 2.1 Introducción

Para poder analizar un vehículo autónomo, primero es necesario definirlo.

El concepto de *autonomía*, es la capacidad de tomar decisiones propias sin ser controlado por alguien más (Cambridge University Press, 2016). Un sistema autónomo existente en el mundo físico, que pueda percibir su entorno y actuar en él para alcanzar objetivos por cuenta propia, es por definición, un *robot* (Mataric, 2007).

La *navegación* está definida como el acto de dirigirse de un lugar a otro (Cambridge University Press, 2016), un robot que posee un sistema de locomoción que le permite navegar su entorno, se denomina *robot móvil* (Siegwart & Nourbakhsh, 2004).

Por lo tanto, definiremos un *vehículo autónomo* como un robot móvil capaz de navegar a múltiples destinos dentro de su entorno, sin intervención humana.

## 2.2 Navegación

Leonard y Durrant-Whyte resumieron el problema de la navegación en la resolución de las siguientes tres preguntas fundamentales (Leonard & Durrant-White, 1991):

"¿Dónde estoy?", "¿A dónde voy?" y "¿Cómo llego ahí?"

Por medio de cuatro tareas principales, expuestas por Siegwart y Nourbakhsh, podemos resolverlas (Siegwart & Nourbakhsh, 2004):

- Obtener e interpretar información del entorno (*Percepción*).
- Encontrar la posición actual en el entorno (*Localización y manejo de mapas*).

- Plantear el objetivo y planear los movimientos necesarios para llegar a él (*Cognición y planeación de movimientos*).
- Modular los actuadores para ejecutar los movimientos planeados con la finalidad de seguir la trayectoria deseada (*Control de movimientos*).

Éstas pueden ser resueltas cíclicamente, como muestra la figura 2.1:

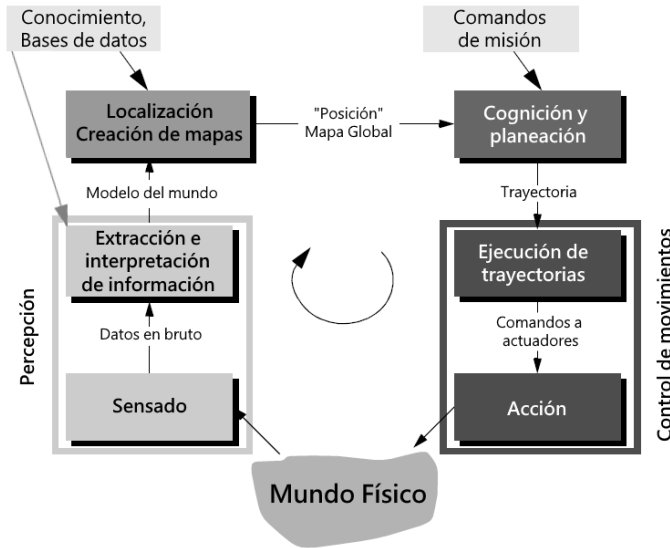


Figura 2.1: Ciclo ver-pensar-actuar (Siegwart & Nourbakhsh, 2004)

## 2.2.1 Percepción

El obtener información del entorno es una de las tareas primordiales de un sistema autónomo y consiste en tomar mediciones por medio de sensores para después extraer información significativa. Es necesario determinar valores internos del sistema como velocidad de las ruedas, por medio de *sensores propioceptivos* y valores externos relacionados al entorno como distancias y posiciones a sistemas fijos de referencia externos, por medio de *sensores exeroceptivos* (Matarić, 2007).

Los principales sensores utilizados en aplicaciones de robots móviles son:

- **Sensores de Posición y Velocidad de Ruedas/Motores**

Dispositivos utilizados para conocer el estado interno y la dinámica de un robot móvil, por ejemplo, los *encoders*, que permiten medir la posición y velocidad angular de un mecanismo rotacional (Siegwart & Nourbakhsh, 2004).

- **Sensores de Rumbo**

Nos permiten determinar la orientación del robot móvil con respecto a un marco de referencia fijo, los más comunes son *giroscopios* (GYRO) y *magnetómetros* (MAG).

Los GYRO funcionan basados en el principio fundamental de conservación de momento angular (Fraden, 2004), pueden medir velocidades angulares de un cuerpo al que estén sujetos.

Los MAG pueden detectar campos magnéticos, en aplicaciones de navegación en robots móviles son de interés aquellos capaces de detectar el campo magnético de la Tierra (J. Borenstein, 1996).

- **Sistemas de Señalización**

Históricamente, los humanos hemos utilizado sistemas de señalización para navegar, como estrellas, faros, direcciones donde el Sol se alza o desaparece en el horizonte, entre otros. En la actualidad, el avance tecnológico nos ha proporcionado sistemas que permiten conocer nuestra posición prácticamente en cualquier rincón del planeta, como el *Sistema Global de Navegación por Satélite* (GNSS).

El término es utilizado para la colección de sistemas de posicionamiento satelital operacionales o planeados.

Actualmente, existen 2 GNSS totalmente funcionales:

- **Sistema de Posicionamiento Global (GPS)**

GNSS desarrollado por Estados Unidos de Norteamérica y mantenido por la U.S. Air Force, compuesto en los últimos años por una red de 31 satélites operacionales que orbitan alrededor de la Tierra, asegurando la disponibilidad de al menos 24 de ellos, el 95% del tiempo.

Los satélites vuelan a una altitud aproximada de 20,200 [km] y están dispuestos en 6 planos orbitales igualmente separados entre sí con 4 satélites cada uno. Este *segmento espacial* asegura que cualquier usuario virtualmente en cualquier parte del mundo tiene acceso a 4 satélites (U.S. Government, 2016), como se muestra en la figura 2.2.

- **Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS)**

GNSS desarrollado por la URSS y mantenido por la Federación de Rusia, actualmente compuesto por una red de 27 satélites que orbitan alrededor de la Tierra, de los cuales 24 están en estado operacional.

Los satélites vuelan a una altitud aproximada de 19,100 [km] y están dispuestos en 3 planos orbitales igualmente separados entre sí con 8 satélites cada uno (Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing, 2016), su segmento espacial se muestra en la figura 2.2.

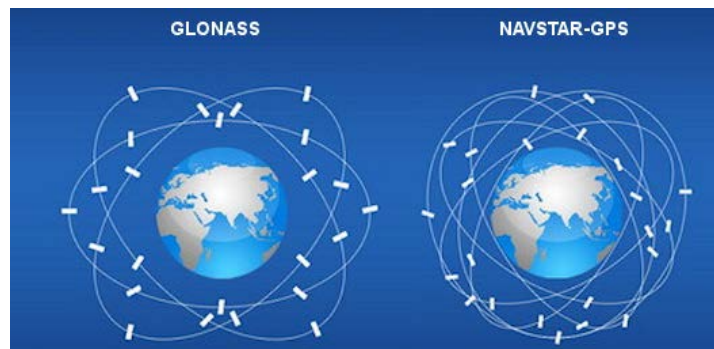


Figura 2.2: Segmento espacial del GPS y GLONASS (István & Gábor, 2011)

- **Sensores de Detección Activa**

En la robótica móvil, los sensores que proporcionan mediciones de distancias a objetos cercanos son muy utilizados, sobre todo con fines de evasión de obstáculos y construcción de mapas.

Un ejemplo son los sensores basados en tiempo de vuelo, que determinan la distancia a objetos cercanos midiendo el tiempo de vuelo de un pulso de energía emitida viajando a un objeto reflejante y resonando de regreso al receptor (Leonard & Durrant-White, 1991).

Dos de los más populares en la robótica móvil son:

- **Sensores Ultrasónicos**

Trasmiten paquetes de ondas ultrasónicas de presión y miden el tiempo que tarda el mismo haz en regresar al receptor. La distancia al objeto reflejante puede ser calculada por medio de la velocidad de propagación del sonido y el tiempo de vuelo.

Debido a la conicidad de propagación del sonido, los datos adquiridos no representan puntos de profundidad sino regiones enteras, es decir, detecta la presencia de un objeto dentro del cono de medición (Siegwart & Nourbakhsh, 2004), como se muestra en la figura 2.3.

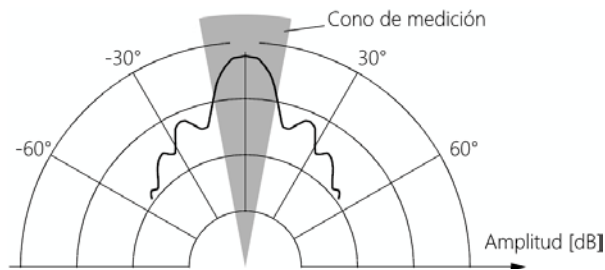


Figura 2.3: Distribución típica de la medición en un sensor ultrasónico (Siegwart & Nourbakhsh, 2004).

- **Sensores Basados en Láser**

También conocidos como radar láser o LiDAR, emiten un pulso de luz por medio de un diodo láser, la luz viaja hasta encontrar algún obstáculo y parte de la energía luminosa es reflejada al emisor. Si el haz no encuentra un obstáculo, la luz no es reflejada.

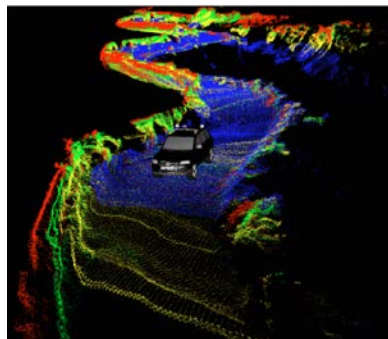


Fig. 2.4: Representación de terreno creada por LiDAR (Thrun, et al., 2006)

Este tipo de sensores puede contar con un sistema de actuadores que permita un recorrido del haz de luz, obteniendo de esta manera un conjunto de mediciones llamado *nube de puntos*, al ser procesada la información se pueden representar objetos en 2-D o en 3-D, como lo muestra la figura 2.4. Mientras mayor sea la densidad de puntos, la representación tendrá mayor detalle (Velodyne LiDAR, 2016).

- **Sensores Basados en Visión**

Una manera de aprovechar la gran cantidad de información disponible en el ambiente, es intentar replicar el sentido más importante en el ser humano: la visión. Las dos actuales tecnologías para crear este tipo de sensores son (Siegwart & Nourbakhsh, 2004):

- **Dispositivos de Carga Acoplada (CCD)**

Consta de un arreglo de elementos sensibles a la luz (pixeles) que pueden ser vistos como capacitores inicialmente cargados y que liberan electrones conforme a la incidencia de luz. Estos son captados por campos eléctricos y acumulados en cada pixel, para finalmente ser leídos renglón por renglón del arreglo, transportando cada carga a una de las esquinas del chip CCD, siendo de extrema importancia que mantengan su valor. La figura 2.5 muestra el principio de funcionamiento de un sensor CCD.

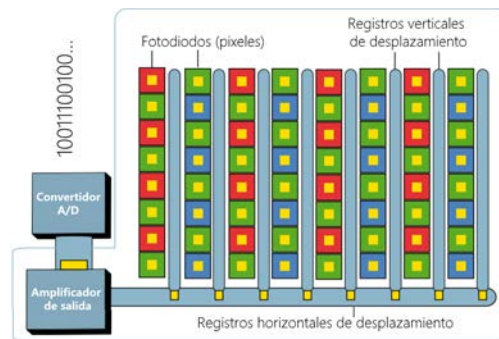


Figura 2.5: Principio de funcionamiento de sensor CCD (Axis Communications AB, 2010)

- **Semiconductor Complementario de Óxido Metálico (CMOS)**

También utiliza un arreglo de pixeles, pero cuenta con transistores específicos para cada uno de ellos. Las cargas son acumuladas como en los sensores CCD, pero al momento de ser leídas la circuitería específica correspondiente a cada pixel mide y amplifica la señal, en paralelo para cada uno de los pixeles. La figura 2.6 muestra el principio de funcionamiento de un sensor CMOS.

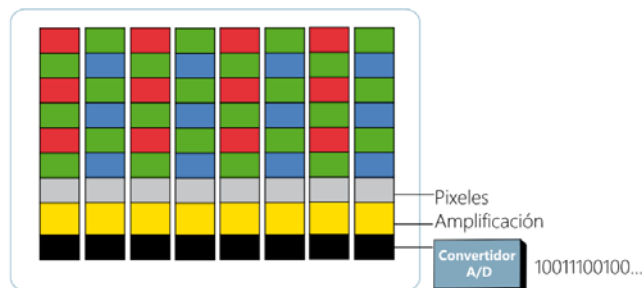


Figura 2.1: Principio de funcionamiento de sensor CMOS (Axis Communications AB, 2010)

## 2.2.2 Localización y Manejo de Mapas

Con la información obtenida de los sensores durante la tarea de percepción, se puede determinar la posición y orientación actual del vehículo con respecto a un sistema de referencia externo.

La localización en robots móviles puede ser vista como un problema de transformación de coordenadas, donde se debe establecer una correspondencia entre el sistema de coordenadas externo con el sistema de coordenadas interno del robot (Thrun, Burgard, & Fox, Probabilistic Robotics, 2000).

Existen entonces, dos tipos de localización (Schworer, 2005):

- **Localización Relativa**

Basada en sensores propioceptivos, donde la posición inicial es conocida y actualizada por medio de *odometría* (encoders en las llantas) (Siegwart & Nourbakhsh, 2004) y/o *Sistemas de Navegación Inercial* (INS), los cuales utilizan una técnica conocida como *Dead-Reckoning* que, al agregar GYRO, MAG y acelerómetros (ACCEL), junto con las leyes de movimiento de Newton y valores iniciales, permite calcular la velocidad y con ella la posición del robot móvil (Schumacher, 2006).

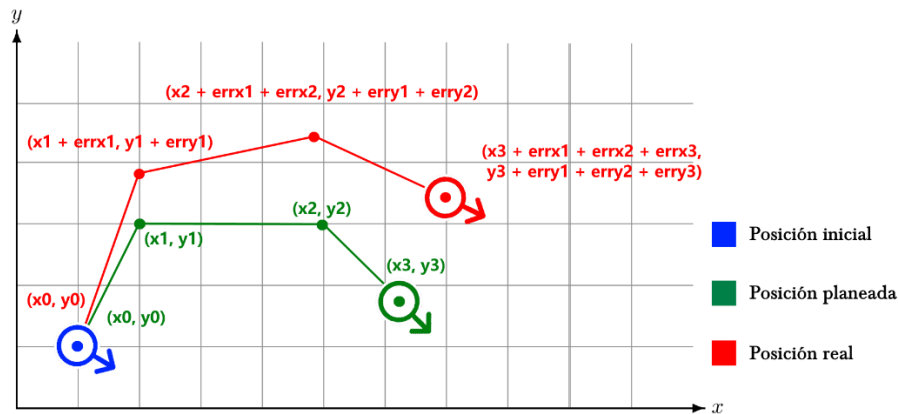


Figura 2.7: Errores acumulativos en posicionamiento (Cordero, 2016)

Una de las desventajas de este tipo de sistemas, es que es propenso a errores acumulativos. Debido a que la información de los sensores es integrada para encontrar la posición, los errores de medición también son integrados, por lo que el robot móvil acumulará errores en posicionamiento en cada iteración y después de un determinado tiempo e instrucciones la posición real será distinta a la planeada (Siegwart & Nourbakhsh, 2004), como se muestra en la figura 2.7.

- **Localización Absoluta**

Posición del robot externo al modelo del sistema sin previo conocimiento de su posición inicial. La información proviene de sensores exteroceptivos, como visión o algún GNSS, para ubicarse en un sistema de referencia absoluto. Sebastian Thrun comenta que el problema de la localización absoluta tiene un mayor nivel de dificultad en su resolución, ya que incluye el problema de la localización relativa (Thrun, Burgard, & Fox, Probabilistic Robotics, 2000).

- **Manejo de Mapas**

Para ubicar un robot móvil presente en el mundo físico, se necesita de una representación del último, llamada *modelo del mundo*, siendo un *mapa* la representación más utilizada (Matarić, 2007).

Un robot que es capaz de navegar en un entorno de manera autónoma por medio de información que obtiene de sus sensores, es capaz también de interpretar aquellos datos y construir un mapa del entorno (Siegwart & Nourbakhsh, 2004), un proceso llamado *mapeo*.

El problema del mapeo, puede ser dividido en dos situaciones (Santos A. G., 2008):

1. Cuando el robot conoce la ubicación de sus objetivos y debe navegarlo reconociendo señalizaciones y evitando obstáculos, creando así la representación del mundo conforme se acerca a su destino.
2. Cuando el robot no conoce la ubicación de sus objetivos debe recorrer el entorno buscando ubicación de su objetivo y en el peor de los casos deberá recorrer el entorno en su totalidad.

El problema recae en lo siguiente: para poder construir un mapa, el robot necesita saber su ubicación, mientras que para conocer su ubicación necesita conocer las características del mapa. Al proceso paralelo de localización y mapeo en un entorno, se le conoce como *Localización y Mapeo Simultáneo* (SLAM) y permite navegar el entorno rastreando su posición al mismo tiempo que construye el mapa (Siegwart & Nourbakhsh, 2004).

El mantener la incertidumbre de la posición y localización de las características del mapa, con la finalidad de reducir los errores al máximo, es una de las principales preocupaciones referentes a SLAM y es por ello que se utilizan ciertos filtros, por ejemplo, el *Filtro de Kalman*, que mediante ecuaciones matemáticas y un método recursivo, realiza estimaciones de estados pasados, presentes y futuros aun sin un modelo preciso del sistema (Santos A. G., 2008).

### 2.2.3 Cognición y Planeación de Movimientos

*Cognición* está definido como el uso de procesos conscientes mentales (Cambridge University Press, 2016). *Planeación* es el proceso de prever los resultados de posibles acciones, así como buscar la secuencia de acciones a realizar que permitirán alcanzar el objetivo deseado (Matarić, 2007).

En la robótica móvil, la tarea de *cognición* y *planeación* representa la toma de decisiones para posteriormente pasar a la ejecución de acciones, con el propósito de alcanzar sus objetivos. Este proceso se encuentra directamente ligado a la capacidad del robot móvil para actuar con base en su conocimiento e información proveniente de sus sensores, del modo más eficiente y confiable posible. Mientras más tiempo le tome al sistema planear sus acciones, más tardará en llegar a su objetivo (Siegwart & Nourbakhsh, 2004).

Para navegar, un humano resuelve primero un problema global y después se encarga de tomar decisiones a nivel local que aseguren completar la trayectoria con el menor número de incidentes. De la misma manera, las técnicas de planeación en un robot móvil para poder llegar a su objetivo, pueden ser divididas en dos ramas:

- **Planeación Global**

Utiliza la completa información del ambiente para generar una solución, ignorando las decisiones de bajo nivel. Se encarga de decidir las acciones a llevar a cabo, y por lo tanto la *planeación de la trayectoria*, para alcanzar el destino (Coenen, 2012)

Es un proceso deliberativo que mira a futuro, por lo general ejecutado antes de que el robot móvil comience su recorrido. Durante la planeación de la trayectoria, el robot móvil y el mundo sobre el cual navega deben ser representados con todas las posibles situaciones que se puedan presentar. En cada punto temporal, el robot móvil puede tener exactamente una combinación de su posición y orientación, llamada *configuración* (Giesbrecht, 2004). Cada una de estas configuraciones puede ser descrita por  $k$  valores  $q_1, q_2, \dots, q_n, \dots, q_{k-1}, q_k$ . Los  $k$  – *valores* pueden ser representados como un punto  $p$  en un espacio de dimensión  $k$ , el cual es llamado el  $k$  *espacio de configuración*  $C$  (Siegwart & Nourbakhsh, 2004).

Mientras más grados de libertad se agreguen al sistema, el número y tamaño de dimensiones aumenta, incrementando la dificultad de la tarea de planeación, por lo que una buena decisión del espacio de configuración contendrá el menor número de dimensiones posibles para un rápido funcionamiento de los algoritmos (Giesbrecht, 2004).

Dentro de los métodos más utilizados para la planeación de trayectorias, están los métodos de *descomposición por celdas* (Giesbrecht, 2004), ejemplificado en la figura 2.8, donde la totalidad del espacio donde se realizarán las trayectorias es dividida en regiones adyacentes no superpuestas (*celdas*), cada una con un costo por navegar a través de ella. El planeador busca a través del grafo generado al considerar cada celda como un nodo, aplicando una métrica para determinar cuál es la trayectoria óptima.

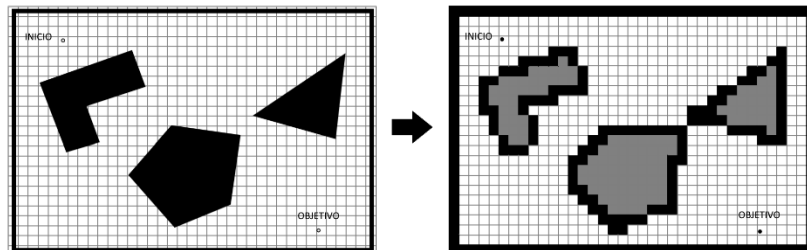


Figura 2.8: Descomposición por celdas (Siegwart & Nourbakhsh, 2004)

Otro método que también es muy utilizado, es llamado *hojas de ruta* (Siegwart & Nourbakhsh, 2004), mostrado en la figura 2.9, el cual es una representación del espacio de configuración del robot basado en la geometría de los obstáculos, mediante una red de curvas o líneas que permiten al robot móvil recorrer todo el espacio libre.

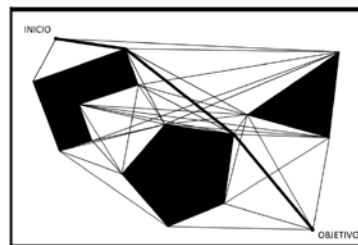


Figura 2.9: Hojas de ruta (Siegwart & Nourbakhsh, 2004)



- **Planeación Local**

Toma decisiones de bajo nivel utilizando información local del entorno. Se encarga de planear ante eventualidades presentes entre puntos intermedios de la trayectoria, como *evasión de obstáculos* (Coenen, 2012)

Para resolver el problema de la planeación local, algunos métodos han sido planteados, dentro de ellos uno de los más conocidos es la navegación mediante *Campos Potenciales Artificiales*.

El robot móvil es tratado como una partícula con carga dentro de un campo potencial  $U$ , compuesto por fuerzas ficticias, los cuales pueden ser de atracción (en el caso de objetivos) o de repulsión (en el caso de obstáculos) y los cuales varían en magnitud dependiendo de un factor de escalamiento y la cercanía al objetivo u obstáculo (Coenen, 2012). La figura 2.10, muestra el principio de evasión de obstáculos por medio de campos potenciales.

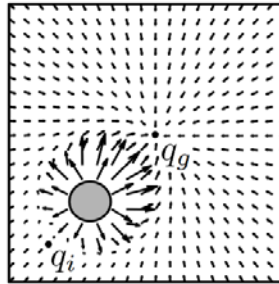


Fig. 2.10: Campos potenciales (Coenen, 2012)

## 2.2.4 Control de Movimientos

Para que un robot móvil pueda dirigirse físicamente a su destino, es necesario un sistema de *locomoción* (mecanismos que le permitan moverse en su entorno) que cuente con *motorización* (accionamiento sobre los grados de libertad del robot, que permitan su movimiento) (Siegwart & Nourbakhsh, 2004).

En el mundo físico, siempre habrá *perturbaciones* que afecten el movimiento del robot, por lo que es apropiado contar con un sistema de control que permita corregirlo. Para reducir la incertidumbre al seguir una trayectoria, se puede utilizar un control retroalimentado, que permita reducir la diferencia entre la salida del sistema (en este caso el movimiento real del robot) y los parámetros de referencia (la trayectoria a seguir) (Ogata, 1998). La figura 2.11 muestra el funcionamiento elemental de un control retroalimentado.

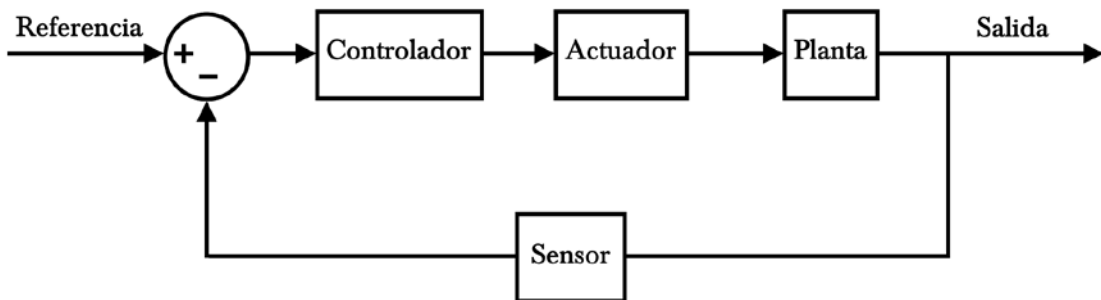


Figura 2.11: Control retroalimentado (Cordero, 2016)

## 2.3 Dinámica de Vehículos

Debido a que la PMP está basada en un modelo a escala de un automóvil común y se busca el mejor desempeño del sistema completo, son necesarios conceptos previos referentes a dinámica de vehículos para poder seleccionar el diseño que más se apegue a las necesidades, tomar a consideración los parámetros de un vehículo de este tipo y poder realizar los ajustes necesarios ante los resultados de las pruebas dinámicas.

### 2.3.1 Consideraciones

Se tomaron como base los sistemas de referencia utilizados por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) (Milliken & Milliken, 1995) y se adaptaron a los requerimientos de la PMP.

Un vehículo puede ser considerado como un sistema de dos masas: la masa no suspendida y la masa suspendida, cada uno con su sistema de ejes individual ( $SE_U$  y  $SE_S$  respectivamente) como se muestra en la figura 2.12. Ambos se unen para formar el sistema de ejes de la PMP ( $SE_{PMP}$ ), mostrado en la figura 2.13. Todos los sistemas son derechos.

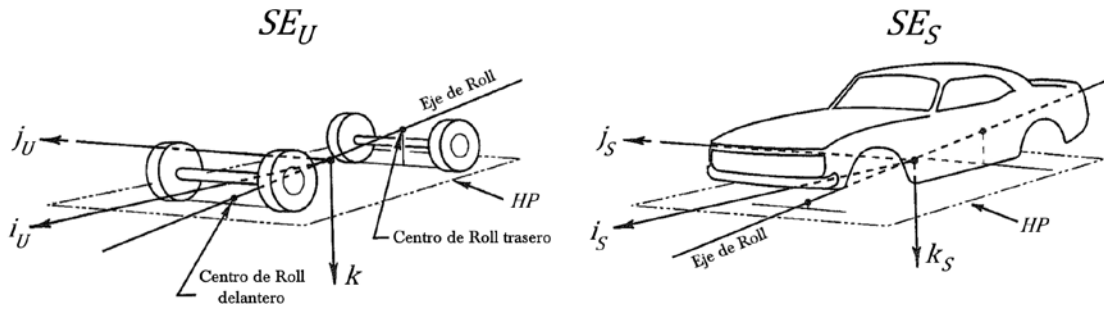


Fig. 2.12: Sistema de dos masas (Milliken & Milliken, 1995)

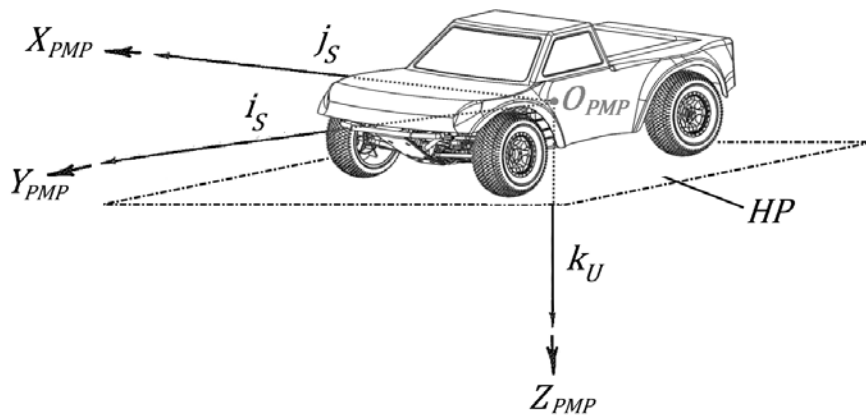


Fig. 2.13: Sistema de ejes de la PMP (Cordero, 2016)

El origen  $O_{PMP}$  del  $SE_{PMP}$  está situado en el centro de masa (CM) de la PMP ( $CM_{PMP}$ ), el eje  $X_{PMP}$  está ligado al eje  $i_S$  del  $SE_S$  y es positivo hacia el frente de la PMP, el eje  $Y_{PMP}$  está ligado al eje  $j_S$  del  $SE_S$  y es positivo hacia la derecha de la PMP, el eje  $Z_{PMP}$  está ligado al eje  $k_U$  del  $SE_U$  y es positivo hacia abajo de la PMP.

Se asume la existencia de un plano horizontal  $HP$ , sobre la cual se desplaza la PMP. El cuerpo en interacción directa con  $HP$  es la llanta, la figura 2.14 muestra el sistema de ejes de la llanta  $SE_W$ .

El origen  $O_W$  del  $SE_W$  está situado en el centro del área de contacto de la llanta con  $HP$  (conocido como *huella de la llanta*), la llanta gira sobre el *eje de giro de la llanta*  $S_W$ , el *plano de la llanta*  $P_W$  es un plano perpendicular a el eje  $S_W$  y su intersección con  $HP$  conteniendo a  $O_W$ , da origen a  $X_W$ , que es positivo en dirección de avance de la llanta.

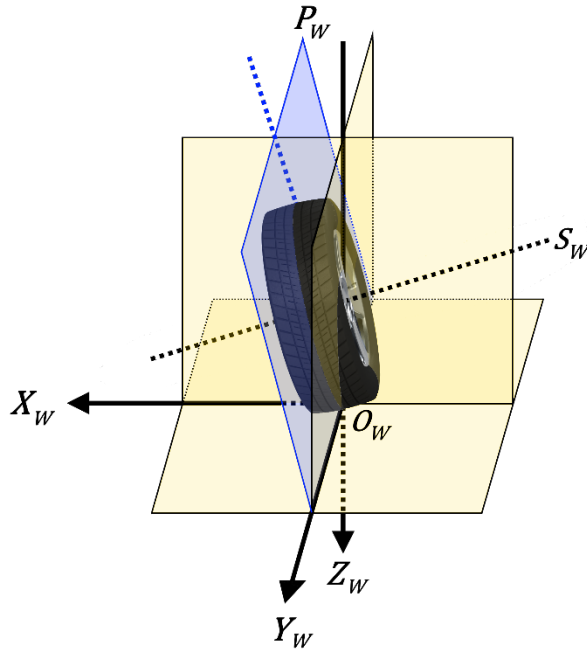


Figura 2.14: Sistema de ejes de la llanta (Cordero, 2016)

Con base en lo anterior, a continuación se definen algunos conceptos fundamentales (mostrados en las figuras 2.15 y 2.16). Debido a la ambigüedad con otros términos en idioma español, se utilizarán como identificadores los términos en inglés..

- Ángulo *Yaw* de la PMP ( $\psi_{PMP}$ ): ángulo entre  $IR_{PMP}$  (referencia inicial en  $XY_{PMP}$ ) y  $X_{PMP}$ .
- Ángulo *Pitch* de la PMP ( $\rho_{PMP}$ ): ángulo entre  $X_{PMP}$  y  $HP'$ .
- Ángulo *Roll* de la PMP ( $\varphi_{PMP}$ ): ángulo entre  $Y_{PMP}$  y  $HP'$ .

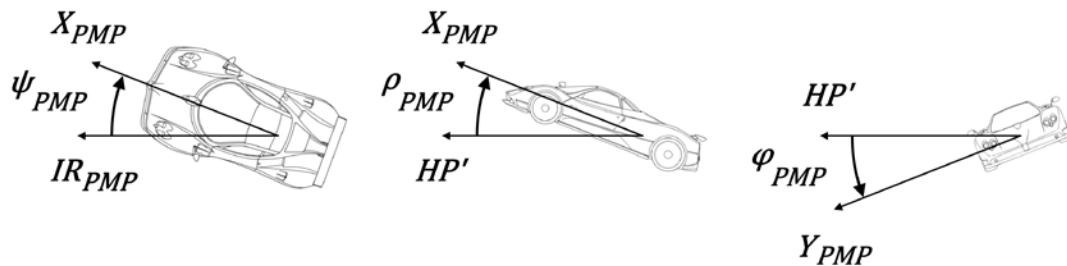


Figura 2.15: Roll, Pitch y Yaw (Cordero, 2016)

- Ángulo *Heading* de la PMP ( $\Psi_{PMP}$ ): ángulo medido en dirección horario entre  $X_{HP}$  (una referencia invariable en  $HP$ ) y  $\overrightarrow{X_{PMP}^{HP}}$  (proyección en  $HP$  de  $X_{PMP}$ ).
- *Route course* de la PMP ( $RC_{PMP}$ ): Trayectoria ideal a seguir por la PMP.
- *Proyección del Route course* de la PMP ( $\overrightarrow{RC_{PMP}^{HP}}$ ): Proyección en  $HP$  del  $RC_{PMP}$ .
- *Waypoint* del  $RC_{PMP}$  ( $WP_{RC}$ ): Punto intermedio del  $RC_{PMP}$ .
- *Proyección del Waypoint* del  $RC_{PMP}$  ( $\overrightarrow{WP_{RC}^{HP}}$ ): Proyección en  $HP$  del  $WP_{RC}$ .
- *Track* de la PMP ( $TRK_{PMP}$ ): Trayectoria real seguida por la PMP.
- *Proyección del Track* de la PMP ( $\overrightarrow{TRK_{PMP}^{HP}}$ ): Proyección en  $HP$  de  $TRK_{PMP}$ .
- Ángulo *Steer interno* ( $\sigma_{IW}$ ): ángulo medido en dirección horario entre  $\overrightarrow{X_{PMP}^{HP}}$  y  $X_{IW}$ .
- Ángulo *Steer externo* ( $\sigma_{OW}$ ): ángulo medido en dirección horario entre  $\overrightarrow{X_{PMP}^{HP}}$  y  $X_{OW}$ .

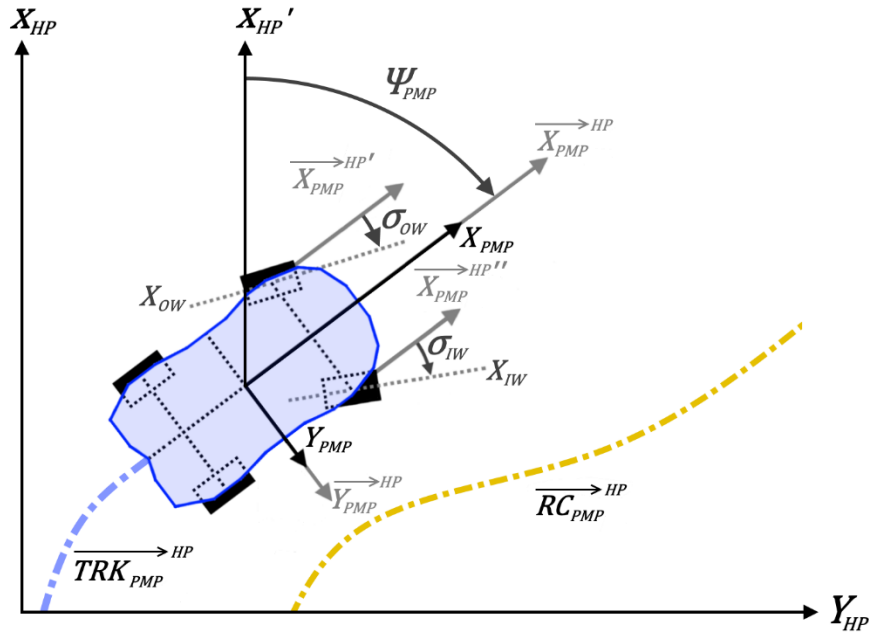


Figura 2.16: Conceptos fundamentales (Cordero, 2016)

Un vehículo está compuesto por numerosos sistemas y subsistemas sin embargo para el propósito de la presente tesis, se consideraron principales: masa no suspendida, suspensión, dirección y sistema de propulsión.

### 2.3.2 Masa no Suspendida

Los elementos de un vehículo que no están soportados por los elementos elásticos principales de la suspensión (resortes, barra de torsión, etc.) constituyen la *masa no suspendida* (USM) (Happian-Smith, 2002).

Uno de ellos, la llanta, es donde se originan un gran número de fuerzas que actúan en el vehículo: por medio de la interacción con la superficie de desplazamiento proveen las fuerzas

de aceleración, tracción, frenado, fuerza en curva para la maniobrabilidad, así como las fuerzas y par mecánico que proporcionan control y estabilidad del mismo (Milliken & Milliken, 1995).

A continuación, se detallan las fuerzas y efectos involucrados para desplazar al vehículo longitudinalmente, seguir una trayectoria curva y las consecuencias de inclinar la llanta en diferentes ejes.

- **Slip Angle**

Las llantas son elásticas a torsión, por lo tanto, al momento de girarlas la huella de la llanta se resistirá a este movimiento gracias a la fricción elástica entre el camino y el material de la llanta. El siguiente efecto se presenta: la huella se distorsionará y su desplazamiento angular será menor que el de  $X_W$ . La diferencia angular entre ambos  $\zeta$ , mostrada positiva en la figura 2.17, es conocida como *slip angle* (Smith, 1978).

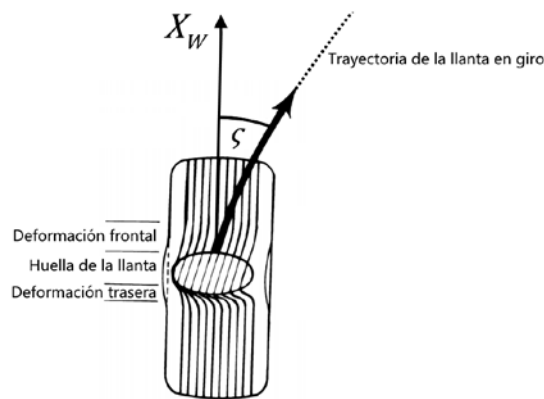


Figura 2.17: Slip angle (Smith, 1978)

- **Fuerzas Laterales**

Poco después de que un vehículo gira las llantas para seguir una trayectoria curva, la *fuerza centrífuga* aparentemente lo intenta sacar de la curva. Esta fuerza, presente debido a efectos de inercia, es transmitida a la llanta provocando una deflexión lateral.

Esta deflexión lateral en las llantas da origen a una fuerza elástica conocida como *fuerza lateral* o *fuerza de viraje*, la cual se origina en  $O_W$  y es perpendicular a  $X_W$ . Es la causa de que un vehículo vire y puede ser vista como la capacidad de la llanta para resistir el deslizamiento al seguir una trayectoria curva (Santos R. d., 2014).

Debido a su estrecha relación con el slip angle las fuerzas laterales se pueden ver como resultado del slip angle: cuando una llanta se encuentra en movimiento rectilíneo y es girada para seguir una trayectoria curva, se crea un slip angle en ella que provoca una fuerza lateral, esta fuerza gira el vehículo en dirección de la trayectoria curva; o bien el slip angle como resultado de las fuerzas laterales: cuando un vehículo es sometido a aceleración centrífuga, la fuerza lateral provoca una reacción en la llanta, generando un slip angle (Milliken & Milliken, 1995).

La relación entre el slip angle y la fuerza lateral, influencia sobremanera en el comportamiento dinámico del vehículo, ya que a partir de cierto valor en el slip angle, cualquier incremento en el mismo provocará que la fuerza de fricción transmitida entre la llanta y la superficie de

desplazamiento disminuya junto con la fuerza de viraje, provocando una pérdida de tracción y consecuentemente, deslizamiento (Smith, 1978).

- **Ángulo Camber**

El ángulo  $\kappa$  formado entre  $XZ_W$  y  $P_W$ , es conocido como ángulo *camber*. Por convención, se denota *camber* negativo si la parte superior se inclina hacia el interior en relación al vehículo y positivo si es hacia el exterior (Rill, 2007), como se muestra en la figura 2.18.

El *camber* influencia la dinámica del vehículo al generar fuerzas laterales en dirección de la inclinación, con *camber* ligeramente negativo se alcanza la máxima fuerza de viraje (Milliken & Milliken, 1995), mientras que con *camber* positivo se requiere menos fuerza para girar a bajas velocidades. La mayoría de vehículos de calle tienen *camber* ligeramente positivo (Fenske, 2012).

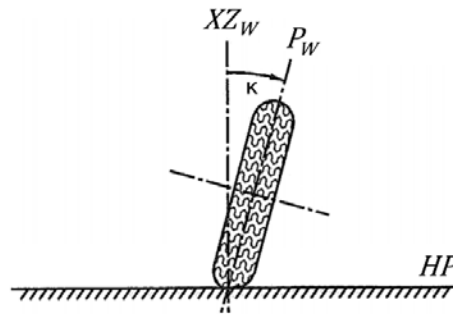


Figura 2.18: Ángulo *camber* (Milliken & Milliken, 1995)

- **Fuerzas Longitudinales**

Para poder acelerar y frenar un vehículo se deben generar las siguientes *fuerzas longitudinales*, similares en cierto sentido a las fuerzas laterales, ya que involucran la elasticidad de las llantas y las fuerzas de fricción con la superficie de desplazamiento (Milliken & Milliken, 1995).

- **Fuerza de Tracción (Aceleración)**

Al girar una llanta por medio de un par mecánico  $M_T$  sobre una superficie (*llanta accionada*), se produce una reacción: la *fuerza de tracción*  $F_T$ . Esta fuerza provoca una transferencia de carga a la parte trasera del vehículo girándolo positivamente en el eje pitch, deformando las llantas y comprimiendo el patrón de las huellas, induciendo un movimiento de avance con respecto al eje de la llanta.

- **Fuerza de Frenado**

La situación es la misma que en la fuerza de tracción, pero el par mecánico aplicado es en dirección contraria provocando una *fuerza de frenado*  $F_B$ . En este caso la transferencia de carga es a la parte trasera del vehículo girándolo negativamente en el eje pitch, deformando las llantas y comprimiendo el patrón de las huellas, induciendo un movimiento de retroceso con respecto al eje de la llanta.

### 2.3.3 Suspensión

La suspensión tiene gran influencia en la dinámica del vehículo al encargarse de la interacción entre la superficie de desplazamiento, la USM y el resto del vehículo.

- **Configuraciones de la Suspensión**

Dos de los tipos más utilizados en los vehículos modernos son:

- **MacPherson**

Utiliza un solo brazo de suspensión como elemento guía y una pieza llamada *strut* que combina un resorte, un amortiguador y además funciona como elemento estructural unido directamente al chasis, mostrado en la figura 2.19. Esto reduce el espacio requerido, así como el peso y costo, siendo el último factor una de las principales causas por las que este tipo de configuración sea utilizada en la mayoría de vehículos de calle (Fenske, 2012).

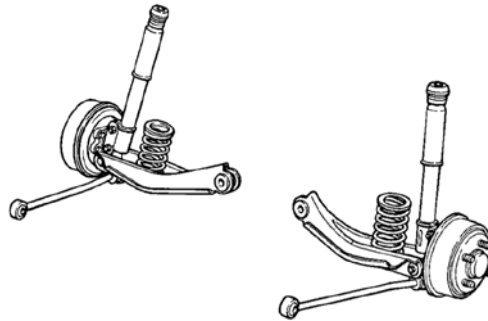


Figura 2.19: Suspensión McPherson Strut (Gillespie, 1992)

- **Double Wishbone (A-Arm)**

Utiliza dos brazos de suspensión (con forma similar a una letra A) como elementos guía. La figura 2.20 muestra 3 maneras de configurarlos (Smith, 1978):

1. Brazos paralelos de misma distancia: debido a que se forma un paralelogramo, con el movimiento vertical no hay cambio del ángulo camber. Con movimiento de roll en el vehículo las llantas con mayor carga aumentan su ángulo de camber.
2. Brazos paralelos de diferente distancia: haciendo los brazos superiores de menor longitud que las inferiores, se logra camber negativo con el movimiento vertical. Con movimiento de roll el aumento de camber en las llantas con mayor carga es mucho menor pero las llantas con menor carga disminuyen demasiado el camber.
3. Brazos no paralelos de diferente distancia: al inclinar los brazos superiores hacia la línea central del vehículo en sentido descendente se logra reducir el Camber positivo conforme incrementa el ángulo de roll del vehículo.

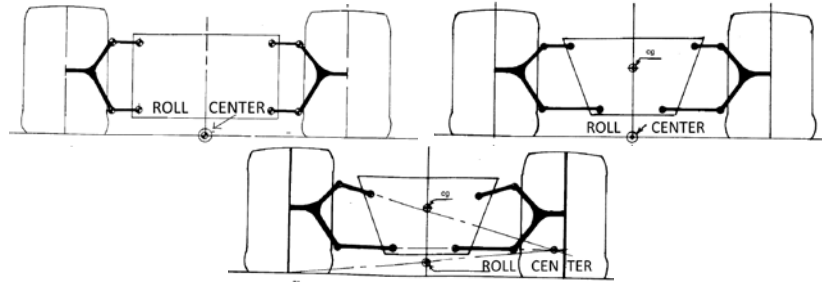


Figura 2.20: Configuraciones 1, 2 y 3 de brazos de suspensión (Smith, 1978)

### 2.3.4 Dirección

Para poder asumir que no ocurre deslizamiento lateral en las llantas, es necesario que todas las llantas sigan arcos con el mismo centro geométrico (Smith, 1978), llamado *centro de rotación*. Una solución viable es el principio de dirección *Ackerman*, que permite ajustar ángulos independientes a las llantas de dirección con respecto a ejes individuales, incrementando la estabilidad del vehículo y disminuyendo el espacio necesario en contraste a virar las llantas con respecto a un eje común (Rayner, 2004).

Sin embargo, la presencia de *slip angle* modifica el centro de rotación influyendo en el desempeño del vehículo (Smith, 1978) y es por ello que, de acuerdo a la situación, diferentes configuraciones son utilizadas:

Para bajas aceleraciones laterales, como las presentadas en vehículos de calle, *Ackerman* normal (la OW de dirección tiene un menor ángulo de viraje que la IW) es la más utilizada, ya que al seguir círculos concéntricos se garantiza el libre giro de las llantas sin presentar *slip angle* significativo.

Con altas aceleraciones laterales todas las llantas presentan *slip angle* relevantes pero las internas a la curva son sometidas a cargas mucho menores que las externas. Dado que a menores cargas se requiere de un menor *slip angle* para obtener la máxima fuerza lateral, de mantener una geometría *Ackerman* normal, la IW estaría siendo sometida a un *slip angle* mayor del necesario para alcanzarla. Esto provoca que la llanta friccione sobremanera con el suelo, desgastándola en mayor medida e incrementando la temperatura, disminuyendo también la velocidad del vehículo.

Por esta razón en vehículos de carrera es común utilizar dirección paralela o *Ackerman* inverso (Milliken & Milliken, 1995).

La figura 2.21 muestra las configuraciones mencionadas anteriormente.



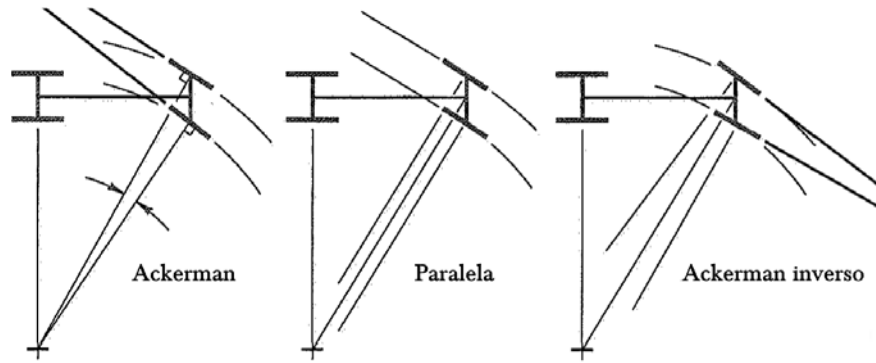


Figura 2.21: Configuraciones del mecanismo de dirección (Milliken & Milliken, 1995)

- **Toe - In y Toe - Out**

La alineación de las llantas juega un papel importante en el comportamiento dinámico del vehículo (Smith, 1978):

Se conoce como *toe-in* (o *toe positivo*) cuando la distancia entre la parte frontal de un par de llantas es menor a la distancia entre la parte trasera de las mismas.

Con esta configuración, ante la presencia de una perturbación lateral, la llanta cercana a la perturbación permanecerá igualmente orientada pero la llanta con mayor carga virará e incrementará su slip angle, al estar originalmente con Toe negativo, el vehículo tenderá a seguir la trayectoria original. Un vehículo con Toe-In tendrá mejor estabilidad, pero mayor dificultad para virar.

*Toe-out* (o *toe negativo*) es cuando la distancia entre la parte frontal de un par de llantas es mayor a la distancia entre la parte trasera de las mismas.

Al ocurrir una transferencia de carga en el vehículo debido a una perturbación lateral, el evento virará la llanta con la mayor carga, incrementando su slip angle, al permanecer en la misma posición la llanta más cercana a la perturbación, el vehículo tiende a virar en dirección de la última. Un vehículo con toe-out será más inestable pero la respuesta en curva será mayor (mostrado en la figura 2.22).

Por lo anterior, la mayoría de vehículos de calle tendrán configuración toe-in mientras que los de carrera toe-out (inTrax, 2016).

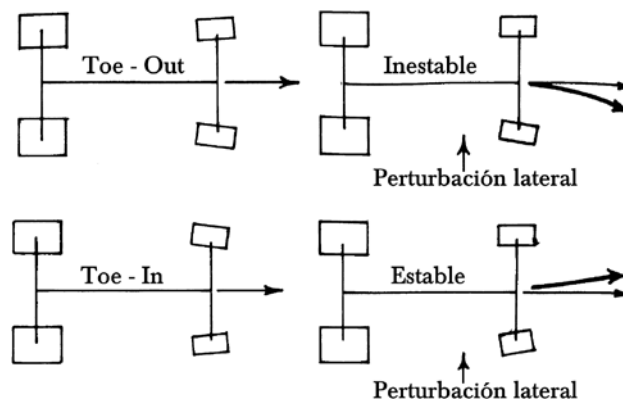


Figura 2.22: Efecto del ángulo toe en la estabilidad de un vehículo (Smith, 1978)

### 2.3.5 Sistema de Propulsión

La mayoría de vehículos comerciales son impulsados por un único *motor de combustión interna* (ICM), mientras que en los vehículos de modelismo también es común que sean impulsados por un único *motor eléctrico* (ME). El *tren motriz*, es el encargado de transmitir el movimiento del motor hacia las llantas accionadas, con la finalidad de generar las fuerzas de tracción necesarias para que un vehículo siga una trayectoria. Una representación general del sistema de propulsión se muestra en la figura 2.23.

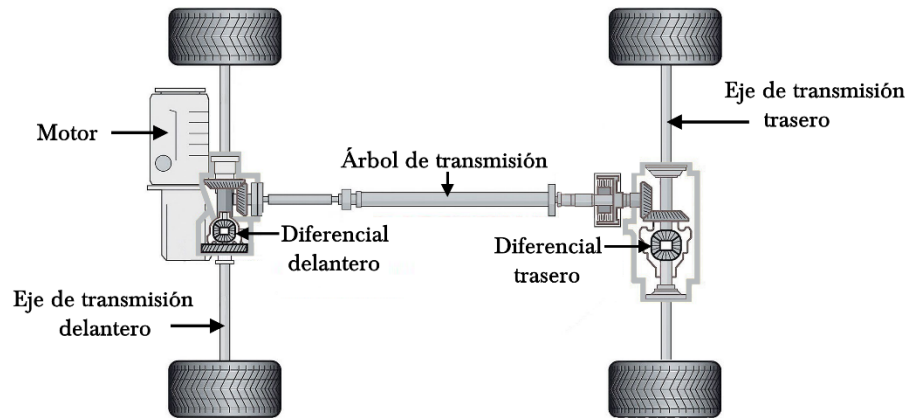


Figura 2.23: Sistema de propulsión (Pratte, 2010)

Es claro que en una trayectoria curva la OW recorre más distancia que la IW y por ello su velocidad angular debe ser mayor. Esto no presenta problemas para las llantas no accionadas o de acción individual (ya que giran independientemente) pero en el caso de llantas conectadas al tren motriz se necesita transmitir la potencia a ambas llantas y a la vez permitir diferentes velocidades angulares entre ellas.

Un *diferencial*, mostrado en la figura 2.24, es el componente más utilizado para este fin y se comporta como un elemento rígido cuando el vehículo se traslada en línea recta, proporcionando la misma velocidad en ambas, pero en trayectorias curvas permite la diferencia de velocidades (Robert Bosch GmbH, 2002). Algunos vehículos eléctricos de competición cuentan con un motor en cada llanta y por lo tanto la distribución se puede lograr directamente con cada motor sin la necesidad del diferencial (Racing, 2016).

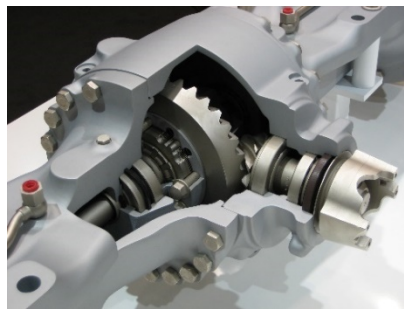


Figura 2.24: Diferencial de engranes (Wayne's Transmission, s.f.)

## 2.4 Ejemplos de Vehículos Autónomos

En los últimos años ha incrementado el interés por el desarrollo de vehículos autónomos, mediante competencias, desarrollos institucionales y corporativos.

En 2004, la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa (DARPA), convocó el DARPA Grand Challenge (DGC): una carrera de vehículos autónomos con una trayectoria de más de 200 [km], situada en el desierto de Nevada.

El primer año de competencia ningún vehículo logró completar el circuito, siendo *Sandstorm* (Universidad Carnegie Mellon) el que recorrió la mayor distancia: 12.07 [km]. El vehículo ganador de la segunda iteración de la competencia en 2005 fue *Stanley* (Universidad de Stanford). Dos años después tuvo lugar el DARPA Urban Challenge (DUC), una nueva iteración del DGC, pero situado en un ambiente urbano, simulando intersecciones, semáforos, cruces de peatones, entre otros. El vehículo *Boss* (Universidad Carnegie Mellon) fue el ganador de ésta competencia (DARPA, 2014).

Los vehículos se muestran en la figura 2.25.



Figura 2.25: Stanley (Thrun, et al., 2006) y Boss (Tartan Racing, 2007)

Algunos de los desarrollos en vehículos autónomos, iniciados a partir de la participación en DGC y DUC, o por razones comerciales son:

- **AutoNOMOS Labs**

En la Universidad Libre de Berlín, desde 2006 *AutoNOMOS Labs* al mando del Dr. Raúl Rojas, ha desarrollado vehículos autónomos funcionales (figura 2.26) tanto en ambientes urbanos como en carretera, logrando recorrer exitosamente viajes de hasta 2,400 [km] continuos de manera autónoma (Autonomos Labs, 2015). Participaron en el DUC, alcanzando el nivel de semifinales.



Figura 2.26: Vehículo Made In Germany (Autonomos Labs, 2015)

- **Waymo**

El proyecto de un vehículo autónomo de Google comenzó en 2009 y fue integrado en un inicio por desarrolladores de los equipos ganadores de los DGC y DUC. Consta de una flotilla de vehículos autónomos (modelos mostrados en la figura 2.27) con más de 3.218 millones de kilómetros acumulados en pruebas, la mayoría en entornos urbanos (Waymo, 2017)



Figura 2.27: Flotilla Waymo (Waymo, 2017)

- **Tesla**

La compañía de vehículos eléctricos ha implementado un sistema funcional de navegación asistida en sus últimos vehículos comerciales (modelos mostrados en la figura 2.28), e incluye en ellos el hardware necesario para una futura navegación autónoma (Tesla Inc., 2017).



Figura 2.28: Tesla Model S (Tesla Inc., 2017)

Los vehículos anteriormente mencionados utilizan tecnología LiDAR, GPS, sensores de rumbo, entre otros, montados en una plataforma mecánica robusta.

## 2.5 Resumen

Se plantearon las características que un vehículo autónomo debe tener, tanto en la parte autónoma (obtener información del entorno por medio de arreglos de sensores, procesarla para encontrar su posición actual en el entorno, plantear objetivos y planear los movimientos necesarios para cumplirlos), como la parte física (una plataforma robusta y ejecución de los movimientos planeados por medio de actuadores instalados en ella). Se dio mayor importancia a aquellas que serán implementadas en el AUTONAV.

## Capítulo 3

# Creando una Solución en Vehículos Autónomos

*It's amazing to me that we let humans drive cars...  
It's a bug that cars were invented before computers.*  
—Eric Schmidt

### 3.1 Introducción

En este capítulo se detalla el problema a resolver, la propuesta de solución planteada en cada uno de los módulos, alcances del proyecto y el procedimiento a seguir para completarlo exitosamente.

### 3.2 Definición del Problema

Existen sensores para obtener información del ambiente, módulos para procesarla, plataformas de vehículos y actuadores, pero no se cuenta con un sistema integrado para navegar un entorno, por lo que se requiere diseñar un sistema de navegación autónomo que adquiera información del ambiente, analice dicha información, tome decisiones para poder seguir una trayectoria y sea implementado en un vehículo terrestre de modelismo. La escalabilidad a un vehículo terrestre de tamaño real debe ser factible.

La evasión de obstáculos no será tratada, pues para resolver ese tema aplicado en vehículos autónomos, se necesitarían sensores que nos indiquen en todo momento y en todas direcciones la ubicación de obstáculos, es decir un sistema de percepción con al menos 208° frontales de cobertura, que es el límite de la visión humana (Stockyard Hill Wind Farm, 2009), con un sistema de procesamiento capaz de analizar los datos constantemente, lo que implaría un gran incremento en el costo.

El proyecto involucra 3 áreas de la ingeniería que en conjunto representan el enfoque de la Ingeniería Mecatrónica:

- **Mecánica**

Conocimientos de la dinámica de un vehículo, con la finalidad de implementar el NAVSYS en un vehículo a escala (VE) para posteriormente formar la PMP, y poder modificar parámetros físicos para mejorar su comportamiento dinámico, análisis y selección de los actuadores necesarios para dirigirla.

- **Eléctrica-Electrónica**

Análisis y selección de sensores en el mercado que cumplan los requerimientos establecidos, implementación del módulo de adquisición de datos y control (DAQCON), análisis y selección del sistema de alimentación.

- **Computación**

Diseño e implementación del NAVSYS, que tenga como entrada datos predeterminados y datos dinámicos del entorno, los analice y planee las acciones a seguir para dirigirse a un nuevo destino, control de los actuadores seleccionados para dirigir la PMP.

### 3.3 Propuesta de Solución

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, se desarrollará lo siguiente:

- Percepción
- Localización absoluta
- Manejo de mapas virtuales
- Planeación de movimientos
- Control de movimientos

Permitiendo así un espacio de mejora del proyecto a futuro en los campos de:

- Creación de mapas
- Evasión de obstáculos

Se terminará primero con el sistema mecánico y eléctrico-electrónico del proyecto, con la finalidad de iterar las pruebas de los algoritmos del AUTONAV directamente en la PMP, sin atrasos por la construcción.

Para ello se planearon 5 fases y será necesario completar las primeras 3 antes de continuar a la siguientes.

Debido a la obligatoria espera durante el tiempo de envío de los componentes comprados, se intercalará el trabajo de las fases 1 y 2 para evitar tiempo muerto.

La figura 3.1 detalla el proceso a seguir para el desarrollo de la solución del proyecto.

Para la toma de decisiones entre opciones, se utilizarán matrices de decisión, contenidas en el Apéndice A.

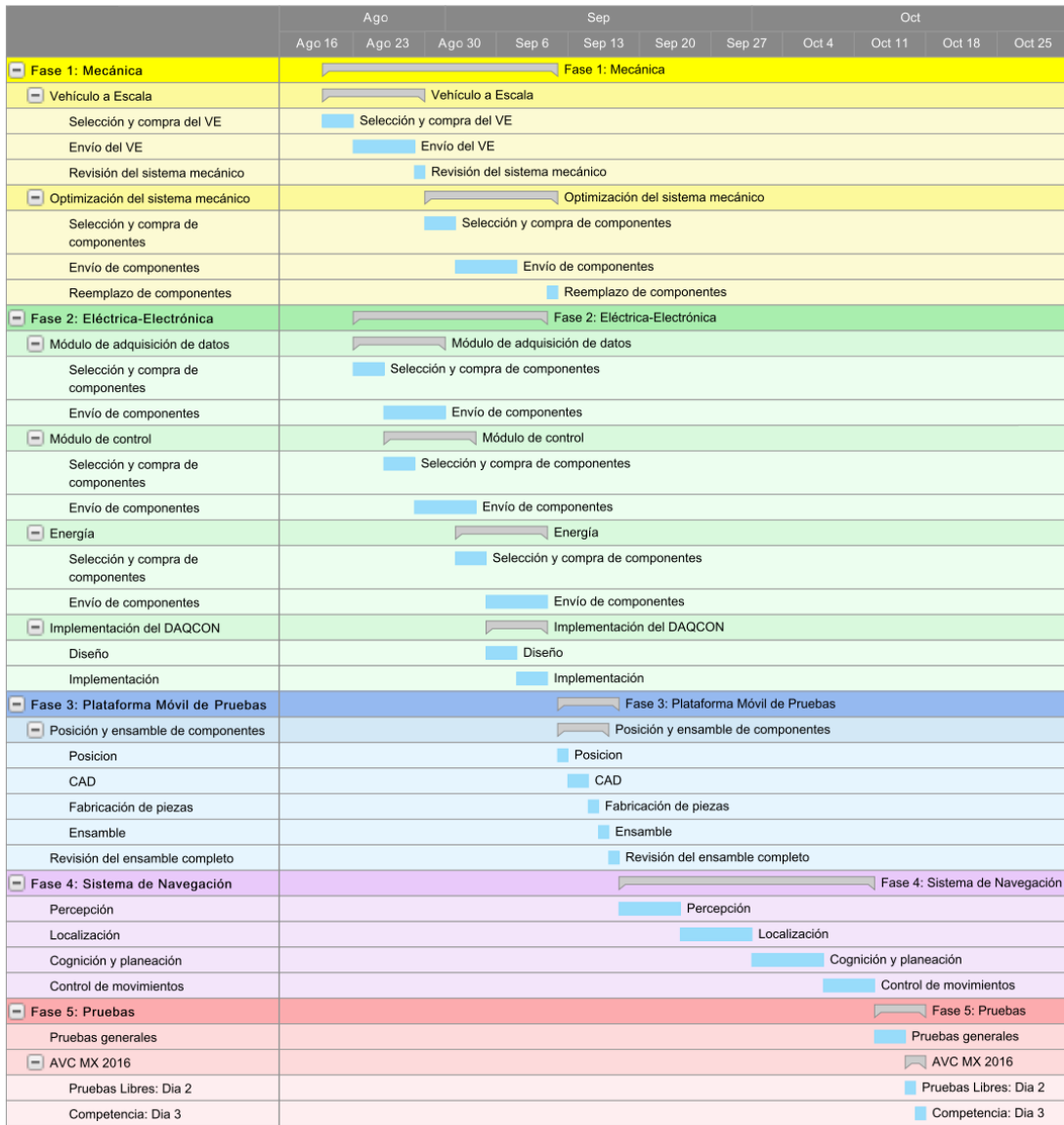


Figura 3.1: Proceso del desarrollo del proyecto

### 3.4 Resumen

Se determinó el alcance del proyecto y se estableció una propuesta de solución por medio de un plan de trabajo estructurado por 5 fases: las tres primeras desarrollan la mecánica y eléctrica-electrónica culminando en la PMP, mientras que las dos últimas constan de la programación y pruebas reales. Se asignó una distribución temporal, que permitió finalizar el proyecto a tiempo para presentarse en la Autonomous Vehicle Competition (AVC) 2016.





## Capítulo 4

# Sistema Mecánico

*I couldn't find the sports car of my dreams.  
So I built it myself.  
—Ferdinand Porsche*

### 4.1 Introducción

En este capítulo se detalla el proceso de elección y optimización del área mecánica del vehículo autónomo. Se buscó desarrollar un vehículo apegado a un vehículo real, por lo que se propuso un VE que posea los sistemas estudiados en el capítulo dos: USM, suspensión, dirección y sistema de propulsión.

### 4.2 Vehículo a Escala

Se estableció que el VE a elegir sería a escala 1/16 o 1/18 debido a las limitaciones de tamaño impuestas por la competencia en la cual se planeó probar el sistema completo. Se establecieron características por sistema (mostrados en la figura 4.2) necesarias para que el VE se asemeje a un vehículo de tamaño real. Los vehículos que cumplen las características fueron los siguientes (mostrados en ese orden en la figura 4.2):

- **Associated Electronics 1/18**  
Dimensiones [mm]: 265x143x166
- **Duratrax Vendetta 1/18**  
Dimensiones [mm]: 324x168x185
- **Traxxas Slash 1/16**  
Dimensiones [mm]: 356x185x185

Sistema	Requerimiento	Razón
USM	El modelo elegido debe contar con llantas elásticas.	Por lo visto en el capítulo 2, la elasticidad de las llantas es el origen de las fuerzas laterales y longitudinales.
Suspensión	El modelo elegido debe contar con un sistema de suspensión que almacene y disipe energía, similar al de un automóvil real.	Se busca una reacción del VE similar a un automóvil real ante las fuerzas que se generan por el desplazamiento.
Dirección	El modelo elegido debe contar con un sistema de dirección similar al de un automóvil real.	La mayoría de automóviles reales cuentan con un sistema de dirección donde las llantas delanteras viran independientemente un determinado ángulo para dirigir el vehículo (a diferencia de algunos robots autónomos que utilizan dirección diferencial).
Sistema de propulsión	El VE debe ser propulsado por un sistema de transmisión que lleve el movimiento circular de un único ME a las llantas motrices y permita su giro a diferentes velocidades por medio de diferenciales.	Disminución de costo y complejidad: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Para vehículos a escala, un ME tiene menor costo y mantenimiento que un ICM.</li> <li>• El costo por 1 [kWh] es menor en energía eléctrica (\$0.697) (CFE, 2017) que en gasolina (\$1.731) (INPC, 2017).</li> <li>• Por lo visto en el capítulo 2, es necesaria una diferencia de velocidades entre las IW y las OW para evitar deslizamiento, un solo ME y diferenciales representa un menor costo y complejidad mecánica-eléctrica que llantas accionadas independientemente.</li> </ul>

Figura 4.1: Requerimientos del VE por sistema



Figura 4.2: Opciones para el VE (AMain Hobbies, 2016)

Debido a la gran similitud de los 3 VE, se adquirió el que tiene mayores oportunidades de mejora (AMain Hobbies, 2016) debido a refacciones: Associated Electronics 1/18.

### 4.3 Revisión del Sistema Mecánico

Se inspeccionó estáticamente el VE y después se realizaron pruebas dinámicas en modo RC con los dispositivos RF incluidos cuando se compró (transmisor y receptor). Se corrió libremente en una superficie con desniveles pronunciados no mayores al 100% del tamaño de las llantas, hasta agotar la batería NiMh incluida de fábrica. A continuación, se presenta la información recabada por sistema.

### 4.3.1 USM

- **Revisión Estática:**

Las llantas son de material elástico y simulan el contener un fluido por medio de un inserto de material suave. El rin de la llanta es de plástico rígido.

Los *steering hubs* y los *wheel hubs* son de plástico rígido e interactúan directamente con el rin de las llantas direccionales y no direccionales, respectivamente. Los *caster blocks* también son de plástico rígido e interactúan directamente con los *steering blocks*. La tolerancia en cada ensamble es de aproximadamente 2 [mm] y puede provocar vibraciones innecesarias con el desplazamiento.

- **Pruebas Dinámicas:**

Las llantas se comportan de manera similar a llantas de un vehículo a tamaño real, al friccionar con la superficie no sufrieron desgaste considerable para ser primera vez que se corrió el VE.

### 4.3.2 Suspensión

- **Revisión Estática:**

El sistema es una variante de la configuración double wishbone, ya que tiene A-Arms inferiores y barras superiores (en lugar de A-Arms superiores) que conectan la USM a las torres de suspensión. Estas barras no son de longitud variable, eliminando la posibilidad de modificar el ángulo *camber* para modificar la dinámica del vehículo. Las torres de suspensión y los A-Arms son de plástico rígido.

Cuenta con 1 elemento resorte-amortiguador por cada llanta. No es miembro estructural, pero conecta los A-Arms inferiores directamente al chasis.

- **Pruebas Dinámicas:**

Los 4 brazos de suspensión inferiores (*lower A-Arms*), al friccionar con la superficie sufrieron desgaste considerable para ser primera vez que se corrió el VE, por lo que puede que se rompan con el uso. Además, se notó que a pesar de ser de plástico rígido, la geometría de las torres de suspensión provoca que bajo ciertas condiciones se flexionen, por lo que la respuesta del VE se ve disminuida.

### 4.3.3 Dirección

- **Revisión Estática:**

Las *tie-rod* (elemento que une la barra de dirección con la USM) están compuestas de una sola pieza, sin contar con un mecanismo de cambio de longitud, impidiendo ajustar fácilmente el VE a *toe-in* o *toe-out*.

El mecanismo de dirección es de plástico rígido. Por medio de un *servomotor tipo hobby* (SERVOH) y tolerancias menores a 1 [mm] entre las piezas concéntricas, vira las llantas.

- **Pruebas Dinámicas:**

La tolerancia entre las piezas concéntricas es lo suficientemente grande para que exista una zona muerta al inicio del movimiento de viraje, aproximadamente de  $10^\circ$ .

#### 4.3.4 Sistema de Propulsión

- **Revisión Estática:**

Cuenta con un único ME tipo BLDC controlado por un *controlador de velocidades electrónico tipo hobby* (ESCH), que transmite el movimiento circular por medio de engranes y bandas a dos diferenciales de engranes (delantero y trasero), que a su vez lo transmiten a cuatro llantas motrices por medio de 4 barras estilo *dogbone*, además de permitir la diferencia de velocidades entre IW y OW.

- **Pruebas Dinámicas:**

La geometría de los dogbone deja un espacio vacío de aproximadamente 2 [mm] entre la cuña del dogbone y la ranura del *differential uutmdrive*, provocando un choque innecesario entre las piezas al acelerar y frenar (*backlash*), esto puede desgastar las piezas y provoca una disminución en la respuesta del VE.

Después de 5 minutos de pruebas, la temperatura del ME era de  $77 [^\circ\text{C}]$ , sólo 3 grados por debajo del límite recomendado (Associated Electronics Inc., 2014). Sobrecalentar un motor puede disminuir la vida útil del mismo, o en el peor de los casos, quemarlo.

### 4.4 Optimización del Sistema Mecánico

Con base en la revisión del sistema mecánico y refacciones disponibles (AMain Hobbies, 2016), se propusieron mejoras por sistema. Para su aprobación, se priorizaron proporcionalmente las ventajas (mejoras relativas en rendimiento) por lo que se les asignó la métrica [1, 10] donde 10 es el máximo valor favorable, a las desventajas (precio e incremento en el peso, relativos) se les asignó la mitad a cada una, una métrica [-5, 1] donde -5 es el máximo valor desfavorable. Se fijó un umbral en 0 para asegurar que las ventajas compensen las desventajas.

Una vez realizadas las mejoras mecánicas, se corrieron pruebas dinámicas en modo RC. Nuevamente se corrió libremente en una superficie con desniveles pronunciados no mayores al 100% del diámetro de las llantas, hasta agotar la batería.

#### 4.4.1 Masa no Suspendida

- **Propuesta:**

1. Sustituir los steering blocks, wheelhubs y caster blocks por piezas de aluminio maquinadas por CNC, con la finalidad de reducir el juego existente en los ensambles.

La figura 4.3 muestra la aprobación y la figura 4.4 las piezas físicas.

Mejora propuesta	Rendimiento	Precio	Peso	Total	Resolución
Cambio de material de los steering blocks: aluminio	+7	-3	-3	+1	Aprobado
Cambio de material de los wheel hubs: aluminio	+7	-2	-3	+2	Aprobado
Cambio de material de los caster blocks: aluminio	+7	-4	-3	0	Aprobado

Figura 4.3: Aprobación de mejoras para el sistema de USM



Figura 4.4: Steering blocks, weel hubs y caster blocks

- **Resultado:**

La tolerancia entre los steering blocks y wheelhubs con los rines de la llanta se redujo aproximadamente a 1 [mm], la tolerancia entre steering blocks y caster blocks también, por lo que la probable vibración con el avance disminuirá.

## 4.4.2 Suspensión

- **Propuesta:**

1. Sustituir las barras superiores de conexión entre las torres de suspensión y la USM por tensores de longitud variable (*turnbuckles*).
2. Sustituir los A-Arms de plástico inferiores por A-Arms de aluminio.
3. Sustituir las dos torres de suspensión de plástico por torres de fibra de carbono.

La figura 4.5 muestra la aprobación y la figura 4.6 las piezas físicas.

Mejora propuesta	Rendimiento	Precio	Peso	Total	Resolución
Reemplazo de las barras superiores de conexión por turnbuckles	+8	-4	-4	0	Aprobado
Cambio de material de A-Arms inferiores: aluminio	+3	-2	-3	-2	No Aprobado
Cambio de material de torres de suspensión: fibra de carbono	+5	-4	-1	0	Aprobado

Figura 4.5: Aprobación de mejoras para el sistema de suspensión

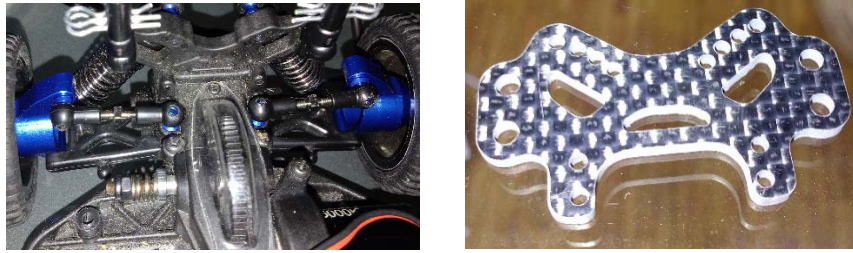


Figura 4.6: Turnbuckles y torres de suspensión

- **Resultado:**
  1. Gracias a los turnbuckles, el camber puede ser modificado fácilmente.
  2. Con las torres de fibra de carbono, se percibió cualitativamente una mejora en la respuesta del vehículo.

#### 4.4.3 Dirección

- **Propuesta:**
  1. Sustituir las tie-rods por turnbuckles.
  2. Sustituir el mecanismo de dirección por uno de aluminio maquinado por CNC, que permita virar por medio de rodamientos, con la finalidad de reducir el juego existente al inicio del movimiento de viraje.

La figura 4.7 muestra la aprobación y la figura 4.8 las piezas físicas.

Mejora propuesta	Rendimiento	Precio	Peso	Total	Resolución
Reemplazo de tie-rod por turnbuckles	+7	-2	-4	+1	Aprobado
Cambio de material de mecanismo de dirección: aluminio	+10	-4	-3	+3	Aprobado

Figura 4.7: Aprobación de mejoras para el sistema de dirección



Figura 4.8: Turnbuckles y mecanismo de dirección

- **Resultado:**
  1. Gracias a los turnbuckles, se puede ajustar fácilmente a toe-in o toe-out.
  2. Con el nuevo mecanismo de dirección, se eliminó por completo la zona muerta al inicio del movimiento de viraje.

### 4.4.5 Sistema de Propulsión

- **Propuesta:**

1. Sustituir los dogbones por constant velocity drives (CVD), que eliminan el backlash y tienen mayor rango de operación (MSUK, 2013).
2. Agregar un disipador de calor en el motor junto con un ventilador con la finalidad de disminuir la temperatura.

La figura 4.7 muestra la aprobación y la figura 4.8 las piezas físicas.

Mejora propuesta	Rendimiento	Precio	Peso	Total	Resolución
Reemplazo de dogbones por CVD	+8	-5	-2	+1	Aprobado
Disipador de calor	+10	-2	-5	+3	Aprobado
Ventilador	+4	-2	-3	-1	No aprobado

Figura 4.9: Aprobación de mejoras para el sistema de propulsión



Figura 4.10: CVD y disipador de calor

Además, el VE cuenta con dos atenuadores de impacto (frontal y trasero), debido a que no tendrá modalidad de reversa se quitó el atenuador trasero para reducir piezas y facilitar el montaje de componentes (para acceder a la suspensión trasera es necesario removerlo) el delantero se mantuvo.

## 4.4 Resumen

Se seleccionó un vehículo que cumple con todas las necesidades planteadas y funciona como representación de un vehículo real. Algunos componentes originales del VE fueron reemplazados con la finalidad de mejorar la mecánica del vehículo. Como resultado, se obtuvo una plataforma mecánica robusta, sobre la cual se monta la electrónica.





## Capítulo 5

# Sistema Eléctrico-Electrónico

*It is not a dream.  
It is a simple feat of scientific electrical engineering.*  
—Nikola Tesla

## 5.1 Introducción

El sistema eléctrico-electrónico se dividió en 3 ramas:

- **Módulo de Adquisición de Datos (DAQ)**

Consta de los sensores y sus circuitos necesarios para su funcionamiento.

- **Módulo de Control (CON)**

Consta del sistema que servirá como controlador de los actuadores con base en la programación y datos adquiridos de los sensores. Incluye la interfaz de interacción.

- **Módulo de Energía (PWR)**

Consta de las baterías a utilizar y distribución de energía para DAQ, CON y motores. Incluye el ESCH.

En este capítulo se detallan cada una de ellas, se presenta la selección de componentes y fabricación de circuitos.

## 5.2 Módulo de Adquisición de Datos

De acuerdo al alcance mencionado en el capítulo 3, la principal función de nuestra tarea de percepción será obtener información para la tarea de localización.

Para la localización absoluta, se propusieron sensores exteroceptivos, asistidos por sensores propioceptivos, que nos ayuden a calcular el heading y la posición con respecto a sistemas de referencia externos.

Para el heading con respecto a un sistema de referencia externo, se decidió usar un MAG asistido por una unidad de medición inercial (IMU). Por su magnitud, el campo magnético de la Tierra tendrá mayor influencia en él, por lo que será utilizado para encontrar el norte magnético del planeta y estimar el ángulo de heading referido a él.

Se propusieron los siguientes módulos MAG:

- Memsic MMC3140 (MEMSIC Inc., 2010)
- Freescale MAG3110 (Freescale Semiconductor Inc., 2013)
- Honeywell HMC5883L (Honeywell International Inc., 2010)
- Honeywell HMC6343 (Honeywell International Inc., 2014)

Con base en la matriz A.1 del apéndice A, se seleccionó el HMC5883L y se comunicará con el CON por medio de I<sup>2</sup>C. Se muestra junto con su sistema de referencia local ( $SE_{HMC}$ ) en la figura 5.1.

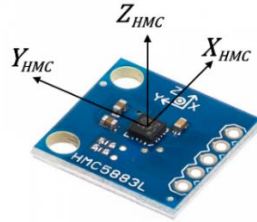


Figura 5.1: MAG Honeywell HMC5883L (Jaycon Systems LLC, 2016)

Se utilizará la IMU para calibrar los errores del MAG que se presenten al ser inclinado.

Se propusieron los siguientes módulos IMU:

- ST LSM6DS3 (ST Microelectronics N.V., 2016)
- Invensense MPU-6050 (Invensense Inc., 2013)
- SF SEN-10121 (Sparkfun Electronics, 2016)

Con base en la matriz A.2 del apéndice A, se seleccionó el MPU6050 y se comunicará con el CON por medio de I<sup>2</sup>C.

Se muestra junto con su sistema de referencia local ( $SE_{MPU}$ ) en la figura 5.2.

Debido a que la IMU está compuesta por el GYRO y el ACCEL,  $X_{MPU} = X_{ACCEL} = X_{GYRO}$ ,  $Y_{MPU} = Y_{ACCEL} = Y_{GYRO}$ ,  $Z_{MPU} = Z_{ACCEL} = Z_{GYRO}$ .

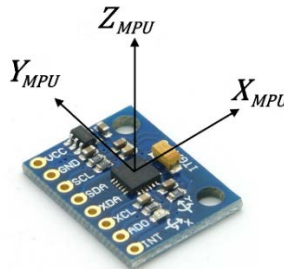


Figura 5.2: IMU MPU6050 (HAOYU Electronics, 2016)

Para la posición en un sistema de referencia externo, se propuso un sistema GNSS ya que nos puede indicar nuestras coordenadas a nivel global.

Con base en la matriz A.3 del apéndice A, se decidió utilizar un módulo GPS y se propusieron las siguientes opciones:

- Adafruit Ultimate GPS Module (Adafruit Industries, 2016)
- Ublox Neo-6M (U-blox Holding AG, 2011)
- Venus GPS (SkyTraq Technology Inc., 2011)
- EM-506 (Globalsat Technology Corp., 2013)

Con base en la matriz A.4 del apéndice A, el módulo seleccionado fue el Adafruit Ultimate GPS Module y se comunicará con el CON por comunicación serial (TX/RX). Se muestra en la figura 5.3.

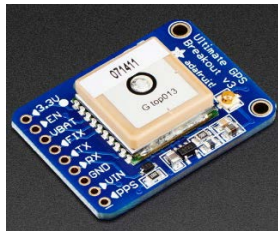


Figura 5.3: Adafruit Ultimate GPS Module (Adafruit Industries, 2016)

## 5.3 Módulo de Control

Es necesaria la inclusión de una *unidad de procesamiento* que reciba los datos del DAQ, los analice, planee las acciones a seguir y envíe las instrucciones necesarias a los actuadores. Se decidió usar un *microcontrolador* (MCU) debido a que es un sistema que incluye la unidad de procesamiento, *memoria* y *pines generales de entrada/salida* (GPIO).

- **Interfaz**

Es conveniente poder interactuar con el MCU sin la necesidad de una computadora, por lo que se necesita una pantalla para mostrar información, 4 botones (MODE, SET, START, RESET) y 4 LED de estado.

Se propusieron las siguientes pantallas:

- Módulo LCD 16x2
- Módulo LCD 20x4

Con base en la matriz A.5 del apéndice A, la pantalla seleccionada fue el módulo LCD 20x4.

De los 16 pines que tiene, 11 están destinados para su comunicación, sin embargo, es posible utilizar sólo 8 y así disminuir el número de GPIO a usar (Fried, Wiring a Character LCD, 2015), por lo que se diseñó y fabricó un adaptador, con un resistor variable incluido para modificar el contraste de la pantalla. La pantalla y el adaptador se muestran en la figura 5.4

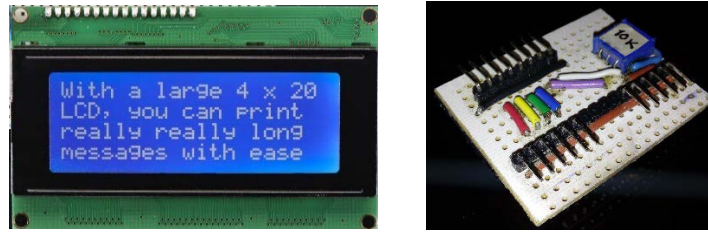


Figura 5.4: Display LCD 20x4 (Adafruit Industries, 2016) y adaptador 16x8 (Cordero, 2016)

- **Microcontrolador**

El MCU debe recibir la información del DAQ por comunicación I<sup>2</sup>C (IMU y MAG) y comunicación serial (GPS), analizará la información, y controlará el SERVOH y el ESCH por medio de 2 pines con capacidades PWM, además necesita 3 pines digitales para conocer el estado actual de los botones, 2 pines digitales para controlar los LED de estado y 8 pines digitales para comunicarse con el módulo LCD.

La limitante del número de pines en un MCU puede ser sorteada por medio de un *multiplexor* que conmute las líneas, sin embargo, se considera inconveniente agregar más componentes al sistema cuando pueden ser evitados con un MCU que tenga el número de pines requeridos.

Se propusieron los siguientes MCU:

- Arduino Uno R3 (Arduino AG, 2016)
- Arduino Mega 2560 R3 (Arduino AG, 2016)
- Texas Instruments MSP430G2553 (Texas Instruments Inc., 2016)
- Intel Galileo GEN2 (Arduino AG, 2016)

Con base en la matriz A.6 del apéndice A, el MCU seleccionado fue el Arduino Mega 2560 R3, mostrado en la figura 5.5.



Figura 5.5: MCU Arduino Mega 2560 R3 (Reichelt Elektronik GmbH & Co., 2016)

Por último, hay que notar que el Arduino Mega 2560 opera con niveles lógicos de 5 [V] pero el HMC5883L y el MPU6050 operan con niveles lógicos de 3.3 [V], por lo que es necesario agregar un *convertidor de niveles lógicos* (LLC) bidireccional para la comunicación I<sup>2</sup>C entre del DAQ y el CON.

El LLC utilizado fue el BOB-12009, mostrado en la figura 5.6.

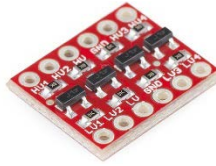


Figura 5.6: LLC BOB-12009 (Sparkfun Electronics, 2016)

## 5.4 Energía

Se decidió utilizar baterías recargables (BATT) de Polímero de Litio (LiPo), debido a que a largo plazo representan un menor gasto a baterías de un solo uso y tienen mayor densidad energética que las baterías NiMh.

Debido a que los componentes funcionan con diferentes niveles de voltaje, se necesita una distribución de energía adecuada. Además, la alimentación y señal de control para el ME, es por medio del ESCH.

Para los requerimientos de la BATT: voltaje ( $V_{BATT}$ ), *tasa de descarga* ( $TD_{BATT}$ ), y *capacidad* ( $C_{BATT}$ ), se analizó voltaje y corriente continua de operación de los principales componentes, mostrados en la figura 5.7

Componente	Voltaje de operación [V]	Corriente de operación [mA]
XPS Micro ESC (Associated Electronics Inc., 2014)	4.8 – 8.5	20,000 (máx. 50,000)
SERVOH XP1016 (Associated Electronics Inc., 2016)	5	200 (máx. 500)
Arduino Mega 2560 (Arduino Forum, 2010)	6-20	1,000 (MAX)
MPU-6050 (Invensense Inc., 2013)	2.3-3.5	3.9
HMC5883L (Honeywell International Inc., 2010)	2.16 – 3.6	0.1
3 Super-bright LED (China International Co., 2011)	3	60
MTK3339 GPS (GlobalTop Technology Inc., 2011)	3.3 - 5	25
LCD 20x4 (Tinsharp Industrial Co., 2009)	4.5 – 4.9	180

Figura 5.7: Voltaje y corriente de operación de los componentes

Se realizó la siguiente distribución eléctrica a los componentes (por corriente consumida y similitudes en voltaje):

Alimentar el ESCH y el MCU de la misma BATT, por lo que  $V_{BATT} = 6 - 8.5$  [V]. Debido a que el ESCH y el SERVOH están mecánicamente fijos a la misma zona del chasis del VE, y a que el primero cuenta con un *circuito eliminador de baterías* (BEC) interno que entrega 5 [V] y máximo 1000 [mA] dedicado a la alimentación de componentes (normalmente un SERVOH y un receptor), lo utilizaremos para alimentar el XP1016.

El MPU-6050 y el HMC5883L pueden ser alimentados por 3.3 [V], y juntos consumen aproximadamente 4 [mA], por lo que se energizarán de la línea 3.3 [V] del MCU que puede proporcionar máximo 40 [mA], los 3 Super-bright LED serán alimentados directamente de 3 pines digitales del MCU.

El GPS y la LCD pueden ser alimentados por 5 [V] y juntos consumen aproximadamente 205 [mA], por lo que serán alimentados por el pin de 5 [V] del MCU, que puede suministrar hasta una corriente de 800 [mA].

Por último, pensando en la posibilidad de añadir componentes con mayor consumo de corriente en un futuro, con base en la matriz A.7 del apéndice A, se decidió agregar al sistema un regulador conmutado LM2596S, mostrado en la figura 5.8, que entrega 1.2 – 37 [V] a máximo 3000 [mA] y la posibilidad de seleccionar la fuente de alimentación (línea de 5 [V] del MCU o la salida del regulador conmutado).



Figura 5.8: Regulador conmutado LM2596S (HeTPro, 2016)

Por lo anterior, se decidió utilizar una BATT con  $V_{BATT} = 7.4$  [V] y dimensiones menores a 105 x 35 x 30 [mm], debido a limitantes físicas del VE. Se consideró el máximo consumo de corriente de los componentes (modo instantáneo y continuo) con un *factor de seguridad*  $FS=1.3$ , en el cálculo de la  $TD_{BATT}$  mínima necesaria para evitar que la BATT se dañe permanentemente.

Con base en la matriz A.8 del apéndice A, la BATT seleccionada fue Hobbyking Zippy Compact,  $V_{BATT} = 7.4$  [V],  $C = 1,800$  [mAh] y  $TD_{BATT} = 40 - 50$  C (Hobbyking, 2016)



Figura 5.8: BATT Zippy Compact (Hobbyking, 2016)

Considerando un consumo aproximado de 21,000 [mA] por todos los componentes en modo continuo, una batería tendría duración de 5.14 minutos, es decir relativamente baja si se planea realizar pruebas en un día completo. Considerando una tasa de carga a máximo 1C y una proporción 1:4 entre pruebas y pausas, se propuso adquirir 3 BATT.

## 5.5 Implementación del DAQCON

Por claridad en la clasificación del sistema eléctrico-electrónico, el DAQ y el CON fueron considerados módulos separados, sin embargo, para facilitar la implementación física fueron tratados como un solo módulo, el DAQCON. Debido a que el MCU a utilizar fue un Arduino

Mega 2560 R3, se decidió fabricar una placa apilable (*shield*) para montar algunos componentes del DAQCON. La figura 5.9, muestra las reglas para la implementación de la shield:

Componente	Regla	Razón
IMU	En la parte central de la shield. El eje $X_{MPU}$ será coincidente con el eje $X_{PMP}$ .	Debe estar posicionada lo más cercano al CM de la shield, que a su vez estará posicionado lo más cercano al CM del VE (Stanley, Accelerometer placement – where and why, 2012)
MAG	No incluido en la shield. Se insertará un conector en el borde dirigido hacia la zona delantera del VE. El eje $X_{HMC}$ será coincidente con el eje $X_{PMP}$ .	Las mediciones del MAG pueden ser afectadas por el campo magnético de otros componentes electrónicos, producto de su funcionamiento, por lo que debe estar lo más alejado posible de fuentes de interferencia (Stanley, Magnetometer placement – where and why, 2012). Por el momento, el único componente fijo es el ME, localizado en la zona trasera del VE, por lo que el conector del MAG se dirigió hacia la zona delantera.
LLC	Colindante con la IMU y el conector del MAG.	Se requieren 8 líneas para la conversión de niveles lógicos de la IMU y el MAG. Para evitar complicaciones, se busca reducir el largo del cableado.
GPS	Situado en un espacio libre dentro o fuera de la DAQCON.	Debido a su precisión de 3 [m], la variación en su medición al desplazarlo 5-10 [cm] para colocarlo sobre el vehículo o la shield, es despreciable.
LCD	No incluida en la shield. Se insertará un conector en un borde.	Por su gran tamaño la pantalla no estará en la shield, por lo que se necesita un conector de 8 líneas. Se busca que interfiera lo menos posible con los demás componentes.
Botones	RESET: en una esquina MODE y SET: juntos START: no incluido en la shield. Se insertará un conector en un borde.	RESET: Evitar reinicios no deseados al estar en un lugar no accesible fácilmente. MODE y SET: Ergonomía. START: Se colocará en un lugar de fácil acceso en la PMP.
ESC	Componente externo al DAQCON. Se insertará un conector en un borde.	Se busca que las líneas de control y tierra al ESC interfieran lo menos posible con los demás componentes.
SERVOH	Componente externo al DAQCON. Se insertará un conector en un borde.	Se necesitan líneas de control, alimentación y tierra al SERVOH. Se busca que interfieran lo menos posible con los demás componentes.
Regulador conmutado	Componente externo al DAQCON. Se insertará un conector y un jumper en los bordes.	Se necesitan líneas de alimentación y tierra a la shield provenientes del regulador conmutado, además de permitir seleccionar la fuente de alimentación. Se busca que interfieran lo menos posible con los componentes.

Figura 5.9: Reglas para la implementación de la shield

Se propusieron las siguientes tres opciones para la fabricación de la shield:

- **PCB Casera**

Transferir el circuito diseñado a una placa fenólica sin perforar, remover material sobrante con cloruro férrico, perforación de *through-holes*, soldar componentes.

- **PCB Profesional**

Envío de esquemático del circuito diseñado a un fabricante profesional de PCB, recibir la shield ya ensamblada.

- **Protoshield**

Comprar una Mega *Protoshield* (placa perforada ajustada a las medidas del Arduino Mega), ensamblar los componentes y construir el circuito *punto a punto*.

Con base en la matriz A.9 del apéndice A, la fabricación elegida fue por medio de una Protoshield.

Se agregó un juego de Arduino Mega Stackable Headers Kit y Headers macho rectos, para proporcionar un mayor libramiento entre el microcontrolador y la placa ya que el cableado se realizó por debajo y se utilizó *ribbon cable* con conectores tipo DuPont Para la conexión con los componentes alejados de la shield.

La shield terminada se muestra en la figura 5.10.

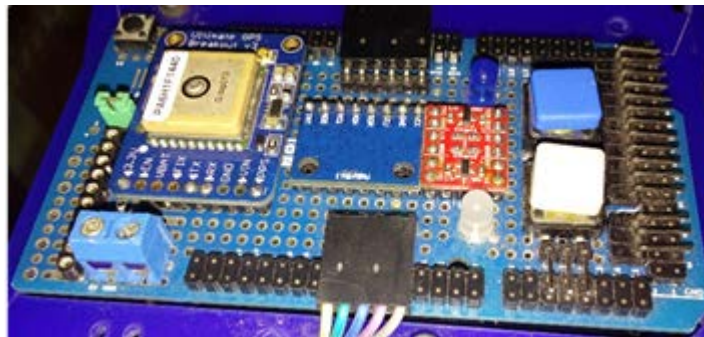


Figura 5.10: Shield terminada (Cordero, 2016)

## 5.6 Resumen

Se analizaron los requerimientos eléctrico-electrónicos para el funcionamiento del VE. Se seleccionaron y analizaron los sensores necesarios para Percepción y se fabricó una shield para el MCU que permitirá obtener la información de ellos y enviar instrucciones a los actuadores.

Lo desarrollado en éste capítulo se encuentra listo para ser montado en el VE y posteriormente programado.



## Capítulo 6

# Plataforma Móvil de Pruebas

*We do not build cars.  
We build mobile works of art.*  
—Chris Bangle

### 6.1 Introducción

En este capítulo se integra lo desarrollado en los dos anteriores: las partes mecánica y eléctrica-electrónica del vehículo. A esta integración se le denominó plataforma móvil de pruebas, ya que permite probar físicamente el NAVSYS.

Se propone diseñar una base que se acople al VE y sobre este conjunto, montar el DAQCON y los componentes de energía. Se busca facilidad de ensamble y desensamble para poder realizar reparaciones o ajustes sobre la marcha.

### 6.2 Posición y Ensamble de Componentes

En el diseño se siguieron los criterios de diseño para manufactura y ensamble (DFMA) (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2010), se buscó reducir piezas (se dieron múltiples funciones a elementos individuales), estandarizar *fasteners* (se utilizó únicamente tornillos cabeza Allen de 3 [mm] de diámetro), y diseñar para un sencillo desensamble (necesario para hacer reparaciones rápidas durante las pruebas).

Además, se tomaron en cuenta ciertos criterios para la posición de los componentes, mostrados en la figura 6.1.

Componente	Consideración	Razón
MAG	Zona delantera del VE, centrado entre las llantas de dirección.	El MAG debe posicionarse lo más lejano a posibles fuentes de interferencia magnética. Además, debe estar en la sección que mejor represente la orientación de la PMP.
Shield/ MCU	Zona media del VE, lo más inferior posible.	Al estar montada la IMU sobre el shield, ésta debe estar posicionada lo más cercano al CM del VE.
LCD	Zona trasera del VE, inclinada.	Cuando el operador camine detrás del vehículo mientras se sigue una trayectoria, debe poder leer la LCD fácilmente
Botón START	Zona trasera del VE con fácil acceso.	Debe permitir ser presionado para iniciar el recorrido, sin obstaculizar el movimiento del VE.
ESC	Ajustado al chasis del VE, colindante al ME.	El ESC requiere 3 líneas para controlar el ME. Para evitar complicaciones, se busca reducir el largo del cableado.
BATT	Ajustada al chasis del VE, opuesta a ME.	Al ser de los componentes con mayor masa, se ubica lo más pegado al suelo para mantener un bajo CM de la PMP.

Figura 6.1: Consideraciones para la posición de los componentes

Para acoplar la base con el VE, se propusieron 2 soportes unidos directamente al chasis por medio de las torres de suspensión. Estos soportes no deben obstruir el movimiento de la suspensión.

Se diseñó un descanso como soporte del shield/MCU, unido a la base por medio de 4 postes *stand-off* de aluminio.

Para el montaje de la LCD, se supuso un seguimiento a 1 metro de distancia por una persona con altura de 1.70, por lo que para facilitar la lectura se propuso un soporte con un ángulo de inclinación de  $22.5^\circ$ . Se optó por acrílico de 6[mm] para los soportes y acrílico de 3[mm] para la base, el descanso del shield/MCU y el soporte de la LCD. Se trabajaron las piezas en corte láser y se procedió a su ensamble sobre el VE.

La figura 6.2 muestra el ensamble propuesto.

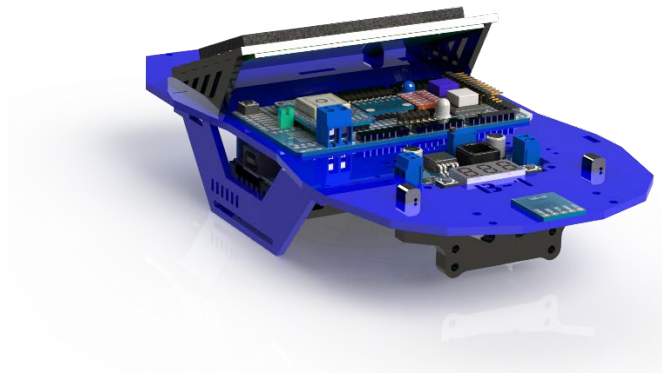


Figura 6.2: Ensamble propuesto

## 6.3 Revisión del Ensamble Completo

Una vez ensamblados y conectados todos los componentes, se procedió a realizar pruebas dinámicas de la PMP en modo RC, con la finalidad de asegurar que todas las piezas estuvieran fijas al mismo, no se desconectarán los componentes y no existiera interferencia física en el ensamble. Se corrió libremente en una superficie con desniveles pronunciados no mayores a 5 [cm] hasta agotar la batería, bajo ciertas aceleraciones laterales la PMP sufrió volcaduras, sin embargo, al revisarse posteriormente los sistemas, se determinó que los incidentes no provocaron fallas o desperfectos.

La figura 6.3 muestra la PMP terminada.



Figura 6.3: Plataforma Móvil de Pruebas (Cordero, 2016)

## 6.4 Resumen

Lo desarrollado en los capítulos 4 y 5 fue unido para formar una plataforma lista para ser programada y probada, la PMP. Ésta probó ser mecánica-eléctricamente robusta y confiable, incluso ante percances como volcaduras.



## Capítulo 7

# Sistema de Navegación

*Self-driving cars are the natural extension of active safety and obviously something we should do.*

—Elon Musk

## 7.1 Introducción

Se cuenta ya con un vehículo que tiene el potencial de navegar autónomamente, por lo que en este capítulo se desarrolla un sistema de navegación que pueda resolver las cuatro tareas principales detalladas en el capítulo 2.

De acuerdo al alcance especificado en el capítulo 3, los objetivos por cumplir son:

- Percepción
- Localización relativa y absoluta
- Manejo de mapas virtuales
- Planeación de movimientos
- Control de movimientos

## 7.2 Percepción

Como se comentó en el capítulo 2, la tarea de percepción es la encargada de obtener e interpretar información del entorno, esto se logra por medio de los sensores del DAQ.

### 7.2.1 IMU

El MPU-6050 es un módulo que contiene un GYRO de 3 ejes, un ACCEL de 3 ejes y un procesador digital de movimiento (DMP) (Invensense Inc., 2013). Con él, se busca estimar los

ángulos YPR de la PMP ( $Y = Yaw = \psi_{PMP}, P = Pitch = \rho_{PMP}, R = Roll = \varphi_{PMP}$ ), para asistir en la detección de heading y navegación.

Podemos calcularlos procesando los valores puros o utilizando el DMP, que realiza internamente una fusión de sensores y nos entrega los ángulos YPR. Se desarrollaron ambos enfoques y se compararon para decidir cuál utilizar.

- **Procesando los Valores Puros**

Con el GYRO del MPU-6050, para cada eje podemos obtener valores en bruto (Invensense Inc., 2013) correspondientes a la tasa de cambio de una posición angular  $\theta$  con respecto al tiempo  $t$  (velocidad angular), i.e.,

$$\omega = \dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$$

Por lo tanto, para encontrar  $\theta$  en un determinado momento  $t$ , podemos resolver la siguiente integral:

$$\theta(t) = \int_0^t \omega(t) dt$$

Para un sistema digital, es posible realizar una aproximación por medio de una suma finita de valores tomados en un tiempo de muestreo  $T_s$ .

$$\theta(t) = \sum_0^t \omega(t) \cdot T_s$$

Dicho de otra manera, para estimar los ángulos YPR por medio del GYRO, podemos comenzar con valores iniciales conocidos e iterar el siguiente proceso para cada uno de los ejes: utilizar los datos en bruto para obtener la velocidad angular  $\omega$  en un instante, con un tiempo de muestreo  $T_s$  calcular el cambio angular  $\Delta\theta$  y con él actualizar el último valor angular conocido  $\theta$ .

El GYRO nos proporciona una buena estimación del cambio angular, por lo que la estimación de ángulos a corto plazo es buena (alta frecuencia), sin embargo, debido a que estamos aproximando integrales, a largo plazo (baja frecuencia) sufrirá un efecto conocido como *drift*, que es la acumulación de errores en las posiciones angulares con el paso del tiempo (Brito, 2009).

El ACCEL del MPU-6050, nos permite obtener valores en bruto correspondientes a aceleraciones en 3 ejes, ya que éstas causan el desplazamiento de masas de prueba a lo largo de los mismos y estos movimientos son medidos (Invensense Inc., 2013). Es posible estimar los ángulos pitch y roll a partir de la medición de la aceleración en los ejes provocada por la inclinación.

Para la estimación del ángulo de yaw, no se utilizará el ACCEL ya que no es posible cuando su eje vertical sea paralelo al vector gravitacional de la Tierra (Moutou, 2015), es decir, cuando el plano  $XY_{PMP}$  se encuentre paralelo al plano  $HP$ .

Sea

$A_{x_{ACCEL}}$  la aceleración normalizada medida por el ACCEL en el eje  $X_{ACCEL}$

$A_{y_{ACCEL}}$  la aceleración normalizada medida por el ACCEL en el eje  $Y_{ACCEL}$

$A_{z_{ACCEL}}$  la aceleración normalizada medida por el ACCEL en el eje  $Z_{ACCEL}$

Para poder ubicar  $\rho_{ACCEL}$  y  $\varphi_{ACCEL}$  en los cuadrantes correctos de  $YZ_{ACCEL}$  y  $XZ_{ACCEL}$  respectivamente, es necesario tomar en cuenta los signos de las componentes  $A_x$ ,  $A_y$  y  $A_z$ , por lo que se hizo uso de la función computacional atan2.

Con lo anterior dicho, se pueden utilizar las siguientes ecuaciones (Tuck, 2007) para estimar los ángulos de pitch y roll por medio del ACCEL, cuya representación gráfica se muestra en la figura 7.1:

$$\rho_{ACCEL} = \text{atan2}\left(\frac{A_{x_{ACCEL}}}{\sqrt{A_{y_{ACCEL}}^2 + A_{z_{ACCEL}}^2}}\right), \quad \varphi_{ACCEL} = \text{atan2}\left(\frac{A_{y_{ACCEL}}}{\sqrt{A_{x_{ACCEL}}^2 + A_{z_{ACCEL}}^2}}\right)$$

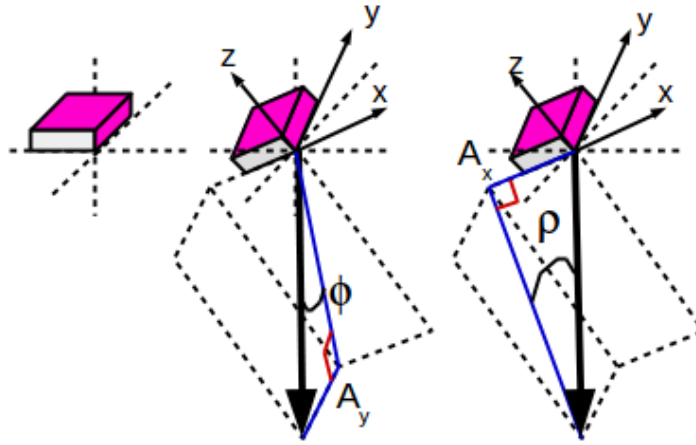


Figura 7.1: Cálculo de los ángulos roll y pitch, por medio de ACCEL (Moutou, 2015)

El ACCEL nos proporciona una mejor estimación de los ángulos de pitch y roll cuando la única fuerza que está actuando es la gravedad, ya que con movimiento las mediciones varían demasiado, es por esto que la estimación de los ángulos a corto plazo (alta frecuencia) no es confiable, sin embargo, promediando las mediciones a largo plazo (baja frecuencia) obtenemos una buena estimación (Brito, 2009).

Las figuras 7.2 y 7.3 muestran la estimación de  $\varphi$  a corto y largo plazo, respectivamente, por medio de GYRO y ACCEL.

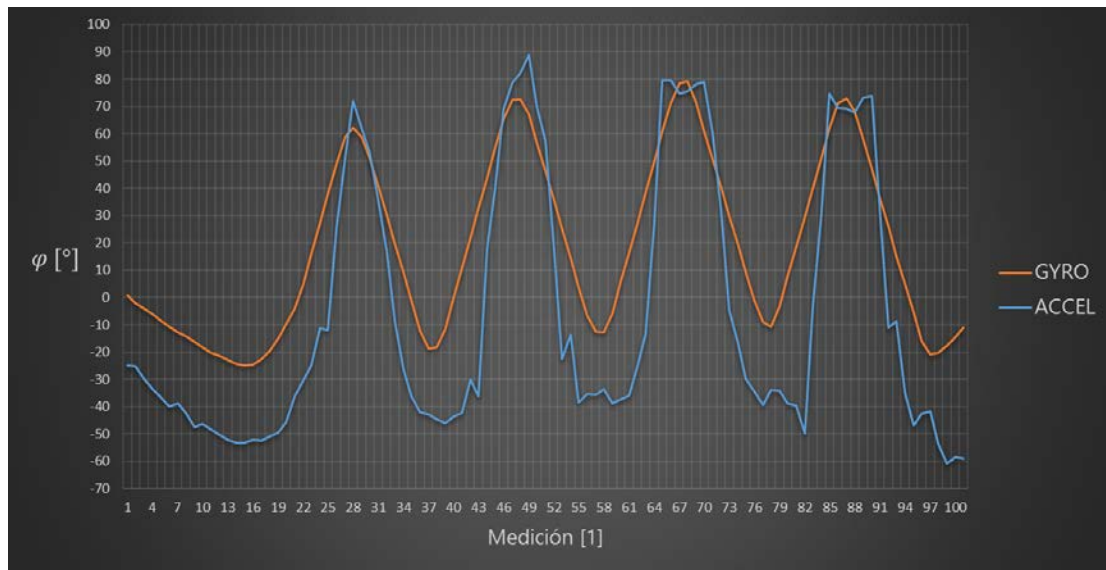


Figura 7.2: Estimación de  $\varphi$  a corto plazo, por medio de GYRO y ACCEL (Cordero, 2016)

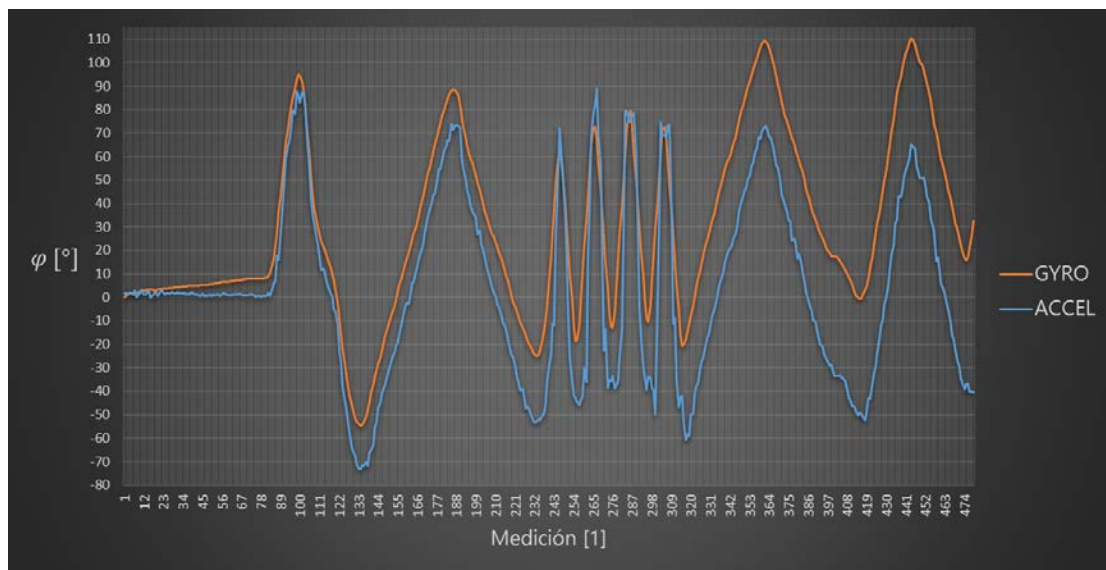


Figura 7.3: Estimación de  $\varphi$  a largo plazo, por medio de GYRO y ACCEL (Cordero, 2016)

Como era esperado, la estimación por GYRO tiene menor variación a corto plazo, pero sufre de drift con el paso del tiempo, mientras que la estimación por ACCEL tiene muchas variaciones a corto plazo, pero es estable a largo plazo.

## 7.2.2 MAG

El HMC5883L es un módulo con un MAG de 3 ejes, puede entregar datos en bruto correspondientes a la dirección e intensidad del campo magnético de la Tierra (Honeywell International Inc., 2010). Será el principal sensor para la estimación de heading y será asistido



por la IMU. Cabe mencionar que el heading estimado estará ligado al campo magnético de la Tierra, por lo que será denominado *heading magnético*  $\Psi_{mag}$ .

El campo magnético de la Tierra no es constante, no está distribuido equitativamente y puede ser representado por líneas de campo, cuya fuente se conoce como *sur magnético* y su sumidero *norte magnético* (Honeywell International Inc., 2016), como se muestra en la figura 7.4.

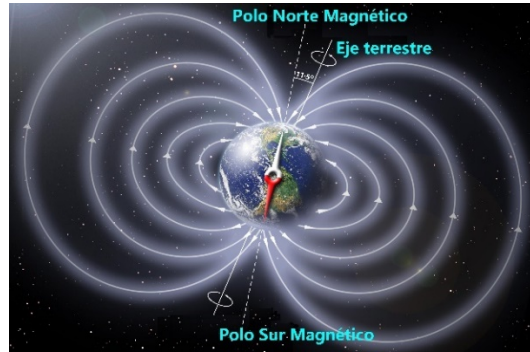


Figura 7.4: Representación del campo magnético de la Tierra (Reid, 2009)

- **Procesando los Valores Puros**

Considerando el sistema de ejes  $SE_H$  mostrado en la figura 7.5, la fuerza y dirección del campo magnético se puede describir por un vector  $H$  de 3 componentes:  $H_x$ ,  $H_y$  y  $H_z$ . El plano  $XY_H$  es coincidente con  $HP$ .

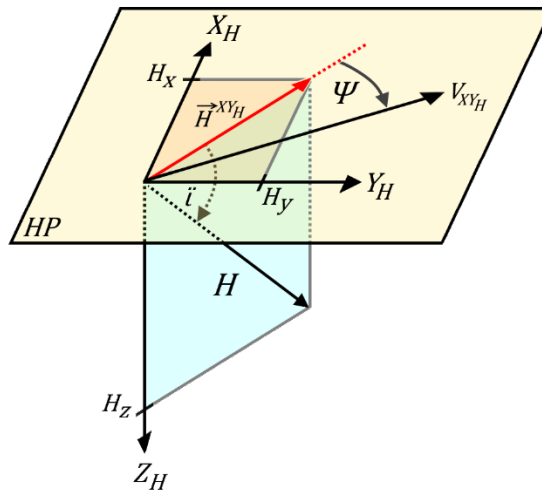


Figura 7.5: Vector de campo magnético  $H$  (Cordero, 2016)

Es directo deducir que existe un ángulo  $i$  entre  $H$  y el plano  $XY_H$ , éste es llamado *ángulo de inclinación* (LaValle, Yershova, Katsev, & Antonov, 2014), un ángulo  $\Psi$  entre  $\vec{H}^{XY_H}$  (proyección de  $H$  en  $XY_H$ ) y  $V_{XY_H}$  (un vector cualquiera, contenido en  $XY_H$ ), y que debido a la distribución del campo magnético, ambos ángulos son dependientes de la posición en la Tierra en que se esté ubicado, y no es posible calcular  $\Psi$  cuando  $i$  sea cercano a  $90^\circ$  (LaValle, Yershova, Katsev, & Antonov, 2014).

Entonces,  $\Psi$  puede ser calculado con la siguiente ecuación (Grygorenko, 2014):

$$\Psi = \text{atan}\left(\frac{H_y}{H_x}\right)$$

Dicho lo anterior, podemos obtener  $H_{HMC}$  ( $H$  de acuerdo a mediciones del MAG en una particular posición), y como  $HP$  es coincidente con  $XY_H$ , podemos referenciar todo a  $HP$  obteniendo  $\overrightarrow{H_{HMC}}^{HP}$  (proyección de  $H_{HMC}$  en  $HP$ ),  $\vec{H}^{XY_H} = \vec{H}^{HP}$  y  $V_{XY_H} = \overrightarrow{H_{HMC}}^{HP}$ , para calcular un ángulo  $\Psi_{HMC}$ . Para poder ubicar  $\Psi_{HMC}$  en el cuadrante correcto de  $HP$ , es necesario tomar en cuenta los signos de las componentes  $H_{x_{HMC}}$  y  $H_{y_{HMC}}$ , por lo que se hizo uso de la función computacional  $\text{atan2}$ .

Cabe notar que la estimación de  $H_{HMC}$  cambiará conforme cambia la inclinación del MAG (Grygorenko, 2014), por lo que es necesario realizar la siguiente compensación de inclinación:

$$R_1 = \sqrt{1 - A_{x_{ACCEL}}^2 - A_{y_{ACCEL}}^2}$$

$$H_{y_{cmp}} = H_{y_{HMC}} \cdot R_1 - H_{z_{HMC}} \cdot A_{y_{ACCEL}}$$

$$H_{x_{cmp}} = H_{x_{HMC}} \cdot (1 - A_{x_{ACCEL}}^2) - H_{y_{HMC}} \cdot A_{x_{ACCEL}} \cdot A_{y_{ACCEL}} - H_{z_{HMC}} \cdot A_{x_{ACCEL}} \cdot R_1$$

Por último, existe un ángulo  $\delta_{dev}$  entre  $\vec{H}^{XY_H}$  y  $\overrightarrow{H_{HMC}}^{HP}$  (mostrado en la figura 7.6), llamado *desviación magnética*, inducido por el campo magnético local donde el MAG esté montado (Pilotfriend, 2016), por lo que hay que corregir  $\Psi_{HMC}$  para finalmente estimar  $\Psi_{mag}$ .

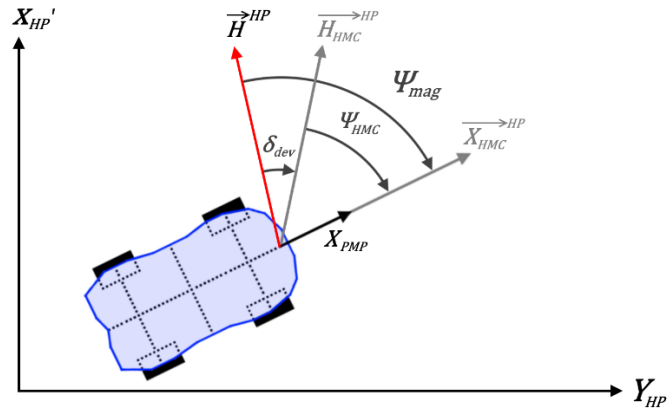


Figura 7.6: Desviación magnética (Cordero, 2016)

La expresión final es:

$$\Psi_{mag} = \text{atan2}\left(\frac{H_{y_{cmp}}}{H_{x_{cmp}}}\right) + \delta_{dev}$$

De manera similar al ACCEL, las mediciones del MAG varían demasiado, por lo que la estimación de  $\Psi_{mag}$  a corto plazo no es confiable (figura 7.7), sin embargo, promediando la medición a largo plazo obtenemos una buena estimación.

Las figuras 7.7 y 7.8 muestran la estimación de  $\Psi$  a corto y largo plazo, respectivamente, por medio de GYRO y MAG.

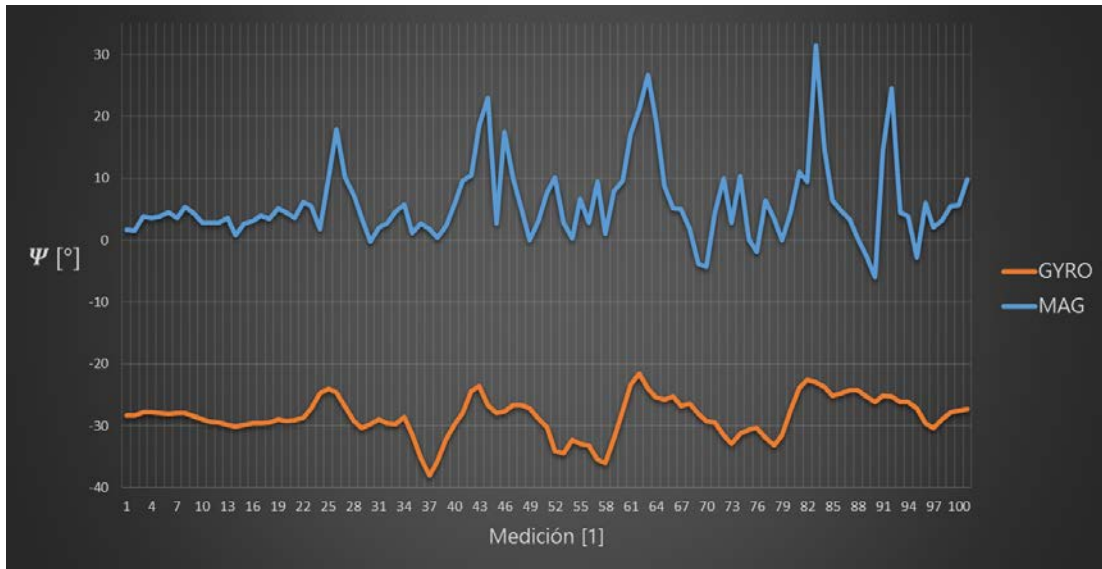


Figura 7.7: Comparación de  $\Psi$  a corto plazo, por medio de GYRO y MAG (Cordero, 2016)

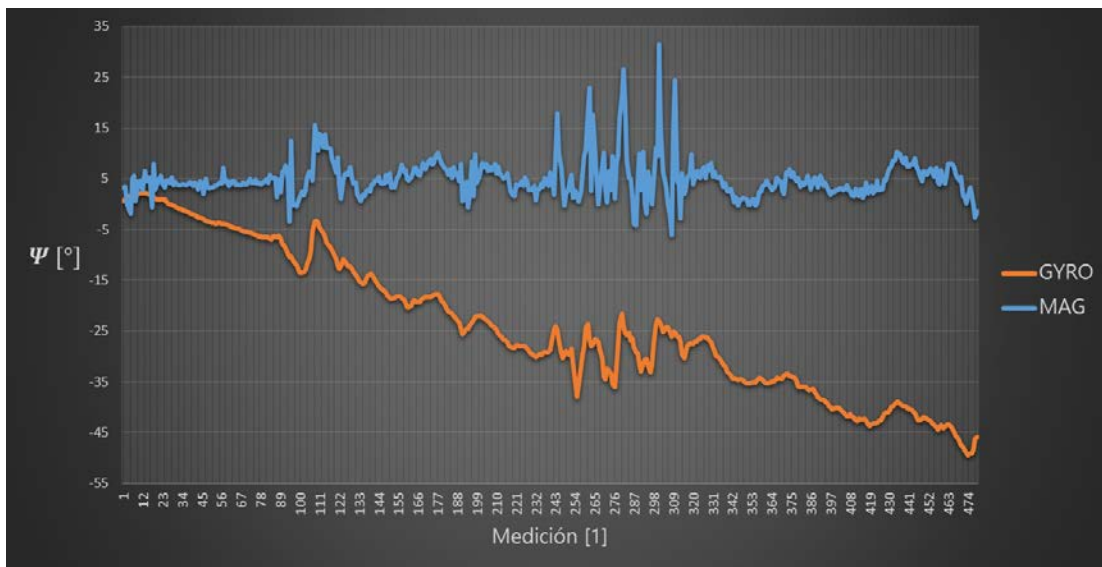


Figura 7.8: Comparación de  $\Psi$  a largo plazo, por medio de GYRO y MAG (Cordero, 2016)

### 7.2.3 Filtros Digitales

Para combinar los beneficios a corto plazo de la correcta estimación de cambio angular del GYRO con la correcta estimación de ángulos a largo plazo del ACCEL y MAG, podemos realizar una fusión de sensores. Existen varios métodos para realizar la fusión de sensores, para el presente trabajo se desarrollaron los siguientes tres:

- **Filtro Complementario (CF)**

La idea detrás del CF, es mantener la estimación de baja frecuencia del ACCEL y MAG alimentando sus salidas a un filtro pasa-bajas, mantener la estimación de alta frecuencia del GYRO alimentando la integración de su salida a un filtro pasa-altas, y al establecer la misma frecuencia de corte para todas, la suma de sus funciones de transferencia es la unidad (Malinen, 2015), como se muestra en la figura 7.9.

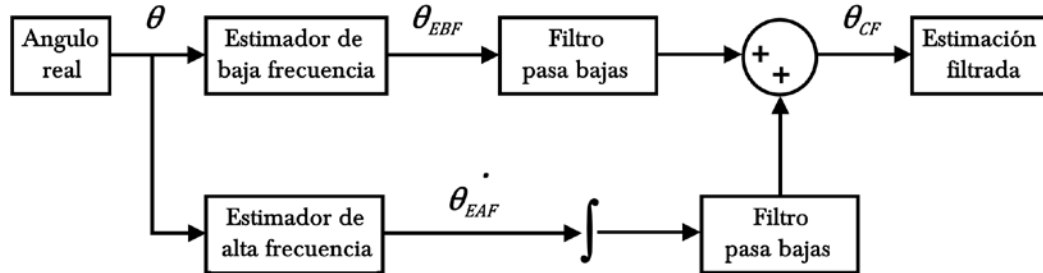


Figura 7.9: Filtro complementario de primer orden (Cordero, 2016)

Por lo tanto, la estimación  $\theta_{CF}$  de un ángulo  $\theta$  por medio del CF puede ser expresada por las siguientes ecuaciones:

$$\theta_{CF}(n) = a \cdot (\theta_{CF}(n-1) + \theta_{EAF}(n) \cdot T_s) + (1-a) \cdot \theta_{EBF}(n)$$

$$a = \left( \frac{\tau}{\tau + T_s} \right)$$

donde

$n$  = número de muestreo

$a$  = parámetro de filtrado

$\tau$  = constante de tiempo

- **Filtro Complementario de Segundo Orden (CF2)**

Gi Min y Tae Jeung propusieron el filtro complementario de segundo orden con ganancias  $k_i$  y  $k_p$ , para realizar la fusión del GYRO y el ACCEL (Gi Min & Tae Jung, 2015), mostrado en la figura 7.10:

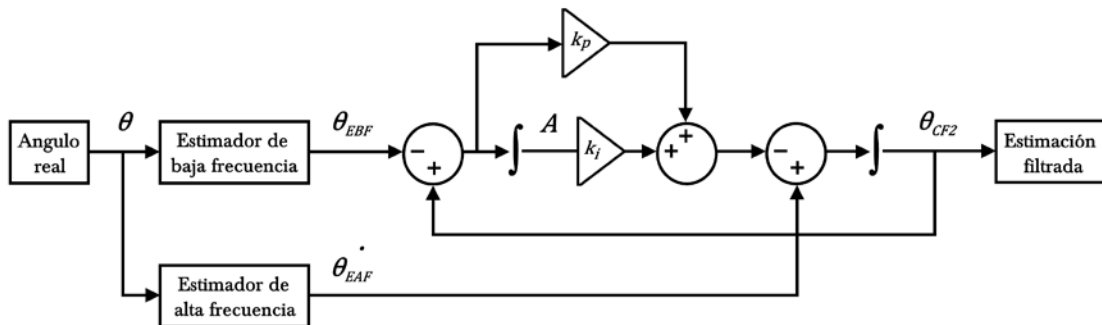


Figura 7.10: Filtro complementario de segundo orden (Cordero, 2016)

Para estimar  $\theta_{CF2}$  de un ángulo  $\theta$  por medio del CF2, se dedujeron las siguientes ecuaciones:

$$\theta_{CF2}(n) = \theta_{CF2}(n-1) + [\theta_{EAF}(n) - [\theta_{CF2}(n-1) - \theta_{EBF}(n)] \cdot 2 \cdot k_p + k_i \cdot A(n)] \cdot T_s$$

$$A(n) = A(n-1) + [\theta_{CF2}(n-1) - \theta_{EBF}(n)] \cdot T_s$$

- **Procesador Digital de Movimiento**

El MPU-6050 cuenta con un procesador digital de movimiento que puede realizar la fusión de sensores por sí solo y entregar los ángulos YPR. Esto nos evita los cálculos anteriores por medio de un algoritmo interno, desarrollado por Invensense, el fabricante del MPU-6050.

Las figuras 7.11 y 7.12 muestran la estimación de  $\rho$  a corto y largo plazo, respectivamente, por medio de CF, CF2 y DMP.

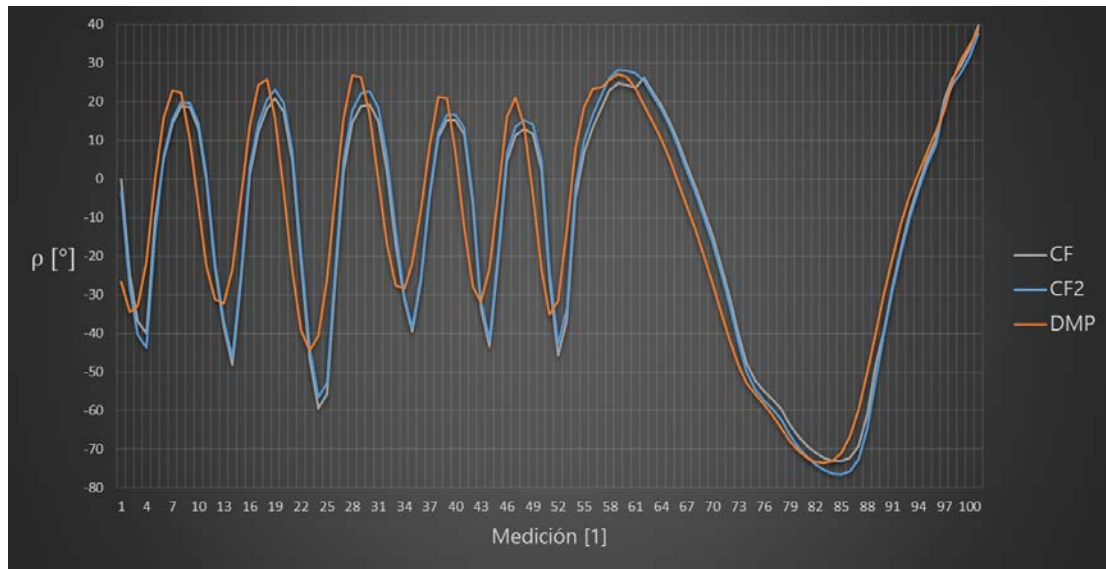


Figura 7.11: Comparación de  $\rho$  a corto plazo, por medio de CF, CF2 y DMP

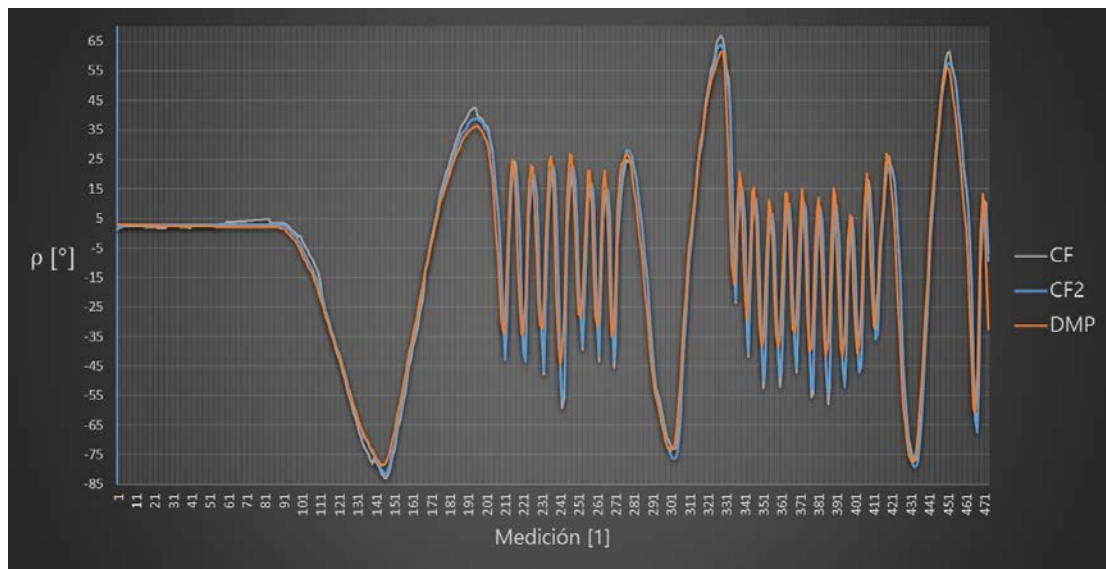


Figura 7.12: Comparación de  $\rho$  a largo plazo, por medio de CF, CF2 y DMP

Se puede apreciar que el comportamiento entre el CF y el CF2 es bastante similar, el segundo tiene un comportamiento más estable en cambios repentinos de ángulo, pero implica ligeramente mayor procesamiento. Al comparar ambos con el DMP, se puede apreciar un pequeño atraso en la señal. Además, el DMP realiza los cálculos internamente, liberando de esa carga de procesamiento al MCU.

Por lo anterior, se decidió utilizar el DMP.

### 7.2.3 GPS

El Ultimate GPS es un módulo basado en el chipset GPS MTK3339 con antena incluida (Fried, Adafruit Ultimate GPS, 2016). Con él se buscará obtener los valores de longitud, latitud y velocidad terrestre, que servirán para la localización absoluta de la PMP.

El módulo nos puede entregar datos en bruto en formato NMEA (Baddeley, 2001), del cual nos interesan: *fix* (nos indica si se ha establecido una conexión exitosa con los satélites para determinar la ubicación), latitud ( $\phi_{GPS}$ ) y longitud ( $\lambda_{GPS}$ ) en el sistema de coordenadas geográfico (nos permiten describir un punto de manera única en la superficie terrestre) y velocidad terrestre  $v_{GPS}$ .

## 7.3 Localización y Manejo de Mapas

Se utilizó información de sensores propioceptivos para compensar errores en las mediciones de sensores exteroceptivos. Esta información, ya compensada, nos servirá para encontrar la posición actual de la PMP en el entorno.

### 7.3.1 Localización Absoluta

Para la localización absoluta, las mediciones de los sensores exteroceptivos de la PMP necesitan estar ligadas a sistemas de referencia invariables, por lo que se utilizará la geografía terrestre. Dicho esto, cualquier localización  $L_{ABS}$  puede ser definida de la siguiente manera por su posición y heading (mostrado en la figura 7.13):

$$L_{ABS} = (\phi_{PMP}, \lambda_{PMP}, \Psi_{PMP})$$

donde

$\phi_{PMP}$  = latitud de la PMP en el sistema de coordenadas geográfico.

$\lambda_{PMP}$  = longitud de la PMP en el sistema de coordenadas geográfico.

$\Psi_{PMP}$  = heading de la PMP, con  $X_{HP}$  apuntando al *norte geográfico*.

Para estimar  $\phi_{PMP}$  y  $\lambda_{PMP}$ , se desarrolló un algoritmo que toma información del IMU y del GPS y actualiza la posición de la PMP en el sistema de coordenadas geográfico.

Para estimar  $\Psi_{PMP}$ , se toma en cuenta lo siguiente:

Como se mencionó anteriormente, el heading estimado por Percepción ( $\Psi_{mag}$ ) es dependiente de la dirección y fuerza del campo magnético. Existe una desviación de

aproximadamente  $11.5^\circ$  entre el eje que une los polos magnéticos y el que une los polos geográficos que, aunado a otras anomalías distribuidas en el planeta, modifica localmente el ángulo entre el norte magnético y el norte geográfico, dependiendo de donde se tome la medición.

Este ángulo es llamado *ángulo de declinación*  $\delta_{dec}$  y es constantemente mapeado, por lo que puede ser utilizado para compensar el valor obtenido de Percepción y así encontrar  $\Psi_{PMP}$  (Honeywell International Inc., 2016).

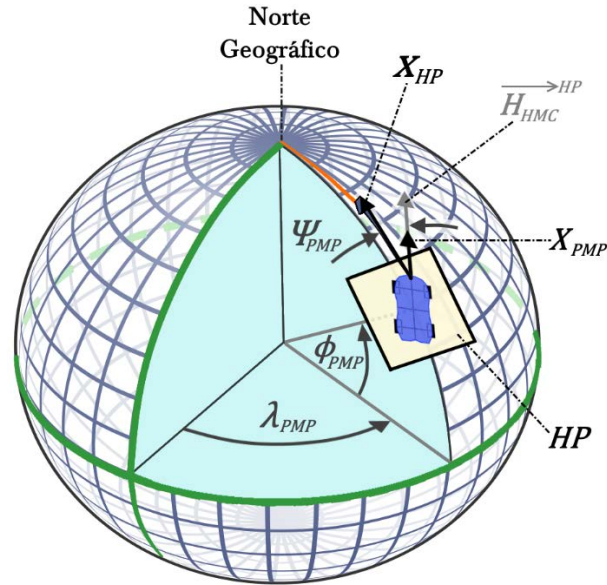


Figura 7.13: Localización absoluta de la PMP (Cordero, 2016)

Por último, el IMU se instaló en la PMP de manera que  $SE_{MPU}$  sea lo más coincidente posible con  $SE_{PMP}$ , pero  $SE_{HMC}$  está recorrido  $+10.5$  [cm] sobre  $X_{PMP}$ , esto provoca que la estimación de  $\Psi_{PMP}$  varíe por  $\delta_T$  si se considera desde  $O_{PMP}$  o desde  $O_{HMC}$  (figura 7.14), por lo que siendo teóricamente estrictos sería necesario realizar una transformación para obtener una mejor estimación de  $\Psi_{PMP}$ .

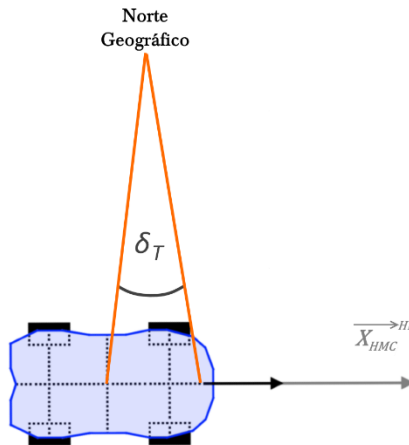


Figura 7.14: Diferencia  $\delta_T$  (Cordero, 2016)

Sin embargo, debido a la magnitud que está recorrido con respecto a la distancia al polo, este valor es ínfimo (considerando un campo localmente constante,  $1^\circ$  de diferencia se presentaría con  $X_{PMP}$  a 6[m] y perpendicular al polo), por lo que ésta diferencia se consideró despreciable para fines prácticos y se tomará  $\Psi_{PMP}$

La expresión final queda:

$$\Psi_{PMP} = \Psi_{mag} + \delta_{dec}$$

Lo anterior se muestra en la figura 7.15.

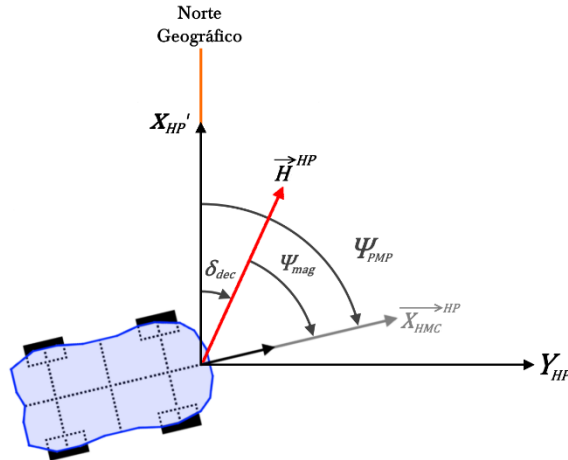


Figura 7.15: Declinación magnética (Cordero, 2016)

### 7.3.2 Manejo de Mapas

Se utilizó un método basado en el de hojas de ruta, donde la PMP puede navegar en rutas (RC) basadas en el espacio libre. Un RC es representado como una lista de WP (como se muestra en la figura 7.16), similar a la manera en que las rutas fueron representadas en el DARPA Grand Challenge, por medio de un archivo de datos de definición de la ruta (RDDF). Además, se pueden crear nuevas rutas posicionando físicamente la PMP en WP deseados y agregándolos por medio de la interfaz.

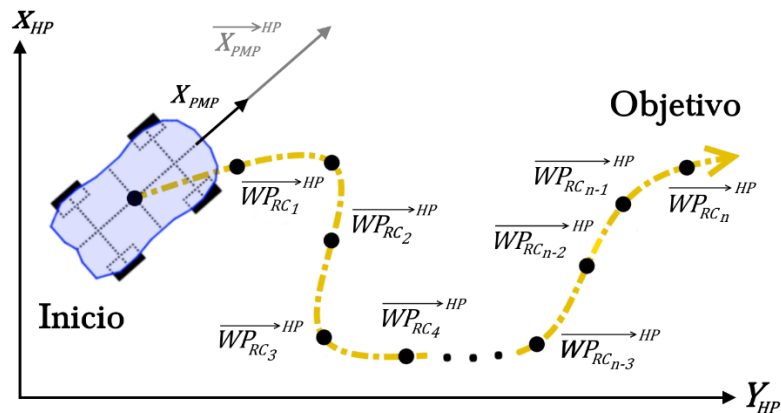


Figura 7.16: Route course (Cordero, 2016)



Sean  $WP_{RC_i} = (\phi_{WP_{RC_i}}, \lambda_{WP_{RC_i}})$  y  $WP_{RC_k} = (\phi_{WP_{RC_k}}, \lambda_{WP_{RC_k}})$ , para calcular la distancia  $d_{WP_{RC}}$  entre ellos se tomó en cuenta lo siguiente:

La distancia más corta entre dos puntos es una línea recta, cuando se trabaja sobre una superficie curva (como la de la Tierra) se conoce como *geodésica* (Weintrit & Kopacz, 2011) y para encontrarla es necesario resolver el *segundo problema geodésico inverso*.

Existen varios métodos encontrar la distancia dependiendo de la superficie en cuestión, en este caso (y por las características del MCU), la superficie de la Tierra fue aproximada a una esfera con un radio  $r_T = 6371$  [km], por lo que se hizo uso del método de Haversine, mediante las siguientes ecuaciones (Veness, 2016):

$$a = \text{sen}^2\left(\frac{\Delta\phi_{WP_{RC}}}{2}\right) + \cos(\phi_{WP_{RC_i}}) \cdot \cos(\phi_{WP_{RC_k}}) \cdot \text{sen}^2\left(\frac{\Delta\lambda_{WP_{RC}}}{2}\right)$$

$$c = 2 \cdot \text{atan2}\left(\frac{\sqrt{a}}{\sqrt{1-a}}\right)$$

$$d_{WP_{RC}} = r_T \cdot c$$

Al ser la Tierra una superficie curva, el ángulo  $\beta_{S_{RC}}$  con respecto al norte geográfico de un segmento de trayectoria  $S_{RC}$  sobre la geodésica cambiará a diferencia de una *loxodrómica* donde el ángulo se mantiene igual, por lo que es necesario recalcularlo constantemente. Las excepciones son cuando las geodésicas se encuentren en un paralelo o meridiano, ya que éstos también son loxodrómicos. La figura 7.17 muestra claramente la diferencia de ángulos entre una geodésica y una loxodrómica.

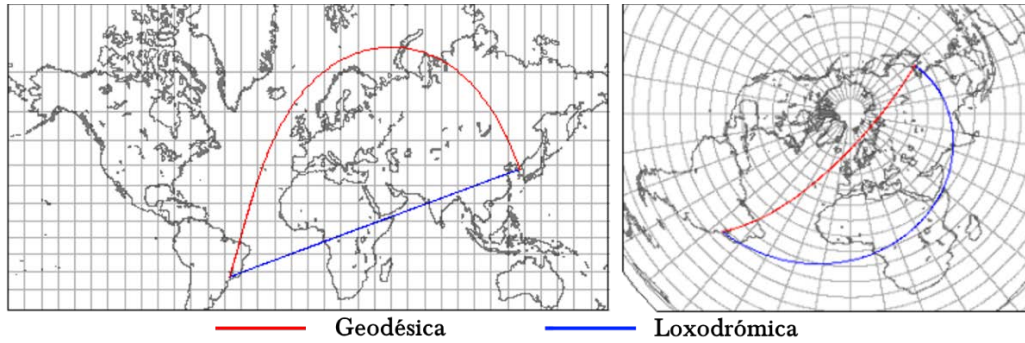


Figura 7.17: Geodésica y loxódromica (Furuti, 1997)

Para calcularlo, podemos utilizar la siguiente ecuación (Veness, 2016):

$$\beta = \text{atan2}\left(\frac{\text{sen}(\Delta\lambda_{WP_{RC}}) \cdot \cos(\phi_{WP_{RC_k}})}{\cos(\phi_{WP_{RC_i}}) \cdot \text{sen}(\phi_{WP_{RC_k}}) - \text{sen}(\phi_{WP_{RC_i}}) \cdot \cos(\phi_{WP_{RC_k}}) \cdot \cos(\Delta\lambda_{WP_{RC}})}\right)$$

Cabe notar, que cuando los dos  $WP_{RC}$  se encuentran dentro de un radio de 15.5 [km], la superficie de la Tierra puede considerarse plana (Weintrit & Kopacz, 2011) y la distancia ser calculada con geometría euclidiana.

En la implementación, se combinaron los dos métodos para optimizar el procesamiento.

## 7.4 Cognición

El módulo Cognición y planeación de movimientos debe poder tomar decisiones basadas en la información proporcionada por Localización y utilizarla para navegar la PMP a los destinos requeridos. Cognición funciona como un módulo de toma de decisiones.

El principal propósito de Cognición es el dirigir la PMP de la posición actual al WP actual, para esto Cognición debe realizar dos tareas principales:

1. Verificar que se ha alcanzado el objetivo
2. Determinar las acciones por realizar

Por lo anterior, se desarrolló un módulo que utiliza información procedente de Percepción y de Localización para determinar el estado de la PMP, y con apoyo de Manejo de mapas y un modelo secuencial, cíclicamente determina el error entre la posición actual y el WP actual, si éste se encuentra en un rango preestablecido asigna un nuevo WP a alcanzar, en caso negativo determina las condiciones necesarias para alcanzar WP actual (e.g. velocidad de navegación recomendada  $v_{nav}(t)$ ) para posteriormente dar instrucciones a Control de movimientos, hasta completar la trayectoria. Lo anterior es generalizado en la figura 7.18.

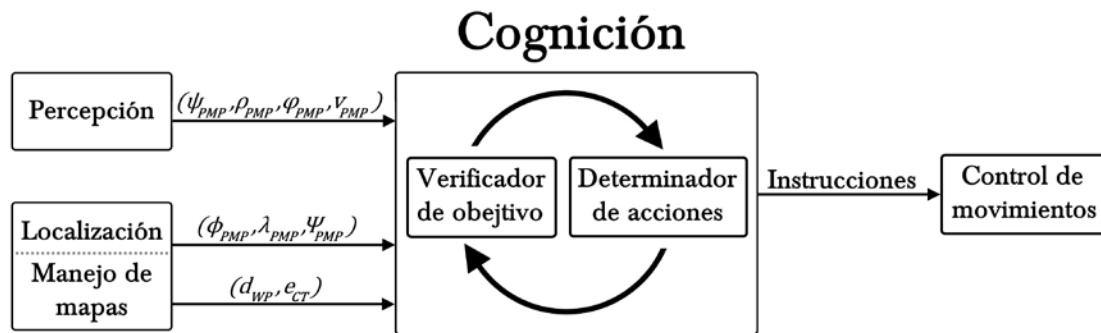


Figura 7.18: Generalización de Cognición (Cordero, 2016)

## 7.5 Low-Level Control

Hasta el momento, la PMP es capaz de obtener información del ambiente, utilizarla para localizarse globalmente, y planear las acciones a ejecutar para seguir una trayectoria. Es necesario entonces, desarrollar los algoritmos de control de los actuadores para poder ejecutar las acciones lo más cercano a lo planeado.

### 7.5.1 Modelo Cinemático de la PMP

Se utilizará un modelo cinemático similar al de bicicleta, que colapsa IW ( $\sigma_{IW}$ ) y OW ( $\sigma_{OW}$ ), en una sola llanta delantera direccional W ( $\sigma_w$ ) y una trasera no direccional (Snider, 2009) para describir el movimiento cinemático de la PMP con velocidad longitudinal  $v_{PMP}$ , mediante el error de crosstrack de la llanta direccional  $e_{CTW}$ , el error del heading de la PMP al segmento actual de trayectoria a seguir  $e_{\psi_{PMP}} = \beta_{RC} - \Psi_{PMP}$  y el error de W al segmento actual de trayectoria a seguir  $e_w = e_{\psi_{PMP}} - \sigma_w$ , como se muestra en la figura 7.19.

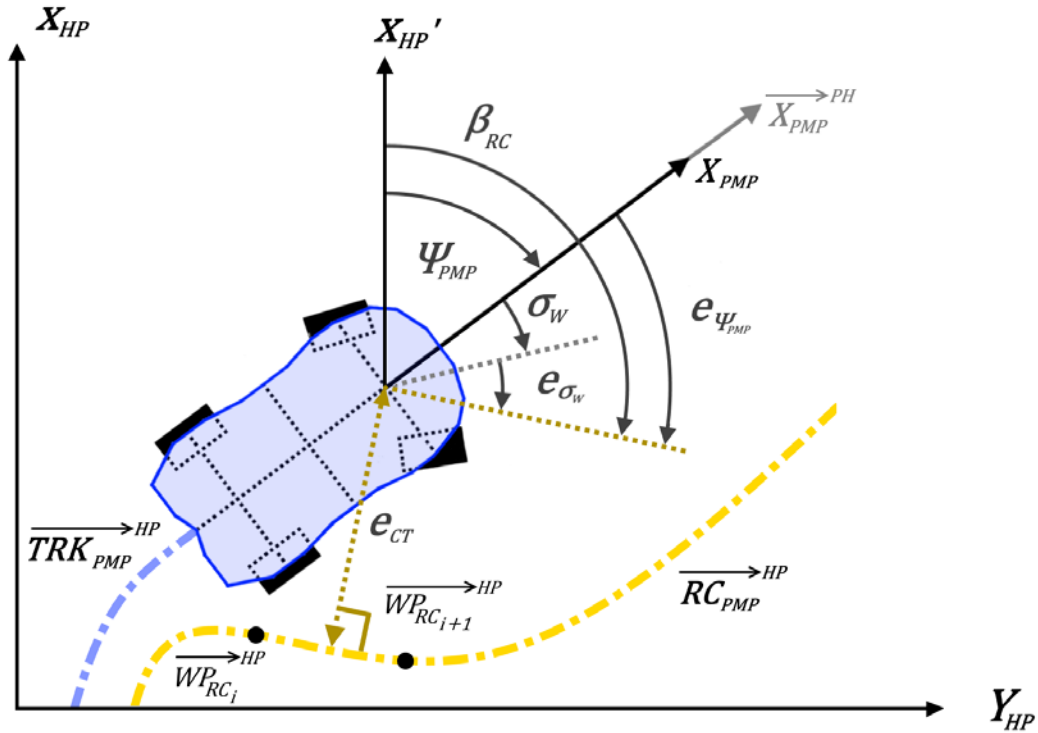


Figura 7.19: Modelo cinemático de la PMP

## 7.5.2 Control Lateral

- **Teoría**

Debido a que el sistema de dirección tiene un límite mecánico para el ángulo máximo de viraje  $\sigma_{wmax}$ , existirán 3 regiones de viraje: viraje saturado a la izquierda, viraje distribuido, viraje saturado a la derecha.

Un razonamiento inicial entregó la siguiente ley de control lateral:

$$\sigma_w(t) = \begin{cases} e_{\psi_{PMP}}(t) & , \quad |e_{\psi_{PMP}}(t)| < \sigma_{wmax} \\ \sigma_{wmax} & , \quad e_{\psi_{PMP}}(t) \geq \sigma_{wmax} \\ -\sigma_{wmax} & , \quad e_{\psi_{PMP}}(t) \leq -\sigma_{wmax} \end{cases}$$

Con ésta ley de control lateral, se logra un incremento en el viraje de las llantas proporcional al ángulo de desviación a la trayectoria. En el caso que el vehículo esté dirigido en dirección contraria a la trayectoria, las llantas entran en zona de saturación correspondiente a la menor distancia por recorrer. Sin embargo, lo anterior no considera el error de crosstrack, ya que  $\sigma_w$  es independiente del valor de  $e_{CT_w}$ .

El Stanford Racing Team propone la adición de un término que considera el error de crosstrack y asegura un equilibrio estable del sistema en  $e_{CT_w} = 0$  (Hoffmann, Tomlin, Montemerlo, & Thrun, 2007). De este modo, para  $e_{CT_w} \gg 0$  el vehículo se dirige

perpendicularmente a la trayectoria y conforme  $e_{CT_w}$  disminuye, el vehículo converge exponencialmente a la trayectoria.

La ley de control lateral actualizada es:

$$\sigma_w(t) = \begin{cases} e_{\psi_{PMP}}(t) + \operatorname{atan} \frac{k \cdot e_{CT_w}(t)}{v_{PMP}(t)} & , \left| e_{\psi_{PMP}}(t) + \operatorname{atan} \frac{k \cdot e_{CT_w}(t)}{v_{PMP}(t)} \right| < \sigma_{w_{max}} \\ \sigma_{w_{max}} & , e_{\psi_{PMP}}(t) + \operatorname{atan} \frac{k \cdot e_{CT_w}(t)}{v_{PMP}(t)} \geq \sigma_{w_{max}} \\ -\sigma_{w_{max}} & , e_{\psi_{PMP}}(t) + \operatorname{atan} \frac{k \cdot e_{CT_w}(t)}{v_{PMP}(t)} \leq -\sigma_{w_{max}} \end{cases}$$

La figura 7.20 muestra el retrato de fase de un vehículo manejando con la ley de control lateral arriba presentada, con  $v_{PMP}(t) = 10$  [m/s],  $k = 2.5$  [m/s] y  $\sigma_{w_{max}} = 24$  [°]. Las líneas rojas son la frontera entre viraje distribuido (zona interna) y saturado (zona externa).

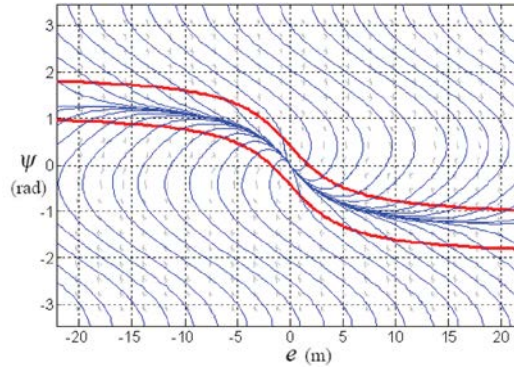


Figura 7.20: Retrato de fase de un vehículo con la ley de control lateral (Thrun, et al., 2006)

- **Implementación**

El control lateral está ligado directamente al sistema de dirección, por lo que será necesario controlar el SERVOH encargado de virar el mecanismo de dirección. El SERVOH de dirección de la PMP es analógico, marca Associated Electronics, modelo XP1016, con un voltaje de operación nominal  $VO_{ser} = 5$  [V] y un *rango de operación*  $RO_{ser} = 0 - 180$  [°] nominal (Associated Electronics Inc., 2016).

Un SERVOH es un ME cuya posición angular puede ser controlada por medio de un circuito de control retroalimentado, recibe un pulso de *duración*  $D_{ser}$  en un *rango de duración*  $RD_{ser}$  (depende del SERVOH en cuestión, normalmente  $RD_{ser} = 0.5 - 2.5$  [ms]) que necesita ser actualizado a cierta *frecuencia de operación*  $F_{ser}$  (normalmente  $F_{ser} = 50$  [Hz] para un SERVOH analógico), dependiendo de  $D_{ser}$ , el SERVO se dirige a una posición angular  $\sigma_{ser}$  dentro de  $RO_{ser}$  y la mantiene (Candelas & Corrales, 2007).

Es común que sea llamada erróneamente PWM o PPM (Arduino Forum, 2009), pues difiere de ambas en lo siguiente:

No es exactamente PWM, ya que la salida no está directamente ligada al *ciclo de trabajo*, pues se pueden alcanzar todas sus posiciones angulares bajo el mismo ciclo de trabajo (variando la frecuencia) y se puede alcanzar una misma posición angular bajo diferentes ciclos de trabajo.

Tampoco es una señal PPM, ya que en ésta el ancho de pulso es constante y la salida es dependiente de la posición del pulso. Dicho lo anterior y para evitar confusiones, en la presente tesis será llamada PWDM (modulación por duración del ancho de pulso), mostrada en la figura 7.21.

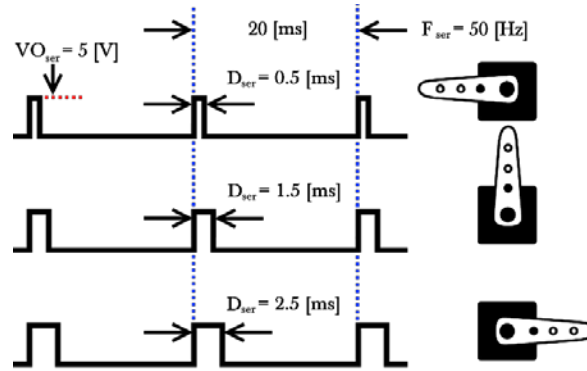


Figura 7.21: Señal PWDM (Cordero, 2016)

Se contactó al fabricante para conocer los valores arriba comentados, pero no contaban con éstos, por lo que se procedió a caracterizar el SERVOH. Se generó una señal PWDM con el MCU y se realizó un primer barrido de  $D_{ser}$  para encontrar  $RD_{ser}$  y se realizó un segundo barrido de  $D_{ser}$  dentro de  $RD_{ser}$ , para conocer las regiones de viraje del mecanismo de dirección. Los resultados aproximados se muestran en la figura 7.22.

$D_{ser}$ [ms]	$\sigma_{ser}$ [°]	$\sigma_w$ [°]
0.600 - 1.250	0 - 65	-30 ( $-\sigma_{w_{max}}$ )
1.260 - 1.490	66 - 89	-29 - 0
1.500	90	0
1.510 - 1.740	91 - 114	0 - 29
1.750 - 2.400	116 - 180	30 ( $\sigma_{w_{max}}$ )

Figura 7.22: Regiones de viraje del mecanismo de dirección

Una vez encontradas las regiones de operación, se programó la Ley de control lateral y posteriormente se evaluó por medio de pruebas en situaciones controladas.

### 7.5.3 Control Longitudinal

- **Teoría**

El planeador de movimientos entrega una velocidad recomendada de navegación de la PMP  $v_{nav}$ , por lo que se necesita un controlador que ajuste el giro del motor con base en el error de velocidad longitudinal  $e_{v_{PMP}} = v_{nav} - v_{PMP}$ .

Un controlador proporcional-integral-derivativo (PID) es el control retroalimentado más utilizado en la industria, debido a su robustez y clara implementación, lo que lo hace adecuado en un amplio rango de aplicaciones (National Instruments, 2011).

Un controlador PID consta de tres partes (Ogata, 1998):

- Respuesta Proporcional

La parte proporcional, como su nombre lo indica, aporta únicamente una respuesta proporcional a la señal de error. Incrementar la ganancia proporcional aumenta la velocidad de respuesta del sistema, pero si es muy grande puede llevar a oscilaciones en la salida.

- Respuesta Integral

La parte integral suma la señal de error con el paso del tiempo con la finalidad de llevar el error en estado permanente a cero, por lo que incluso ante errores pequeños incrementará poco a poco. Una errónea implementación puede llevar a que la parte integral sature el controlador sin llevar el error en estado permanente a cero.

- Respuesta Derivativa

La parte derivativa es proporcional a la velocidad de cambio de la señal de error. Incrementar la ganancia derivativa ocasiona que el sistema reaccione más agresivamente a cambios en el error y aumenta la velocidad de respuesta del sistema, pero la vuelve muy sensible a ruido, por lo que es común que sea muy pequeña.

Por lo mencionado, se propuso un controlador PID para la ley de control longitudinal:

$$v_{PMP}(t) = k_p \cdot e_{v_{PMP}}(t) + k_i \cdot \int_0^t e_{v_{PMP}}(t) \cdot dt + k_d \cdot \frac{de_{v_{PMP}}(t)}{dt}$$

La sintonización del controlador se realizará durante las pruebas en situaciones controladas.

El diagrama de bloques del control longitudinal de la PMP se muestra en la figura 7.23.

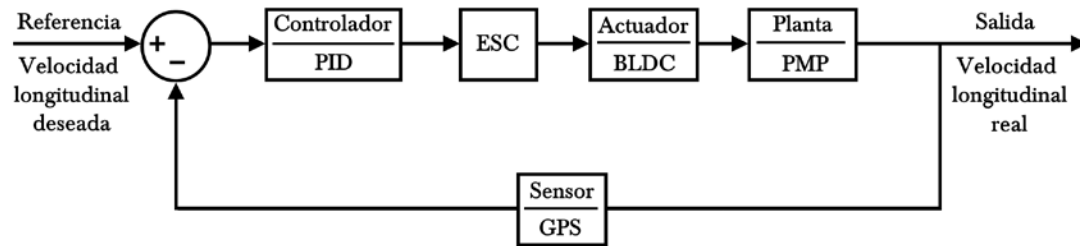


Figura 7.23: Diagrama de bloques del control longitudinal (Cordero, 2016)

- **Implementación**

El control longitudinal está ligado directamente al sistema de propulsión, por lo que será necesario controlar el ME para generar el movimiento de aceleración y frenado. El ME del sistema de propulsión de la PMP es un BLDC marca Reedy, modelo Micro Brushless Motor 5000kV, con  $RO_{ME} = 0 - 55,500$  [RPM] nominal (Associated Electronics Inc., 2014).

Un ESCH es un circuito electrónico que permite controlar el giro de un ME, recibe una señal PWM (como aquella utilizada para controlar el SERVOH) y dependiendo de  $D_{ESCH}$ , el ESCH puede activarse, girar el ME (considerando un sistema derecho) en sentido positivo, negativo o detenerlo. El ESCH del sistema de propulsión de la PMP es marca Reedy, modelo

Micro Brushless ESC con voltaje de operación nominal seleccionado de 7.4 [V] (Associated Electronics Inc., 2014).

Nuevamente se contactó al fabricante (mismo del SERVOH) para conocer los valores arriba comentados, pero no contaban con éstos, por lo que se procedió a caracterizar el ESCH. Se realizó un primer barrido de  $D_{ESCH}$  para encontrar el valor de activación  $VA_{ESCH}$  (se determinó  $VA_{ESCH} = 1.500 - 1.550$  [ms]). Se realizó un segundo barrido de  $D_{ESCH}$  para encontrar  $RD_{ESCH}$  (se determinó  $D_{ESCH} = 1.150 - 1.850$  [ms]). Se realizó un tercer barrido de  $D_{ESCH}$  dentro de  $RD_{ESCH}$ , para conocer su efecto en el giro del motor y por consecuente en la PMP. Los resultados se muestran en la figura 7.24.

$D_{ESCH}$ [ms]	Efecto de $RO_{ESCH}$ en giro del motor	Efecto longitudinal en la PMP
1.150	Máximas RPM en sentido negativo	Máxima velocidad en reversa
1.160-1.390	RPM distribuidas en sentido negativo	Velocidades descendentes en reversa
1.400	Mínimas RPM en sentido negativo	Mínima velocidad en reversa
1.410-1.490	Sin resistencia al giro	Llantas pueden girar libres
1.500-1.510	Freno	Llantas inmovilizadas
1.520-1.560	Sin resistencia al giro	Llantas pueden girar libres
1.570-1.590	Comportamiento errático	El vehículo vibra
1.600	Mínimas RPM en sentido positivo	Mínima velocidad de avance
1.610-1.840	RPM ascendentes en sentido positivo	Velocidades ascendentes de avance
1.850	Máximas RPM en sentido positivo	Máxima velocidad de avance

Figura 7.24: Efecto longitudinal en la PMP

Una vez encontrado el efecto longitudinal en la PMP, se programó el control longitudinal y posteriormente se evaluó por medio de pruebas en situaciones controladas.

## 7.6 Interfaz

Para poder interactuar con el MCU y obtener información visual de los procesos que se están realizando, se desarrolló una interfaz. Por medio de ella, podemos editar o crear nuevas trayectorias posicionando la PMP en una serie de WP, iniciar navegación, entre otros, y además interconecta la información de los módulos (figura 7.25).

Sus características son las siguientes:

- Una pantalla para mostrar información a corta distancia.
- 4 botones, que permiten desplazarse en menús de opciones (MODE), seleccionar una opción (SET), ejecutar una acción determinada (START) y reiniciar el microcontrolador (RESET).
- 4 LED de estado como indicadores: a corta distancia cada uno está asignado a un botón e indican si se han presionado, a larga distancia indican: tres de ellos indican el proceso actual que se está ejecutando y el último indica errores en los módulos por medio de destellos a diferentes frecuencias.

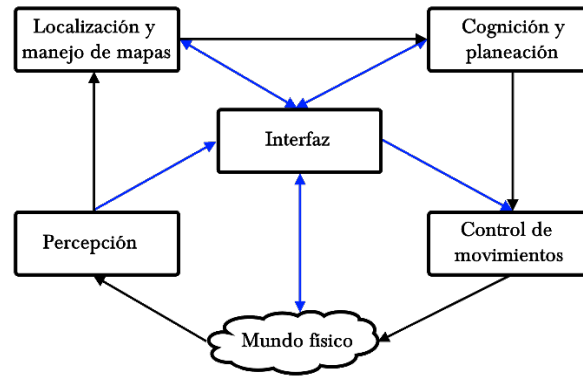


Figura 7.25: Interconexión de los módulos por medio de la interfaz (Cordero, 2016)

## 7.7 Resumen

Se desarrollaron cuatro módulos correspondientes a las cuatro tareas necesarias para una navegación autónoma y un módulo para interacción:

1. **Percepción:** A partir de datos en bruto del GYRO y ACCEL, se obtuvieron los ángulos  $\rho_{PMP}$  y  $\varphi_{PMP}$ , a partir de datos en bruto del GYRO y MAG se obtuvo el ángulo  $\Psi_{mag}$ , a partir de datos en bruto del GPS se obtuvieron  $\phi_{GPS}$ ,  $\lambda_{GPS}$ . Se aplicaron filtros digitales a las salidas para mejorar las representaciones de los valores verdaderos.
2. **Localización y manejo de mapas:** Se utiliza la información de Percepción para la encontrar la localización absoluta de la PMP, en función de su posición global y su heading al norte geográfico ( $\phi_{PMP}$ ,  $\lambda_{PMP}$ ,  $\Psi_{PMP}$ )
3. **Cognición:** Se desarrolló un algoritmo capaz de decidir las acciones a seguir con base en la localización y WP actuales, que envía instrucciones para seguir una trayectoria.
4. **Control de movimientos:** Se desarrollaron dos controladores (lateral y longitudinal), que ejecutan las instrucciones de Cognición e intentan minimizar el error entre el  $TRK_{PMP}$  y  $RC_{PMP}$ .
5. **Interfaz:** Se desarrolló un módulo que permite obtener e ingresar información al NAVSYS.

Las 3 áreas (mecánica, eléctrica-electrónica y programación) se encuentran funcionales, por lo que la PMP está lista para pruebas de navegación en trayectorias reales.



## Capítulo 8

# Pruebas y Resultados

*There is nothing impossible,  
for him who will try.*  
—Alexander the Great

### 8.1 Introducción

En este capítulo se presentan las pruebas en situaciones controladas realizadas al sistema completo (AUTONAV), así como la evaluación de su desempeño en comparación a propuestas similares, en la Autonomous Vehicle Competition Mexico (AVCMX) 2016 y 2017.

Todas las pruebas en situaciones controladas fueron realizadas en un estacionamiento de cemento considerado como una superficie horizontal: libre de baches, piedras, reductores de velocidad y además sin obstáculos superiores (para evitar bloqueos del GPS). Fueron basadas en los eventos dinámicos de Formula SAE (SAE International, 2014) y se adaptaron para probar las capacidades de un vehículo autónomo.

- Acceleration
- Skidpad
- Autocross
- Endurance

### 8.2 Pruebas en Situaciones Controladas

Estas pruebas sirven a doble propósito: evaluar las capacidades del AUTONAV y preparación para un evento de vehículos de competición.

## 8.2.1 Acceleration

- Objetivos:
  1. Sintonizar el controlador longitudinal
  2. Evaluar el desempeño del AUTONAV en recta
- Prueba:

Se coloca el AUTONAV desviado ( $e_{\psi_{PMP}} \neq 0$ ,  $e_{CT_w} \neq 0$ ) en varios  $RC_{PMP}$  formados por rectas de determinada longitud y con diferentes velocidades recomendadas asignadas para que sean recorridos en tiempos determinados.

La sintonización del controlador longitudinal y la prueba continuaron hasta que se mantuvo  $e_{v_{PMP}} \leq 10\%$ .

## 8.2.2 Skid Pad

- Objetivos:
  1. Encontrar la máxima velocidad en curva a la que el AUTONAV puede virar antes de derrapar o voltearse
  2. Evaluar la capacidad en curvas del AUTONAV al virar a un radio constante
- Prueba:

Se plantea un circuito de prueba donde  $RC_{PMP}$  está formado por dos círculos tangentes de igual diámetro. El inicio es en un lado de la unión y la meta es el lado contrario (figura 8.2). Por medio de varias vueltas, se hace un barrido con diferentes velocidades recomendadas hasta encontrar la máxima velocidad en curva.

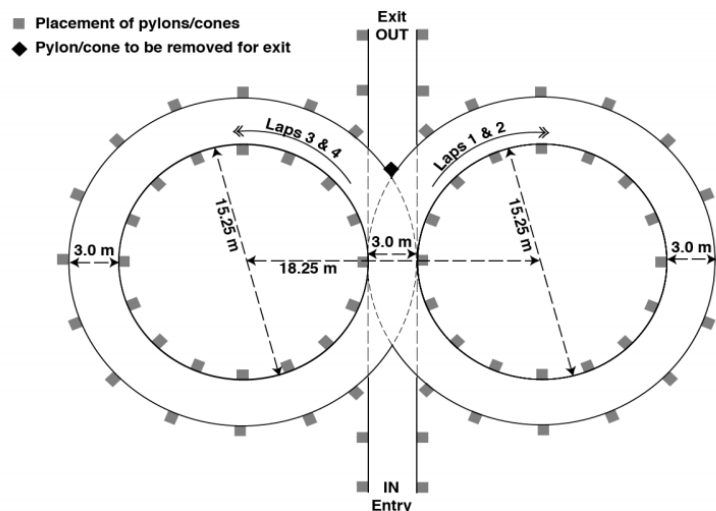


Figura 8.2: Prueba Skid Pad (SAE International, 2014)

### 8.2.3 Autocross

- Objetivos:
  1. Ajustar Localización y Cognición
  2. Sintonizar el controlador lateral
  3. Evaluar la maniobrabilidad del AUTONAV en un circuito complejo
- Prueba:

Se forma un circuito de prueba, donde  $RC_{PMP}$  está compuesto por curvas cerradas izquierdas y derechas (figura 8.3). Conforme el AUTONAV recorre el circuito, cuando  $e_{CT_w}$  es mayor que un radio determinado se toma en cuenta como abandono de circuito. Al final de la prueba se analiza recorrido dentro vs fuera del circuito, se modifican valores en Localización, Cognición y el controlador lateral, y se repite.

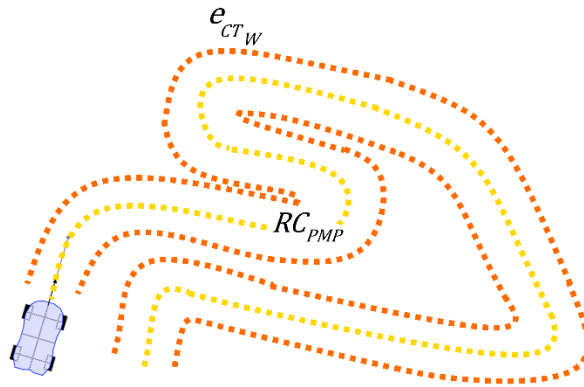


Figura 8.3: Prueba Autocross (Cordero, 2016)

La sintonización y la prueba continuaron hasta que se alcanzó un 80% de recorrido dentro del circuito, con  $e_{CT_w} \leq 2.5$  [m] (error aproximado del GPS) y  $e_{\psi_{PMP}} \leq 2$  [°] (error aproximado del MAG)..

### 8.2.4 Endurance

- Objetivos:
  1. Evaluar el desempeño general, durabilidad y confiabilidad del AUTONAV
- Prueba:

Se forma un circuito de prueba en forma de óvalo, considerando abandono del circuito cuando  $e_{CT_w} > 3.5$  [m]. El AUTONAV recorrerá el circuito y no deberá abandonarlo ni tener fallas en un número determinado de vueltas.

La sintonización general y la prueba continuaron hasta que se alcanzaron 10 vueltas de recorrido sin incidentes.

La figura 8.4 muestra el desempeño de los controladores lateral y longitudinal ya sintonizados, con valores iniciales:  $e_{\psi_{PMP}} = 130$  [°],  $e_{CTW} = 1$  [m].

En la zona inferior se puede notar la transición de viraje saturado a distribuido alrededor de los 1.9305 [s] y la labor del controlador lateral para mantener  $e_{\psi_{PMP}} \leq 2$  [°].

En la zona superior se puede notar la labor del controlador longitudinal para mantener  $e_{v_{PMP}} \leq 10\%$ . Se aprecia que el mayor sobrepaso sucede cuando sale de zona de aceleración.

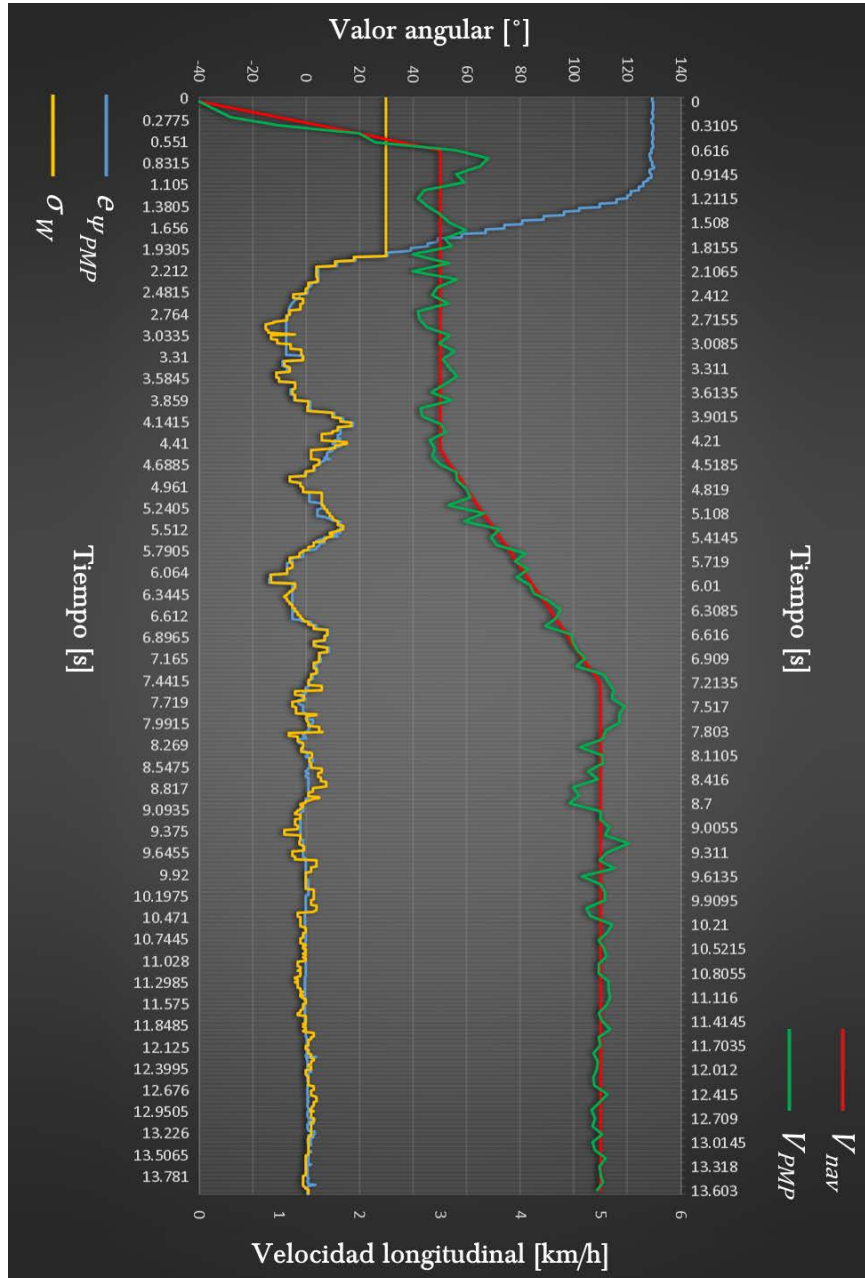


Figura 8.4: Desempeño de los controladores lateral y longitudinal (Cordero, 2016)

Cabe notar que los valores mostrados son estimaciones del NAVSYS basadas en mediciones de los sensores, por lo que puede existir ligeras disparidades con los valores reales.

## 8.3 Autonomous Vehicle Competition MX 2016

Con la finalidad de presentar el AUTONAV ante un ambiente no controlado, con condiciones no previstas, y comparar su desempeño con proyectos similares, se decidió inscribirlo bajo la designación B-1 a la AVCMX 2016, convocada por la Asociación Mexicana de Mecatrónica, celebrada del 23 – 25 de octubre del 2015.

El evento es una carrera de vehículos autónomos con hasta 5 vehículos en ruta al mismo tiempo. Las reglas principales son (Asociación Mexicana de Mecatrónica, 2015):

1. El vehículo debe ser completamente autónomo. No se permiten transmisores de radio frecuencia, infrarrojos, faros de comunicación y/o posicionamiento instalados alrededor de la pista, ni sistema alguno que permita la interacción del usuario.
2. Una prueba exitosa es aquella donde el vehículo navega los 4 puntos de control (banderas amarillas) y cruza la línea de meta en un tiempo menor a los 5 minutos. Los puntos base-tiempo empiezan en 300 y se van restando de acuerdo al tiempo que pase, 1 punto por segundo, hasta que el robot termine la ruta.  
Se pueden ganar puntos aun si no se completa el recorrido, se ganan 25 puntos después de pasar exitosamente una esquina (el vehículo debe pasar completamente la esquina, no solamente llegar a ella).

La competencia constó de cuatro etapas: pruebas libres (2 días), prácticas en circuito (2 horas), eliminatorias (2 carreras) y finales (2 carreras).

### 8.3.1 Pruebas Libres

Se contó con dos días para realizar pruebas libres de los vehículos sin un circuito delimitado, por motivos personales no se pudo asistir el primer día. Ya en la competencia, se notó que muchos equipos se encontraban practicando en la misma zona, se observó su comportamiento, se midieron sus tiempos y se intuyó que su desempeño sería menor que el de B-1, por lo que se decidió no tendría caso practicar en un área tan concurrida y perder tiempo por obstaculizaciones o arriesgarse a incidentes, por lo que se desplazó a otra zona del campus, donde nuevamente se corrieron pruebas generales (acceleration, skidpad, autocross, endurance) y se continuó la sintonización para mejorar el comportamiento.

### 8.3.2 Prácticas en Circuito

Al día siguiente fue instalado en la zona previamente concurrida, el circuito de competencia, delimitado por conos naranjas, sin información de inicio/meta ni sentido de circulación, por lo que se asignaron identificadores a las características del circuito, la figura 8.4 muestra la delimitación aproximada del circuito sobre la imagen satelital (Google Maps, 2016) de la zona de competencia.

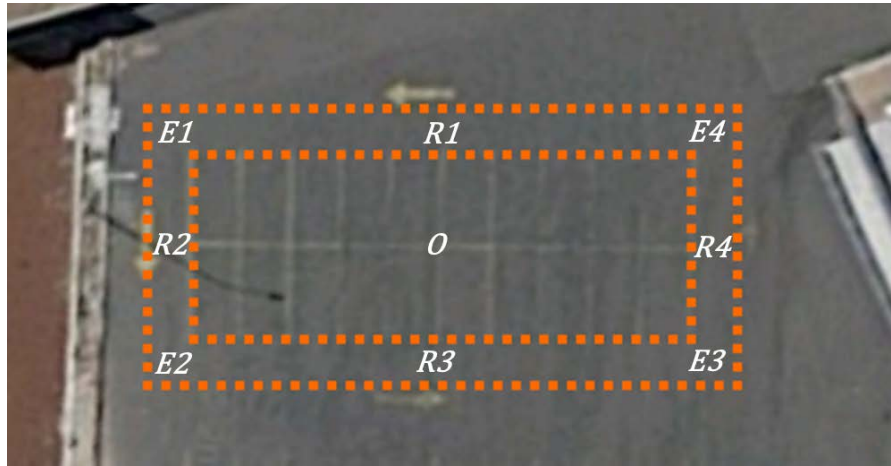


Figura 8.4: Representación aproximada del circuito en AVCMX 2016 (Cordero, 2016)

Específicamente la zona del circuito presenta los siguientes inconvenientes:

- **Piedras de hasta el 50% de diámetro de las llantas distribuidas a lo largo del terreno**  
La PMP tiene un libramiento en la parte posterior entre base y suelo de 2 [cm], por lo que puede llegar a atascarse o desviarse de  $RC_{PMP}$ . Remover las piedras se marcó como ilegal por parte de los jueces al considerarlas como parte del reto.
- **Barrera de cemento y pared de piedra/zona de jueces y espectadores**  
Hay una barrera de cemento paralela a R-2 a menos de 1.5 [m] de distancia del circuito y una pared de piedra a la derecha de R-4, con la dificultad agregada que la zona de jueces y espectadores se encuentra frente a la pared y a menos de 1 [m] del circuito. Dado que el GPS tiene un error aproximado de 2.5 [m] pueden presentarse colisiones al finalizar R-1, en ambas direcciones de recorrido.
- **Zona de tierra**  
En E-3, se encuentra una zona de tierra de profundidad aproximada de 2 [cm], la zona cubre aproximadamente  $\frac{3}{4}$  de la esquina y si el vehículo entra en ella puede atascarse. Remover la tierra de E-3 se marcó como ilegal por parte de los jueces al considerarla como parte del reto.
- **Circuito delimitado**  
Todo el circuito está delimitado hacia ambos lados por una serie de conos anaranjados con un ancho de 1.5 [m]. Los jueces anunciaron que si el vehículo toma las curvas por adentro del área delimitada se contará como esquina no completada (tomar las curvas por fuera del área delimitada aún cuenta como esquina completada).

Se introdujeron las características del circuito al sistema y se realizaron 10 vueltas iniciales en el circuito, 5 en sentido horario y 5 en sentido anti horario.

Durante las pruebas en circuito se comprobó que los problemas mencionados efectivamente afectaron a B-1.

1. Las piedras tuvieron impacto en las estimaciones de distancia ya que en ocasiones al chocar con ellas  $\psi_{PMP}$  cambiaba casi  $90^\circ$ , agregando al recorrido distancia no

planeada, pero lo suficientemente aleatoria para no poder realizar un cálculo de la trayectoria y conocer la distancia agregada.

2. En tres ocasiones B-1 colisionó contra la barrera de concreto a máxima velocidad y en una ocasión contra la zona de jueces. Al revisar el log, cuando se presentaron las colisiones, la localización por GPS tuvo los errores orientados hacia los obstáculos por lo que no consideró destino alcanzado y el vehículo continuó avanzando. Las colisiones se presentaron sin evitarlas manualmente ya que se esperó hasta el último instante antes del impacto para identificar si se dispararía el comportamiento de viraje. Después de cada impacto se revisó la integridad del sistema esperando encontrar piezas de acrílico rotas sin embargo el atenuador de impactos disipó la energía suficiente para evitarlo.
3. En dos ocasiones B-1 entró en la zona de tierra de E-3 y se atascó en ella, fue necesario levantarlo o empujarlo manualmente para desatascarlo.

Se implementaron las siguientes soluciones:

1. Se agregó un algoritmo a Cognición que, bajo ciertas condiciones, identifica si una desviación del RC de B-1, ha sido intencional o no intencional. Con base en lo anterior y un umbral de desviación, Cognición da la instrucción de recalcular la distancia recorrida.
2. Considerando el punto anterior como mejora en la estimación de distancia, en R-1 se disminuyó el peso asignado a los datos proporcionados por el GPS con la finalidad de evitar choques. Además, las curvas en E-1, E-2 y E-4 se planearon más cercanas al circuito interior agregando puntos intermedios, con la finalidad de reducir aún más las probabilidades de impacto.
3. Al encontrarse en E-3, se dispara una bandera que incrementa la velocidad recomendada en 10%, que en caso de que B-1 ingrese y se atasque en la zona de tierra, lo ayudará a salir de esa zona sin intervención manual. Al salir de la curva, no se aplica más este incremento. El tener una diferenciación entre los coeficientes utilizados en E-3 y el resto de curvas del circuito disminuye la posibilidad de derrapes y volcaduras al no incrementar velocidad en curvas donde no se necesita.

Al terminar las mejoras se corrió otras 10 veces en pista, y B-1 obtuvo los siguientes resultados:

- Siempre estuvo dentro del rango permitido para considerar las curvas como esquina completada y por tanto circuito completo.
- Nunca sufrió colisiones con la barrera de cemento.
- Ingresó en la zona de tierra 3 de las 10 ocasiones, pero nunca permaneció atascado más de 1 [s], siempre salió de la zona.
- Nunca sufrió colisiones con la zona de jueces.
- Tiempo promedio de circuito completo: 44.1 [s].

Se continuaron las pruebas en circuito hasta 5 minutos antes de completar las 2 horas, cuando otro participante no siguió las reglas de seguridad de la competencia e ingresó al circuito sin autorización interponiéndose en la trayectoria de B-1, para evitarlo saltó prematuramente y cayó sobre él, rompiendo la base principal, el soporte de la LCD y el soporte de la BATT. Se reparó in situ y los jueces concedieron una última vuelta para probar la integridad del sistema.

Al cambiar la posición de algunos componentes el CM cambió, pero el desempeño general del sistema continuó siendo correcto.

### 8.3.3 Eliminatorias

Se registraron 22 equipos inscritos, de instituciones de educación superior como, IPN UPIITA, ITESM Campus Ciudad de México, ITM, entre otros. Se asignó un número de competidor a cada vehículo (#17 a B-1) y se estableció que los vehículos realizarían intentos individuales para terminar el circuito, en el orden asignado. Se corrieron dos fases de eliminatorias y el mejor de los dos intentos se tomó en cuenta para la clasificación. Entre la primera y la segunda fase se permitió a todos los equipos realizar cualquier modificación necesaria para mejorar el rendimiento de su vehículo, siempre y cuando éste siga cumpliendo con las reglas.

El orden de recorrido se asignó E1-E2-E3-E4, iniciando en el centro del circuito y finalizando a la mitad de R-4, con distancia total aproximada de 112 [m]. Los 4 primeros lugares clasificaron a las finales.

La figura 8.5 muestra los 3 mejores puntajes de la etapa de eliminatorias:

Pos.	Vehículo	Institución de origen	Tiempo 1ª fase [s]	Puntaje 1ª fase	Tiempo 2ª fase [s]	Puntaje 2ª fase
1	B-1	UNAM, Facultad de Ingeniería CU	44.3	355.7	44.7	355.3
2	Mastretta	Instituto Tecnológico de México, Campus Ciudad Guzman	55 (aprox.)	345 (aprox.)	51 (aprox.)	349 (aprox.)
3	La Bestia	Instituto Tecnológico Superior de Puerto Vallarta	65 (aprox.)	335 (aprox.)	62 (aprox.)	338 (aprox.)

Figura 8.5: Primeros 3 lugares de la etapa de eliminatorias en AVC MX 2016

Al tener el mejor desempeño en la fase de eliminatorias B-1 calificó a la etapa de finales junto con otros 3 vehículos.

### 8.3.4 Finales

Nuevamente se asignó un número de competidor a los equipos (#3 a B-1) y se realizó por orden intentos individuales de terminar el circuito, también se corrieron dos fases de finales.

El orden de recorrido se mantuvo igual que en la etapa de eliminatorias.

En la primera fase, B-1 tuvo un contratiempo al no poder superar una zona con gran número de piedras finalizando R-1, por lo que fue considerado como circuito no completado. Al revisar a B-1, se encontró que la BATT se encontraba cerca del mínimo por celda, se consideró ésta la posible causa del contratiempo y se sustituyó por una con carga completa.

Entre la primera y la segunda fase se permitió a todos los equipos realizar cualquier modificación necesaria para mejorar el rendimiento de su vehículo, siempre y cuando el vehículo siga cumpliendo con las reglas.



Previo a la etapa de finales el equipo del ITM Campus Ciudad Guzmán realizó ajustes a su vehículo de manera que obtuvo en la primera fase de finales un tiempo parejo al obtenido por B-1 en la etapa de eliminatorias.

En *Tune to Win* (Smith, 1978) se comenta que el factor más importante en el desempeño de un vehículo de carrera es su capacidad de aceleración en recta y existen varios factores que dictaminan aquella capacidad del vehículo como tracción de las llantas, potencia del motor, drag aerodinámico entre otros.

Después de la aceleración en recta, la aceleración en curva (también llamada potencia en curva) es determinante en el desempeño del vehículo. Mientras más rápido pueda un vehículo cruzar una curva será menor su tiempo de vuelta, ya que:

1. A mayor velocidad, menor tiempo tardará en recorrer esa sección de la pista.
2. Al abandonar la curva a cierta velocidad, un vehículo X tardará menos en recorrer la recta que prosigue comparado con un vehículo Y que abandone la curva a una velocidad menor y deba incrementar su velocidad hasta igualar la de X.

Dicho lo anterior y dada la situación de ser la última oportunidad de conseguir un lugar en el podio, se apostó por incrementar 5% a la velocidad recomendada (y por tanto aumentado su capacidad de aceleración), aplicable en todo el RC, para alejarse del tiempo conseguido por el ITM Campus Ciudad Guzmán.

Para contrarrestar el movimiento de roll de B-1 (presentado al tomar una curva) es necesario incrementar la fuerza lateral generada por la llanta. Sin la caracterización de la llanta, no es posible conocer con exactitud el valor de camber que proporciona mayor fuerza lateral, sin embargo, sabiendo que todas las vueltas del circuito son a la izquierda, y que en vehículos de carrera el camber que genera mayor fuerza lateral en dirección interna a la curva es de  $4^\circ$  [48], se hizo un ajuste de camber negativo a  $4^\circ$  en las llantas derechas (exteriores a la vuelta) y de camber positivo a  $4^\circ$  en las llantas izquierdas (interiores a la vuelta).

El mejor de los dos intentos se tomó en cuenta para el podio: los mejores 3 desempeños recibieron 1<sup>o</sup>, 2<sup>o</sup> y 3<sup>er</sup> lugar.

En la segunda fase, B-1 completó el circuito exitosamente.

Con un tiempo de 35.1 [s] (20.7 % menor a la etapa de eliminatorias), velocidad promedio de 11.52 [km/h] y un puntaje de 364.9, B-1 se proclamó campeón de la competencia a nivel nacional. Las posiciones finales se muestran en la figura 8.6:

Pos.	Vehículo	Institución de origen	Tiempo 1 <sup>a</sup> fase [s]	Puntaje 1 <sup>a</sup> fase	Tiempo 2 <sup>a</sup> fase [s]	Puntaje 2 <sup>a</sup> fase
1	B-1	UNAM, Facultad de Ingeniería CU	No completó el circuito	25	35.1	364.9
2	Mastretta	Instituto Tecnológico de México, Campus Ciudad Guzman	45 (aprox.)	355 (aprox.)	44 (aprox.)	356 (aprox.)
3	La Bestia	Instituto Tecnológico Superior de Puerto Vallarta	62 (aprox.)	338 (aprox.)	60 (aprox.)	340 (aprox.)

Figura 8.6: Podio en AVCMX 2016

## 8.4 AUTONAV Mk. II

El desarrollo del proyecto fue pausado por una estancia académica de 1 + 7 meses en Alemania, primero en Goethe-Insitut Dresden (Nov – Dic 2015) y después en Universität Stuttgart (Feb - Oct 2016).

Ya de regreso en México, se planteó la posibilidad de competir en la AVC MX edición 2017 a celebrarse 2 semanas después, del 20 al 22 de octubre del 2016. Ante el poco tiempo disponible, se realizaron mejoras sólo en lo que se consideró de mayor impacto en el desempeño del vehículo y que pudiera ser realizado en 14 días.

Se siguió un proceso condensado similar al del AUTONAV Mk. I, se intercaló el trabajo de la fase 1, 2 y 3 para evitar tiempo muerto entre los envíos. La distribución temporal se muestra en la figura 8.7.

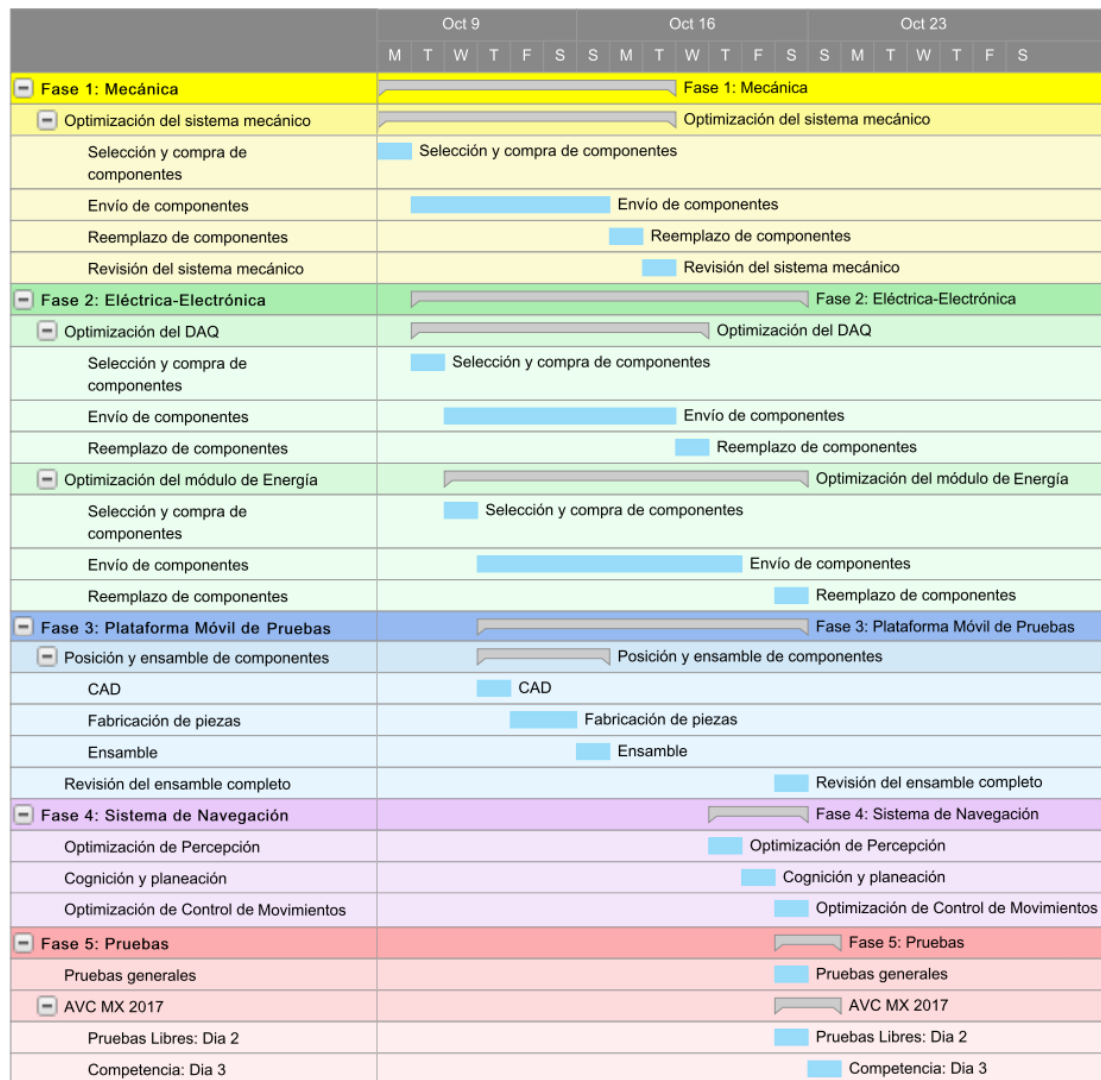


Figura 8.7: Distribución temporal del AUTONAV Mk.II

## 8.4.1 Fase 1, Mecánica: Revisión y Optimización

- **USM**

Incrementar el ancho de una llanta puede mejorar el desempeño de un vehículo en carrera ya que, al incrementar la huella de la llanta, hay mayor contacto con la superficie y por consecuente, mayor agarre y mayor velocidad en curvas, así como mayor facilidad de tracción a la salida de una curva (Pirelli & C. S.p.A., s.f.)

Se aprobó el reemplazo de las llantas actuales por otras de adaptación directa, con un ancho 36.36% mayor y un diámetro 16.25% mayor.

- **Suspensión**

Incrementar el *track de un vehículo* (VTRK) puede mejorar su desempeño, ya que reduce la transferencia de carga para una determinada aceleración centrífuga (Smith, 1978).

Además, la geometría de la suspensión (en combinación con el diámetro de las llantas) del AUTONAV Mk.I, permiten un libramiento en la parte posterior entre base y suelo de 2 [cm], que mostró un aspecto negativo al favorecer atascamientos con obstáculos como piedras.

Se aprobó el reemplazo de los A-Arms y CVD por otros de adaptación directa, logrando un incremento del 9% en VTRK.

Se aprobó el reemplazo de los elementos resorte-amortiguador por otros de adaptación directa, variando la geometría de la suspensión (en combinación con el nuevo diámetro de las llantas) se logró un incremento del 30% en libramiento entre base y suelo.

- **Dirección**

Una mayor velocidad angular y par del SERVOH, puede mejorar la respuesta del vehículo y traducirse en un mejor control lateral.

Se aprobó el reemplazo del SERVOH por otro de dimensiones similares, con incrementos nominales del 66.6% en velocidad angular y 262.5% en par.

- **Sistema de Propulsión**

Bajo ciertas condiciones de velocidad, el ME puede presentar *cogging torque*, el cual es causado por la interacción entre estator y rotor, provocando vibraciones. (Hartman & Lorimer, 2000). Un *sensored* ME puede disminuirlo, ya que cuenta con sensores Hall que detectan en todo momento la posición del rotor y permite al circuito que lo controla, ajustar los pulsos correctamente, además pueden permitir un mejor par de arranque (Higgins, 2011).

Se aprobó el reemplazo por un *sensored* ME de adaptación directa, pero con un diámetro 21.7% mayor.

## 8.4.2 Fase 2, Eléctrica-Electrónica: Revisión y Optimización

- **DAQCON**

El IMU y el MAG, probaron ser de gran ayuda en la navegación y son los únicos módulos del DAQ que al cambiarlos puede incrementar significativamente su precisión sin incrementar significativamente el costo.

Se aprobó su reemplazo por un módulo de orientación absoluta (AOM) que incluye un ACCEL de 3 ejes, un GYRO de 3 ejes y un MAG de 3 ejes.

Se agregó una cámara 1080p FULLHD, un módulo de grabación y se modificó el CON para poder controlarlo, con la finalidad de obtener secuencias FPV.

- **PWR**

El ESCH utilizado no tiene soporte para un sensor ME, por lo que se aprobó su reemplazo por uno que sí lo tiene. Los nuevos ME y ESCH tienen mayores dimensiones que los anteriores, por lo que se acomodaron los componentes y el espacio para la batería disminuyó. Se aprobó su reemplazo por una de menores dimensiones.

### 8.4.3 Fase 3, PMP: Revisión y Optimización

- **Posición y ensamble de los componentes**

Ante colisiones presentadas anteriormente, el atenuador de impactos disipó la energía suficiente para evitar quebraduras de la base principal, sin embargo, con las modificaciones en llantas, VTRK, SERVOH, ME y ESCH, se espera correr a mayor velocidad, por lo que las colisiones pueden implicar mayor energía. Aunado a la rotura de la base principal y soporte de pantalla en AVCMX 2016, se aprobó el cambio del material de acrílico a aluminio 6061. Además, se planteó agregar un atenuador de impactos ante volcaduras.

Para compensar el incremento del CM en dirección negativa a  $Z_{PMP}$ , provocado por la mayor densidad del aluminio comparada con el acrílico y al 30% de libramiento añadido por los cambios en llantas y suspensión, se eliminó el soporte inclinado de la pantalla y se fijó por debajo de la base principal, se eliminaron los dos soportes al chasis y se sustituyeron por 4 postes de plástico que disminuyen la altura de la base y DAQCON (dirección positiva a  $Z_{PMP}$ ) hasta los límites físicos posibles. Además, se les asignó una segunda función y se escogieron de 10 [cm] de longitud, por lo que funcionan como el atenuador de impactos ante volcaduras.

### 8.4.5 Fase 4, Sistema de Navegación: Revisión y Optimización

- **Percepción**

Se realizaron las modificaciones a Percepción para el (AOM), se programó el control del módulo de grabación, se revisó todo el código y se optimizó para una mejor ejecución.

- **Localización, Cognición y Planeación**

Se revisó todo el código y se optimizó para una mejor ejecución.

- **Control de Movimientos**

Se contactó al fabricante del nuevo SERVOH para conocer  $RD_{servoH}$ ,  $F_{servoH}$  y se realizó un barrido de  $D_{servoH}$  para encontrar las nuevas regiones de viraje del mecanismo de dirección. Se contactó al fabricante del nuevo ESCH para conocer  $VA_{ESCH}$ ,  $RD_{ESCH}$ ,  $F_{ESCH}$  y se realizó un barrido de  $D_{ESCH}$  para conocer los nuevos efectos en el giro del motor y por consecuente en la PMP. Posteriormente se actualizaron las leyes de control lateral y longitudinal.

## 8.5 AVCMX 2017

Las características de la competencia fueron muy similares a la edición 2016, con pequeños cambios:

- La sede fue la Universidad de Sonora en Hermosillo, debido a las instalaciones hubo mejoras en el terreno de competencia y circuito
- Las reglas iniciales de la competencia permanecieron iguales, pero se eliminaron las restricciones de tamaño y costo
- La competencia constó sólo de tres etapas: pruebas libres (2 días), prácticas en circuito (2 horas), se suprimieron las eliminatorias y se procedió directamente a finales (2 carreras)

### 8.5.1 Pruebas Libres

Se contó con dos días para realizar pruebas libres de los vehículos en el área de competencia sin circuito delimitado. Debido al poco tiempo de desarrollo para competir en AVCMX 2017, los días de pruebas libres el AUTONAV Mk.II aún estaba en construcción, por lo que se decidió no asistir el primer día por facilidad de herramienta e instalaciones, se asistió el segundo día de pruebas, se terminó el AUTONAV Mk.II in situ, y se inscribió nuevamente bajo la designación B-1. Ya en la competencia se revisó el terreno: a diferencia de la edición anterior, el terreno era plano en su totalidad (sin piedras), por lo que el desempeño de B-1 se esperó mejor. Sin embargo, por la alta temperatura (39 [°C]) los jueces recomendaron no realizar pruebas mayores a 15 minutos durante el día, por lo que el vehículo fue probado de 9 a 11 [pm].

La figura 8.8 muestra el AUTONAV Mk. II.



Figura 8.8: AUTONAV Mk.II

### 8.5.2 Prácticas en Circuito

Al día siguiente fue instalado un circuito rectangular delimitado por conos naranjas sin información de inicio/meta ni sentido de circulación, por lo que se asignaron identificadores a

las características del circuito, la figura 8.9 muestra la delimitación aproximada del circuito sobre la imagen satelital (Google Maps, 2016). En esta ocasión, sólo hubo un obstáculo a menos de 2.5 [m] del límite del circuito, cercano a E1.

Se probó 10 veces el nuevo sistema, 5 en sentido horario y 5 en sentido anti horario, obteniendo los siguientes resultados:

- B-1 siempre estuvo dentro del rango permitido para considerar las curvas como esquina completada y por tanto circuito completo
- B-1 nunca sufrió volcaduras
- B-1 sufrió una sola colisión.
- Tiempo promedio de circuito completo: 27.7 [s]



Figura 8.9: Representación aproximada del circuito en AVCMX 2017

Se continuaron las pruebas hasta agotar las 2 horas.

### 8.5.3 Finales

En la edición 2017 se eliminó la etapa de eliminatorias y todos los equipos inscritos (13) compitieron directamente por el podio. Se asignó un número de competidor a cada vehículo (#11 a B-1) y se estableció que los vehículos realizarían intentos individuales para terminar el circuito, en el orden asignado. Se corrieron dos fases de finales y el mejor puntaje obtenido de los dos intentos se tomó en cuenta para la premiación.

Esta nueva regla incrementó la dificultad de ganar la competencia, ya que los vehículos deben de funcionar correctamente los únicos dos intentos que tienen para aspirar a un buen lugar en el podio, a diferencia de la edición pasada, donde se tenían dos oportunidades para poner el vehículo a punto y bastaba con alcanzar un cuarto lugar para obtener dos oportunidades más para buscar un lugar en el podio.

El orden de recorrido se asignó E2-E3-E4-E1, iniciando en la mitad de R-1 y terminando en el mismo punto, con distancia total aproximada de 132 [m]

En la primera fase B-1 completó el circuito exitosamente con un tiempo de 26.4 [s]. Ningún otro vehículo completó el circuito en la primera fase. Debido a lo anterior, no se consideró necesario realizar ajustes para la segunda fase.

Entre la primera y la segunda fase se permitió a todos los equipos realizar cualquier modificación necesaria para mejorar el rendimiento de su vehículo, siempre y cuando el vehículo siga cumpliendo con las reglas.

En la segunda fase, el orden de recorrido se mantuvo igual, pero iniciando con  $\Psi_{PMP}$  distinto. Dos vehículos más lograron completar el recorrido con más de 20 [s] por encima del tiempo conseguido por B-1, por lo que con un tiempo de 26.4 [s], velocidad promedio de 18 [km/h] y un puntaje de 376.6, B-1 se proclamó bicampeón de la competencia a nivel nacional.

Las posiciones finales se muestran en la figura 8.10:

Pos.	Vehículo	Universidad de origen	Mejor tiempo [s]	Mejor puntaje
1	B-1	UNAM, Facultad de Ingeniería CU	26.4	376.6
2	Sin datos	Sin datos	ca. 40	ca. 350
3	RoboUAQ	Universidad Autónoma de Querétaro	ca. 50	ca. 350

Figura 8.10: Podio de AVCMX 2017

Se comprobó que las mejoras realizadas fueron exitosas ya que B-1 con AUTONAV Mk.II,

Cuantitativamente:

- Operó al 156.6 % de velocidad que con AUTONAV Mk.I sin sufrir volcaduras que pudieron ser provocadas debido al movimiento de roll por la aceleración centrífuga al tomar las curvas.
- Las colisiones con obstáculos durante AVCMX 2017 bajaron 50 % con respecto a AVCMX 2016.
- Incremento del 26.15 % en desempeño superior relativo al segundo lugar en AVCMX 2017 con respecto a AVCMX 2016.

Cualitativamente:

- Con un menor tiempo de pruebas libres (2 horas) y en circuito (2 horas) alcanzó un comportamiento merecedor del 1er lugar, comparado con AUTONAV Mk.I que fue probado todo el segundo día de pruebas libres y 2 horas en circuito.
- Se observó lo suficientemente superior como para decidir no realizar mejoras entre las dos fases de finales.
- Al ser probado en modo RC, se sintió un vehículo más responsivo a los comandos.

## 8.6 Resumen

Con la PMP y el NAVSYS completados, se realizó la integración del sistema completo AUTONAV.

Se diseñaron pruebas exhaustivas en situaciones controladas para comprobar y evaluar el funcionamiento de los módulos, controladores y comportamiento general. Mediante estas pruebas, se definieron los parámetros de operación del AUTONAV.

Para comparar el desempeño del sistema completo, se inscribió a la AVCMX 2016 bajo la designación B-1, donde se declaró campeón nacional ante otros 21 proyectos similares de universidades del país.

Después de una pausa en el desarrollo por causas académico-personales, se continuó el desarrollo por 14 días más, mejorando las 3 áreas del proyecto (mecánica, eléctrica-electrónica y sistema de navegación).

Se inscribió a la AVCMX 2017 nuevamente bajo la designación B-1, donde se proclamó bicampeón nacional probando ser aún el sistema con mejor desempeño ante otros 12 proyectos similares de universidades del país, incluso con una gran diferencia al segundo lugar, confirmando que las mejoras realizadas fueron exitosas.



# Capítulo 9

## Conclusiones

*I just want the future to happen faster.*

—Nolan Bushnell

El desarrollo de vehículos autónomos es un tema relevante de investigación hoy en día, universidades, empresas, institutos, equipos independientes e individuos contribuyen día con día a que un vehículo totalmente autónomo se vuelva realidad.

El presente trabajo abordó las 3 preguntas fundamentales de la navegación autónoma, por medio de desarrollos focalizados:

1. “¿Dónde estoy?” Percepción + Localización y manejo de mapas.
2. “¿A dónde voy?” Manejo de mapas + Cognición.
3. “¿Cómo llego ahí?” Cognición y planeación de movimientos + Control de movimientos.

Mediante estos desarrollos, se cumplieron los siguientes objetivos, planteados desde un inicio:

- Se diseñó y fabricó un módulo de adquisición de datos y control (DAQCON), capaz percibir datos del ambiente y filtrarlos digitalmente para mejorar la representación de los valores verdaderos. Se desarrolló un sistema de navegación autónomo (NAVSYS) que, con información obtenida del DAQCON, toma decisiones y planea acciones necesarias para seguir una trayectoria definida.

El filtrado digital de datos permitió al NAVSYS una mejor localización y, en consecuencia, un control de movimientos más fluido.

- Se seleccionó y mejoró un vehículo a escala, sobre el cual se instaló el DAQCON, obteniendo una plataforma móvil de pruebas (PMP).

El contar con un sistema mecánico robusto, fue de gran importancia ya que permitió que el NAVSYS no fuera tan dependiente de las características del terreno donde se navegue, pues disminuye el impacto de desniveles y pequeñas piedras. Además

Además, la capacidad para permanecer estable eléctrica y mecánicamente ante eventualidades como choques a alta velocidad y volcaduras fue un diferenciador en

AVCMX, pues mientras otros sistemas tuvieron inconvenientes posteriores a sufrir alguna de estas situaciones, AUTONAV permaneció funcional.

- El vehículo autónomo (AUTONAV) resultante de la unión de la PMP y el NAVSYS demostró ser capaz de seguir una trayectoria definida por un número finito de waypoints, minimizando el error entre ésta y el track, por medio de dos leyes de control: lateral y longitudinal.

Ambas leyes de control demostraron un buen desempeño:

La ley de control lateral mantuvo  $e_{CT_w} \leq 2.5$  [m] durante 80% de los recorridos en las pruebas controladas y  $e_{CT_w} \leq 1.5$  [m] durante el 100% del recorrido durante las últimas pruebas de finales en AVCMX.

La ley de control longitudinal mantuvo una diferencia entre  $v_{nav}$  y  $v_{PMP}$  menor al 10% tanto en pruebas controladas como en AVCMX.

Además de los objetivos, se desarrolló lo siguiente:

- Control de velocidad y dirección de giro de un ME tipo BLDC, por medio de un ESC (Capítulo 7, sección 7.5.3).
- Verificación de mejor desempeño del AUTONAV, entre 22 sistemas similares desarrollados por universidades de todo el país, en la Autonomous Vehicle Competition MX 2016, con pruebas en un ambiente no controlado, bajo circunstancias no previstas y desfavorables para su funcionamiento, como obstáculos, piedras de hasta 3 [cm] de diámetro, tierra suelta, entre otros (Capítulo 8, sección 8.3.4).
- Mejoras electromecánicas en la PMP y computacionales en el NAVSYS del primer sistema diseñado (Capítulo 8, sección 8.5.3).

Las mejoras se comprobaron exitosas, pues verificaron una vez más a AUTONAV como el sistema con mejor desempeño en AVCMX, esta vez en la edición 2017 ante 13 sistemas similares

Los conocimientos adquiridos durante mi formación académica en las tres áreas que conforman ingeniería mecatrónica, fueron de gran importancia para el desarrollo del trabajo: la PMP fue construida con conocimientos en mecanismos, elementos de máquinas, manufactura, etc., el DAQCON con conocimientos en electrónica, máquinas eléctricas, instrumentación, etc., y el NAVSYS con conocimientos en programación, control automático, robots móviles y agentes inteligentes, etc., todo fundamentado en las ciencias básicas, que en conjunto permitieron cumplir los objetivos planteados del proyecto.

Una principal ventaja del AUTONAV que permitió tener el mejor desempeño en AVCMX 2016 y 2017, fue el conocimiento distribuido en las tres áreas mencionadas, pues proporcionó una correcta integración al ser manejado como un sistema mecatrónico. Por esta razón, se le asignó la misma importancia a la correcta funcionalidad y robustez de las tres, pues al estar amalgamadas, un fallo en una de ellas implicaría un fallo en el sistema completo.

La experiencia en proyectos extracurriculares (principalmente en Lunambotics donde se desarrolló un robot de exploración planetaria para NASA CC y en UNAM Motorsports donde se desarrolló un vehículo tipo Fórmula) también fue de gran importancia, ya que permitió obtener conocimientos directamente aplicables al proyecto: en UNAM Motorsports se instruyó en vehículos y sus subsistemas principales, mientras que en Lunambotics se instruyó en técnicas

de navegación autónoma y robótica móvil.

La unión de las propuestas principales de ambos proyectos conlleva al desarrollo de un vehículo autónomo terrestre.

Uno de los principales obstáculos encontrados fue el no contar con un sistema de telemetría que permitiera monitorear el comportamiento del AUTONAV sobre la marcha y guardar los datos para uso a futuro, por lo que para estudiarlo era necesario realizar pruebas, pausar y transferir los datos del log a una computadora para analizarlos.

## 9.1 Trabajo a Futuro

El sistema cumplió los objetivos planteados en un inicio, sin embargo, existen varios avances que pueden realizarse para lograr un mejor funcionamiento.

Las principales áreas de mejora son las siguientes:

- Percepción: Implementación de sensores adicionales.
- Localización y manejo de mapas: Métodos predictivos en el algoritmo de localización, creación de mapas y evasión de obstáculos.
- Sistemas a prueba de fallas.
- Sistema de telemetría.

### 9.1.1 Percepción

- **Implementación de Sensores Adicionales**
  - **Encoders**

Implementar encoders en cada una de las llantas y utilizar los datos obtenidos con ellos para determinar la distancia recorrida por la PMP.
  - **Visión Artificial**

Se puede utilizar un sistema de visión para reconocer objetos presentes en el entorno.
  - **Tecnología LiDAR**

Obtener la distancia a objetos presentes en el entorno, con mayor alcance y tasa de muestreo comparado contra otras tecnologías (ultrasónico, infrarrojo, entre otras).

### 9.1.2 Localización y Manejo de Mapas

Complementar el algoritmo desarrollado con algún método predictivo que ayude a una localización más precisa, por ejemplo, la implementación de un *Filtro de Kalman*. Por medio de la adición de visión artificial y LiDAR, se puede mejorar la navegación al introducir detección de puntos de referencia (*landmarks*) y un sistema de planeación local basado en detección de obstáculos. También se pueden crear representaciones de entornos para ser utilizados a futuro cuando la PMP navegue el mismo ambiente.

### 9.1.3 Sistemas a Prueba de Fallas

A pesar de no experimentar fallas en el control automático del vehículo durante las pruebas y competencia, que conllevaran a que el vehículo avanzara sin control, se recomienda enérgicamente agregar un sistema a prueba de fallas en caso de presentarse un incidente desfavorable.

Algunas ideas son:

- **Control Manual Inalámbrico**

Por medio de los dispositivos RF incluidos con el VE cuando fue comprado, implementar un sistema de comunicación inalámbrica al AUTONAV que permita tomar control manual en caso de un mal funcionamiento del CON. Una de las posibles soluciones sería mandar la señal de salida del módulo receptor RF a pines de interrupción en el MCU de manera que, con la lógica correcta al detectar cierta señal, se pause el proceso actual y responda al control manual.

- **Kill - Switch Automático**

Añadir un switch electro-mecánico que abra la línea de alimentación del ME, en caso de detectar pérdida de alimentación en el DAQCON.

### 9.1.4 Sistema de Telemetría

Se puede agregar un sistema de telemetría bidireccional, que permita tanto recibir datos como enviar instrucciones

De esta manera, se puede monitorear el comportamiento del AUTONAV al momento y guardar aquellos datos para uso futuro, además de poder realizar ajustes sobre la marcha en su configuración y analizar cómo éstos afectan en el desempeño.

# Bibliografía

(n.d.).

Adafruit Industries. (2016). *Adafruit Ultimate GPS Breakout - 66 channel w/10 Hz updates - Version 3*. Obtenido de Adafruit: <https://www.adafruit.com/product/746>

Adafruit Industries. (2016). *Standard LCD 20x4 + extras - white on blue*. Obtenido de Adafruit: <https://www.adafruit.com/product/198>

AMain Hobbies. (2016). *RC Cars & Trucks*. Obtenido de Amain Performance Hobbies: <https://www.amainhobbies.com/rc-cars-trucks>

AMain Hobbies. (2016). *Search for 'SC18'*. Obtenido de Amain Performance Hobbies: <https://www.amainhobbies.com/search?s=sc18>

Arduino AG. (2016). *Arduino MEGA 2560 & Genuino MEGA 2560*. Obtenido de Arduino: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>

Arduino AG. (2016). *Arduino UNO & Genuino UNO*. Obtenido de Arduino: <https://www.arduino.cc/en/main/arduinoBoardUno>

Arduino AG. (2016). *Intel® Galileo Gen2*. Obtenido de Arduino: <https://www.arduino.cc/en/ArduinoCertified/IntelGalileoGen2>

Arduino Forum. (2009). *How does a servo work (PWM or PPM)?* Obtenido de Arduino Forum: <http://forum.arduino.cc/index.php?topic=14146.0>

Arduino Forum. (2010). *Power Consumption Arduino*. Obtenido de Arduino Forum: <http://forum.arduino.cc/index.php?topic=5536.0>

Asociación Mexicana de Mecatrónica. (2015). Obtenido de Asociación Mexicana de Mecatrónica: <http://www.mecamex.org/>

Associated Electronics Inc. (2014). *Micro Brushless Motor*. Obtenido de Team Associated: [https://www.teamassociated.com/pdf/cars\\_and\\_trucks/shared/Reedy%20Micro%20Motor%20Manual%20Sheet%2010%2014%2008.pdf](https://www.teamassociated.com/pdf/cars_and_trucks/shared/Reedy%20Micro%20Motor%20Manual%20Sheet%2010%2014%2008.pdf)

Associated Electronics Inc. (2014). *XPS Micro Speed Control*. Obtenido de Team Associated: [https://www.teamassociated.com/parts/details/29136-ASC29136-xps\\_micro\\_speed\\_control/](https://www.teamassociated.com/parts/details/29136-ASC29136-xps_micro_speed_control/)

Associated Electronics Inc. (2016). *Associated Electronics XPC1016 Servo*. Obtenido de Servo Database: <http://www.servodatabase.com/servo/associated-electronics/xpc1016>

- Autonomos Labs. (2015). *Autonomous Cars from Berlin*. Obtenido de Autonomos Labs: <http://autonomos-labs.com/>
- Autonomos Labs. (2015). *MadeInGermany*. Obtenido de Autonomos Labs: <http://autonomos-labs.com/vehicles/made-in-germany/>
- Axis Communications AB. (2010). *CCD and CMOS sensor technology*. Obtenido de Axis Communications: [https://www.axis.com/files/whitepaper/wp\\_ccd\\_cmos\\_40722\\_en\\_1010\\_lo.pdf](https://www.axis.com/files/whitepaper/wp_ccd_cmos_40722_en_1010_lo.pdf)
- Baddeley, G. (2001). *GPS - NMEA sentence information*. Obtenido de USING PRE-APRS (older) TNC FOR HOME OPERATIONS: <http://aprs.gids.nl/nmea/>
- Boothroyd, G., Dewhurst, P., & Knight, W. A. (2010). *Product Design for Manufacture and Assembly*. CRC Press.
- Brito, J. (2009). *Quadrotor prototype*. Tesis de Maestría. Universidade Técnica de Lisboa.
- Cambridge University Press. (2016). *autonomy*. Obtenido de Cambridge Dictionary: <http://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/autonomy>
- Cambridge University Press. (2016). *cognition*. Obtenido de Cambridge Dictionary: <http://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/cognition>
- Cambridge University Press. (2016). *navigation*. Obtenido de Cambridge Dictionary: <http://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/navigation>
- Candelas, F., & Corrales, J. (2007). *Servomotores*. Obtenido de Grupo AUROVA: <http://www.aurova.ua.es/previo/dpi2005/docs/publicaciones/pub09-ServoMotores/servos.pdf>
- CFE. (2017). *Consulta tu tarifa*. Obtenido de Comisión Federal de Electricidad: [http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/Tarifas\\_casa.asp?Tarifa=domesticas2003&anio=2017](http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/Tarifas_casa.asp?Tarifa=domesticas2003&anio=2017)
- China International Co. (2011). *5mm Standard Round White LED*. Obtenido de Adafruit: [https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/FLR-50T04-HW7+\(2012.02.22\).pdf](https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/FLR-50T04-HW7+(2012.02.22).pdf)
- Coenen, S. (2012). *Motion Planning for Mobile Robots - A Guide*. Tesis de Maestría. Eindhoven University of Technology.
- Cordero, J. (2016). *Diseño e Implementación de un Vehículo Terrestre no Tripulado con Sistema de Navegación Autónomo*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.
- DARPA. (2014). *The DARPA Grand Challenge: Ten Years Later*. Obtenido de Defense Advanced Research Projects Agency: <http://www.darpa.mil/news-events/2014-03-13>
- Fenske, J. (2012). *Suspensions*. Obtenido de Engineering Explained: <http://www.howdoesacarwork.com/p/6-suspensions.html>
- Fraden, J. (2004). *Handbook of modern sensors - Physics, Designs and Applications*. Springer.

- Freescale Semiconductor Inc. (2013). *Xtrinsic MAG3110 Three-Axis, Digital Magnetometer*. Obtenido de NXP Semiconductors: <http://www.nxp.com/assets/documents/data/en/data-sheets/MAG3110.pdf>
- Fried, L. (2015). *Wiring a Character LCD*. Obtenido de Adafruit: <https://learn.adafruit.com/character-lcds/wiring-a-character-lcd>
- Fried, L. (2016). *Adafruit Ultimate GPS*. Obtenido de Adafruit: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-ultimate-gps.pdf>
- Furuti, C. A. (1997). *Useful Map Properties: Shapes*. Obtenido de Progonos: <http://www.progonos.com/furuti/MapProj/Normal/MapProj/ShapePres/shapePres.html>
- Gi Min, H., & Tae Jung, E. (2015). *Complementary Filter Design for Angle Estimation using MEMS Accelerometer and Gyroscope*. Obtenido de Academia.edu: [http://www.academia.edu/6261055/Complementary\\_Filter\\_Design\\_for\\_Angle\\_Estimation\\_using\\_MEMS\\_Accelerometer\\_and\\_Gyroscope](http://www.academia.edu/6261055/Complementary_Filter_Design_for_Angle_Estimation_using_MEMS_Accelerometer_and_Gyroscope)
- Giesbrecht, J. (2004). *Global Path Planning for Unmanned Ground Vehicles*. Defense Research and Development Canada.
- Gillespie, T. (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrendale: Society of Automotive Engineers.
- Globalsat Technology Corp. (2013). *GLOBALSAT GPS Module Hardware Data Sheet*. Obtenido de Sparkfun Electronics: [https://cdn.sparkfun.com/datasheets/GPS/EM506\\_um.pdf](https://cdn.sparkfun.com/datasheets/GPS/EM506_um.pdf)
- GlobalTop Technology Inc. (2011). *FGPMMOPA6H GPS Standalone Module Data Sheet*. Obtenido de Adafruit: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/GlobalTop-FGPMOPA6H-Datasheet-VOA.pdf>
- Google Maps. (2016). *Satellite View*. Obtenido de Google Maps: <https://www.google.com.mx/maps>
- Grygorenko, V. (2014). *AN2272 PSoC 1 Sensing - Magnetic Compass with Tilt Compensation*. Obtenido de Cypress: <http://www.cypress.com/file/130456/download>
- HAOYU Electronics. (2016). *GY-521 MPU6050 3-Axis Acceleration Gyroscope 6DOF Module*. Obtenido de HAOYU Electronics: <http://www.hotmcu.com/gy521-mpu6050-3axis-acceleration-gyroscope-6dof-module-p-83.html>
- Happian-Smith, J. (2002). *An Introduction to Modern Vehicle Design*. Butterworth Heinemann.
- Hartman, A., & Lorimer, W. (2000). Cogging torque control in brushless DC motors. *Incremental Motion Control Syst. And Devies, 29Th Annu. Syrup. Proc*, págs. 237-243.
- HeTPro. (2016). *Regulador de voltaje Step-Down LM2596S con Display*. Obtenido de HeTPro: <https://hetpro-store.com/regulador-de-voltaje-step-down-lm2596s-con-display/>

- Higgins, M. (2011). *Brushless Motors: Sensored vs. Sensorless*. Obtenido de RC Truck Stop: <http://rctruckstop.com/2011/12/15/brushless-motors-sensored-vs-sensorless/>
- Hobbyking. (2016). *ZIPPY Compact 1800mAh 2S 50C Lipo Pack*. Obtenido de Hobbyking: [https://hobbyking.com/en\\_us/zippy-compact-1800mah-2s-40c-lipo-pack.html](https://hobbyking.com/en_us/zippy-compact-1800mah-2s-40c-lipo-pack.html)
- Hoffmann, G. M., Tomlin, C. J., Montemerlo, M., & Thrun, S. (2007). Autonomous Automobile Trajectory Tracking for Off-Road Driving. *American Control Conference* (págs. 2296-2301). IEEE.
- Honeywell International Inc. (2010). *3-Axis Digital Compass IC HMC5883L*. Obtenido de SOC Robotics: <http://www.soc-robotics.com/pdfs/HMC5883L.pdf>
- Honeywell International Inc. (2014). *Three-axis Compass with Algorithms HMC6343*. Obtenido de All Data Sheet: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/221160/HONEYWELL/HMC6343.html>
- Honeywell International Inc. (2016). *Application Note: Compass Heading Using Magnetometers AN-203*. Obtenido de Honeywell | Aerospace: [https://aerospace.honeywell.com/en/~media/aerospace/files/application-note/an203\\_compass\\_heading\\_using\\_magnetometers.pdf](https://aerospace.honeywell.com/en/~media/aerospace/files/application-note/an203_compass_heading_using_magnetometers.pdf)
- Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing. (2016). *GLONASS CONSTELLATION STATUS, 25.04.2017*. Obtenido de Information and Analysis Center for Positioning, Navigation and Timing: <https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/>
- INPC. (2017). *Precio de la gasolina 2017*. Obtenido de Índice Nacional de Precios al Consumidor: <http://elinpc.com.mx/precio-gasolina-2017/>
- inTrax. (2016). *Camber, Caster, Toe-in/Toe-out, explained*. Obtenido de inTrax Suspension Technology: <http://en.intraxracing.nl/techniek/camber,-caster,-toe-intoe-out/>
- Invensense Inc. (2013). *MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification*. Obtenido de Invensense: <https://www.invensense.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>
- István, H., & Gábor, B. (2011). *GPS technique*. Obtenido de Satellite Global Positioning Systems: [http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0033\\_SCORM\\_MFGGT6002-EN/sco\\_02\\_01.scorm](http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0033_SCORM_MFGGT6002-EN/sco_02_01.scorm)
- J. Borenstein, H. R. (1996). *"Where am I?" Sensors and Methods for Mobile Robot Positioning*. The University of Michigan.
- Jaycon Systems LLC. (2016). *3 Axis Magnetometer Breakout - HMC5883L*. Obtenido de Jaycon Systems: <http://www.jayconsystems.com/triple-axis-magnetometer-breakout-hmc5883l.html>
- LaValle, S., Yershova, A., Katsev, M., & Antonov, M. (2014). Head tracking for the Oculus Rift. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 187–194.



- Leonard, J. J., & Durrant-White, H. F. (1991). Mobile Robot Localization by Tracking Geometric Beacons. *IEEE transactions on robotics and automation*, 7(3), 376-382 .
- Malinen, E. (2015). *Fusion of Data from Quadcopter's Inertial Measurement Unit Using Complementary Filter*. Tesis de Licenciatura. Lappeenranta University of Technology.
- Matarić, M. J. (2007). *The Robotics Primer*. The MIT Press.
- MEMSIC Inc. (2010). *Low Profile, Low Consumption, ±2 g Dual Axis Accelerometer with Digital Outputs*. Retrieved from Memsic:  
<http://www.memsic.com/userfiles/files/Datasheets/Accelerometer-Datasheets/MXD6235MP-Datasheet.pdf>
- Milliken, W., & Milliken, D. (1995). *Race Car Vehicle Dynamics*. Warrendale: Society of Automotive Engineers.
- Moutou, S. (2015). *Travail pratique : Utilisation d'un Accéléromètre MPU6050*. Obtenido de Wikiversity:  
[https://fr.wikiversity.org/wiki/Micro\\_contr%C3%B4leurs\\_AVR/Travail\\_pratique/Utilisation\\_d'un\\_Acc%C3%A9l%C3%A9rom%C3%A8tre\\_MPU6050](https://fr.wikiversity.org/wiki/Micro_contr%C3%B4leurs_AVR/Travail_pratique/Utilisation_d'un_Acc%C3%A9l%C3%A9rom%C3%A8tre_MPU6050)
- MSUK. (2013). *Advantages of CVD's over dog bones?* Obtenido de MSUK Forum:  
<https://www.msuk-forum.co.uk/forums/topic/177353-advantages-of-cvds-over-dog-bones/>
- Ogata, K. (1998). *Ingeniería de Control Moderna*. Pearson Educación.
- Pilotfriend. (2016). *Fixed Wing Flight Training - Magnetic compass*. Obtenido de Pilotfriend:  
[http://www.pilotfriend.com/training/flight\\_training/fxd\\_wing/comp.htm](http://www.pilotfriend.com/training/flight_training/fxd_wing/comp.htm)
- Pirelli & C. S.p.A. (s.f.). *F1 2017: new rules and new tyres in Formula 1*. Obtenido de Youtube:  
<https://www.youtube.com/watch?v=OIFUwOpC2yE>
- Pratte, D. (2010). *Drivetrain Power Loss - The 15% "Rule"*. Obtenido de Super Street Online:  
<http://www.superstreetonline.com/how-to/engine/modp-1005-drivetrain-power-loss/>
- Racing, A. (2016). *AMZ News - April 2016*. Obtenido de AMZ Racing:  
[http://www.amzracing.ch/sites/default/files/pdf/news\\_maerz\\_16\\_en\\_vfinal.pdf](http://www.amzracing.ch/sites/default/files/pdf/news_maerz_16_en_vfinal.pdf)
- Rayner, L. (2004). *Steering Design for a Formula SAE-A Open Wheel Race Car*. Tesis de Licenciatura. University of Southern Queensland.
- Reichelt Elektronik GmbH & Co. (2016). *ARDUINO MEGA :: Arduino Mega 2560, ATmega1280, USB*. Obtenido de Reichelt Elektronik:  
<https://www.reichelt.de/Einplatinen-Microcontroller/ARDUINO-MEGA/3/index.html?ACTION=3&GROUPID=6667&ARTICLE=119696&OFFSET=16&SID=14VWgTXqwQATYAAB@1dgEd20c6605acdff511a40466a97c3e78fc&LANGUAGE=EN>
- Reid, P. (2009). *Representation of Earth's Invisible Magnetic Field*. Obtenido de National Aeronautics and Space Administration:

[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/news/gallery/Earthsmagneticfieldlines-dipole.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/gallery/Earthsmagneticfieldlines-dipole.html)

- Rill, G. (2007). *Road Vehicle Dynamics*. Fachhochschule Regensburg.
- Robert Bosch GmbH. (2002). *Bosch Automotive Handbook*. Robert Bosch GmbH.
- SAE International. (2014). *2015 Formula SAE® Rules*. Obtenido de FSAE Online: <http://www.fsaonline.com/content/2015-16%20fsae%20rules%20revision%2091714%20kz.pdf>
- Santos, A. G. (2008). *Autonomous Mobile Robot Navigation using Smartphones*. Tesis de Maestría. Universidade Técnica de Lisboa.
- Santos, R. d. (2014). *The Absolute Guide to the Racing Tyres - Part 1: Lateral Force*. Obtenido de Racing Car Dynamics : <http://racingcardynamics.com/racing-tires-lateral-force/>
- Schumacher, A. (2006). *Integration of a GPS aided Strapdown Inertial Navigation System for Land Vehicles*. Tesis de Maestría. Kungliga Tekniska Högskolan.
- Schworer, I. (2005). *Navigation and Control of an Autonomous Vehicle*. Tesis de Maestría. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Siegwart, R., & Nourbakhsh, I. (2004). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. Cambridge: The MIT Press.
- SkyTraq Technology Inc. (2011). *Venus638FLPx GPS Receiver Datasheet*. Obtenido de Sparkfun Electronics: [http://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/GPS/Venus/638/doc/Venus638FLPx\\_DS\\_v07.pdf](http://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/GPS/Venus/638/doc/Venus638FLPx_DS_v07.pdf)
- Smith, C. (1978). *Tune To Win*. Fallbrook: Aero Publishers.
- Snider, J. (2009). *Automatic Steering Methods for Autonomous*. Pittsburgh: Carnegie Mellon University.
- Sparkfun Electronics. (2016). *SparkFun 6 Degrees of Freedom IMU Digital Combo Board - ITG3200/ADXL345*. Obtenido de Sparkfun Electronics: <https://www.sparkfun.com/products/10121>
- Sparkfun Electronics. (2016). *SparkFun Logic Level Converter - Bi-Directional*. Obtenido de Sparkfun Electronics: <https://www.sparkfun.com/products/12009>
- ST Microelectronics N.V. (2016). *LSM6DS3 iNEMO inertial module: always-on 3D accelerometer and 3D gyroscope*. Obtenido de ST Microelectronics: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/a3/f5/4f/ae/8e/44/41/d7/DM00133076.pdf/files/DM00133076.pdf/jcr:content/translations/en.DM00133076.pdf>
- Stanley, M. (2012). *Accelerometer placement – where and why*. Obtenido de NXP Blog: <https://blog.nxp.com/sensors/accelerometer-placement-where-and-why>

- Stanley, M. (2012). *Magnetometer placement — where and why*. Obtenido de NXP Blog: <https://blog.nxp.com/sensors/magnetometer-placement-where-and-why>
- Stockyard Hill Wind Farm. (2009). *Parameters of Human Vision*. Obtenido de Stockyard Hill Wind Farm.
- Tartan Racing. (2007). *Race Day*. Obtenido de Tartan Racing: <http://www.tartanracing.org/gallery.html>
- Tesla Inc. (2017). *Autopilot*. Obtenido de Tesla: <https://www.tesla.com/autopilot>
- Tesla Inc. (2017). *Model S*. Obtenido de Tesla: <https://www.tesla.com/models>
- Texas Instruments Inc. (2016). *MSP430G2x53, MSP430G2x13 Mixed Signal Microcontroller*. Obtenido de Texas Instruments: <http://www.ti.com/product/MSP430G2553>
- Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (2000). *Probabilistic Robotics*. The MIT Press.
- Thrun, S., Montemerlo, M., Dahlkamp, H., Stavens, D., Aron, A., & Diebel, J. (2006). Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge. *Journal of Field Robotics*, 661-692.
- Tinsharp Industrial Co. (2009). *LCM MODULE TC2004A-01*. Obtenido de Adafruit: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/TC2004A-01.pdf>
- Tuck, K. (2007). *AN3461 Tilt Sensing Using Linear Accelerometers*. Obtenido de Aitendo: [http://aitendo3.sakura.ne.jp/aitendo\\_data/product\\_img/sensor/MMA7260Q/MMA7260QT\\_AN3461.pdf](http://aitendo3.sakura.ne.jp/aitendo_data/product_img/sensor/MMA7260Q/MMA7260QT_AN3461.pdf)
- U.S. Government. (2016). *Space Segment*. Obtenido de GPS: The Global Positioning System: <http://www.gps.gov/systems/gps/space/>
- U-blox Holding AG. (2011). *NEO-6 u-blox 6 GPS Modules Data Sheet*. Obtenido de U-blox: [https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6\\_DataSheet\\_\(GPS.G6-HW-09005\).pdf](https://www.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09005).pdf)
- Velodyne LiDAR. (2016). *Velodyne's HDL-64E: A high definition LiDAR sensor for 3-D applications*. Obtenido de Velodyne LiDAR: <http://velodynelidar.com/hdl-64e.html>
- Veness, C. (2016). *Calculate distance, bearing and more between Latitude/Longitude points*. Obtenido de Movable Type Scripts: <http://www.movable-type.co.uk/scripts/latlong.html>
- Waymo. (2017). *Journey*. Obtenido de Waymo: <https://waymo.com/journey/>
- Waymo. (2017). *On the Road*. Obtenido de Waymo: <https://waymo.com/ontheroad/>
- Wayne's Transmission. (s.f.). *Differentials*. Obtenido de Wayne's Transmissions: <http://www.waynes-transmission.com/differentials.html>
- Weintrit, A., & Kopacz, P. (2011). A Novel Approach to Loxodrome (Rhumb Line), Orthodrome (Great Circle) and Geodesic Line in ECDIS and Navigation in General. *International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 5(4).



# Apéndice A

## A.1 MAG

Factores de decisión		Status Quo	Miemic MMC3140	Freescala MAG3110	Honeywell HMC5883L	Honeywell HMC6343
Criterio	W.	1	2	3	4	5
Precisión	3.0	0	3	3	3	5
Costo	2.0	0	3	5	5	2
Documentación disponible	2.0	0	3	3	5	3
Tamaño	1.0	0	5	5	5	5
Funciones extra	1.0	0	3	3	3	5
Facilidad de compra	1.0	0	2	5	5	5
Puntuación		0.0	3.1	3.8	4.2	4.0

Criterio	Definición
Precisión	Máximo error de la medición con respecto al valor verdadero
Costo	Precio de los módulos comerciales tipo Hobby
Documentación disponible	Existencia de referencias para utilizar éste sistema en un idioma que manejo
Tamaño	Apropiado para su inclusión en una placa de sensores
Funciones extra	Procesamiento interno, autocalibración, etc.
Facilidad de compra	Facilidad con la que los dispositivos pueden ser comprados o importados.

## A.2 IMU

Factores de decisión		Status Quo	ST LSM6DS3	MPU-6050	SEN-10121
Criterio	W.	1	2	4	3
Precisión	3.0	0	3	3	3
Costo	2.0	0	3	5	5
Documentación disponible	2.0	0	3	5	3
Tamaño	1.0	0	5	5	5
Funciones extra	1.0	0	3	3	3
Facilidad de compra	1.0	0	2	5	5
Puntuación		0.0	3.1	4.2	3.8

Criterio	Definición
Precisión	Máximo error de la medición con respecto al valor verdadero
Costo	Precio de los módulos comerciales tipo Hobby
Documentación disponible	Existencia de referencias para utilizar éste sistema en un idioma que manejo
Tamaño	Apropiado para su inclusión en una placa de sensores
Funciones extra	Procesamiento interno, autocalibración, etc.
Facilidad de compra	Facilidad con la que los dispositivos pueden ser comprados o importados.

### A.3 GNSS

Factores de decisión		Status Quo	GPS	GLONASS
Criterio	W.	1	2	3
Documentación en idioma conocido	4.0	0	5	2
Costo	3.0	0	4	3
Facilidad de compra	3.0	0	5	4
<b>Puntuación</b>		0.0	<b>4.7</b>	2.9

Criterio	Definición
Documentación en idioma conocido	Existencia de referencias para utilizar éste sistema en un idioma que maneje
Costo	Precio de los módulos comerciales tipo Hobby
Facilidad de compra	Facilidad con la que los dispositivos pueden ser comprados o importados.

### A.4 GPS

Factores de decisión		Status Quo	Adafruit Ultimate GPS Module	Ublox Neo-6M	Venus GPS	EM-506
Criterio	W.	1	2	3	4	5
Precisión	3.0	0	4	5	5	5
Costo	2.0	0	5	4	3	4
Documentación disponible	2.0	0	5	5	3	3
Tamaño	1.0	0	4	3	4	5
Funciones extra	1.0	0	5	4	2	2
Facilidad de compra	1.0	0	5	5	5	5
<b>Puntuación</b>		0.0	<b>4.6</b>	4.5	3.8	4.1

Criterio	Definición
Precisión	Máximo error de la medición con respecto al valor verdadero
Costo	Precio de los módulos comerciales tipo Hobby
Documentación disponible	Existencia de referencias para utilizar éste sistema en un idioma que maneje
Tamaño	Apropiado para su inclusión en una placa de sensores
Funciones extra	Logging, PPS, Sleep Mode, entre otros
Facilidad de compra	Facilidad con la que los dispositivos pueden ser comprados o importados.

### A.5 Display

Factores de decisión		Status Quo	Display LCD 16x2	Display LCD 20x4
Criterio	W.	1	2	3
Información a mostrar	5.0	0	2	5
Costo	4.0	0	5	2
Facilidad de compra	1.0	0	5	5
<b>Puntuación</b>		0.0	3.5	<b>3.8</b>

Criterio	Definición
Información a mostrar	Capacidad de desplegar información en la pantalla
Costo	Precio de los módulos comerciales tipo Hobby
Facilidad de compra	Facilidad con la que los dispositivos pueden ser comprados o importados.

## A.6 MCU

Factores de decisión		Status Quo	Arduino Uno R3	Arduino Mega 2560 R3	Texas Instruments MSP430G253	Intel Galileo GENZ
Criterio	W.	1	2	3	4	5
Velocidad de procesamiento	2.0	0	2	2	2	5
Velocidad de pines GPIO	2.0	0	4	4	4	3
Número de pines GPIO	2.0	0	3	5	4	3
Precio	1.0	0	5	3	4	2
Facilidad de implementar	1.0	0	5	5	4	3
Documentación disponible	1.0	0	5	5	4	3
Facilidad de compra	1.0	0	5	5	4	3
<b>Puntuación</b>		0.0	3.8	4.0	3.6	3.3

Criterio	Definición
<b>Velocidad de procesamiento</b>	Velocidad del procesador y del reloj
<b>Velocidad de pines GPIO</b>	Máxima velocidad que puede alcanzar el GPIO (determinada por el MPU)
<b>Número de pines GPIO</b>	Número de GPIO disponibles para evitar el uso de un multiplexor
<b>Precio</b>	Precio de los módulos comerciales tipo Hobby
<b>Facilidad de implementar</b>	Capacidad de la memoria incluida, librerías existentes, entre otros
<b>Documentación disponible</b>	Existencia de referencias para utilizar este sistema en un idioma que maneje
<b>Facilidad de compra</b>	Facilidad con la que los dispositivos pueden ser comprados o importados.

## A.7 Regulador

Factores de decisión		Status Quo	Regulador lineal 78XX	Switching Regulator	Switching Regulator con Voltmetro integrado
Criterio	W.	1	2	3	4
Eficiencia	4.0	0	2	5	5
Precio	1.0	0	5	2	1
Funciones	3.0	0	1	3	5
Facilidad de compra	2.0	0	5	3	3
<b>Puntuación</b>		0.0	2.6	3.7	4.2

Criterio	Definición
<b>Eficiencia</b>	Eficiencia del regulador al convertir de un nivel de voltaje a otro
<b>Precio</b>	Precio de los elementos comerciales tipo Hobby
<b>Funciones</b>	Regulación variable, Visualización de elementos
<b>Facilidad de compra</b>	Facilidad con la que los elementos pueden ser comprados o importados.

## A.8 BATT

Factores de decisión		Status Quo	Zippy 7.4 [V] @ 1800 [mAh]	Zippy 7.4 [V] @ 2200 [mAh]	Turnigy 7.4 [V] @ 1800 [mAh]	Turnigy 7.4 [V] @ 2200 [mAh]
Criterio	W.	1	2	3	4	5
Capacidad	3.0	0	4	5	4	5
Precio	2.0	0	5	4	4	3
Tamaño necesario	3.0	0	5	4	5	4
Facilidad de compra	2.0	0	3	3	2	2
<b>Puntuación</b>		0.0	4.3	4.1	3.9	3.7

Criterio	Definición
<b>Capacidad</b>	Capacidad de la batería en [mAh]
<b>Precio</b>	Precio de los elementos comerciales tipo Hobby
<b>Tamaño necesario</b>	Tamaño para el vehículo de modelismo
<b>Facilidad de compra</b>	Facilidad con la que los elementos pueden ser comprados o importados.

## A.9 Método de fabricación de la placa de sensores/control

Factores de decisión		Status Quo	PCB casera	PCB Profesional	Compra de una Arduino Protoshield
Criterio	W.	1	2	3	4
Trabajo	6.0	0	1	3	3
Costo	4.0	0	5	1	3
Puntuación		0.0	2.6	2.2	3.0

Criterio	Definición
Trabajo	Trabajo / tiempo a invertir para hacer el diseño
Costo	Costo aproximado para hacer el diseño