



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO AUTOMOTRIZ**

AUTORES: VELASCO ULCO VÍCTOR MANUEL

PILICITA CAIZA EDISON ENRIQUE

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VEHÍCULO
ELÉCTRICO AUTOBALANCEADO PERSONAL (VEAP) DE
DOS RUEDAS EN PARALELO ESTILO SEGWAY**

DIRECTOR: ING. SALAZAR FREDDY

CODIRECTOR: ING. QUIROZ JOSÉ

LATACUNGA, DICIEMBRE 2014

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE**CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ****CERTIFICADO**

Ing. Freddy Salazar (DIRECTOR)

Ing. José Quiroz (CODIRECTOR)

CERTIFICAN

Que el trabajo titulado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO AUTOBALANCEADO PERSONAL (VEAP) DE DOS RUEDAS EN PARALELO ESTILO SEGWAY” Elaborado por: VÍCTOR MANUEL VELASCO ULCO Y EDISON ENRIQUE PILICITA CAIZA, ha sido guiado y revisado periódicamente y cumple normas estatutarias establecidas por la UNIVERSIDAD, en el reglamento de estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

Debido a que constituye un trabajo de excelente contenido científico que contribuirá a la aplicación de conocimientos y al desarrollo profesional, **SI** recomiendan su publicación.

El mencionado trabajo consta de UN documento empastado y UN disco compacto el cual contiene los archivos en formato portátil de Acrobat (pdf). Autorizan a los señores: VÍCTOR MANUEL VELASCO ULCO Y EDISON ENRIQUE PILICITA CAIZA, que lo entreguen al ING. JUAN CASTRO CLAVIJO, en su calidad de Director de la Carrera de Ingeniería Automotriz.

Latacunga, Diciembre del 2014.

Ing. Freddy Salazar
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. José Quiroz
CODIRECTOR DE PROYECTO

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

NOSOTROS: VÍCTOR MANUEL VELASCO ULCO

EDISON ENRIQUE PILICITA CAIZA

DECLARAMOS QUE:

El proyecto de grado denominado: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO AUTOBALANCEADO PERSONAL (VEAP) DE DOS RUEDAS EN PARALELO ESTILO SEGWAY”** ha sido desarrollado en base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas que constan el pie de las páginas correspondientes cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado en mención.

Latacunga, Diciembre del 2014.

Víctor Manuel Velasco Ulco

C.I. 172367691-0

Edison Enrique Pilicita Caiza

C.I. 172091460-3

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

AUTORIZACIÓN

NOSOTROS: VÍCTOR MANUEL VELASCO ULCO

EDISON ENRIQUE PILICITA CAIZA

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución, del trabajo: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO AUTOBALANCEADO PERSONAL (VEAP) DE DOS RUEDAS EN PARALELO ESTILO SEGWAY”** cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Latacunga, Diciembre del 2014.

Víctor Manuel Velasco Ulco

C.I. 172367691-0

Edison Enrique Pilicita Caiza

C.I. 172091460-3

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme estar vivo y gozar de buena salud para poder compartir con mis seres queridos esta alegría tan grande, por no abandonarme en las adversidades que se me presentaban a diario y por permitirme tener la suficiente fortaleza, el don del conocimiento y la sabiduría para afrontar día a día cada nuevo reto en mi vida universitaria y profesional.

A mi madre Maruja Ulco la persona más importante de mi vida que supo estar conmigo en mis triunfos y mis fracasos a lo largo de toda mi carrera universitaria, y que sin ningún interés de por medio me supo dar su confianza para que logre mis objetivos, en reconocimiento a todo su sacrificio puesto para que yo pueda estudiar, se merece esto y mucho más.

A mi padre Manuel Velasco, la persona que nunca bajo los brazos y que me pudo dar todos los medios necesarios para que nunca me faltara nada, preocupándose por mi hasta en los aspectos más pequeños que pudiera necesitar, y ser un ejemplo a seguir para formarme profesionalmente.

A Alexandra Chuquitarco por ser una persona muy importante que formo parte de mi vida universitaria, la mujer por la cual seguiré demostrándole un sentimiento desinteresado, y simplemente por todo aquello que pasó, por el significado de su frase “amor y odio” que hoy rige nuestra cercanía, le dedico esta tesis a Ale porque simplemente la amo y la llevo en mi corazón

Víctor Manuel Velasco Ulco

DEDICATORIA

La realización de este proyecto está dedicada a Dios quien con su guía siempre ilumino mis pensamientos, y a toda mi familia en especial.

A mi padre José Enrique Pilicita, quien con su apoyo y sabios consejos me impulso a cumplir todas mis metas sin importar lo difícil que sea.

A mi madre Rosa Etelvina Caiza, quien es mi inspiración y mi razón de vivir, por darme su apoyo incondicional sin importarle el sacrificarse por nosotros sus hijos, aunque tenga un carácter fuerte siempre te amare, este triunfo es por ella y para ella.

A mis hermanas Mirian, Mayra, Adriana, y mis hermanos Brayan, René, quienes sin saberlo me impulsan a mejorar en todos los aspectos de mi vida y ser un ejemplo para ellos.

Edison Enrique Pilicita Caiza

AGRADECIMIENTO

A Dios porque sin el nada de esto hubiera sido posible

A mis padres Manuel Velasco y Maruja Ulco quienes dieron su sacrificio para que nunca me falte nada, una confianza incondicional puesta en mí para que yo pueda educarme a nivel superior, y por su abnegada dedicación para mostrarme con su ejemplo la disciplina necesaria que se requiere para cumplir cada reto que se me presentaba en la vida, sin bajar los brazos ante las duras adversidades de la vida.

Un especial agradecimiento al Ingeniero Juan Galarza, Alexis Velasteguí, y a las personas que conforman la familia ALLUC que fueron parte de este proyecto y que me permitieron desarrollarme y obtener los conocimientos necesarios para concluir con éxito esta meta.

A mis profesores y maestros a quienes les debo gran parte de mi conocimiento, gracias por prepararnos para un futuro competitivo, no solo como los mejores profesionales sino también como mejores personas.

A mis amigos Edison, Luis, Jonathan, Paul, Cristian, Albita, Michael, Alexander, Cesar y a todos aquellos que no están aquí, pero que me ayudaron a que este esfuerzo se haga realidad, y por pasar a mi lado todos los momentos de mi vida universitaria compartiendo momentos buenos y malos, gracias por estar ahí, jamás los olvidaré

Víctor Manuel Velasco Ulco

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi DIOS y a la VIRGEN SANTÍSIMA del CISNE por haberme dado salud y vida además de ayudar a cristalizar con esfuerzo todos mis sueños y proyectos.

A mi padre José Enrique Pilicita, mi madre Rosa Etelvina Caiza quienes me han apoyado incondicionalmente, guiándome por la senda del éxito con la firme convicción de verme realizado.

A mis tres hermanas Mirian, Mayra, Adriana y mis hermano Brayan y René quienes fueron un apoyo incondicional en todo momento

Un agradecimiento especial a los señores ingenieros tutores del proyecto Freddy Salazar y José Quiroz que de manera desinteresada me ayudaron guiándome para que el trabajo se lo realice correctamente.

Y a todas las personas que pusieron su confianza en mí, y darme la oportunidad de culminar con éxito este proyecto como lo hizo mi compañero y amigo Víctor.

Edison Enrique Pilicita Caiza

ÍNDICE GENERAL

CARÁTULA.....	i
CERTIFICADO.....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
ÍNDICE DE TABLAS	xviii
ÍNDICE DE ECUACIONES	xix
RESUMEN.....	xxi
ABSTRACT.....	xxii
CAPÍTULO I.....	1
1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO AUTOBALANCEADO PERSONAL (VEAP) DE DOS RUEDAS EN PARALELO ESTILO SEGWAY.”	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	1
1.3. Descripción resumida del proyecto	4
1.4. Justificación e importancia	4
1.5. Objetivos del proyecto	5
1.5.1. Objetivo general.....	5
1.5.2. Objetivos específicos	5
1.6. Metas	6
1.7. Hipótesis	6
1.8. Variables de la investigación.....	7
CAPÍTULO II.....	8
2. MARCO TEÓRICO	8
2.1. Introducción	8

2.2. Historia del Segway	9
2.3. Dinámica de la estabilización.....	11
2.3.1. El cerebro y la fuerza	12
2.3.2. Sistema de péndulo invertido sobre móvil.....	13
2.3.3. Modelado teórico de un vehículo basado en el péndulo invertido.....	15
2.4. Parte operativa.....	25
2.4.1. Sensores.....	27
a. Características de selección de sensores.....	28
b. Sensores de inclinación, posición angular o rotación	29
c. El giroscopio.....	30
d. El acelerómetro.....	32
e. Métodos de selección del sensor usando solo giroscopio	34
f. Métodos de selección del sensor usando solo acelerómetro.....	36
g. Selección del sensor usando giroscopio y acelerómetro	38
h. MPU-6050 (Unidad de Procesamiento del Movimiento)	39
i. Compensación de la inclinación con el sensor MPU 6050.....	40
2.4.2. Actuadores.....	41
a. Motores DC.....	41
2.4.3. Unidad controladora de motores.....	42
a. Sabertooth dual 60A motor conductor	43
b. Guía de conexiones sabertooth 2X60.....	43
c. Modo de operación driver sabertooth 2X60	44
2.4.4. Sistema de control	46
2.5. Baterías.....	47
2.5.1. Parámetros para la selección de las baterías	47
2.5.2. Baterías de LiPo (lithium polymer)	48
2.5.3. Equipo auxiliar: cargador de baterías	49
CAPÍTULO III.....	51
3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL VEAP.....	51
3.1. Requerimientos del sistema.....	51

3.1.1. Requerimiento de etapa de potencia de motores	51
3.1.2. Requerimientos de espacio para las baterías	60
3.1.3. Ruedas del vehículo	61
3.2. Diseño estructural del VEAP	61
3.2.1. Bastidor del vehículo	62
3.2.2. Recubrimiento exterior de la estructura	64
3.2.3. Mecanismo barra de dirección	65
3.2.4. Integración de los componentes del vehículo	67
3.3. Construcción estructural del VEAP	69
3.3.1. Carrocería del VEAP	70
3.3.2. Adaptador eje rueda	72
3.3.3. Tornillos de sujeción	72
3.3.4. Ensamble de componentes mecánicos y eléctricos	73
a. Acoplamiento de los motores dc	73
b. Acoplamiento de las ruedas	73
c. Ubicación de los componentes electrónicos	74
d. Ubicación de baterías Li-Po	75
e. Interruptores de alimentación y seguridad	76
f. Instalación de pulsadores de dirección	78
CAPÍTULO IV	79
4. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL	79
4.1. Parámetros de control	79
4.2. Condiciones de Inicialización del software de control	79
4.3. Estrategia de control mediante diagramas de flujo	84
4.4. Implementación del software de control	90
4.4.1. Diagrama de bloques	91
4.4.2. Acción de control Fuzzy	99
4.4.3. Filtro Kalman	103
a. Modelo del sistema	104
b. Implementación del algoritmo filtro Kalman	105

CAPÍTULO V	109
5. PRUEBAS Y RESULTADOS	109
5.1. Pruebas de funcionalidad del VEAP	109
5.1.1. Respuesta de estabilización mediante voltajes de la batería	109
5.1.2. Autonomía y tiempos de carga del VEAP	110
a. Tiempo de autonomía de las baterías.....	111
b. Autonomía basado en el kilometraje alcanzado.....	112
c. Tiempos de carga para baterías de LiPo con Triton	114
5.2. Resultados de estabilización del VEAP	115
5.2.1. Pruebas estáticas del VEAP	115
5.2.2. Pruebas dinámicas del VEAP	117
5.3. Análisis financiero del VEAP.....	120
5.3.1. Costo de materiales	121
5.3.2. Costo de construcción del VEAP	122
5.3.3. Costo de ingeniería	123
CAPÍTULO VI	125
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	125
6.1. Conclusiones	125
6.2. Recomendaciones	126
BIBLIOGRAFÍA.....	127
NETGRAFÍA	128
ANEXO A. MANUAL DE CONDUCCIÓN DEL VEAP	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO B. DIAGRAMAS DE FLUJO ESTRATEGIA DE CONTROL	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO C. PROGRAMACIÓN EN EL ENTORNO SIMULINK.....	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO D. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS KING MOTOR SF7152	¡Error! Marcador no definido.
ANEXO E. DIMENSIONAMIENTO CONSTRUCTIVO DEL VEAP	¡Error! Marcador no definido.

ANEXO F. ARTÍCULO CIENTÍFICO..... ¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Árbol de problemas sobre el tráfico vehicular	2
Figura 2. Árbol de problemas sobre viabilidad en el uso del Segway	3
Figura 3. Segway usados en el Ecuador	9
Figura 4. Principales modelos comerciales de Segway	11
Figura 5. Estabilización del Segway	12
Figura 6. Esquema de un Giroscopio.....	13
Figura 7. Péndulo invertido sobre base móvil	14
Figura 8. Ejemplo de un péndulo invertido.....	14
Figura 9. Esquema general de un vehículo auto balaceado.	15
Figura 10. Diseño estructural del VEAP.....	25
Figura 11. Estructura básica del sistema de control	26
Figura 12. Sistema de cardanes y giróscopo con dos grados de libertad	31
Figura 13. Funcionamiento de un giroscopio de tipo vibratorio.....	31
Figura 14. Esquema Acelerómetro Capacitivo.....	32
Figura 15. Cabeceo con un ángulo Θ en sentido horario.....	36
Figura 16. Cabeceo con un ángulo Θ en sentido anti - horario.....	37
Figura 17. Alabeo con un ángulo Θ en sentido horario.....	37
Figura 18. Alabeo con un ángulo Θ en sentido anti - horario.....	37
Figura 19. Sensor inercial MPU-6050	39
Figura 20. Sabertooth 2x60 dual.....	43
Figura 21. Conexiones driver Sabertooth 2x60.....	44
Figura 22. Posicionamiento de interruptores para el modo serial	45
Figura 23. MCU STM32F407 VG.....	46
Figura 24. Baterías LiPo 22.2 V, 5000mAh.....	49
Figura 25. Cargador de baterías Lipo Triton EQ	50
Figura 26. Elementos en el desplazamiento de los cuerpos	53
Figura 27. Diagrama de cuerpo libre.....	53

Figura 28. Diagrama de cuerpo libre aplicado al proyecto	54
Figura 29. Par de giro y potencia de una máquina o motor	57
Figura 30. Diseño de las ruedas	61
Figura 31. Modelo Autodesk Inventor sin carga.....	62
Figura 32. Modelo Autodesk Inventor con carga.....	62
Figura 33. Base estructural del VEAP.....	63
Figura 34. Análisis de tensiones efectuados en la base estructural.....	64
Figura 35. Cubierta de la base estructural	65
Figura 36. Base de la dirección.....	66
Figura 37. Tubo galvanizado vertical	66
Figura 38. Unión regulable del volante	67
Figura 39. Ensamble de mecanismo de dirección	67
Figura 40. Ensamblaje de transmisión de movimiento.....	68
Figura 41. Ensamblaje de mecanismo de dirección al vehículo	68
Figura 42. Ensamble de la caja protectora	69
Figura 43. Diseño estructural del VEAP.....	69
Figura 44. Construcción bastidor del VEAP	70
Figura 45. Bastidor VEAP	71
Figura 46. Piso superior de madera.....	71
Figura 47. Adaptador eje rueda	72
Figura 48. Ubicación de los motores DC	73
Figura 49. Ruedas del VEAP	74
Figura 50. Esquema de ubicación de componentes electrónicos	74
Figura 51. Ubicación de componentes electrónicos.....	75
Figura 52. Ubicación de las baterías.....	76
Figura 53. Esquema de instalación del interruptor de alimentación.....	77
Figura 54. Ubicación del interruptor de alimentación	77
Figura 55. Ubicación del interruptor de seguridad	78
Figura 56. Ubicación de pulsadores de dirección	78
Figura 57. Instalación de la aplicación STM32 ST – LINK.....	80

Figura 58. Instalación de la aplicación st_v2_usbdriver	81
Figura 59. Adición de la carpeta Waijung en documentos Matlab	81
Figura 60. Directorio de Waijung en Matlab	82
Figura 61. Instalación y ejecución del instalador de waijung	82
Figura 62. Acceso al entorno Matlab/Simulink	83
Figura 63. Entorno de Simulink	83
Figura 64. Despliegue de esquema de trabajo	84
Figura 65. Inicialización de waijung, y tarjetas de control	85
Figura 66. Lectura de datos en MPU 6050	86
Figura 67. Limitaciones de programación	87
Figura 68. Cálculo para la acción de control mediante Fuzzy	87
Figura 69. Salida de la señal establecida para los motores	88
Figura 70. Diagrama de señal de envío hacia el controlador de motores	90
Figura 71. Inicialización de la tarjeta STM32 F4	91
Figura 72. Inicialización de la tarjeta STM32 F4	92
Figura 73. Inicialización MPU 6050	92
Figura 74. Lectura del sensor MPU6050	93
Figura 75. Cálculo del error y escalado del error	94
Figura 76. Valores del escalado y derivada del escalado del error	95
Figura 77. Etapa de conversión de señal para UART	96
Figura 78. Pulsadores de dirección del VEAP	97
Figura 79. Condiciones de seguridad del VEAP	98
Figura 80. Condiciones de envío de señal por puerto serial	98
Figura 81. Indicador led de funcionamiento	99
Figura 82. Condición del vehículo para la medición angular	101
Figura 83. Condición del vehículo hacia adelante	101
Figura 84. Condición del vehículo en posición vertical	102
Figura 85. Condición del vehículo hacia atrás	103
Figura 86. Recursividad en el filtro kalman	104
Figura 87. Comprobación de voltajes de las baterías	110

Figura 88. Condiciones de RPM del motor DC	113
Figura 89. Condiciones iniciales de carga	114
Figura 90. Tiempo requerido para la carga de baterías	115
Figura 91. Prueba estática césped a) sin peso b) con peso	116
Figura 92. Prueba estática adoquín	116
Figura 93. Prueba estática asfalto equilibrio sin manos y en un pie	117
Figura 94. Pruebas dinámicas en asfalto	118
Figura 95. Prueba dinámica en césped	118
Figura 96. Pruebas dinámicas en superficies irregulares	119
Figura 97. Paso del VEAP a través de un rompe velocidades.....	119
Figura 98. Prueba en superficie inclinada subida y bajada	120
Figura 99. Proyecto VEAP diseño en Autodesk Inventor y vehículo real...	123

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones técnicas Segway i2 y X2.....	10
Tabla 2. Características principales de los acelerómetros.....	33
Tabla 3. Designación de pines MPU-6050.....	40
Tabla 4. Especificaciones Sabertooth 2x60	44
Tabla 5. Coeficientes de resistencia a la rodadura	55
Tabla 6. Especificaciones técnicas del motor DC seleccionado	58
Tabla 7. Valores seriales para control de motores.....	89
Tabla 8. Acción de control Fuzzy	100
Tabla 9. Desglose de costos de materiales del sistema mecánico	121
Tabla 10. Desglose de costos de materiales eléctricos y electrónicos	122
Tabla 11. Análisis financiero del VEAP	123

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ecuación de Euler-Lagrange	16
Ecuación 2. Ecuación del Lagrangiano	17
Ecuación 3. Determinación de la energía cinética	18
Ecuación 4. Energía cinética de las ruedas	18
Ecuación 5. Ecuación desarrollada de la energía cinética de las ruedas	18
Ecuación 6. Centro de masa en el eje x	19
Ecuación 7. Centro de masa en el eje y	19
Ecuación 8. Derivada del centro de masa del eje x	19
Ecuación 9. Derivada del centro de masa del eje y	19
Ecuación 10. Energía cinética el péndulo	19
Ecuación 11. Ecuación desarrollada de energía cinética el péndulo	20
Ecuación 12. Ecuación desarrollada de la energía cinética	20
Ecuación 13. Energía potencial del sistema	20
Ecuación 14. Expresión del Lagrangiano desarrollada	21
Ecuación 15. Derivada del Lagrangiano respecto a θ	21
Ecuación 16. Derivada del Lagrangiano respecto a ω	21
Ecuación 17. Derivada del Lagrangiano respecto a θ	22
Ecuación 18. Derivada del Lagrangiano respecto a ω	22
Ecuación 19. Derivación de la ecuación 17 respecto al tiempo	22
Ecuación 20. Derivación de la ecuación 18 respecto al tiempo	22
Ecuación 21. Fuerza de rozamiento de los motores	23
Ecuación 22. Ecuación desarrollada de Euler-Lagrange	23
Ecuación 23. Ecuación desarrollada de Euler-Lagrange	23
Ecuación 24. Algoritmo acumulativo del giroscopio	35
Ecuación 25. Variable de medición de proceso de inclinación	41
Ecuación 26. Velocidad angular a partir de la velocidad lineal	52
Ecuación 27. Par nominal para el cálculo del motor DC	57

Ecuación 28. Potencia del motor	58
Ecuación 29. Relación de estado en el momento $K - 1$ y el instante K	104
Ecuación 30. Relación del estado x con la observación z_k	105
Ecuación 31. Modelo algoritmo filtro kalman	106
Ecuación 32. Vector de estados bajo algoritmo Kalman	106
Ecuación 33. Variable de observación del acelerómetro	107
Ecuación 34. Margen de error en base al giroscopio	107
Ecuación 35. Modelo incluido al algoritmo de filtro Kalman	107
Ecuación 36. Modelo algoritmo filtro Kalman acelerómetro giroscopio	108
Ecuación 37. Capacidad de descarga de las baterías LiPo	111
Ecuación 38. Tiempo de autonomía de las baterías	111

RESUMEN

En la siguiente investigación se detallan los procesos de diseño y construcción de un vehículo eléctrico autobalanceado personal (VEAP) de dos ruedas en paralelo estilo Segway, la meta de este trabajo es el desarrollo de la parte de control de estabilidad del vehículo mediante condiciones mecánicas y de programación; por lo tanto, es necesario recalcar que no se realiza el diseño de los controladores y tarjetas electrónicas que efectúen los procesos, sino que se adquieren productos comerciales capaces de manejar los parámetros a desarrollarse. Se describe el montaje de un sistema físico de péndulo invertido permitiéndole al vehículo moverse para compensar el desplazamiento del péndulo y mantenerlo, así, en equilibrio, se determinará la autonomía de las baterías eléctricas, potencia de los motores, y un sistema de control que permita manejar la velocidad que el vehículo alcanzará con su ensamble y carga completa, la parte estructural modificada con sus respectivas acotaciones puntuales, utilizando un modelo estructural basado en los prototipos SEGWAY, consiguiendo así como resultado final un transportador personal que brinde servicios de confort, comodidad y seguridad, y detalles sofisticados que promoverán el uso de la misma, que están enfocados a eliminar congestión de tráfico y contaminación.

PALABRAS CLAVE: INGENIERÍA AUTOMOTRIZ, VEAP, VEHÍCULOS AUTOBALANCEADOS, VEHÍCULOS ELÉCTRICOS, PÉNDULO INVERTIDO.

ABSTRACT

In the following investigation processes design and construction of a personal self-balancing electric vehicle (VEAP) parallel two-wheeled Segway style, the goal of this work is the development of vehicle stability control and programming by mechanical conditions; therefore, it should be stressed that the design of controllers and postcards carrying out the processes are performed, but commercial products are acquired capable of handling the parameters to develop. Mounting a physical system inverted pendulum allowing the vehicle to move to compensate for the displacement of the pendulum and keep well, at equilibrium, the autonomy of electric batteries, engine power, and a control system allowing be determined is described handle the speed that the vehicle assembly and reach their full charge, the structural part modified their specific dimensions, using a structural model based on prototypes SEGWAY, achieving the end result a personal carrier that offers services of comfort, convenience and security, and sophisticated details that will promote the use thereof, which are focused on eliminating traffic congestion and pollution.

KEYWORDS: AUTOMOTIVE ENGINEERING, VEAP, SELF-BALANCING VEHICLES, ELECTRIC VEHICLES, INVERTED PENDULUM.

CAPÍTULO I

1. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO AUTOBALANCEADO PERSONAL (VEAP) DE DOS RUEDAS EN PARALELO ESTILO SEGWAY.”

1.1. Antecedentes

Moreno, L. (2009) “Este tipo de vehículo tiene básicamente un único exponente, denominado Segway, el cual fue el primer vehículo comercial de esta categoría. A la fecha, existen además un par de trabajos similares entre sí, orientados al control de un vehículo inestable basados en ese primer diseño.”

Moreno, L. (2009) “En el ámbito de estudio, este enfoca un interesante desafío desde el punto de vista de la ingeniería, al conjugar aspectos de diseño mecánicos y eléctricos, de potencia (etapa de motores) y aspectos de control de sistemas.”

Por estos motivos, el desarrollo del proyecto plantea una solución que busque reflejar la aplicación teórica y práctica de los conocimientos adquiridos durante la carrera de ingeniería, donde se podrá comprobar todos los principios que se estudiaron y su respectivo análisis para el mejoramiento de una alternativa de transporte de este tipo.

1.2. Planteamiento del problema

Al ser notable el incremento del tráfico vehicular debido a que gran parte de los trayectos que realiza un vehículo particular convencional los hace con un único pasajero a bordo la mayoría de veces, provocando así, un uso incorrecto sobre la capacidad de pasajeros que un auto debería transportar, esto nos permite diseñar un dispositivo que haga referencia a la

transportación de un solo individuo a fin de reducir el congestionamiento, en todo esto cabe la comparación de masas entre un VEAP y un coche pequeño (utilizado como monoplaza) que ronde los 1.200kg.

En esta comparación el factor de multiplicación de masas entre ambos vehículos es nada menos que de 24:1. La existencia de un VEAP significa que es posible un transporte para distancias cortas e individuos solos (este es un uso muy habitual de un vehículo medio) que ahorra más del 90% de la masa a desplazar, adaptándose a situaciones cotidianas del medio, logrando que la velocidad se suple con fluidez total de tráfico y simplicidad de uso mientras que la autonomía es más que suficiente para el trayecto urbano medio donde el VEAP permitirá estar preparado idealmente para viajes y turismo, seguridad pública, transporte empresarial y en campus universitarios, además de reparto de correo, paquetes y productos, permitiendo a la gente usar mejor su tiempo, interaccione dentro de su comunidad y contribuya a eliminar congestión de tráfico y contaminación.

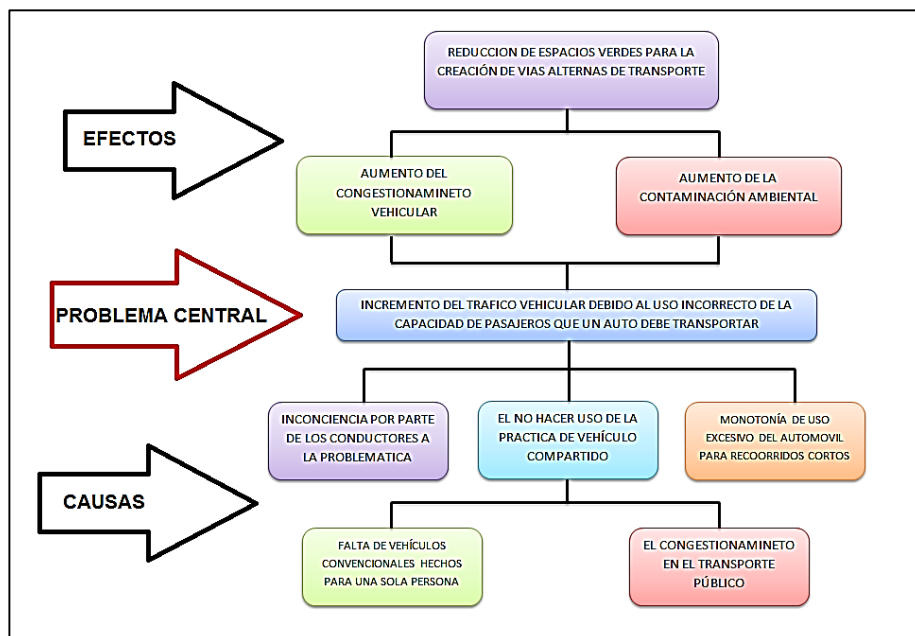


Figura 1. Árbol de problemas sobre el tráfico vehicular

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Pero una de las problemáticas que también surge para promover el uso de los vehículos Segway es su elevado precio y las limitaciones a las que está sujeto tanto en su sistema como en los espacios destinado para la movilidad de los mismos, definiéndose así como muestra la Figura 2.

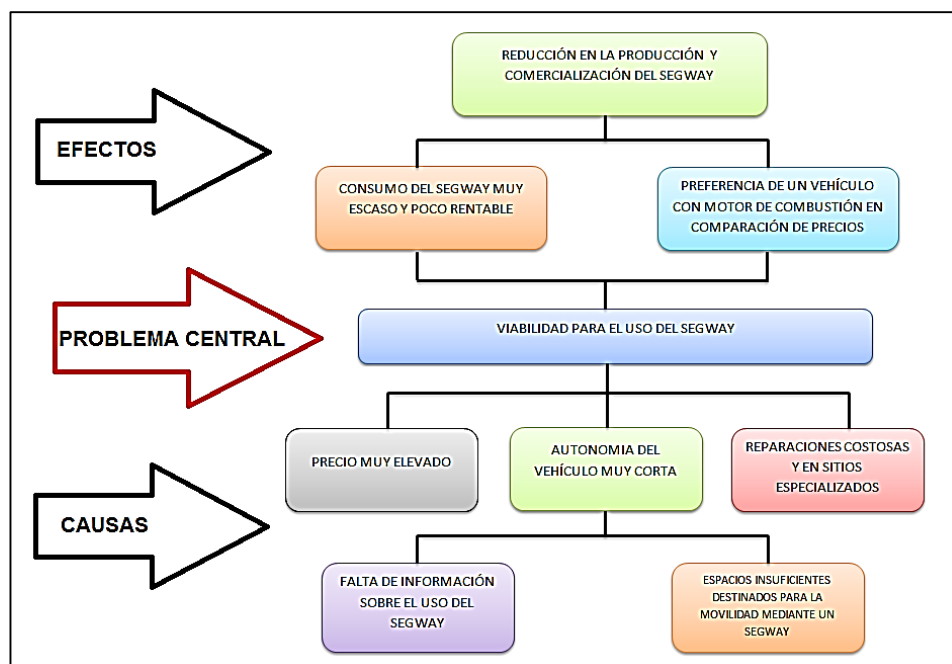


Figura 2. Árbol de problemas sobre viabilidad en el uso del Segway

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Entonces pensando en estos dos factores que influyen fuertemente para la creación de un vehículo alternativo que satisfagan ambas situaciones, se enfocará en la oportunidad de proporcionar a la sociedad un vehículo que desarrolle la creación de soluciones verdes de transporte personal y que además su valor genere demandas con el fin de establecer un comercio entre este tipo de vehículos, los cuales están enfocados a desafiar lo convencional, enseñándonos un camino claro a seguir: simplicidad, reducción de masa y componentes, soluciones de transporte a medida de la necesidad real y cero emisiones durante su utilización.

1.3. Descripción resumida del proyecto

Se diseñó y construyó un Vehículo Eléctrico Autobalanceado Personal (VEAP) que tiene como característica principal el uso de dos ruedas concéntricas (paralelas), una a cada lado, generando en el sistema un estado de equilibrio inestable, el cual es controlado por la implementación de sistema de control de estabilidad que tiene como principio, el funcionamiento de un péndulo invertido, aplicando los conceptos generales y los principios fundamentales relacionados con el funcionamiento de este tipo de vehículos, características de operación y los diferentes sistemas que lo componen.

Se hizo énfasis a la problemática de la sociedad en relación a la congestión vehicular, el planteamiento del problema, sus antecedentes y la importancia que son la causa de estudio del presente proyecto así como los objetivos y metas plateadas.

Se analizó brevemente los materiales y equipos que fueron necesarios, haciendo referencia en los requerimientos de diseño del modelo estructural el VEAP y los componentes que serán implementados en el vehículo, mecanismos de desplazamiento, sistema de potencia y transmisión, así como también la implementación de los parámetros de control, sensores y actuadores que intervendrán en el proyecto.

Se procedió con el montaje de los componentes mecánicos y eléctricos que son parte de este proyecto con las respectivas pruebas de funcionamiento para certificar la seguridad de uso después de que el vehículo se encuentre en su totalidad ensamblado

1.4. Justificación e importancia

El desarrollo de este tema aportará a la iniciativa de motivar a la creación de soluciones verdes de transporte personal que desafíen lo convencional,

logrando así el cuidado del medioambiente, esto combinado con una sólida adaptación a las necesidades funcionales de las personas mejorando su productividad y reduciendo sus costos, permitiéndole ir más lejos, moverse más rápidamente y cargar más cosas o peso de lo habitual, donde se verá reflejada la aplicación teórica y práctica de los conocimientos adquiridos durante la carrera de ingeniería, comprobándose todos los principios que se estudiaron en las mismas.

Considerar los aspectos dimensionales, mecánicos y electrónicos con las que debe adecuarse el vehículo de transportación personal con el fin de que el VEAP use el mismo espacio que un peatón y pueda ir a cualquier sitio por donde una persona puede andar permitiéndole a la gente en casa y en el trabajo el ir más lejos, moverse más rápido y aumentar la cantidad de peso que puede cargar por los sitios por dónde anda normalmente.

1.5. Objetivos del proyecto

1.5.1. Objetivo general

- Diseñar y construir un vehículo eléctrico autobalanceado personal (VEAP) de dos ruedas en paralelo estilo Segway.

1.5.2. Objetivos específicos

- Investigar y determinar el principio de funcionamiento de los transportadores personales tipo Segway, los componentes utilizados y autonomía que adquieren este tipo de vehículo.
- Realizar el diseño del modelo estructural del VEAP y los requerimientos de los componentes que serán implementados en el vehículo.

- Ejecutar la construcción del VEAP mediante el ensamblaje de componentes mecánicos y eléctricos con los que contará el proyecto.
- Efectuar las pruebas de funcionamiento del VEAP luego de su ensamble completo para garantizar la seguridad de uso del mismo.

1.6. Metas

- Disposición de información necesaria a fin de estipular los requerimientos pretendidos para la implementación de dichos elementos para la construcción del VEAP.
- Investigación de la dinámica de estabilización, autonomía de uso y potencia de recorrido que poseen los vehículos de transporte personal tipo Segway.
- Diseño de la parte estructural del VEAP y requerimientos de los componentes con los que constara el proyecto.
- Selección de los componentes mecánicos y eléctricos adecuados a la necesidad de este tipo de vehículo.
- Construcción y ensamblaje de los componentes mecánicos y eléctricos acordes con el diseño preestablecido anteriormente, dependiendo de la disponibilidad de materiales y recursos.
- Cumplir el desarrollo del proyecto con las pruebas respectivas de funcionamiento para certificar la seguridad de uso después de que el vehículo se encuentre en su total ensamblaje

1.7. Hipótesis

¿El desarrollo de un VEAP logrará la adecuación necesaria para conseguir que se ocupe el mismo espacio que un peatón, y contribuya a eliminar congestión de tráfico y contaminación?

1.8. Variables de la investigación

Variable independiente

Materiales y piezas mecánicas, eléctricas y estéticas a ser implementados en el vehículo escogido para realizar este proyecto.

Variable dependiente

Diseño estético que permita la combinación de una sólida adaptación a las necesidades funcionales de las personas mejorando su productividad, eliminando la congestión de tráfico y cuidado del medioambiente.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

Uno de los problemas que presentan las grandes ciudades, están relacionados con la industria del transporte, ya que los vehículos generan gran cantidad de tráfico y contaminación, debido a que; su funcionamiento es en base a motores de combustión interna, requiriendo combustibles fósiles, aportan considerables partículas contaminantes al medio ambiente, llevando al colapso de la congestión vehicular debido al incremento del parque automotor y por ende empeorando ampliamente las cualidades del aire en las ciudades provocando así la disminución de la calidad de vida en los ciudadanos.

Dentro de las alternativas de solución para este problema que involucra a toda la sociedad, se encuentra la aplicación de uso de energía renovable en los vehículos, dotándolos de sistemas eléctricos que le permitan utilizar la energía de una manera más eficiente ya que estas tecnologías son impulsadas por los altos costos del petróleo, pero que son enfocados a tramos cortos y con reducida capacidad de carga y autonomía, en comparación a los vehículos que funcionan con motores de combustión interna.

Moreno, L. (2009) “La aparición de este nuevo medio de transporte basado en una premisa tan estudiada como lo es el control de un péndulo invertido, generó gran interés a nivel mundial ya que se trataba de una solución simple en términos constructivos, y ecológica al usar tracción eléctrica, y que eventualmente podía aportar fuertemente a la descongestión de las calles de grandes urbes al tener el potencial de absorber la demanda de transporte en tramos cortos.”

2.2. Historia del Segway

Moreno, L. (2009) “En el año 2001, el empresario e inventor estadounidense Dean Kamen presentó en sociedad su nueva creación: un dispositivo de transporte en base a dos ruedas independientes sobre un mismo eje, el cual era capaz de autobalancearse con una persona sobre él. El concepto, bautizado como Segway.”

El Segway es el primer dispositivo de transporte con autobalanceo. El ordenador y los motores situados en la base mantienen la base del Segway horizontal todo el tiempo. El usuario se debe inclinar hacia la dirección que quiera tomar (delante, atrás, derecha o izquierda).

A diferencia de un coche, el Segway sólo tiene dos ruedas tiene el aspecto de una carretilla de mano sin embargo, consigue mantenerse vertical por sí mismo. Para moverse hacia delante o hacia atrás en el Segway, el usuario sólo tiene que inclinarse ligeramente hacia delante o hacia atrás. Para girar a la izquierda o a la derecha, el usuario simplemente tiene que girar el mando direccional hacia la izquierda o hacia la derecha.



Figura 3. Segway usados en el Ecuador

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

En la tabla 1 se muestran las características de los principales modelos comerciales que posee la empresa Segway.

Tabla 1.

Especificaciones técnicas Segway i2 y X2

MODELO	SEGWAY i2	SEGWAY x2
Peso de la máquina sin las baterías	37 kg 82 lb.	44 kg 97 lb.
Peso total de la máquina	47 kg	54,4 kg
Peso mínimo del usuario	45 kg 100 lb	45 kg 100 lb
Capacidad de carga	45 – 110 kg	45 – 117 kg
Velocidad máxima	12,5 mph 20 km/h	12,5 mph 20 km/h
Alimentación	Baterías de ion-litio	Baterías de ion-litio
Capacidad (Ah) y voltaje de las baterías	5,8 Ah 73,6 V	5,8 Ah 73,6 V
Dimensiones de baterías	35,7 x 19x8,2 cm (14 x 7,5 x 3,2 in)	35,7 x 19x8,2 cm (14 x 7,5 x 3,2 in)
Peso de las baterías	10,3 kg 22,7 lb.	10,3 kg 22,7 lb.
Autonomía con las baterías totalmente cargadas	De 26 a 39 km De 16 a 24 millas	De 14 a 19 km De 9 a 12 millas
Radio de giro	Cero: Las ruedas pueden girar en sentidos opuestos, gracias a lo cual el Segway PT es capaz de girar sobre sí mismo.	
Altura libre sobre el suelo (sin carga)	8,5 cm 3,4 pulg	11,2 cm 4,4 pulg
Largo y ancho de la máquina	65 x 63 cm 25,5 x 25 pulg.	67 x 84 cm 26,5 x 33 pulg

Continua



Altura de la base de alimentación (sin carga)	20 cm 8 pulg	22,9 cm 9 pulg
Tipo de neumático	Estándar	Todo terreno
Tamaño de neumático	48.3 cm 19 in	53.3 cm 21 in
Tamaño de bases	48 x 63 cm	67 x 84 cm
Motores	Brushless	Brushless

Fuente: Segway simply moving



Figura 4. Principales modelos comerciales de Segway

Fuente: Segway simply moving

2.3. Dinámica de la estabilización

El aspecto más sorprendente del Segway es su capacidad para equilibrarse, para entender de una mejor manera se hará una analogía con el ser humano. Cuando el ser humano se pone de pie y se inclina hacia delante, de manera que se pierda el equilibrio, este probablemente no se caerá de cara debido a que el cerebro sabe que está desequilibrado porque el líquido en el oído se desplaza, así que hace mover la pierna hacia delante para evitar la caída. En lugar de caerse, el ser humano camina hacia delante, un paso cada vez.

El Segway hace casi lo mismo excepto que tiene ruedas en lugar de piernas, un motor en lugar de músculos, una colección de microprocesadores en lugar de un cerebro y un juego de sensores sofisticados para la inclinación en lugar de un sistema de equilibrio del oído interno. Al igual que su cerebro, el Segway sabe cuándo usted se inclina hacia adelante. Para mantener el equilibrio, gira las ruedas a la velocidad apropiada, así usted se mueve hacia adelante. Segway llama esta conducta estabilización dinámica y ha patentado el proceso único que permite que el Segway se equilibre sólo sobre dos ruedas. Como se ve en la Figura 5.



Figura 5. Estabilización del Segway

Fuente: Manual de referencia Segway Inc.

2.3.1. El cerebro y la fuerza

El sistema sensor principal es un grupo de giroscopios. Un giroscopio básico es una rueda giratoria dentro de un marco estable. Un objeto giratorio resiste los cambios en sus ejes de rotación porque una fuerza aplicada se mueve junto con el mismo objeto, ver Figura 6.

A medida que el punto de fuerza sigue moviéndose, termina aplicando la fuerza en los extremos opuestos de la rueda - la fuerza se equilibra a sí misma. Debido a su resistencia a la fuerza externa, una rueda giroscopio mantendrá su posición en el espacio (relativa al suelo), incluso aunque se incline. Pero el marco del giroscopio se moverá libremente en el espacio. Al medir la posición de la rueda giratoria del giroscopio relativa al marco, un

sensor preciso puede notar la inclinación de un objeto (la inclinación que tiene con relación a la posición vertical) además de la velocidad de inclinación (con qué rapidez se está inclinando).

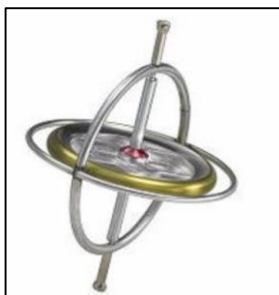


Figura 6. Esquema de un Giroscopio

Fuente: Manual de referencia Segway Inc.

Los ordenadores internos del Segway comparan constantemente los datos de los giroscopios para determinar si cualquiera de estos está suministrando datos erróneos, en esta condición, puede compensar y usar datos de los sensores restantes para seguir obteniendo equilibrio.

Dos sensores de inclinación llenos de un fluido de electrolitos proporciona una referencia de gravedad de la misma manera que nuestro oído interno lo hace para nuestro sentido del equilibrio.

Se tiene un sistema de reducción que permite que el motor funcione a velocidades potentes y eficientes a través de todos los niveles de las marchas del Segway.

2.3.2. Sistema de péndulo invertido sobre móvil

Armijos, C. & Pontón, B. (2010) “El clásico problema del péndulo invertido sobre una base móvil representa de manera muy próxima la dinámica del vehículo que se presenta. El péndulo invertido consiste en un problema dinámico en donde una barra vertical se coloca sobre el centro de una base móvil que puede moverse hacia delante y hacia atrás. De esta manera, las

perturbaciones que precipiten a la barra son compensadas con el movimiento de la base para así restablecer su centro de gravedad y llevarla a una posición de equilibrio.”

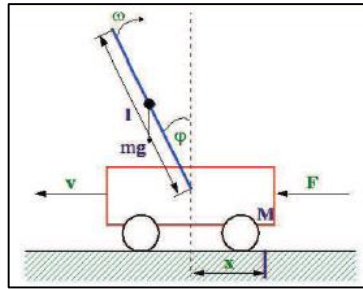


Figura 7. Péndulo invertido sobre base móvil

Fuente: Armijos, C. & Pontón, B. (2010)

Armijos, C. & Pontón, B. (2010) “Muchas técnicas de control son puestas a prueba con el péndulo invertido como por ejemplo: Reguladores de PID, Controles Óptimos, redes neuronales, algoritmos genéticos, entre otros. Las variaciones en este problema incluyen acoplamiento múltiple, permitiendo que el movimiento del carro sea ordenado mientras que mantienen el péndulo, y balancean el sistema.”

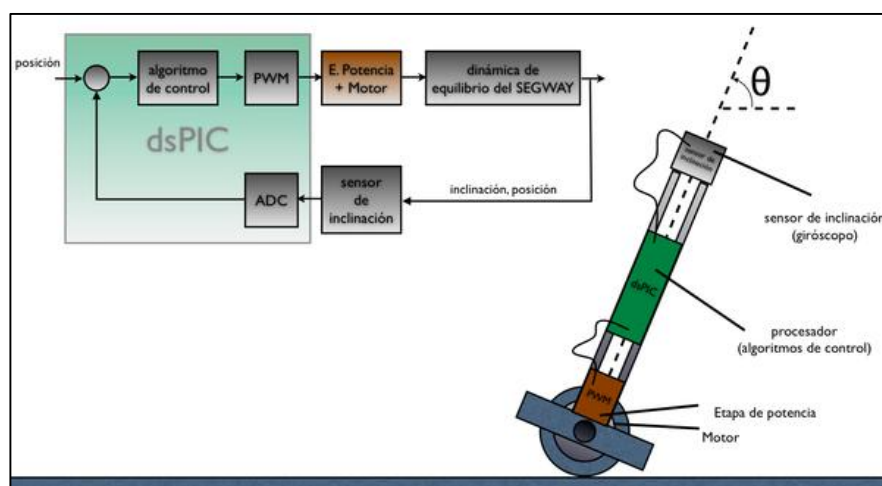


Figura 8. Ejemplo de un péndulo invertido

Fuente: Armijos, C. & Pontón, B. (2010)

2.3.3. Modelado teórico de un vehículo basado en el péndulo invertido

Madero, V. (2009) “El vehículo autobalanceado que se va a analizar, se puede describir como un péndulo invertido cuyo eje de giro es el mismo que el de dos motores y ruedas que permiten desplazarlo para conseguir mantenerlo en equilibrio en la posición vertical.”

Madero, V. (2009) “Se pretende modelar dinámicamente el comportamiento del sistema formado por el vehículo autobalanceado y ajustar sus parámetros para, a partir de él, diseñar las leyes de control que permitan llevar y mantener el vehículo en la posición de equilibrio vertical. “

Como se aprecia en el modelo de prototipo de las Figura 9, el agente que induce el movimiento (el motor) tiene una acción directa tanto para el movimiento lineal como para el movimiento angular. En el caso del péndulo invertido clásico, la acción sobre el movimiento angular es sólo consecuencia de la dinámica de los cuerpos.

Se puede apreciar también en la Figura 9, los principales parámetros del modelo. Estos parámetros responden a magnitudes físicas y tienen valores constantes, algunos de ellos podrán ser medidos directamente, mientras que el valor de otros tendrá que ser estimado a través de datos experimentales ya comprobados.

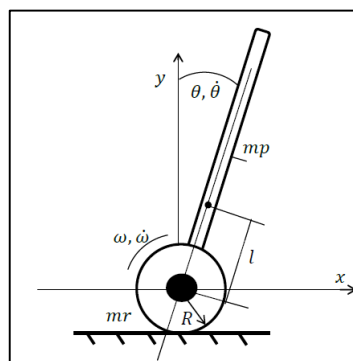


Figura 9. Esquema general de un vehículo auto balanceado.

Fuente: Madero, V. (2009)

A continuación se enumeran dichos parámetros:

θ : Ángulo de inclinación del péndulo.

$\dot{\theta}$: Velocidad angular del péndulo.

m_p : Masa del péndulo. Se incluye los elementos estructurales salvo las ruedas.

l : Longitud del centro de masa del péndulo al eje de los motores

ω : Ángulo girado por el eje de los motores

$\dot{\omega}$: Velocidad en el eje de los motores.

m_r : Masa de las ruedas.

R : Radio de las ruedas

Madero, V. (2009) "Para obtener el modelo dinámico del sistema se va a utilizar la formulación de Lagrange-Euler, que se basa en una interpretación de la energía involucrada en los movimientos del vehículo."

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{p}_i} \right) - \frac{\delta L}{\delta p_i} = \sum_i f_i \quad (1)$$

Ecuación 1. Ecuación de Euler-Lagrange

Fuente: Madero, V. (2009)

Dónde:

P_i : Coordenadas generalizadas.

P_i' : Derivadas de las coordenadas generalizadas P_i .

L : Lagrangiano del sistema mecánico.

F_i : Fuerzas y pares externos aplicados.

Madero, V. (2009) "Las principales variables del sistema, que definen su comportamiento se listan a continuación como coordenadas generalizadas:

θ : Ángulo de inclinación del péndulo (o del vehículo) a partir de la vertical superior. Es la variable principal del sistema y su estabilización es el objetivo de la ley de control.

$\dot{\theta}$: Velocidad angular del péndulo.

ω : Ángulo girado por el eje de los motores

$\dot{\omega}$: Velocidad del eje de los motores."

Madero, V. (2009) "Lo primero para el modelado será la obtención de la expresión del Lagrangiano a través de la diferencia entre las energías cinética E_c y potencial E_p ."

$$L(\theta(t), \omega(t)) = E_c - E_p \quad (2)$$

Ecuación 2. Ecuación del Lagrangiano

Fuente: Madero, V. (2009)

Donde el término L, que recibe el nombre de Lagrangiano del sistema.

Pereira, E. & Rivera, C. (2012) "Se debe mencionar también que para el desarrollo matemático siguiente, se utilizarán las siguientes variables:

E_{tras} : Energía cinética de traslación.

E_{rot} : Energía cinética de rotación.

x_{cm} : Coordenada X del centro de masa del péndulo.

y_{cm} : Coordenada Y del centro de masa del péndulo.

I_r : Momento de Inercia del centro de las ruedas.

I_p : Momento de Inercia del péndulo (en el eje de los motores)."

Madero, V. (2009) “La energía cinética total es la suma de la energía cinética del péndulo y la energía cinética de las ruedas, la cual se tendrán en cuenta por separado puesto que en el movimiento de cada una de esas partes intervienen tanto traslación como rotación, se han de tener en cuenta esos dos términos de la energía de cada parte.”

Así pues, la energía cinética se calcula como:

$$E_c = E_{cr} + E_{cp} \quad (3)$$

Ecuación 3. Determinación de la energía cinética

Fuente: Madero, V. (2009)

Madero, V. (2009) “La energía cinética de las ruedas viene dada por la ecuación (4).”

$$E_{cr} = E_{tras} + E_{rot} \quad (4)$$

Ecuación 4. Energía cinética de las ruedas

Fuente: Madero, V. (2009)

Sustituyendo en la ecuación (4) se tiene:

$$E_{cr} = \frac{1}{2} * m_r * v^2 + \frac{1}{2} * I_r * \dot{\omega}^2$$

$$E_{cr} = \frac{1}{2} * m_r * (R * \dot{\omega})^2 + \frac{1}{2} * \left(\frac{1}{2} * m_r * R^2\right) * \dot{\omega}^2$$

$$E_{cr} = \frac{3}{4} * m_r * R^2 * \dot{\omega}^2 \quad (5)$$

Ecuación 5. Ecuación desarrollada de la energía cinética de las ruedas

Fuente: Madero, V. (2009)

Madero, V. (2009) “Las coordenadas del centro de masa del péndulo vienen dadas por las ecuaciones (6) y (7).”

$$x_{cm} = l * \text{sen}(\theta) + R * \omega \quad (6)$$

Ecuación 6. Centro de masa en el eje x

Fuente: Madero, V. (2009)

$$y_{cm} = l * \text{cos}(\theta) \quad (7)$$

Ecuación 7. Centro de masa en el eje y

Fuente: Madero, V. (2009)

Madero, V. (2009) “Derivando respecto al tiempo las ecuaciones (6) y (7) se obtiene la velocidad del centro de masa del péndulo.”

$$\dot{x}_{cm} = l * \dot{\theta} * \text{cos}(\theta) + R * \dot{\omega} \quad (8)$$

Ecuación 8. Derivada del centro de masa del eje x

Fuente: Madero, V. (2009)

$$\dot{y}_{cm} = l * \dot{\theta} * \text{sen}(\theta) \quad (9)$$

Ecuación 9. Derivada del centro de masa del eje y

Fuente: Madero, V. (2009)

Madero, V. (2009) “La energía cinética del péndulo E_{cp} se calcula según la ecuación (10).”

$$E_{cp} = \frac{1}{2} * m_p * (\dot{x}_{cm}^2 + \dot{y}_{cm}^2) + \frac{1}{2} * I_p * \dot{\theta}^2 \quad (10)$$

Ecuación 10. Energía cinética el péndulo

Fuente: Madero, V. (2009)

Madero, V. (2009) “Sustituyendo la ecuación (8) y (9) en la ecuación (10) se tiene, se puede calcular la energía cinética del péndulo por translación y rotación.”

$$E_{cp} = \frac{1}{2} * mp * [l^2 * \dot{\theta}^2 * \cos^2\theta + R^2 * \dot{\omega}^2 + 2 * l * R * \dot{\theta} * \dot{\omega} * \cos\theta + l^2 * \dot{\theta}^2 * \sin^2\theta] + \frac{1}{2} * I_p * \dot{\theta}^2$$

$$E_{cp} = \frac{1}{2} * mp * l^2 * \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} * mp * R^2 * \dot{\omega}^2 + mp * l * R * \dot{\theta} * \dot{\omega} * \cos\theta + \frac{1}{2} * I_p * \dot{\theta}^2 \quad (11)$$

Ecuación 11. Ecuación desarrollada de energía cinética el péndulo

Fuente: Madero, V. (2009)

Madero, V. (2009) “Por lo tanto, La energía cinética total será la suma de las calculadas en las ecuaciones (5) y (11) donde se obtiene.”

$$E_c = E_{cr} + E_{cp}$$

$$E_c = \frac{3}{4} * mr * R^2 * \dot{\omega}^2 + \frac{1}{2} * mp * l^2 * \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} * mp * R^2 * \dot{\omega}^2 + mp * l * R * \dot{\theta} * \dot{\omega} * \cos\theta + \frac{1}{2} * I_p * \dot{\theta}^2$$

$$E_c = \left(\frac{1}{2} * mp + \frac{3}{4} * mr\right) * R^2 * \dot{\omega}^2 + \frac{1}{2} * mp * l^2 * \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} * I_p * \dot{\theta}^2 + mp * l * R * \dot{\theta} * \dot{\omega} * \cos\theta \quad (12)$$

Ecuación 12. Ecuación desarrollada de la energía cinética

Fuente: Madero, V. (2009)

Madero, V. (2009) “Para el cálculo de la energía potencial se tomará el eje de giro, coincidente con el de los motores, como el punto de referencia. Las ruedas, por tanto, no se tendrán en cuenta para el cálculo de la misma. La energía potencial del sistema E_p , queda definida según la ecuación (13).”

$$E_p = mp * g * l * \cos\theta \quad (13)$$

Ecuación 13. Energía potencial del sistema

Fuente: Madero, V. (2009)

Siendo g la aceleración de la gravedad.

Madero, V. (2009) "Por tanto, el Lagrangiano definido en (2), a través de las ecuaciones (12) y (13)."

$$L = \frac{1}{2} * I_p * \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} * m_p * l^2 * \dot{\theta}^2 + m_p * l * R * \dot{\theta} * \dot{\omega} * \cos\theta + \left(\frac{1}{2} * m_p + \frac{3}{4} * m_r \right) * R^2 * \dot{\omega}^2 - m_p * g * l * \cos\theta \quad (14)$$

Ecuación 14. Expresión del Lagrangiano desarrollada

Fuente: Madero, V. (2009)

Madero, V. (2009) "Una vez formulado el Lagrangiano, a partir de él, se plantearán las ecuaciones de Euler-Lagrange donde se plantean las siguientes expresiones:

Derivando la ecuación (14) respecto a θ y respecto a ω se obtienen las ecuaciones (15) y (16)."

$$\frac{\delta L}{\delta \theta} = -m_p * l * R * \dot{\theta} * \dot{\omega} * \sin\theta + m_p * g * l * \sin\theta \quad (15)$$

Ecuación 15. Derivada del Lagrangiano respecto a θ

Fuente: Madero, V. (2009)

$$\frac{\delta L}{\delta \omega} = 0 \quad (16)$$

Ecuación 16. Derivada del Lagrangiano respecto a ω

Fuente: Madero, V. (2009)

Derivando la ecuación (14) respecto a $\dot{\theta}$ y respecto a $\dot{\omega}$ se obtienen las ecuaciones (17) y (18):

$$\frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}} = I_p * \dot{\theta} + m_p * l^2 * \dot{\theta} + m_p * l * R * \dot{\omega} * \cos\theta \quad (17)$$

Ecuación 17. Derivada del Lagrangiano respecto a $\dot{\theta}$

Fuente: Madero, V. (2009)

$$\frac{\delta L}{\delta \dot{\omega}} = mp * l * R * \dot{\theta} * \cos\theta + (mp + \frac{3}{2}mr) * R^2 * \dot{\omega} \quad (18)$$

Ecuación 18. Derivada del Lagrangiano respecto a $\dot{\omega}$

Fuente: Madero, V. (2009)

Derivando las ecuaciones (17) y (18) respecto al tiempo:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}} \right) = Ip * \ddot{\theta} + mp * l^2 * \ddot{\theta} + mp * l * R * \ddot{\omega} * \cos\theta - mp * l * R * \dot{\theta} * \sin\theta \quad (19)$$

Ecuación 19. Derivación de la ecuación 17 respecto al tiempo

Fuente: Madero, V. (2009)

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{\omega}} \right) = mp * l * R * \ddot{\theta} * \cos\theta - mp * l * R * \dot{\theta}^2 * \sin\theta + (mp + \frac{3}{2}mr) * R^2 * \ddot{\omega} \quad (20)$$

Ecuación 20. Derivación de la ecuación 18 respecto al tiempo

Fuente: Madero, V. (2009)

Madero, V. (2009) “En el caso del vehículo autobalanceado el único par externo que se aplica sobre el sistema es el par de los motores. Al considerarse el eje de giro de los motores y el péndulo como un mismo eje, el par que los motores ejercen directamente sobre las ruedas se muestra como un par opuesto en el péndulo.”

Madero, V. (2009) “La única fuerza externa no conservativa que se considerará en el modelo será la fuerza de rozamiento de los motores. Esta fuerza se debe a la fricción interna de los motores, oponiéndose a la velocidad de giro del eje de los motores, y al igual que en el caso del par aplicado, afecta tanto a las ruedas como al péndulo con igual magnitud y sentido contrario. Teniendo esta información se pueden plantear las ecuaciones de la fuerza de rozamiento en los motores.”

$$Fr = -kr * \dot{\omega} \quad (21)$$

Ecuación 21. Fuerza de rozamiento de los motores

Fuente: Madero, V. (2009)

Madero, V. (2009) “Las ecuaciones que modelan la dinámica del vehículo se obtienen por tanto sustituyendo las ecuaciones (15), (16), (19), (20) y (21) en la ecuación (1).”

$$mp * l * R * \ddot{\theta} * \cos\theta - mp * l * R * \dot{\theta}^2 * \sin\theta + \left(mp + \frac{3}{2}mr \right) * R^2 * \ddot{\omega} = \tau - kr * \dot{\omega} \quad (22)$$

Ecuación 22. Ecuación desarrollada de Euler-Lagrange

Fuente: Madero, V. (2009)

$$(Ip + mp * l^2) * \ddot{\theta} + mp * l * R * \ddot{\omega} * \cos\theta - mp * g * l * \sin\theta = -\tau + kr * \dot{\omega} \quad (23)$$

Ecuación 23. Ecuación desarrollada de Euler-Lagrange

Fuente: Madero, V. (2009)

Dónde: τ : Par del motor

Fr : Fuerza de roce del motor

Kr : Coeficiente de fricción

De forma que las ecuaciones (22) y (23) definen el modelo matemático del sistema.

Madero, V. (2009) “Para trabajar con el modelo de cara al cálculo de leyes de control, se planteará a través de las ecuaciones de estado del mismo. Para ello se definirán las variables de estado del sistema.”

$$x_0 = \theta \quad x_1 = \dot{\theta} \quad x_2 = \omega \quad x_3 = \dot{\omega}$$

Madero, V. (2009) “Además, para facilitar el trabajo con las ecuaciones del sistema se van a agrupar los parámetros del mismo dando lugar un nuevo conjunto de parámetros o constantes del sistema más reducido.”

Los parámetros que se van definir son:

$$A = mp * l * R \quad B = Ip + mp * l^2 \quad C = mp * g * l \quad D$$

$$= (mp + \frac{3}{2}mr) * R^2$$

Madero, V. (2009) “En este sistema, como sistema subactuado que es, tan sólo se cuenta con una variable de control que es el par de los motores.” Se definirá la señal de control como:

$$u = \tau$$

Madero, V. (2009) “Despejando en (22) y (23), y reagrupando términos se pueden presentar las ecuaciones de estado del sistema.”

$$\dot{x}_0 = x_1$$

$$\dot{x}_1 = \frac{A * \cos x_0 * (\text{sen}x_0 * x_1^2 - kr * x_3) - D * C * \text{sen}x_0 - kr * x_3 + (1 + A * \cos x_0) * \tau}{A^2 * \cos^2 x_0 - D * B}$$

$$\dot{x}_2 = x_3$$

$$\dot{x}_3 = ((A^2 * \cos^2 x_0 - D * B) * (kr * x_3 + C * \text{sen}x_0 + \tau) - B * A \cos x_0 * (\text{sen}x_0 * x_1^2 + \tau - kr * x_3) + B * C * D * \text{sen}x_0 + B * kr * x_3 - B * \tau) / (A * \cos x_0 (A^2 * \cos^2 x_0 - D * B))$$

Pereira, E. & Rivera, C. (2012) “A simple vista se observa que el sistema es indudablemente no lineal, lo que dificulta el desarrollo de sistemas de control. No obstante, se pueden aplicar diversas técnicas para linealizar el sistema alrededor del punto de equilibrio ($\theta \cong 0^\circ$) según sea conveniente.”

Pereira, E.; Rivera, C. (2012) “Al mismo tiempo, se aprecia que el sistema se puede esquematizar como un sistema formado por dos bloques, la planta y el actuador, de manera que las variables de estado x_0 y x_1 , las cuales representan el ángulo y la velocidad del péndulo invertido, constituyen la

dinámica de la planta y las variables de estado x_2 y x_3 , que representan el ángulo y la velocidad de las ruedas, constituyen la dinámica de control.”

2.4. Parte operativa

Castro, D. & Peña J. (2011) “La parte operativa de un sistema dinámico controlado, está compuesta por el conjunto (estructura, sensores y actuadores), los cuales están dispuestos en una máquina de manera adecuada para dar soporte a estos y permiten asegurar el perfecto funcionamiento de todo el conjunto.”

En la Figura 10 se muestra la estructura del vehículo, ensamblados en su totalidad conjuntamente con su parte operativa y elementos adicionales para el funcionamiento del vehículo según el diseño establecido.



Figura 10. Diseño estructural del VEAP

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Moreno, L. (2009) “Para la implementación del vehículo en cuestión se requiere estimar ciertas variables físicas del sistema de forma de poder definir parámetros constructivos y de diseño, como posibles materiales, energía necesaria, tipos de sensores, etcétera.”

Castro, D. & Peña J. (2011) “Según el estudio del sistema dinámico, el movimiento lineal del vehículo, es dependiente del ángulo de inclinación de la barra, en cambio el movimiento de rotación del vehículo, solo depende de la diferencia de torque entre los motores, por tanto haciendo un control del ángulo, indirectamente se hace un control del movimiento lineal y de rotación del vehículo, y la perturbación hecha por el usuario permitirá a su vez el movimiento del vehículo.”

Castro, D. & Peña J. (2011) “Por medio de la investigación de trabajos anteriormente realizados, los elementos que corresponden al sistema de control como sensores, controlador y actuador, se seleccionaron basándonos en tablas de características relevantes de las diferentes opciones, se resalta las ventajas y desventajas de porque se utilizaron los elementos que hacen parte del vehículo.”

Castro, D. & Peña J. (2011) “El sistema de control del vehículo se puede representar en forma básica como un sistema de control en lazo cerrado como el visto en la figura 11. Para este caso el sistema controla el ángulo de inclinación del vehículo, controlando el movimiento lineal del vehículo.”

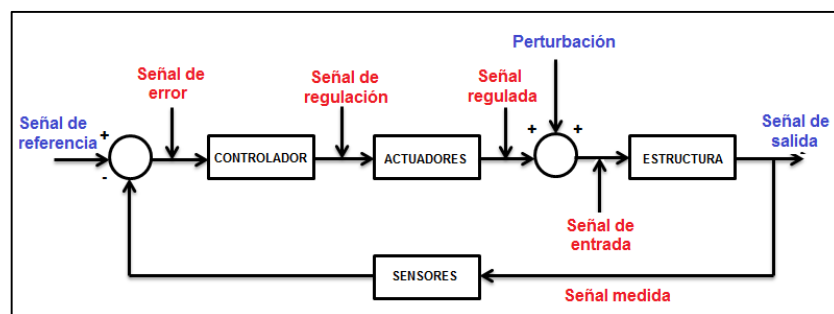


Figura 11. Estructura básica del sistema de control

Fuente: Castro, D. & Peña J. (2011)

También se debe tomar en consideración las características que presenta el sistema y el modo de funcionamiento del mismo, en donde se requiere la medición o estimación en cada instante de acuerdo a los siguientes puntos:

- La inclinación del vehículo que es la principal variable a ser controlada, ya que de ella depende directamente el equilibrio del sistema.
- Velocidad lineal que es la velocidad de traslación del vehículo, combinación de la velocidad de ambas ruedas.
- La referencia de giro que se requiere para establecer la dirección y velocidad de rotación deseada del vehículo. Básicamente representará una diferencia de velocidad entre cada una de las ruedas.
- El estado de las baterías para asegurar el correcto funcionamiento de todos los sistemas involucrados, se debe monitorear constantemente el estado de las baterías, principalmente para dar aviso en caso de una baja carga de éstas (y con ello, de la pérdida del control).
- La corriente en motores de modo de proteger la etapa de potencia del sistema, se debe monitorear la corriente circulante por ésta. Así, se le puede limitar en caso de sobrepasar límites de seguridad previamente establecidos.
- La robustez mecánica de la estructura debe ser suficientemente robusta para soportar caídas sin sufrir mayores daños y protegiendo la electrónica a bordo. Además, no debe poseer elementos innecesarios que compliquen su construcción y/o posibles reparaciones.
- Una plataforma de control robusta, las tarjetas electrónicas de control y sensores estarán expuestas a vibraciones mecánicas y a un medio ruidoso en términos electromagnéticos (debido principalmente a la presencia de motores eléctricos), por lo que el diseño debe considerar dichas variables.

2.4.1. Sensores

Castro, D. & Peña J. (2011) “Son los que permiten hacer la retroalimentación. Es uno de los elementos fundamentales de cualquier sistema de control de lazo cerrado. En el sistema de control referente al presente trabajo, los sensores permiten estimar las distintas variables físicas

(inclinación del vehículo) y enviárselas al micro controlador para ejecutar alguna acción de control que ha sido programada previamente y así realizar el control de la planta dinámica.”

a. Características de selección de sensores

- Voltaje de alimentación del sensor: Es el voltaje que continuamente debe alimentar el sensor, por tanto la salida en voltios del sensor variara entre 0 y el Vdd, la importancia de esta característica radica que estos sensores son sensibles a sobre voltajes y a posibles daños, la estabilidad de la lectura del sensor depende de la estabilidad de la alimentación de este, por tanto se hace necesario disponer de una Fuente de alimentación precisa y estable para los sensores, o tener alguna Fuente de alimentación mayor y regularla utilizando integrados reguladores de voltaje, es beneficioso tener sensores que requieran el mismo voltaje para poder construir un módulo de sensores con su respectiva Fuente y separarlos de la Fuente de alimentación de potencia que involucra ruido.
- Consumo de corriente: La corriente de consumo permite cuantificar cuanta potencia requiere el sensor en el modo activo, esta potencia es significativa para los módulos o aplicaciones en donde no se dispone de la red eléctrica y es necesario la utilización de baterías aunque el consumo es relativamente bajo es necesario hacer un control de este consumo en operación para un sensible ahorro de potencia del sistema, aumentando la vida útil de las baterías lo cual se refleja en autonomía variable significativa en cualquier sistema de transporte y que aplica en nuestro sistema. Los sensores disponen de modo sleep, que permiten bajo consumo del sensor cuando la utilización del sensor es nula, es mediante el microcontrolador que se programa estos modos de utilización.
- Bajo consumo: Consumo de corriente en modo sleep, es relacionado con el consumo de potencia, entre menor sea este consumo es más eficiente el sistema de control en cuanto al consumo energético.

- **Rango:** Rango de medida del acelerómetro, es el valor máximo de aceleración que puede medir el sensor, se calcula teniendo como referencia la aceleración de gravedad, por esto la unidad que se utiliza es g, algunos sensores suministran múltiples rangos, el rango nos permite evaluar la aplicación del sensor, ya que existen sistemas en los que se requiere medir aceleración muy bajas, o muy altas, entre menor el rango de medición, mayor es la sensibilidad del sensor, de la cual se habla en los siguientes ítems.
- **Sensibilidad:** permite obtener la relación entre los voltios entregados por el sensor y la variable física censada, en este caso particular de medición de aceleración se tiene la sensibilidad dada en milivoltios por gravedad (mV/g), la importancia radica en la integración del sensor y el ADC (convertidor análogo digital) que se utilice, ya que si la resolución de este último es muy baja no podrá tener una lectura fiable del sensor, esto se explica en el capítulo de adquisición de datos y procesamiento de señales.
- **Costo:** Debido a que el presupuesto es limitado, se seleccionó la mejor opción en cuanto a prestaciones y soporte, sin superar el presupuesto establecido.
- **Disponibilidad:** la disponibilidad del sensor se refleja en el costo y el tiempo de espera, los sensores que se encuentren a nivel nacional reducirán los costos de importación.

b. Sensores de inclinación, posición angular o rotación

Pozo, D. (2010) “Existen dos tipos de sensores mediante los cuales es posible obtener información sobre un ángulo de inclinación:

- Sensores de medición directa: Son aquellos que están diseñados para proporcionar información directa de la posición angular.
- Sensores de medición indirecta: Son aquellos cuya variable de medición no es necesariamente el ángulo de inclinación, si no, que mediante ciertos arreglos y acondicionamiento pueden brindar una posición angular.”

c. El giroscopio

El giroscopio es un dispositivo que permite conocer como varía un ángulo en el tiempo, mientras este se encuentra rotando (velocidad angular), con esto es posible determinar la actitud del móvil en el cual se encuentra montado.

Los giroscopios antiguamente por su tamaño, peso y carácter mecánico tenían limitadas aplicaciones, siendo esencialmente utilizados en aplicaciones militares.

Actualmente se está haciendo uso de la tecnología de los Sistemas Micro Electro-Mecánicos por sus siglas en inglés MEMS (Microelectromechanical Systems) o microsistemas electromecánicos, son aquellos que funcionan en base a componentes electrónicos y mecánicos miniaturizados, dando origen así a dispositivos capaces de sensar y actuar a una escala micrométrica, con lo cual el tamaño y el peso de este tipo de dispositivos ya no es más un problema, dándoles gran versatilidad en cuanto a su uso, que puede ir desde aplicaciones para estabilización de plataformas.

Existen tres principios básicos de funcionamiento de un giroscopio:

- **Rotatorios:** Este principio utiliza una masa rotando sobre un eje sostenido por uno o varios cardanes dependiendo de los grados de libertad que se deseen, de tal manera que la precesión sea mínima, manteniendo así el eje estable y por tanto el giróscopo apuntará siempre en la misma dirección. Cuando se produce un movimiento en el sistema externo es posible observar el cambio en el ángulo.

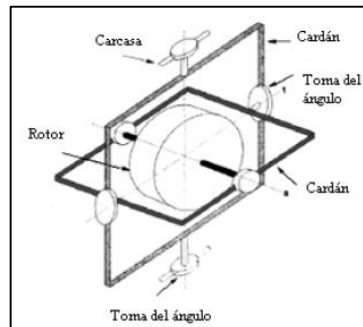


Figura 12. Sistema de cardanes y giroscopio con dos grados de libertad

Fuente: Pozo, D. (2010)

- **Vibratorios:** Se caracterizan por disponer de un elemento vibrante que al ser forzado a rotar, es afectado por una fuerza de Coriolis que induce vibraciones secundarias ortogonales a la vibración original. La velocidad angular se obtiene en base a dichas vibraciones

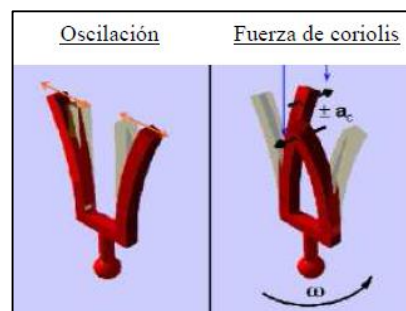


Figura 13. Funcionamiento de un giroscopio de tipo vibratorio

Fuente: Pozo, D. (2010)

- **Ópticos:** Los giroscopios ópticos usan el efecto Sagnac para detectar la rotación a la cual están siendo sometidos. Cuando dos rayos de luz circulan en direcciones opuestas dentro de un camino cerrado, el haz de luz que circula en la misma dirección de la rotación tarda más tiempo en viajar que el haz de luz que va en sentido contrario, con lo cual el ángulo se puede obtener en base a la diferencia de camino que ven los dos rayos que viajan en direcciones opuestas a lo largo del perímetro.

d. El acelerómetro

Pozo, D. (2010) “Es un sensor que permite conocer la aceleración que se produce al realizarse un movimiento, a lo largo del eje en el cual se esté trabajando. Hay que tomar muy en cuenta que un acelerómetro no mide la aceleración de la gravedad en sí, sino, que mide una magnitud de aceleración en general.”

Arenas, M. (2008) “Los acelerómetros son sensores inerciales que miden la segunda derivada de la posición. Un acelerómetro mide la fuerza de inercia generada cuando una masa es afectada por un cambio de velocidad.”

Arenas, M. (2008) “Hay dos parámetros principales a la hora de escoger el medidor adecuado, los rangos de funcionamiento de temperatura y frecuencia. Otros parámetros importantes pueden ser el tamaño, si tienen más funciones, la resistencia a golpes y por supuesto el precio.”

Pozo, D. (2010) “Una característica especial que presenta el acelerómetro es que puede ser utilizado también como un sensor de inclinación, para lo cual se usa la aceleración de la gravedad como un vector para determinar la orientación del objeto en el espacio.”

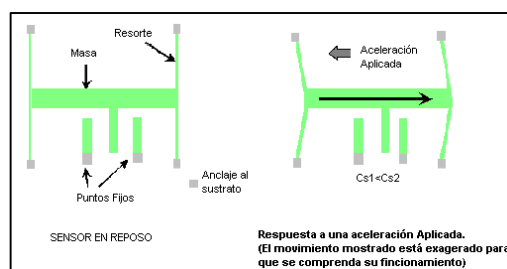


Figura 14. Esquema Acelerómetro Capacitivo

Fuente: Arenas, M. (2008)

Pereira, E. & Rivera, C. (2012) “Este tipo de sensores no solo se puede utilizar para medir aceleraciones, sino también para realizar mediciones indirectas de otras variables, como por ejemplo: velocidades, ángulos, fuerzas, entre otras.”

Pereira, E. & Rivera, C. (2012) “En el desarrollo de vehículos auto balanceados, se utiliza un acelerómetro para medir indirectamente el ángulo de inclinación debido a su bajo costo comercial, ya que, en el mercado existen medidores de ángulos directamente, pero estos, son de costos bastante elevados.”

Pereira, E. & Rivera, C. (2012) “Por otro lado, se tiene que una forma de medir un ángulo de inclinación con un acelerómetro, es aprovechar el vector gravedad como referencia y la medición directa de la aceleración arrojada por el acelerómetro en cualquiera de sus ejes.”

En la tabla 2 se establece las características de los tipos de acelerómetros y sus aplicaciones.

Tabla 2.

Características principales de los acelerómetros

Tipo	Margen de medida	Ventajas e inconvenientes	Aplicaciones
MENS	1,5 g – 250 g	-Alta sensibilidad -Coste medio -Uso sencillo -Bajas temperaturas	-Impacto -ABS -Airbags -Uso en automoción
Piezoeléctricos	0 g – 2000 g	-Sensibilidad media -Uso complejo -Bajas temperaturas -No funcionan en continua	-Vibración -Impacto -Uso industrial
Piezo-resistivos	0 g – 2000 g	-Respuesta en continua y alterna -Prestaciones medias -Bajo coste -Tamaño y peso mínimos -Alta sensibilidad	-Vibración -Impacto -Automoción -Biodinámica -Ensayos de vuelo -Test de túneles de viento

Continúa 

Capacitivos	0 g – 1000 g	-Funcionan en continua -Bajo ruido -Baja potencia -Bajo coste	-Uso general -Uso industrial -Sistemas de alarma -Mediciones sísmicas
Mecánicos	0 g – 200 g	-Alta precisión en continua -Lentos -Alto coste	-Navegación inercial -Guía de misiles -Herramientas -Nivelación

Fuente: Arenas, M. (2008)

e. Métodos de selección del sensor usando solo giroscopio

Pozo, D. (2010) “Como se mencionó anteriormente el giroscopio entrega como información la velocidad con la que está rotando (velocidad angular). Para conseguir la actitud es necesario integrar la velocidad angular, teniendo como concepto de integración, el multiplicar este dato por un valor de tiempo determinado “dt”.”

Pozo, D. (2010) “La constante de tiempo que se utiliza depende únicamente de las necesidades que se tengan, así como también, de cómo se vaya a procesar esta señal. Si los intervalos de tiempo son muy pequeños se vuelve necesaria la utilización de dispositivos con una alta velocidad para el procesamiento de la información.”

$$\frac{d(\text{ángulo})}{dt} = \text{velocidad angular} = \text{señal del giroscopio}$$

$$d(\text{ángulo}) = \text{velocidad angular} * dt$$

$$\int \text{velocidad angular} = \int \text{señal giroscopio} = \text{ángulo}$$

Pozo, D. (2010) “Considerando las fórmulas presentadas se puede apreciar que una pequeña variación en el ángulo es posible calcularla a través del producto de la velocidad angular por el tiempo en el cual se está realizando el movimiento.”

Pozo, D. (2010) “Ahora hay que analizar, que mediante este modelo solo se encuentra un ángulo en un instante determinado, pero el objetivo es encontrar el ángulo de inclinación. Para encontrar este parámetro, es necesario tomar en cuenta que el proceso antes descrito se realiza en intervalos de tiempo establecidos “dt”, con lo cual el ángulo de inclinación sería el resultado de un algoritmo acumulativo, de donde se puede obtener el siguiente modelo.”

$$\text{ángulo}_k = \text{ángulo}_{k-1} + u_k * dt$$

Ecuación 24. Algoritmo acumulativo del giroscopio

Fuente: Pozo, D. (2010)

Dónde:

u_k = Señal acondicionada del giroscopio

dt = tiempo de muestreo

ángulo_k = estado presente

ángulo_{k-1} = estado anterior

Pozo, D. (2010) “Existen dos inconvenientes principales al tratar de encontrar el ángulo de inclinación solo mediante el uso del giroscopio, el primero que se conoce como drift o deriva que se produce a lo largo del tiempo debido al algoritmo acumulativo, es decir, se tendrá valores fiables de ángulo de inclinación solo en intervalos muy cortos de tiempo, y en intervalos largos los valores obtenidos estarán muy lejos de la medida real.”

Pozo, D. (2010) “El segundo inconveniente o problema presente en el uso del giroscopio es que no se puede saber el estado inicial o ángulo de partida, a menos que el sistema siempre tenga un estado inicial conocido con el cual se pueda comenzar el algoritmo acumulativo. De lo cual se tiene que, es muy difícil por no decir imposible conseguir una medida fiable del ángulo de inclinación solo mediante el uso del giroscopio, por lo tanto, es necesario la

utilización de otro dispositivo que contrarreste en cierto modo los problemas que acarrea el uso único del giroscopio y esto es mediante el uso del acelerómetro.”

f. Métodos de selección del sensor usando solo acelerómetro

Pozo, D. (2010) “Como se conoce el acelerómetro da una medida de la aceleración a la cual está sometido el sensor en cada uno de sus ejes, pero una de sus más populares aplicaciones es su uso como un sensor de inclinación.”

Pozo, D. (2010) “Hay que tomar en cuenta que la sensibilidad de los acelerómetros para la medición de la inclinación aumenta, cuando sus ejes se encuentran perpendiculares a la aceleración de la gravedad, es decir, paralelos a la superficie terrestre.”

Pozo, D. (2010) “Primero hay que establecer que el acelerómetro se encuentra unido firmemente a la plataforma, por lo que cuando el vehículo se encuentra paralela a la superficie terrestre, los dos ejes del acelerómetro “X” y “Y” también se encontrarán paralelos con respecto a tierra, es decir, perpendiculares a la gravedad.”

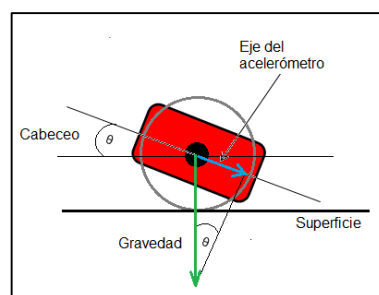


Figura 15. Cabeceo con un ángulo Θ en sentido horario

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

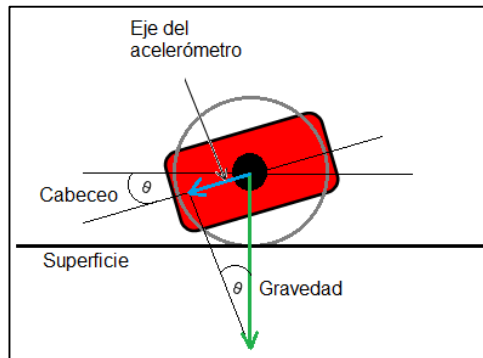


Figura 16. Cabeceo con un ángulo Θ en sentido anti - horario

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

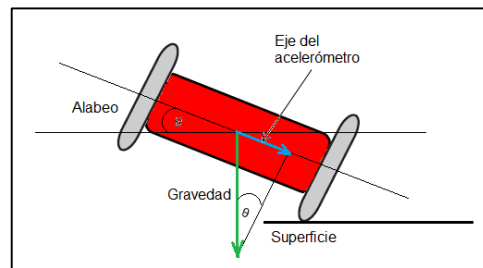


Figura 17. Alabeo con un ángulo Θ en sentido horario

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

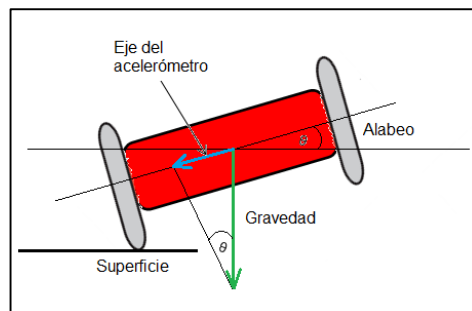


Figura 18. Alabeo con un ángulo Θ en sentido anti - horario

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Pozo, D. (2010) “Cuando el vehículo toma una inclinación como en la Figura 15, lo que sucede es que el sensor se mueve en forma conjunta con

la nave provocando en este caso que el eje “Y”, entregue una señal debido a la componente de la gravedad presente.”

Pozo, D. (2010) “En los gráficos, la flecha azul representa lo que el acelerómetro está midiendo a causa de la gravedad y la flecha roja representa la aceleración de la gravedad.”

Pozo, D. (2010) “Si bien el acelerómetro trabajando como sensor de inclinación es una excelente opción, hay que tener en cuenta que este sensor entrega un ángulo acertado solo en condiciones en las cuales no se esté produciendo un movimiento que implique presencia de aceleración lineal, en cualquiera de sus ejes, es decir, en condiciones en que la aceleración sea cero.”

Pozo, D. (2010) “Tomando en cuenta esto, un ligero cambio en la aceleración distinta de cero sobre el sensor o simplemente por la presencia de vibraciones producirá que el ángulo que se obtiene no sea el acertado, con lo cual el sensor seguirá dando una información errónea mientras se encuentre bajo estos efectos.”

g. Selección del sensor usando giroscopio y acelerómetro

Pozo, D. (2010) “Tomando como referencia los dos métodos anteriores se aprecia claramente que al usar tanto el giroscopio como el acelerómetro de manera individual, se tienen varios inconvenientes que producen que el resultado deseado tienda a tener error en su magnitud.”

Pozo, D. (2010) “Debido a estos inconvenientes, surge la necesidad de trabajar con ambos sensores simultáneamente, con el fin de poder tomar las mejores características de cada uno y que a la vez se contrarresten en cierto grado los inconvenientes.”

h. MPU-6050 (Unidad de Procesamiento del Movimiento)

Para tomar los datos de referencia que en este caso son los parámetros que intervienen en el péndulo invertido para el VEAP se usará el sensor inercial MPU-6050 de InvenSense. El principal motivo de la elección de este sensor es que; en un solo chip se integra un giroscopio y un acelerómetro que presenta una sobresaliente linealidad, reduciendo de esta manera significativamente el error de desalineación que se presenta cuando se fusionan los sensores.

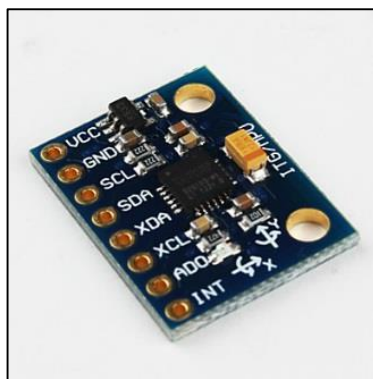


Figura 19. Sensor inercial MPU-6050

Fuente: IvenSense

La MPU-6050 es una unidad compacta para el procesamiento de movimiento elaborado con tecnología MotionProcessing (Tecnología registrada por IvenSense que combina una unidad inercial con el procesamiento digital y aplicaciones basadas en movimiento) de Ivensense.

Combina la aceleración con el movimiento de rotación y posee 6 grados de libertad. Está compuesto por un giroscopio de tres ejes, un acelerómetro de tres ejes y un Procesador de Movimiento Digital (DMP).

El DMP es un sistema basado en un microprocesador que posee un conjunto de instrucciones para el proceso de aplicaciones en tiempo real que requieran operaciones numéricas a muy alta velocidad, es utilizado para la salida de los ángulos de Euler.

La MPU 6050 recoge los datos de los tres ejes del giroscopio, los tres ejes del acelerómetro y los datos de la temperatura; la tasa de muestreo para la sincronización de los datos es definida por el usuario.

Tabla 3.

Designación de pines MPU-6050

PIN	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
1	CLKIN	Referencia opcional externa entrada de reloj. (Conecte a tierra si no se utiliza).
6	AUX_DA	I2C datos, para la conexión de sensores externos
7	AUX_CL	I2C reloj, para la conexión de sensores externos
8	VLOGIC	Entrada o salida digital de suministro de voltaje
9	AD0 / SDO	Dirección I2C, cuando el dispositivo trabaja como esclavo
10	REGOUT	Conexión al condensador regulador del filtro
11	FSYNC	Marco de entrada de sincronización digital. (Conecte a tierra si no se utiliza).
12	INT	Interrupción de salida digital (drenaje abierto)
13	VDD	Tensión de alimentación E / S digital
18	GND	Tierra.
20	CPOUT	Conexión al capacitor que anula el alto voltaje generado por la bomba de carga.
22	CLKOUT	Sistema de salida de reloj.
23	SCL	Señal de reloj I2C.
24	SDA	Línea de datos I2C

Fuente: IvenSense

i. Compensación de la inclinación con el sensor MPU 6050

Castro, D. & Peña J. (2011) “Uno de los parámetro más importantes a considerar antes de realizar la estrategia de control es determinar la variable de inclinación real que se va a medir; o variable de proceso que se efectuara cuando el sensor usado para medir la inclinación tenga un movimiento lineal acelerado y rotacional del vehículo afectando la medida de este, por lo tanto se hace necesario implementar un algoritmo que contrarreste el aumento en la medida de inclinación. Restando el incremento en la medida del giroscopio multiplicado por una constante K_{gg} al valor obtenido con el acelerómetro se puede disminuir este efecto indeseado.”

De tal forma que la variable de Proceso se puede expresar como:

$$\text{Variable de proceso} = \text{Accel} - \Delta_{gyro} * k_{gg}$$

Ecuación 25. Variable de medición de proceso de inclinación

Fuente: Castro, D. & Peña J. (2011)

Castro, D. & Peña J. (2011) “Donde es la medida tomada por el acelerómetro y es la variación entre una medida y la anterior del giroscopio.”

Castro, D. & Peña J. (2011) “El valor final obtenido es la Variable de Proceso es usada para calcular el del sistema y las condiciones de inclinación para determina el sentido y la magnitud del giro de las ruedas.”

2.4.2. Actuadores

En esta parte se considera el análisis y la selección de los motores ya que es uno de elementos fundamentales del modelo estructural del sistema dinámico, se optó por utilizar motores de corriente continua. Este tipo de motor es muy poco utilizado en el mercado y debido a ello la disponibilidad en el mercado nacional es muy reducida, por lo que hace necesario importarlos, no obstante lo que se pretende con este proyecto es reducir sus costos de fabricación con lo cual se utilizó motores disponibles en el país.

a. Motores DC

El motor de corriente continua es una máquina que convierte la energía eléctrica en mecánica, principalmente mediante el movimiento rotatorio. Esta máquina de corriente continua es una de las más versátiles en la industria. Su fácil control de posición, paro y velocidad la han convertido en una de las mejores opciones en aplicaciones de control y automatización de procesos.

2.4.3. Unidad controladora de motores

Madero, V. (2009) “Por unidad controladora de motores se hace referencia al circuito que realiza el control a bajo nivel de los motores. Se trata de una placa basada en microcontrolador que realiza varias tareas entre las que destaca el control de la potencia suministrada a los motores para que en éstos se alcance una velocidad, posición o un par determinado.”

Madero, V. (2009) “Por ello, esta unidad controladora de motores permite que los motores no reciban la alimentación directamente de las baterías; y la reciben a través de la controladora que es la que está conectada directamente a ellas. Normalmente, la electrónica de la controladora es capaz de funcionar a una tensión de alimentación menor que la tensión de funcionamiento de los motores. Gracias a esto, si la tensión de las baterías bajase, el sistema no dejaría de funcionar directamente, simplemente no podría alcanzar su potencia máxima. Para el caso contrario en que se alimente a una tensión mayor a la indicada es necesario que la controladora tenga elementos de protección contra sobretensión para no dañar los circuitos o los motores.”

Madero, V. (2009) “Existen distintos tipos de controladoras de motores en función de que la salida que se quiera obtener sea en par (corriente), velocidad o posición. En nuestro caso se pretende controlar el par del motor. Las leyes de control se implementarán en un microcontrolador y éste se conectará de manera digital a la controladora de los motores para, a través del envío de consignas, darle el valor de par que se ha de aplicar.”

Madero, V. (2009) “Al existir diferentes rangos de alimentación para motores y el resto de elementos electrónicos se ha decidido utilizar una controladora que sea capaz de proporcionar la alimentación en dos sistemas paralelos correspondientes a esos dos grupos. La corriente que pueda ser requerida por los motores en algunos casos puede ser muy elevada con respecto a la corriente soportada por algunos elementos de la electrónica

por lo que con la separación de estos grupos en cuanto a alimentación también se están protegiendo los componentes menos robustos.”

a. Sabertooth dual 60A motor conductor

Es uno de los drivers de motor más versátil, eficiente y fácil de usar. Es adecuado para robots de alta potencia, soporta hasta 120 libras en el combate o hasta 1.000 libras para la robótica de propósito general. Puede suministrar un máximo de 60A a cada uno de los motores. Soporta picos de corriente de 120A por canal durante unos segundos.



Figura 20. Sabertooth 2x60 dual

Fuente: Dimension Engineering Sabertooth

b. Guía de conexiones Sabertooth 2X60

Este driver permite controlar dos motores con: Voltaje analógico, radio control y serie empaquetada. El modo de funcionamiento se ajusta con los interruptores DIP.

Posee terminales con tornillos para ajustar las conexiones sin necesidad de soldaduras. La Sabertooth es un controlador regenerativo síncrono. La topología regenerativa significa que sus baterías se recargan cada vez que el robot frene o realice el cambio de giro. Las paradas y retrocesos son de acción rápida dando al robot ventajas en agilidad y rapidez. El modo de corte de litio permite operar de manera segura con baterías ion Litio o baterías de

litio y polímero protegiendo la vida útil de las mismas. Los transistores se conectan a velocidades ultrasónicas de 24kHz para un funcionamiento silencioso.

En la tabla 4 se muestran las características más relevantes con la viene equipada la Sabertooth 2x60 dual:

Tabla 4.

Especificaciones Sabertooth 2x60

PARÁMETRO	CARACTERÍSTICA
Voltaje de entrada	6V-33.6V
Corriente de salida	60A por canal
Pico de salida actual	120A por canal
Modos de funcionamiento	Analógica, R / C, serial.

Fuente: Dimension Engineering Sabertooth

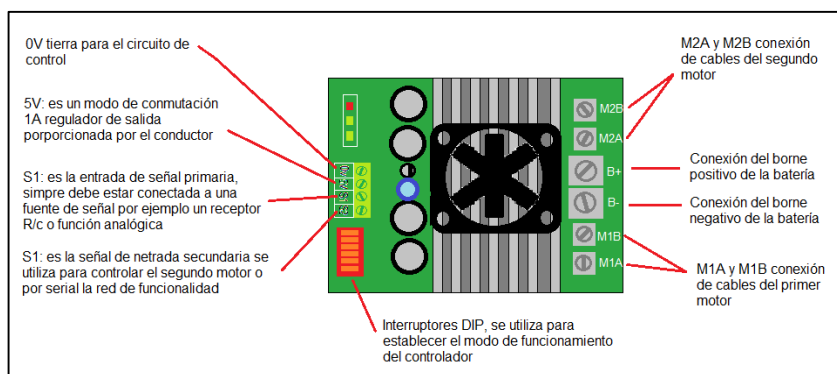


Figura 21. Conexiones driver Sabertooth 2x60

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

c. Modo de operación driver sabertooth 2X60

El controlador como ya se mostró en la tabla 4, puede operar de tres modos diferentes, ya sea análogo, R/C o serial, para nuestro proyecto se

opta por el modo serial debido a que en este modo de funcionamiento se podrá utilizarlo en el entorno en Matlab/Simulink.

Para la selección de velocidad de transmisión (baud rate) el modo serial funciona con un protocolo 8N1 - 8 bytes de datos, no hay bits de paridad y un bit de parada. La velocidad de transmisión es seleccionada por los interruptores 2 y 4 como se ve en la figura 22, con un baud de 9600.

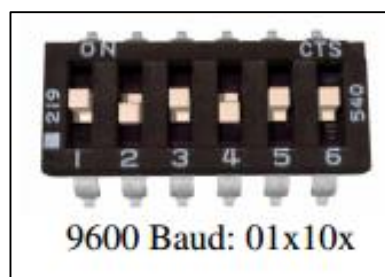


Figura 22. Posicionamiento de interruptores para el modo serial

Fuente: Dimension Engineering Sabertooth

El modo serial es una única interfaz de una sola dirección. La línea de transmisión desde el host está conectada a S1. Debido a que el driver Sabertooth controla dos motores con un carácter de 8 bytes, cuando se opera en el modo de serie simplificado, cada motor tiene 7 bits de resolución.

Enviando un carácter entre 1 y 127 controlará el motor 1. En donde el carácter 1 es total a la inversa, el 64 es detener y 127 es total hacia adelante.

Enviando un carácter entre 128 y 255 controlará el motor 2. En donde el carácter 128 es total a la inversa, 192 es parar y 255 es total hacia adelante.

Mientras que el carácter 0 (0x00 hexadecimal) es un caso especial. El envío de este carácter va a detener ambos motores. Todas esas

consideraciones se deberán tomar en cuenta para la estrategia de control utilizada en el proyecto.

2.4.4. Sistema de control

Madero, V. (2009) “El control de todo el vehículo debe ser realizado por un sistema de control integrado en el mismo. Para ello se ha decidido utilizar un sistema basado en microcontrolador que sea capaz de, por un lado calcular la ley de control que se va a aplicar para la estabilización del péndulo, y por otro lado dirigir el funcionamiento de todos los elementos que componen el vehículo gestionando.”

Madero, V. (2009) “Para seleccionar el sistema microcontrolador se tendrán en cuenta la velocidad de procesado, la disponibilidad de entradas y salidas tanto analógicas como digitales y los puertos de comunicación implementados.”

El sistema desarrollo o placa microcontroladora es la STM32F407VG DISCOVERY. Se trata de una placa de desarrollo basada en el microcontrolador STM32F407VGT6.



Figura 23. MCU STM32F407 VG

Fuente: St STM32F4 Discovery

Algunas de sus principales características se enumeran a continuación:

- Arquitectura de 32 bits, ARM4
- 1MB memoria flash (para programaciones extensas)
- 192kB memoria RAM
- Cristal de 168 MHz(velocidad de proceso, 10 veces más que un Arduino)
- Punto flotante por hardware (Procesa operaciones complicadas)
- 6 UART
- 2 CAN
- 3 SPI
- 3 I2C comunicación (trabaja con mpu 6050 giroscopio y acelerómetros)

2.5. Baterías

Madero, V. (2009) “Tanto los motores eléctricos del vehículo autobalanceado como todos los elementos electrónicos necesarios para su control y operación necesitan de una alimentación eléctrica para poder funcionar. Para poder dotar al vehículo de total movilidad, la alimentación debe realizarse a través de baterías colocadas a bordo. El uso de cables para una alimentación externa limitará fuertemente la movilidad del vehículo.”

2.5.1. Parámetros para la selección de las baterías

Voltaje Nominal: es el voltaje en las terminales de una celda. Esta tensión varía de una tecnología a otra.

Capacidad: se refiere a la cantidad de carga que puede almacenar la batería. La cantidad de carga expresa la capacidad de una batería en Ampere Hora (Ah). Al expresar la capacidad de la batería en Ah, se puede

indicar cuánta corriente puede entregar la batería en un tiempo determinado, sin que la tensión esté fuera de los límites.

Autodescarga: es el proceso de descarga que sufren las baterías aun cuando no se utilicen. Tanto el envejecimiento de la batería como la temperatura incrementan la autodescarga.

Longevidad: se refiere al período de tiempo en el que la batería operará correctamente y bajo las condiciones normales de funcionamiento. La longevidad también puede expresarse en la cantidad de ciclos que soporta la batería, definiendo ciclo como el período de carga y descarga de la batería.

Características de carga: estas características vienen dadas por las curvas de carga de la batería, las cuáles proporcionan información acerca de cómo varía la tensión de la batería, en el proceso de carga, en función ciertos parámetros, tales como, el tiempo, la temperatura y la corriente.

Características de descarga: vienen indicadas por una serie de gráficas que exponen cómo varía el nivel de tensión de la batería para un consumo constante de corriente. En dichas gráficas se muestra también el nivel mínimo de tensión al que debe llegar la batería, para evitar daños.

Efectos de la temperatura: debido a la presencia en las baterías de componentes químicos, la temperatura juega un papel importante en el desempeño de éstas, al punto de que afecta notablemente su capacidad, longevidad, tensión de fin de carga, tensión de fin de descarga, auto descarga, afectando, por ende, el rendimiento general de la batería.

2.5.2. Baterías de LiPo (lithium polymer)

Madero, V. (2009) "Las baterías Li-Po están formadas por elementos de 3.7 V. Con la unión de varios elementos se formarán distintas baterías. A la conexión de dos elementos en serie se le denomina 2S y se trata de una

batería de 7.4 V. La conexión en serie de tres elementos (3S) proporciona un voltaje de 11.1 V.”

En nuestro caso se va a usar dos baterías de 22,2 V y 5000 mAh para la alimentación de los motores y la parte de control que se muestran en la Figura 24.



Figura 24. Baterías LiPo 22.2 V, 5000mAh

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Madero, V. (2009) “Se puede comprobar que la carga real de las baterías es superior a la nominal y tras bastante tiempo de uso comienza a caer el voltaje. Para las baterías de 22.2 V la carga real está en torno a 25.2 V. Se ha comprobado que el número de experimentos que permiten las baterías antes de tener que ser recargadas es bastante alto.”

2.5.3. Equipo auxiliar: cargador de baterías

El cargador de baterías seleccionado permite recargar las baterías LiPo de una manera muy eficaz es el TritonEQ. El modelo seleccionado ofrece todas las especificaciones y características necesaria para las especificaciones con las que cuenta las baterías LiPo, cuenta con un circuito de balanceador lo que permite cargar las baterías individualmente por celdas. Puede ser alimentado desde cualquier toma (110 o 220 Vac). Es completamente automático, una vez que las baterías se encuentran

cargadas, se pone en modo standby. Su pequeño tamaño y peso ligero hacen extremadamente fácil de transportar.



Figura 25. Cargador de baterías Lipo Triton EQ

Fuente: ElectricFly by Great Planes

CAPÍTULO III

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL VEAP

3.1. Requerimientos del sistema

Además de las consideraciones que se deberá tener en cuenta en la parte de diseño donde intervendrán las variables necesarias para la estrategia de control como son: las salidas del ángulo que forma el péndulo, que debe mantenerse en cero, la velocidad angular del péndulo y la otra salida es la velocidad a la que se desplaza el móvil, se deberá tomar en cuenta los aspectos de funcionalidad del sistema en la etapa de potencia de motores y la autonomía del vehículo en donde todas estas variables vienen dada según nuestro diseño y regidos a los siguientes aspectos:

En el modelo real se tienen los siguientes datos:

m: Masa del vehículo: 30kg

M: Masa de la persona (péndulo): 70kg

g: Aceleración de la gravedad: 9.8m/s²

l: Altura del centro de masa con persona: 95cm aproximadamente (Determinado mediante simulación en Autodesk Inventor).

3.1.1. Requerimiento de etapa de potencia de motores

Para la selección y dimensionamiento de los motores, es preciso tomar en cuenta varios factores, principalmente la potencia y relaciones torque-velocidad requeridas para la aplicación. Cuanto más exactos sea este cálculo mejor. De esta manera se podrá dimensionar la potencia eléctrica del motor, con un margen de seguridad, pero sin exagerar los requerimientos para no incurrir en tamaño ni costes excesivos. Para ello se tomará datos reales que nos servirán para determinar estos parámetros.

En primer lugar, como requerimiento de velocidad el vehículo deberá poder movilizarse más rápido que una persona caminando; es decir, la velocidad a la que deberá poder desplazarse el vehículo deberá ser mayor a 4km/h. El proyecto está basado en la velocidad especificada por los Segway comerciales donde hace referencia que no debe sobrepasar los 20 km/h. Esta aplicación requiere el uso de caja reductora, debido a que no se requieren altas velocidades, sino alto torque.

La velocidad lineal del vehículo se relaciona con la velocidad angular del motor, la salida de la caja reductora, es decir, en el eje de la rueda, en función del perímetro de la llanta.

$$v = \omega \times R$$

Ecuación 26. Velocidad angular a partir de la velocidad lineal

Fuente: Matemática aplicada al automóvil GTZ

Dónde:

$$V = \text{velocidad lineal} = 20 \frac{km}{h} \times \frac{1000m}{1 km} \times \frac{1 h}{3600 s} = 5,56 \frac{m}{s}$$

ω = velocidad angular de salida [rad/s]

R = Radio de la rueda = 0,165 m

n = número de revoluciones por minuto [rpm]

Despejando, es posible calcular la velocidad angular requerida al eje de la llanta y con el valor obtenido se puede determinar el número de revoluciones necesarias requeridas para el proyecto.

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{5,56 \frac{m}{s}}{0,165 m} = 33,697 \frac{rad}{s}$$

$$n = 33,697 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \times \frac{1 \text{ rev}}{2 \pi \text{ rad}} = 5,36 \text{ rps} = 321,78 \text{ rpm}$$

Por tanto, para cumplir con el requisito propuesto, la velocidad angular a la salida de la caja reductora debe ser superior a 321 RPM.

A continuación, es necesario analizar las fuerzas que intervienen en el movimiento y el torque que deberá ser capaz de proporcionar el motor. La fuerza F se puede expresar en kg o Newtons. Es la fuerza necesaria para que lentamente el objeto empiece a desplazarse. Atención, la fuerza F no es necesariamente igual al peso o masa del objeto.

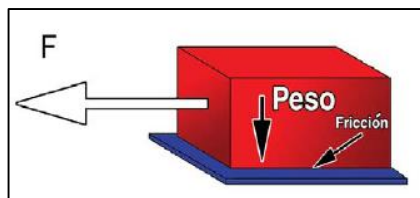


Figura 26. Elementos en el desplazamiento de los cuerpos

Fuente: Manual Maxon Motor

Para esto se realizará un análisis sencillo de fuerzas, pero nótese que en la Figura 27 hace referencia a un análisis de fuerza válido solo para superficies planas. Para el dimensionamiento se analiza la peor condición que deberá soportar el conjunto motor-caja reductora, en la que se tendría condiciones de superficies inclinadas, como dato real para la realización del cálculo se tomó como condición una rampa con una inclinación $\theta = 20^\circ$.

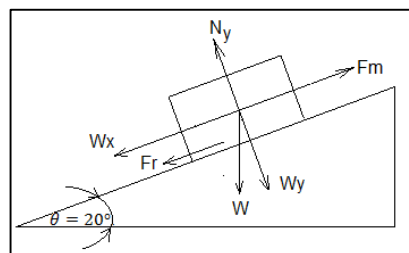


Figura 27. Diagrama de cuerpo libre

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Donde se tiene que:

F_m = Fuerza aplicada por el conjunto motor-caja reductora

θ = Inclinación del terreno: 20°

F_r = Fuerza de rozamiento

W = Peso total de la maquina más la carga

Se puede ver en la Figura 28 que la fuerza F_m depende de la fricción que se necesitará vencer para que la carga se desplace, para nuestra aplicación no es lo mismo arrastrar una pesada caja de cartón sola que ponerle ruedas. La fuerza que se necesitará sin el uso de ruedas es mucho más elevada, sin embargo el peso de la carga es el mismo. Lo que se a hecho al ponerle ruedas es disminuir la fricción.

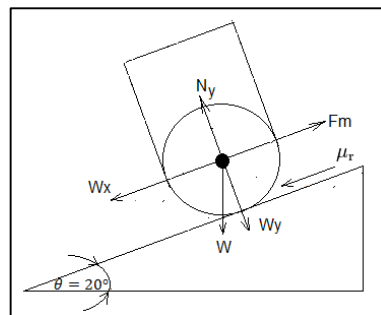


Figura 28. Diagrama de cuerpo libre aplicado al proyecto

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Entonces para este análisis de fuerzas de una rueda se tendrá una resistencia a la rodadura (R_r), cuando un sólido rota a la vez que se traslada, realiza lo que se conoce como rodadura, es decir, que gira sin deslizar, esto viene establecido por un coeficiente de rodadura en donde se deberá entender que el coeficiente de rodadura es casi parecido al de coeficiente de rozamiento, sus diferencias están en que este último hace referencia a dos superficies que deslizan una sobre otra, mientras que en el coeficiente de rodadura va a existir ese deslizamiento entre la rueda y la superficie sobre la que rueda, disminuyendo así la resistencia al movimiento.

El coeficiente por rodadura posee un valor menor comparado al coeficiente de rozamiento por deslizamiento (estático y cinético); siendo así, mucho más conveniente la reducción de las pérdidas energéticas.

En la tabla 5 adjunta se puede ver los coeficientes de fricción que se utiliza en este caso para una rueda sobre asfalto se tiene un coeficiente de rozamiento de $\mu_r = 0,035$ tomado en si en las peores condiciones.

Tabla 5.

Coefficientes de resistencia a la rodadura

Naturaleza y estado del suelo	Coefficiente de resistencia a la rodadura μ_r
Asfalto en buen estado	0,02 – 0,035
Camino de tierra afirmado	0,03 – 0,05
Camino de tierra	0,04 – 0,06
Grava sin alquitrán	0,02 – 0,04
Adoquinado	0,015 – 0,03
Arena	0,05 – 0,3

Fuente: Matemática aplicada al automóvil GTZ

Para la consideración del peso se tomará en cuenta la persona la cual conducirá el vehículo, como peso en condiciones extremas se estableció a una persona de 70 kg como la carga máxima de prueba a soportar del VEAP, a este peso se sumará el peso de la máquina que está determinado en los 30 kg que viene justificado de la siguiente manera:

- Peso de los conjuntos motor-caja reductora: 7.5 kg.
- Peso de las dos baterías: 2 kg.
- Peso de las dos llantas: 5 kg.
- Soporte / volante: 3 kg

- Peso de la estructura: 7.5 kg. (Como materiales se emplea hierro negro y aluminio).
- Peso de componentes electrónicos, protecciones: 1kg.

En total suma 26 kg. Como margen de seguridad se considerará 4 kg. Esta es la justificación y detalle del peso estimado del vehículo (30 kg.)

Para el cálculo se considerará que cada conjunto motor-caja reductora ejerce la fuerza F_m y que se tomará una aceleración muy pequeña, de modo que tienda a cero, debido a que únicamente se pretende calcular la fuerza que permita romper el estado de reposo e iniciar el movimiento. Por tanto, aplicando sumaria de fuerzas de la Figura 28 se tendría:

$$\sum F_y = 0$$

$$a_y = 0$$

$$N - W_y = 0$$

$$N = W_y = m \times g \times \cos\theta$$

$$N = (70 + 30)kg \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times \cos 20^\circ = 921,84 N$$

$$\sum F_x = 0$$

$$2F_m - R_r - W_x = 0$$

$$2F_m = R_r + W_x = (\mu_r \times N) + (m \times g \times \sin\theta)$$

$$F_m = \frac{[(0,035 \times 1474,94 N) + (100 kg \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times \sin 20^\circ)]}{2} = 183,89 N$$

Ahora es necesario calcular el par de giro y potencia del motor. El trabajo producido por un motor, puede ser considerado como el trabajo de dos fuerzas F , que se aplican a los extremos de un mismo diámetro. Estas fuerzas forman lo que se llama “par”. El trabajo efectuado por las dos fuerzas en una vuelta, es igual a la potencia desarrollada por el motor.

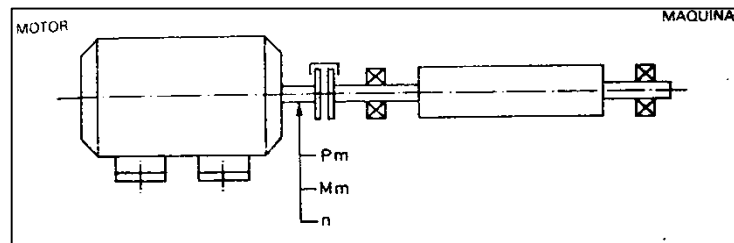


Figura 29. Par de giro y potencia de una máquina o motor

Fuente: Roldan, J. (2005)

$$Mn = Fm \times R$$

Ecuación 27. Par nominal para el cálculo del motor DC

Fuente: Roldan, J. (2005)

Dónde:

Mn = Par nominal en Nm

Fm = Fuerza aplicada por el conjunto motor-caja reductora [N]

R = Radio de la rueda en [m]

$$Mn = 183,89 \text{ N} \times 0,165 \text{ m} = 30,34 \text{ Nm}$$

Como consecuencia el conjunto motor-caja reductora deberá ser capaz de entregar un torque de 30 Nm en las peores condiciones.

Para el cálculo de la potencia del motor será necesario realizar el análisis en condiciones de funcionamiento sobre una superficie plana. Se asumirá que el vehículo parte del reposo y que desea llegar a su velocidad máxima,

que es 20km/h, aplicando un torque constante de 30Nm (menor al máximo calculado en la peor condición). De modo que la condición pico de potencia es:

$$P_m = M_n \times \omega$$

Ecuación 28. Potencia del motor

Fuente: Roldan, J. (2005)

Dónde:

P_m = Potencia del motor en vatios (W)

M_n = Par nominal en Nm

ω = velocidad angular en rad/s

$$P_m = 30 \text{ Nm} \times 33,697 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 1022.44 \text{ Watts}$$

De modo que el conjunto motor-caja reductora requerido debe cumplir como mínimo con las condiciones indicadas anteriormente.

Tomadas estas consideraciones mediante cálculos se buscó exhaustivamente un motor el cual satisficiera los valores de potencia y torque determinados, y mediante la tabla 6 se muestra la característica del motor elegido, el cual cumple con todo esto.

Tabla 6.

Especificaciones técnicas del motor DC seleccionado

Marca del motor	NPC	AmpFlow	KING RIGHT MOTOR
Modelo	T74	E30-150-G	SF7152
Potencia máxima	820 watts (1.1HP)	745 watts (1 HP)	370 watts (0.5HP)
Torque máximo	167 Nm	40 Nm	55 Nm
RPM motor	245	670	200

Continua



Voltaje de alimentación	24 v	24 v	24 v
Relación de caja reductora	20:1	8,3 : 1	15 : 1
Peso(cada motor)	6.55 kg 14.4 lb	3.5 kg 7.7 lb	3.7 kg 8,14 lb
Tienda de compra	The Robot Market Place (USA)	Amazon (USA)	Material reciclado (ECU)
Precio internacional	\$ 351.34	\$ 265	\$ 50

Imagen



Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Con estas especificaciones expuestas en la tabla 6, se procede con la mejor opción para la selección adecuada del motor que usara el VEAP.

En la primera columna se tiene el motor de la marca NTC con el modelo T74; las características que nos ofrece este motor son las más óptimas y adecuadas que se requiere, como ventajas cabe mencionar una potencia, torque y rpm adecuadas para el sistema. La desventaja más grande que posee es su peso, ya que como el producto es extranjero, el factor peso repercute en el valor económico final para su importación, siendo los impuestos demasiado grandes que se saldrían del presupuesto planteado para el proyecto.

Como segunda opción está el motor de la marca AmpFlow con el modelo más económico que presenta cualidades optimas como lo es el E30-150-G, las ventajas de este motor es que ofrece un valor de rpm adecuadas para la velocidad que se pretende en el proyecto además de una potencia casi similar al motor anterior, la desventaja de este es su torque, que es mucho menor al motor anterior, y su caja reductora; que está fabricada en base a un

sistema de cadenas, lo cual repercute mucho porque existe un juego entre las cadenas que provocan un movimiento muerto que será muy difícil controlar en la parte operativa del sistema; además que al igual que el equipo anterior la inversión para la importación nos resultaría muy costosa.

Como la opción más adecuada que se tiene para la selección es el motor de la marca King Righth Motor con el modelo SF7152, donde nos ofrece como ventajas su alto torque, un valor de rpm adecuadas y una potencia que nos significara un bajo consumo para las baterías; pero una de las características que es la mejor y a la vez una mala opción es el precio relativamente bajo con respecto a los demás motores expuestos debido a que su procedencia es de materiales reciclados, no nos ofrece la seguridad total de su buen funcionamiento ya montados en el VEAP; pero el objetivo de este este proyecto en sí; es reducir el costo de su fabricación, así que nos pareció una de las mejores opciones para ser el motor seleccionado del proyecto.

3.1.2. Requerimientos de espacio para las baterías

Madero, V. (2009) “Dado el pequeño tamaño del sistema completo, las baterías a usar no pueden ser excesivamente grandes para poder colocarse en el mismo. El peso de las mismas no debe ser muy elevado para no influir excesivamente en la distribución de pesos del conjunto. El peso del conjunto influye en la elección del motor. De esta forma para mover una masa grande es necesario un motor de mayor potencia que necesita un mayor consumo.”

Madero, V. (2009) “El tipo de baterías que permite minimizar peso y volumen con buena respuesta en corriente es el basado en polímeros de litio (Li-Po, Lithium polymer). Este tipo de baterías es ideal para una aplicación en la que el tamaño y peso son importantes y permite una gran autonomía de carga y gran potencia.”

3.1.3. Ruedas del vehículo

Se seleccionó como ruedas para el proyecto, aquellas que no demandaran mucho presupuesto y que sean de fácil acceso a la hora de su adquisición, en torno a esto se utilizó ruedas comunes comercializadas en cualquier centro ferretero, donde se comercializan llantas de 10, 12 y 13 pulgadas. De entre estas opciones, se escogió las de 13 pulgadas, porque son las que dan mayor velocidad lineal al vehículo. Las ruedas empleadas son neumáticas, con cámara de aire y llanta de acero. El material del soporte de la llanta, que se conecta con el adaptador es de acero. El peso de cada llanta es de 2.5 kg.

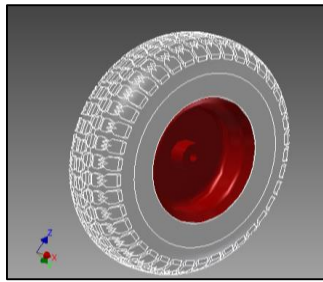


Figura 30. Diseño de las ruedas

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

3.2. Diseño estructural del VEAP

Como es lógico, no se requiere representar toda la complejidad del modelo construido en Autodesk Inventor, sino que se pretende únicamente representar las características más importantes del modelo. Para la estabilización del vehículo se requiere únicamente conocer los pesos, momentos de inercia y movimientos relativos de las piezas entre sí. Por ello del modelo completo que se obtiene, se utiliza simplemente aquello que es de interés. El modelo construido en Autodesk Inventor es el que se muestra en las Figuras 31 y 32, con sus correspondientes propiedades físicas:

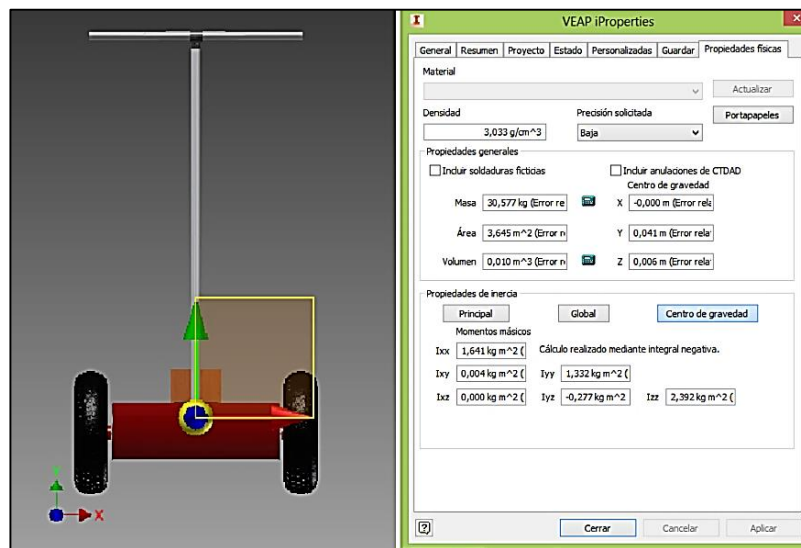


Figura 31. Modelo Autodesk Inventor sin carga

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

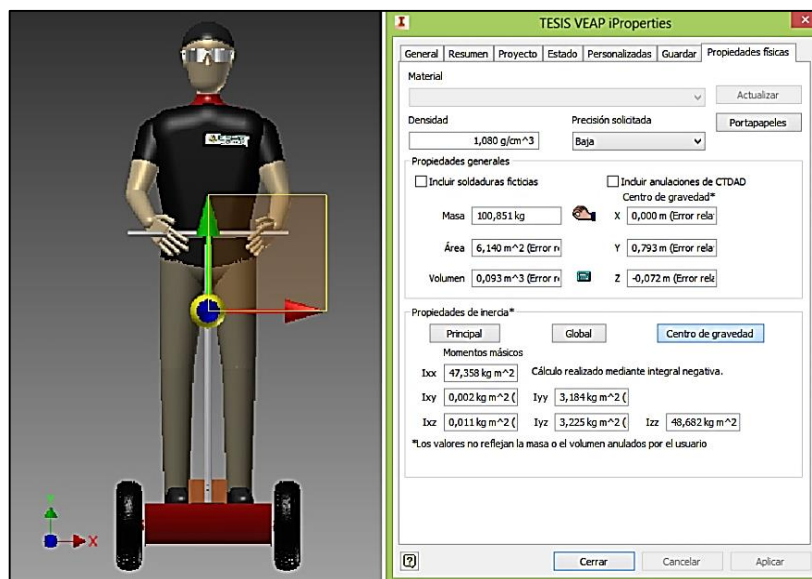


Figura 32. Modelo Autodesk Inventor con carga

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

3.2.1. Bastidor del vehículo

Para el diseño estructural del VEAP lo primero que se analizará es la parte estructural que soportara todo el sistema; tanto a la persona la cual va

a conducir el vehículo, como a los elementos que irán ensamblados en el mismo, se tomó como consideraciones importantes que es diseño está basado en no sobrepasar un peso de 30 kg en la selección de materiales y que su diseño estructural tienda a tener el mismo principio que un Segway original.

La estructura base será la encargada de dar soporte a todos los demás subsistemas del vehículo, además del peso del usuario. Se encuentra compuesto por tubos cuadrados de acero estructural, dispuestos en forma de un cubo rectangular consiguiendo con esto obtener una distribución de la masa estructural de manera uniforme. La Figura 33 muestra el bastidor del vehículo diseñado para el VEAP.

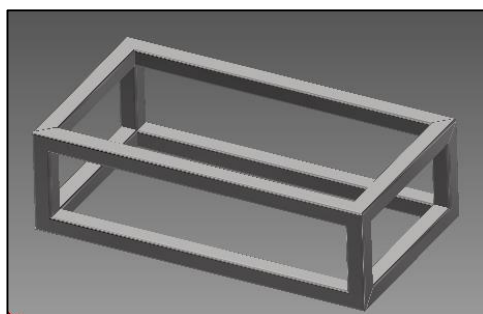


Figura 33. Base estructural del VEAP

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Se ha construido la base estructural del vehículo tomando en cuenta que su ancho sea menor al ancho de una puerta normal, de modo que sea posible desplazarse tanto por lugares abiertos como por lugares cerrados en los que es necesario atravesar puertas. Por consiguiente, el dimensionamiento del ancho del vehículo; incluyendo la base del conductor y las llantas se muestran en el Anexo E.

El material con el que se construyó es de acero estructural de un espesor de 1 milímetro; esto debido a que es espesor del tipo de tubo

escogido, es el más ligero existente en el mercado, por lo que permitirá reducir el peso total del vehículo.

Además es un material resistente y muy económico si se compara con plásticos u otros materiales ligeros hechos en aluminio; también es un tipo de material dúctil, al cual es posible moldear para formar la estructura. La desventaja de utilizar este tipo de materiales radica en que es magnético; y por ende va a afectar a la parte electrónica, principalmente causando interferencia al sensor MPU 6050 que posee magnetómetros.

Como se puede ver en la Figura 34, el análisis de tensión efectuado, se procedió a colocar una carga distribuida a lo largo y ancho de la estructura, para determinar la resistencia en base al peso estimado de una persona de 100 kg para observar la resistencia del material, dando como resultado, una evaluación favorable a la deformación ya que con este tipo de material, y la forma en la que están dispuestos permite un soporte fuerte para la estructura del VEAP.

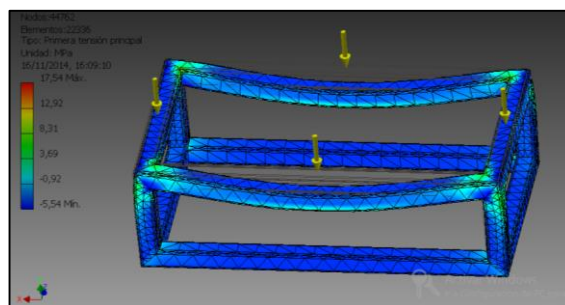


Figura 34. Análisis de tensiones efectuados en la base estructural

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

3.2.2. Recubrimiento exterior de la estructura

Para el diseño de la plataforma del piso en donde la persona reposará, se escogió el material de madera, debido a que; como ya se explicó en la parte de la estructura base del VEAP se pretende evitar que el material sea

magnético con el fin de que este parámetro no afecte al desenvolvimiento del sensor, para ello el material de madera nos ofrece aislar a los componentes electrónicos de cualquier interferencia magnética del exterior.

El recubrimiento está en base a láminas de tol, con un diseño redondeado debido a las dimensiones a lo largo entre la plataforma y la estructura base son diferentes, provocan alargar la parte estructural y para evitar esto, se le da una forma redonda con el propósito también de evitar que la parte inferior de la estructura una vez con las ruedas ensambladas; rocen con el suelo y provoquen accidentes no deseados.

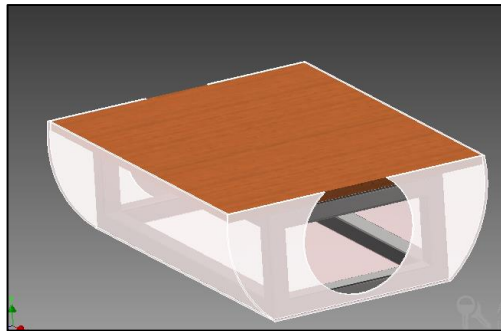


Figura 35. Cubierta de la base estructural

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

3.2.3. Mecanismo barra de dirección

El mecanismo de dirección que utiliza el VEAP consta de una base atornillada al conjunto estructural de la base, en donde esto servirá como un timón que le servirá al conductor poder controlar la inclinación del vehículo para que conjuntamente con la parte electrónica; comande la velocidad y dirección deseada que el VEAP deberá adquirir.

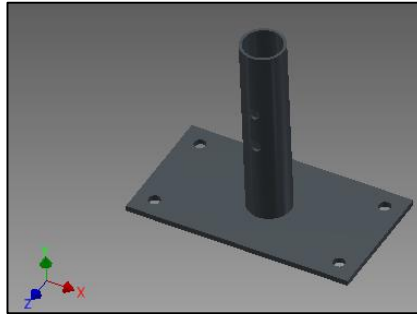


Figura 36. Base de la dirección

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

En la base atornillada se encuentra empotrado un tubo galvanizado; de tales dimensiones que pueda el conductor tener la comodidad de poner la posición de su cuerpo verticalmente, sin tener que inclinar su cuerpo el cual provoque su inestabilidad; además de esto; si la persona no se siente conforme con la estatura del tubo, existe un mecanismo en la parte superior para poder regular su altura; nuevamente para que el conductor sienta la comodidad sin verse afectado por la postura que tome cuando quiera conducir el VEAP.

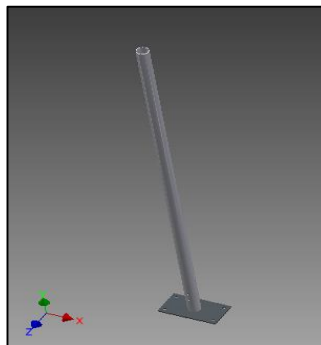


Figura 37. Tubo galvanizado vertical

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

En la parte superior del tubo, existe un tubo perpendicular al de la base que servirá para que reposen las manos del conductor y sirvan de apoyo para que exista más estabilidad y confianza entre la persona y la máquina.

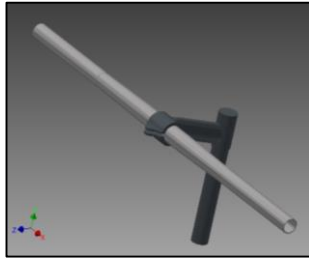


Figura 38. Unión regulable del volante

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Como se puede ver en la Figura 39 el ensamble de todos estos elementos de dirección antes mencionados, darán el confort y la seguridad al conductor para lograr la estabilidad, tanto por inercia del conductor; como por la parte de control de la electrónica.



Figura 39. Ensamble de mecanismo de dirección

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

3.2.4. Integración de los componentes del vehículo

Una vez descrito el diseño de las partes principales de las cuales va a estar compuesto el VEAP, se detallara a continuación el ensamble total de todo el vehículo, orden que se debe tomar en cuenta también, a la hora de ensamblar el vehículo físicamente.

El primer elemento por donde empieza todo el ensamble es la estructura base; luego se procederá a la ubicación de los motores; ya que estos

deberán ir bien sujetos, se considerará como el segundo elemento a ser ensamblado en la base ya que los motores son uno de los componentes primordiales en el vehículo, su correcta alineación, instalación y montaje permitirá controlar físicamente al sistema. Una vez asegurado los motores se procede al ensamble de las ruedas, en donde se debe tomar en consideración ajustarlas al mismo espacio; tal que ninguna de las dos ruedas quede descentrado del eje de simetría.

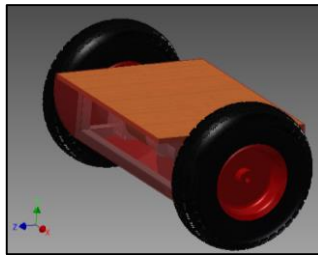


Figura 40. Ensamblaje de transmisión de movimiento

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Una vez ensamblada la parte de transmisión de movimiento del VEAP, se ensambla el timón de control del conductor, el cual consta como ya se mencionó; del mecanismo de dirección.



Figura 41. Ensamblaje de mecanismo de dirección al vehículo

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

A final se ubicara la plataforma superior; este irá empernada a la estructura base, donde será la superficie de contacto con el conductor y

también irán ubicados los elementos de la parte electrónica, en donde se tomó en consideración elaborar una caja cerrada con el fin de que estos elementos se aíslen del exterior y pueda dañarlos.

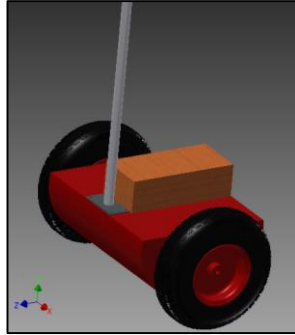


Figura 42. Ensamble de la caja protectora

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Una vez ensamblado todas las piezas, el resultado que el VEAP adquiere como diseño final se lo puede ver en la Figura 43.

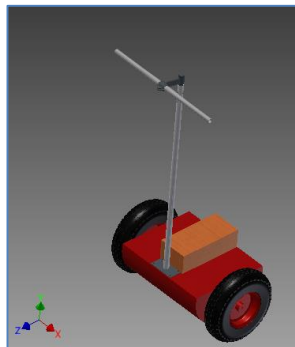


Figura 43. Diseño estructural del VEAP

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

3.3. Construcción estructural del VEAP

La construcción del VEAP está basada en un sistema mecánico el cual es un sistema compuesto por un conjunto de cuerpos sólidos rígidos.

Para la construcción del VEAP se tomaron como consideraciones importantes el peso del vehículo ensamblado, el cual no debe sobrepasar los 30kg establecidos, para ello se eligieron los materiales de mayor ligereza y a su vez de una buena resistencia con el fin que estos aspectos no afecten al desenvolvimiento del VEAP.

Otras de las consideraciones importantes que se tomaron en cuenta fue el uso de materiales reciclados, con el fin de reducir un valor económico considerable comparado con otros proyectos de similares características al nuestro.

3.3.1. Carrocería del VEAP

La base es el componente principal de la estructura del VEAP. Ella será la que soporte al conductor y sobre ella se montarán los diversos componentes. Por ende debe poseer características de robustez con el fin de que el peso de la persona no afecte en la parte de esfuerzos ni tensión en los materiales.

Como ya se explicó, el bastidor es la encargada de dar soporte a todos los demás subsistemas del vehículo, además del peso del usuario. Se encuentra compuesto por dos laterales de tubo cuadrado de acero dispuesto en forma paralela uno respecto del otro a lo largo del VEAP y unidas por dos tubos en la parte frontal y dos en la parte trasera para así obtener una estructura sólida tipo caja como se ve en la Figura 44.



Figura 44. Construcción bastidor del VEAP

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

La base estructural fue diseñada para quedar completamente dentro del diámetro de las ruedas, para así proteger los componentes electrónicos ante un eventual impacto. Luego fue recubierta con material de tol con una forma redonda; con el fin de que el VEAP al subir por superficies inclinadas la parte estructural no golpee con obstáculos en la pista, también se lo hizo para cubrir el esqueleto y los elementos internos como son los motores, las baterías y el cableado.



Figura 45. Bastidor VEAP

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

El piso superior de contacto se fabricó de madera y no de metal sabiendo que este tipo de material al no conducir y no producir interferencia eléctrica es adecuado para esto, puesto que todos los componentes electrónicos van a estar montados sobre esta.



Figura 46. Piso superior de madera

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

3.3.2. Adaptador eje rueda

Esta pieza se emplea para acoplar mecánicamente el eje del motor con la llanta. Esta pieza se la fabrico ya que al ser el orificio de la llanta original mucho más grande que el diámetro del eje del motor, se fabricó un bocín torneado el cual será colocado en el orificio de la llanta a presión, este cuenta con un prisionero para poder sujetar adecuadamente al eje del motor.

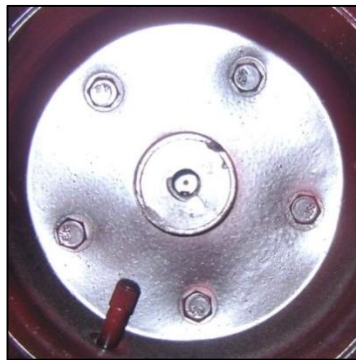


Figura 47. Adaptador eje rueda

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

3.3.3. Tornillos de sujeción

Se han seleccionado diferentes tipos de tornillos, en base a las necesidades de dureza y resistencia. Así se tiene los siguientes:

- Sujeción de los adaptadores al eje del motor (para cada motor) 4 tornillos 7/16-24-UNF de longitud 25 mm, resistencia 12,9 y cabeza DIN912.
- Sujeción de los adaptadores a la llanta de la rueda (para cada rueda) 4 tornillos 7/16-24-UNF de longitud 16 mm, resistencia 12,9 y cabeza DIN912.

3.3.4. Ensamble de componentes mecánicos y eléctricos

En este tema se tratará sobre el ensamble de los componentes eléctricos, cableado, sistema de comunicación, Fuente de energía, entre otros. A continuación se detalla la ubicación y ensamble de los diferentes circuitos.

a. Acoplamiento de los motores dc

Los motores son uno de los componentes primordiales en el vehículo, su correcta alineación, instalación y montaje permitirá controlar físicamente al sistema. Estos motores se acoplan a un soporte adecuadamente fabricado para esto los cuales están soldados a la estructura, asiendo así mucho más fácil la instalación de estos en la estructura dotándole de un apoyo fijo para cuando el VEAP este en movimiento.



Figura 48. Ubicación de los motores DC

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

b. Acoplamiento de las ruedas

Las ruedas como ya se explicó anteriormente irán colocadas mediante el acople correspondiente; en el eje de salida del motor, para el ensamble se debe tener mucho cuidado al colocarlos ya que como estos entran a presión se debe requerir de golpes de martillo para poder meterlos, si excedernos en la fuerza aplicada ya que esto puede dañar a la caja reductora del motor y provocar que los motores se traben.



Figura 49. Ruedas del VEAP

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Otras de las cosas que se debe tener en cuenta es la presión de inflado de los neumático, ya que este facto influye en el desenvolvimiento correcto de la parte electrónica y la parte de la potencia de los motores

c. Ubicación de los componentes electrónicos

Para este proceso se debe tomar en cuenta que el principal componente que tiene preferencia en ubicación es el sensor MPU 6050; debido a los valores tomados en las pruebas realizadas en la programación este elemento debe ir ubicado en el punto exacto donde se evaluaron los datos, para las demás tarjetas se consideró la ubicación por el espacio que se disponía dentro del habitáculo correspondiente; de esta manera quedan esquemáticamente ubicados de la siguiente manera

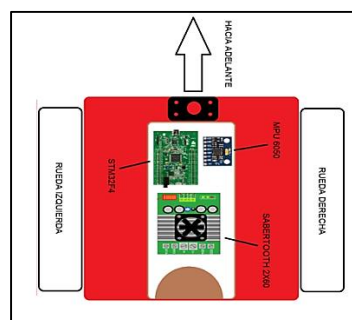


Figura 50. Esquema de ubicación de componentes electrónicos

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

El driver se ubicara como los demás componentes electrónicos en la parte superior de la estructura para que haya una mejor manipulación de estos, además para aislarlos con el fin de que no produzca algún cortocircuito entre la estructura y alguno de los terminales del driver.

Se colocó en la parte posterior del VEAP para poder realizar las conexiones entre las baterías y la tarjeta de control optimizando de mucha mejor manera el espacio ocupados por estos.

La ubicación del acelerómetro - Giroscopio se lo debe hacer lo más cerca posible a la parte delantera del VEAP colocándose a lado del pedestal del volante, esto se lo realiza para que registre de manera más rápida y precisa la variación de valores; ya sea del ángulo o de la velocidad.

Es preciso aclarar que en el lugar donde se encuentra este sensor se va a realizar la programación y se tomara de referencia de este si este es movido del lugar se perderá los valores de inicio y el programa no funcionara correctamente.

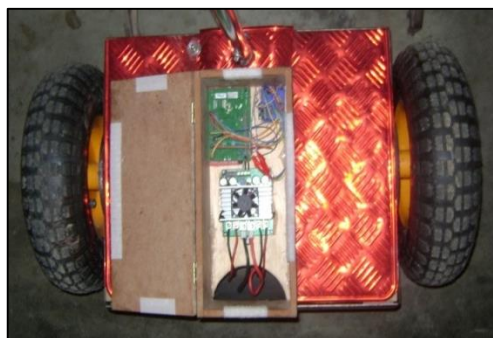


Figura 51. Ubicación de componentes electrónicos

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

d. Ubicación de baterías Li-Po

Las baterías se la coloco en la parte inferior trasera del VEAP para poder optimizar el espacio en la estructura y compensar el peso; ya que con el

pedestal colocado el vehículo tiende a caer para la parte delantera por lo cual con la compensación de masas, las baterías pueden balancear de mejor manera y tener un vehículo mucho más estable aun si activar la parte electrónica.



Figura 52. Ubicación de las baterías

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

e. Interruptores de alimentación y seguridad

Para comenzar con el encendido del VEAP, se han dispuestos dos interruptores: uno de alimentación de energía y otro de seguridad, ya que puede suscitarse eventualidades dispuestas que provoquen el desperfecto de la máquina y con ello se conseguirá evitar cualquier tipo de accidentes.

El primer interruptor que se debe activar para encender el VEAP será el de alimentación, La razón por la cual se instaló esto es que debido a que las baterías que se utilizan tienen la característica de que no permiten conectarse en forma paralela impidiendo así sumar el amperaje entre las dos, por lo cual se opta por construir un circuito adecuado; el cual permitirá la selección de cualquiera de las dos baterías de forma independiente, consiguiendo con esto que el VEAP mantenga una autonomía duradera.

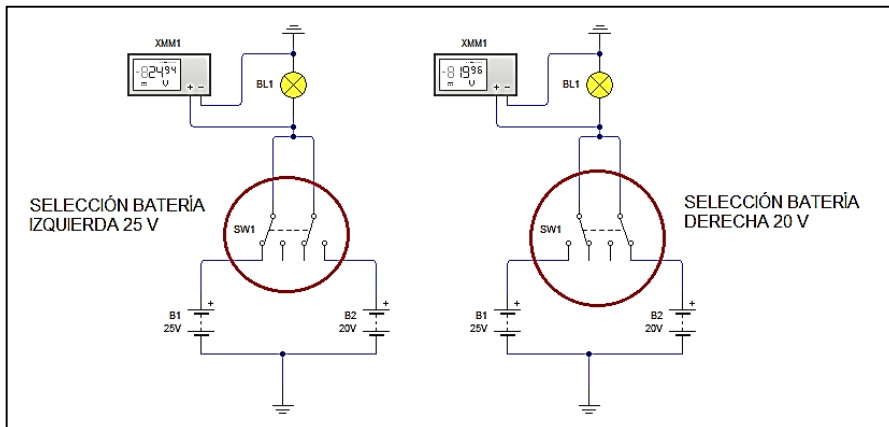


Figura 53. Esquema de instalación del interruptor de alimentación

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

La ubicación de este interruptor está dispuesto en la plataforma base a un costado del tubo de soporte de la dirección.



Figura 54. Ubicación del interruptor de alimentación

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

El otro interruptor que se debe pulsar luego de haber activado el de alimentación, es el interruptor de seguridad, su esquema y razones son explicados en el Capítulo IV; la ubicación que se le dio dentro del vehículo físico, lo sitúa en la parte media central del volante, esto debido a que debe tener el acceso inmediato por parte del conductor cuando se suscite algún percance y el interruptor provoque el corte de funcionamiento del VEAP



Figura 55. Ubicación del interruptor de seguridad

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

f. Instalación de pulsadores de dirección

Como ya se explicó en el capítulo de implementación, el control de dirección de nuestro VEAP se lo realiza por medio de pulsadores los cuales se encuentran instalados en la parte superior del volante.

El principio de funcionamiento explicado anteriormente es el siguiente: si se quiere girar hacia el lado derecho se deberá activar el pulsador del mismo lado con lo cual la llanta del lado izquierdo girará 10% más rápido en comparación con la derecha provocando así el giro deseado y lo mismo hará con la activación del otro con la llanta correspondiente, para comodidad del conductor estos se ubicaron a una distancia prudente de los manubrios; y con acceso hacia los pulgares con el fin de que no se tenga que hacer mayor esfuerzo para pulsarlos.



Figura 56. Ubicación de pulsadores de dirección

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

CAPÍTULO IV

4. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

4.1. Parámetros de control

Para la implementación del sistema de control se empezará con la familiarización de términos y variable utilizados para la estrategia de control, ya que de estos depende la funcionalidad del VEAP, entre ellos se tiene:

Posición de Equilibrio: Hace referencia a la línea vertical que pasa por el eje de las ruedas y por el centro de masa del conjunto vehículo-pasajero.

Inclinación: Es la variable principal del sistema, la cual puede ser medida. El sensor usado en este caso para las diferentes pruebas fue el MPU 6050 que integra acelerómetro y giroscopio

Velocidad de Inclinación: La medida de esta variable permite hacerse una idea de la velocidad con la que el VEAU está cayendo o se está levantando, permitiendo crear una salida predictiva sobre la planta. Se puede medir directamente con el giroscopio, tomando cada valor adquirido y comparándolo con el anterior, es decir, sacando su derivada.

Error. Es la diferencia entre la variable medida o Variable de Proceso y el SetPoint. Para este caso indica que tan inclinado está el vehículo respecto de la posición de equilibrio.

SetPoint. Para este sistema, el SetPoint es el punto donde el sistema se mantiene en un equilibrio “momentáneo” o de inclinación cero, es decir, colineal con el eje vertical que pasa por la posición de equilibrio del sistema.

4.2. Condiciones de Inicialización del software de control

El programa base sobre el cual se desarrollará el software de control debe tener librerías eficientes que optimicen instrucciones y funciones,

puesto que, el tiempo de ejecución de las tareas debe ser mínimo, si se quiere realizar un control determinístico del sistema.

Se necesita un programa en el cual se ocupen instrucciones familiares, estudiadas de antemano, para no entrar en investigaciones largas de un nuevo software que impliquen mayores tiempos de desarrollo: que use una interfaz amigable con el usuario; para mayor facilidad se trabajará en el entorno de Matlab/Simulink mediante Waijung; que es una de las librerías que ejecuta su programación mediante bloques; y que en los subcapítulos posteriores se explicara detalladamente.

Antes de adentrarnos en el entorno de Matlab se tiene que tomar en cuenta que se trabajará conjuntamente con la tarjeta de control STM32f4 y para lo cual se deberá instalar sus características para que compile la programación dentro del entorno de Simulink.

La tarjeta STM32F4 cuenta con una aplicación STM32 ST-LINK_UTILITY_v3.3.0.exe, definiéndose como el software que permite la conexión para realizar la compilación y programación en el entorno Simulink.

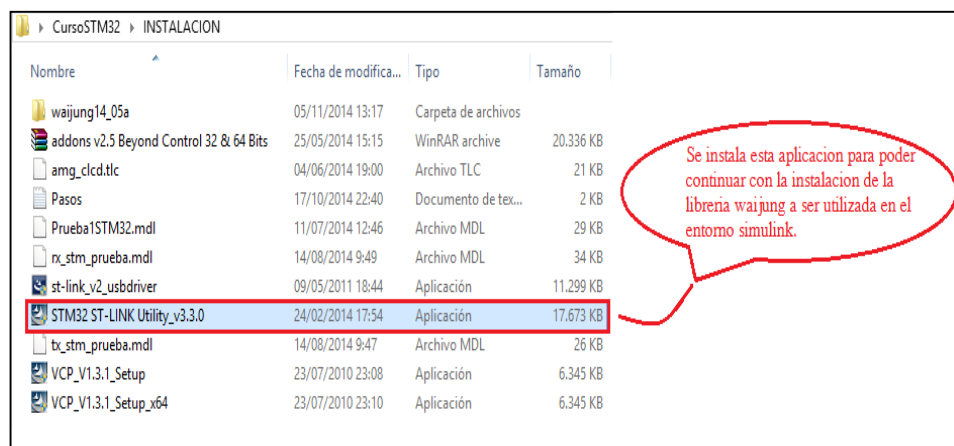


Figura 57. Instalación de la aplicación STM32 ST – LINK

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Luego se debe instalar la aplicación st-link_v2_usbdriver la cual permite la comunicación para poder realizar la transferencia de datos la programación y la depuración de la estrategia de control.

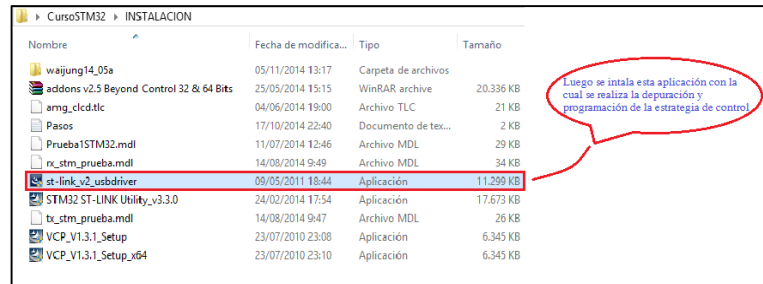


Figura 58. Instalación de la aplicación st_v2_usbdriver

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Luego de haber instalado los componentes de la tarjeta se procederá con la instalación de la librería waijung; debido a que esta librería trabaja directamente con la tarjeta de control, no se la podrá hallar en las librerías por defecto que nos muestra el entorno Simulink, eh ahí la razón de su instalación. Para proceder con esto lo primero que se debe hacer es copiar la carpeta waijung14_05a en: documentos/Matlab como se muestra en la Figura 59.

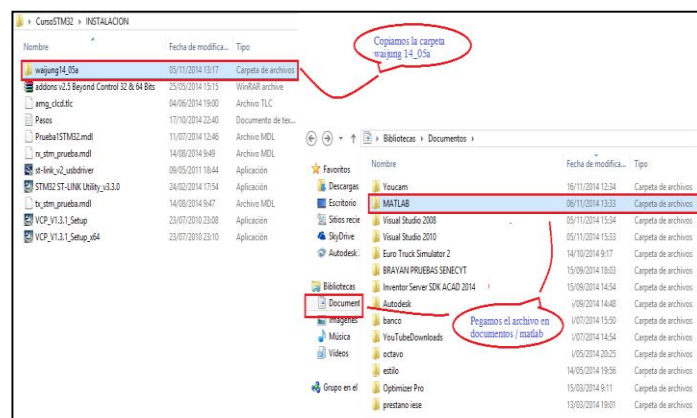


Figura 59. Adición de la carpeta Waijung en documentos Matlab

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Una vez copiado los archivos se deberá abrir el programa Matlab; seguido de eso se cambiará el directorio de matlab a: documentos/matlab/waijung14_05 en la sección denominada “Current Folder”

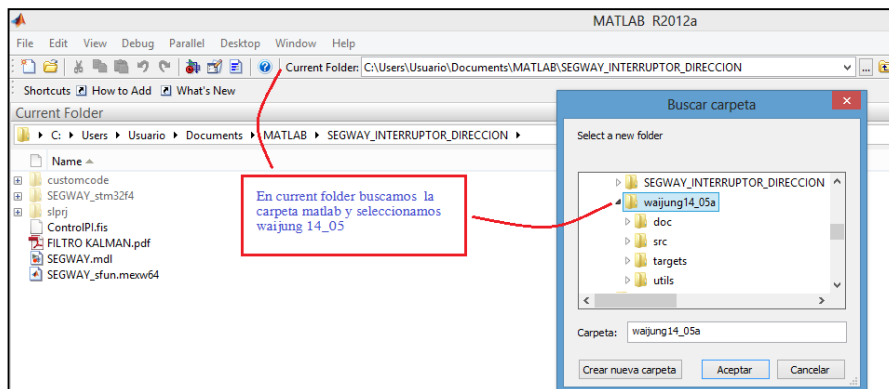


Figura 60. Directorio de Waijung en Matlab

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Abrir y ejecutar el archivo: install_waijung.m con lo cual se activara toda la librería contenida en waijung con lo cual se procederá a elaborar la estrategia de control. Al aparecer algún mensaje en la instalación se dará click en continuar.

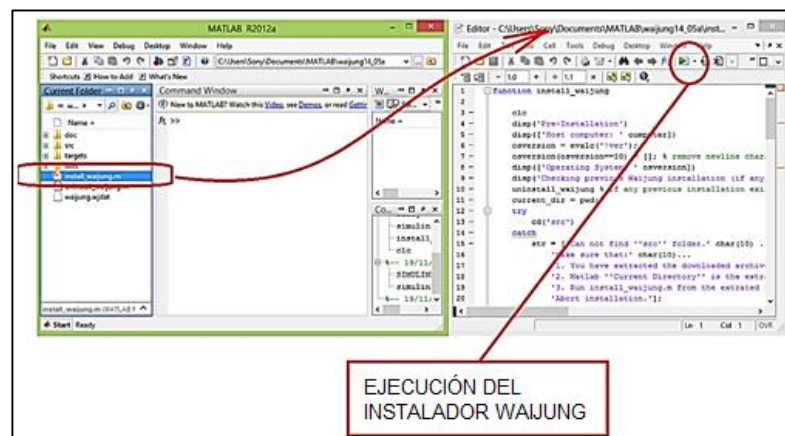


Figura 61. Instalación y ejecución del instalador de waijung

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Ahora ya se puede tener acceso a Simulink para poder realizar nuestra estrategia de control, para adentrarse al entorno de trabajo es muy sencillo; basta con hacer click en el icono que se localiza en la barra de herramientas de MATLAB o a su vez escribir SIMULINK en la ventana de comando de MATLAB como se muestra en la Figura 62.

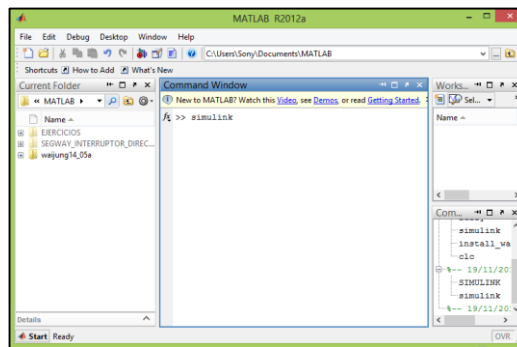


Figura 62. Acceso al entorno Matlab/Simulink

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Al arrancar Simulink se nos despliega una ventana gráfica que contiene todas las librerías que el entorno de Simulink bajo MATLAB; soporta, la Figura 63 muestra gráficamente como es la ventana

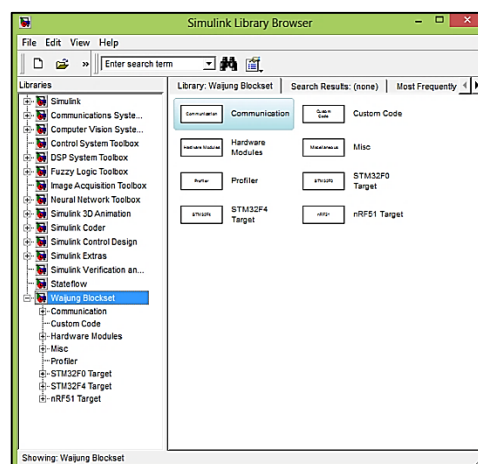


Figura 63. Entorno de Simulink

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Como se podrá observar en la ventana de simulink ya nos muestra las librerías de las cuales se dispone, además de la librería Waijung la cual se instaló, se puede ver también que esta librería posee la parte de inicialización para la tarjeta STM32F4.

Para crear un proyecto o un esquema de trabajo se ubicará en la librería que se desea utilizar, situándose en la barra de menú en la parte de FILE y se seleccionará la opción new model y se nos desplegará una ventana en blanco que es donde se realizará el diseño.

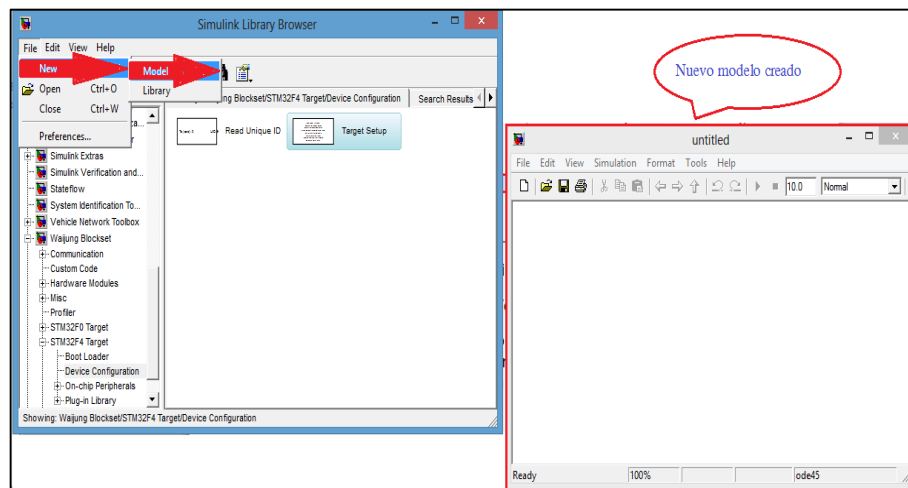


Figura 64. Despliegue de esquema de trabajo

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Este es todo el procedimiento que se debe realizar para establecerse en el entorno de Simulink y proceder con la programación de la estrategia de control del VEAP.

4.3. Estrategia de control mediante diagramas de flujo

Mediante la programación en el entorno de Simulink, con la librería de Waijung, la estrategia de control se efectúa mediante bloques de programación, con características preestablecidas, en donde se requerirá de

diagramas de flujo para poder entrelazar todos estos bloques de manera que efectúen la estrategia de control que se pretende conseguir para el proyecto.

Una vez inicializado el entorno de simulink se debe entender las condiciones en las cuales se ejecutara la programación mediante los diagramas de flujo.



Figura 65. Inicialización de waijung, y tarjetas de control

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Como se puede ver en la Figura 65, se establece la inicialización de las tarjetas de control las cuales se ha elegido para proceder con la programación.

Se observa también la configuración de variables que el MPU 6050 va a manejar, X_{ang} determinará la posición angular en x por parte del acelerómetro, esto debido a que la inclinación que se pretende medir siempre se va a producir sobre la superficie donde la persona va a reposar los pies, es decir que siempre va a medir la inclinación cuando la estructura del VEAP produzca un cabeceo hacia adelante o hacia atrás, como muestran las Figuras 15 y 16, y X_{v_ang} ; determinará la velocidad angular que se estará produciendo en el VEAP por parte del giroscopio.

A partir de haber inicializado cada una de las variables y tarjetas se empezara con la acción de control; en dónde; como ya se dijo anteriormente se tendrá como datos la posición angular con respecto al eje x, adicional a la lectura de datos que el sensor nos ofrecerá, se establece un set point o punto de referencia, establecido manualmente y corroborado mediante acciones de “prueba y error” durante la programación. Su valor se expresa en las mismas unidades que la variable controlada, como se muestra en la figura 66.

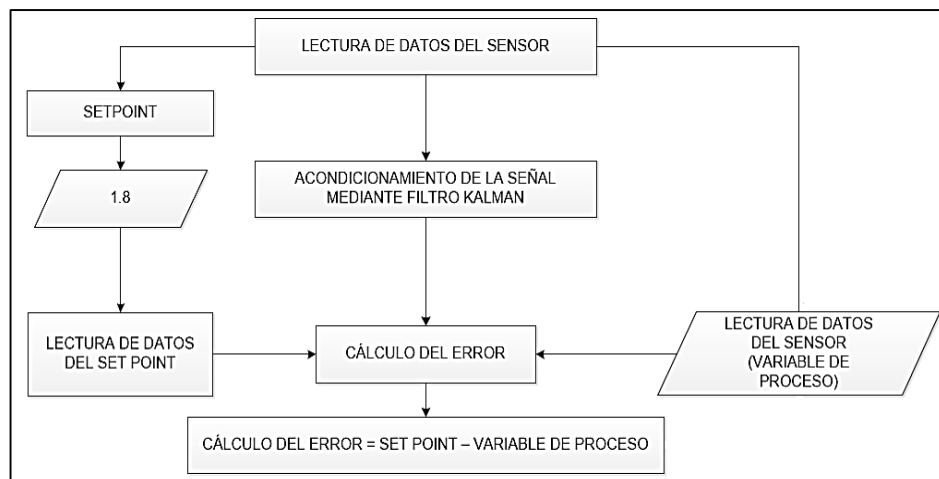


Figura 66. Lectura de datos en MPU 6050

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

A partir de la lectura de datos se procederá con el cálculo del error; pero antes de eso, la programación tendrá un limitante del ángulo máximo al cual deba controlar, debido a que el VEAP solo podrá mantener en equilibrio a la persona en un ángulo máximo de inclinación ya que si sobrepasa este rango, será muy peligroso para su integridad física y no se deberá correr ese riesgo; entonces el limitante viene dado a partir de un ángulo estimado seguro; que no puede sobrepasar los 45° de lectura ya que si ocurriese esto inmediatamente la programación finalice, desactivando toda acción de control de la máquina. La Figura 67 muestra el contenido antes descrito.

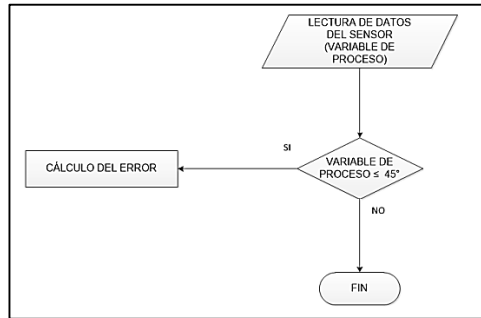


Figura 67. Limitaciones de programación

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Considerado estas limitaciones se procederá al cálculo del error; que viene siendo la diferencia entre la variable medida y el setpoint y esta puede ser + ó -Esto se considera con el fin de; posteriormente; de establecer un escalar, que implanta los valores medidos de posición angular a valores más pequeños que se puedan ejecutar y entender de mejor manera para la acción de control; estos valores están limitados de 1 a -1, que vienen dados de los valores máximos que se pueden tomar lectura que son de 45 grados hacia adelante y -45 grados hacia atrás.

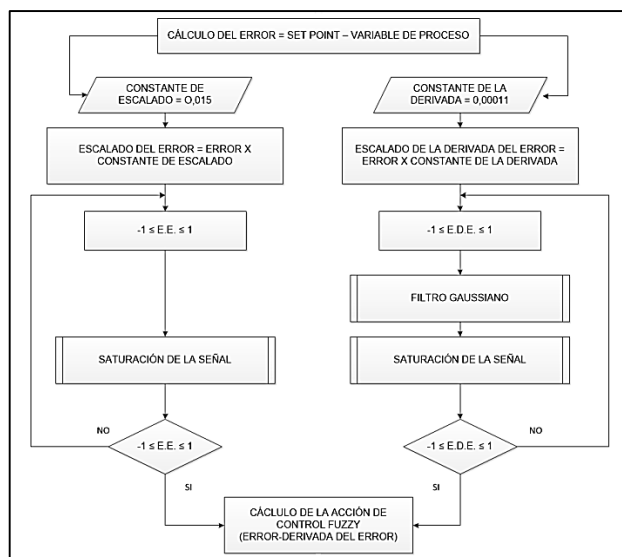


Figura 68. Cálculo para la acción de control mediante Fuzzy

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

La Figura 69 muestra las consideraciones que se debe tener para efectuar esta parte de la lógica de programación. Donde luego de haber establecido el cálculo del error, se establecen constantes tanto para los valores del escalado del error, como también para la derivada del escalado del error; estos valores fueron determinados de la misma manera que el valor de set point, a través de acciones de “prueba y error”. Al final de este proceso se establece una saturación de la señal para evitar que los valores obtenidos sobrepasen los limitantes de 1 a -1. Luego de esto; los valores de señal tendrán que pasar por una acción de control fuzzy normalizado. Una vez realizada la parte de cálculo de acción de control, se seguirá manteniendo un escalo de la señal de 1 a -1.

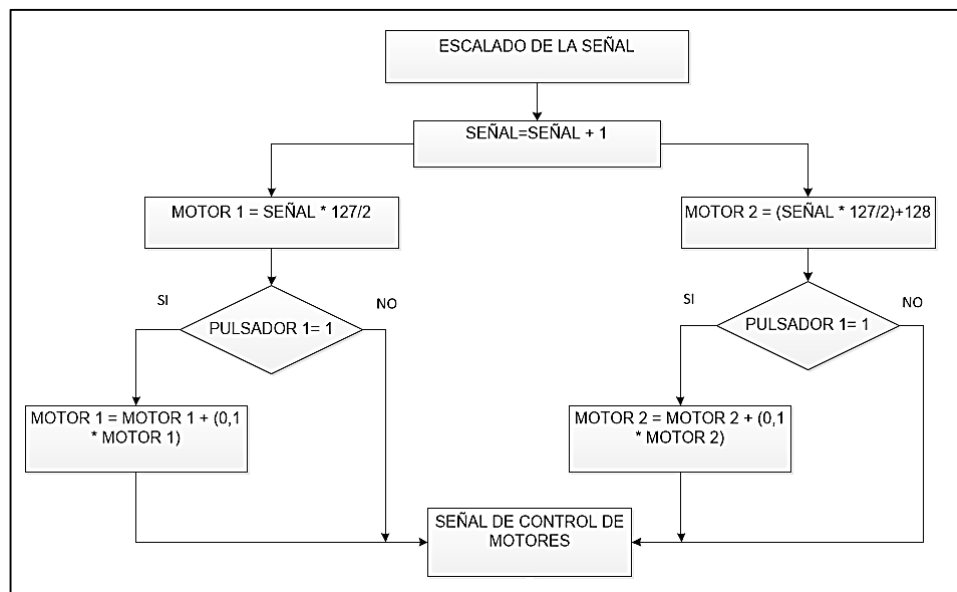


Figura 69. Salida de la señal establecida para los motores

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

A este valor se le sumara una constante de 1 para elevarlo a un rango de 0 a 2 con el fin de poder convertir esa señal en caracteres serial, que son requerimientos que el driver sabertooth tiene establecidos como ya se mencionó en el Capítulo II, y que a continuación se establecen en la tabla 7.

Tabla 7.

Valores seriales para control de motores

	MOTOR 1	MOTOR 2
Condición	Valor del caracter	Valor del caracter
Full hacia delante	127	255
Hacia delante	65	193
Detener	64	192
Hacia atrás	63	191
Full hacia atrás	1	128
Apagado	0	0

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

La señal para cada uno de los motores viene explicada de la siguiente manera:

Para el motor 1 el rango elevado de la señal de ingreso (de 0 a 2) es multiplicada por una constante de 127/2; con el fin de convertir los valores de señal de la acción de control, a valores seriales para el envío de datos al driver sabertooth. Para el motor 2 como trabaja independientemente; además del coeficiente de conversión; se suma una constante de 128 con el fin de alcanzar los valores establecidos por la tarjeta.

Para la parte de dirección del VEAP se establecieron pulsadores con el fin de que estos al ser pulsados (pulsador=1); la velocidad del motor sea aumentada en un 10% más de su capacidad actual; esta acción para ambos motores, y cuando los pulsadores no estén accionados (pulsador=0), no deberá afectar en el desenvolvimiento de la señal.

A partir de estas condiciones; como se muestra en la Figura 70, la acción de control se verá condicionada por un interruptor de emergencia, el cual al estar en activación permitirá el flujo de datos, mientras que al suscitarse

algún percance inesperado este permitirá la desconexión del control electrónico del VEAP logrando desactivar la máquina por seguridad.

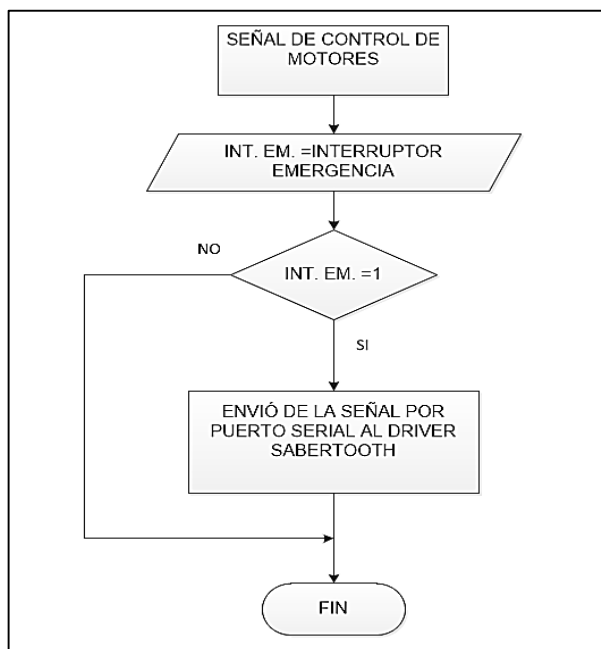


Figura 70. Diagrama de señal de envío hacia el controlador de motores

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Cuando la acción del controlador permita el paso de los valores de señal estos serán enviados mediante puerto serial a la tarjeta controladora de motores Sabertooth, que tomará las debidas acciones en las condiciones en las que se encuentre el ángulo de inclinación de esta manera: cuando el vehículo se incline adelante la velocidad de cada motor se incrementara proporcionalmente hacia adelante, y viceversa para las condiciones de inclinación hacia atrás.

4.4. Implementación del software de control

Se procederá con la implementación de la programación por bloques en el entorno Simulink una vez entendido la parte de la lógica de programación descrito en los diagramas de flujo, que nos permitirá seleccionar los bloques

adecuados para que el programa se compile sin ningún problema en la tarjeta STM32F4 y obtener los resultados esperado que se pretende, en este caso, lograr la acción de equilibrio de una persona en el VEAP

4.4.1. Diagrama de bloques

Para comenzar con el diagrama; una vez abierto el programa Matlab en el entorno de simulink, se deberá identificar la librería de waijung, para dar comienzo con la primera parte que es la inicialización de las tarjetas de control tanto de la STM23F4, el driver Sabertooth mediante comunicación serial UART, y el sensor MPU 6050.

Al abrir la librería de la carpeta waijung, se desplegará todos los archivos contenidos en ésta, para buscar el modelo de tarjeta que se va a utilizar para el proyecto la cual es STM 32F4, se desplegará los documentos de esta carpeta y se seleccionará la opción device configuration en donde extiende el bloque de la tarjeta a utilizar, se mantendrá pulsado sobre la figura y se arrastrará hacia el modelo.

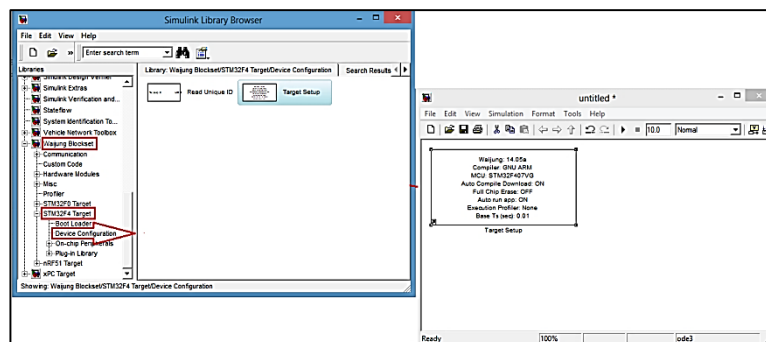


Figura 71. Inicialización de la tarjeta STM32 F4

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Para la selección del controlador del driver se realiza los siguientes pasos: en la misma carpeta waijung se desplegará y seleccionará on-chip peripheral donde se expande varios componentes de donde se elegirá la

última opción llamada UART; ya que esta será la comunicación serial; ahí aparecerá en la pantalla siguiente varios modelos; seleccionar UART setup, mantener pulsado sobre este y arrastrar a la pantalla del modelo.

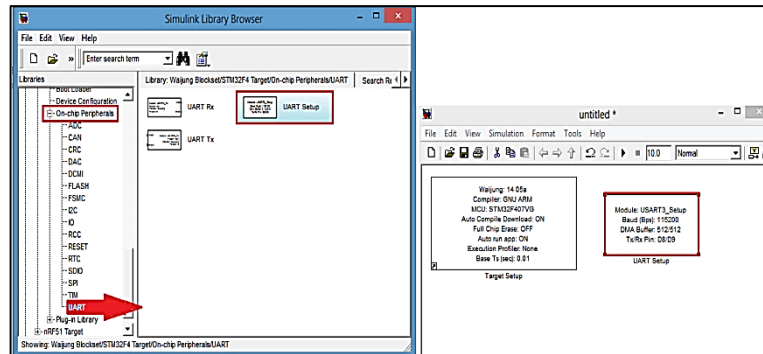


Figura 72. Inicialización de la tarjeta STM32 F4

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Para la inicialización del sensor MPU6050 en la carpeta wajung se seleccionará custom code el cual despliega dos tipos de bloques, la opción a elegir es basic custom code; se deberá pulsar y arrastrar al nuevo modelo, en este se deberá establecer los parámetros de lectura que el sensor proveerá, cinco en total distribuidos en dos salidas para el acelerómetro y tres salidas para el giroscopio.

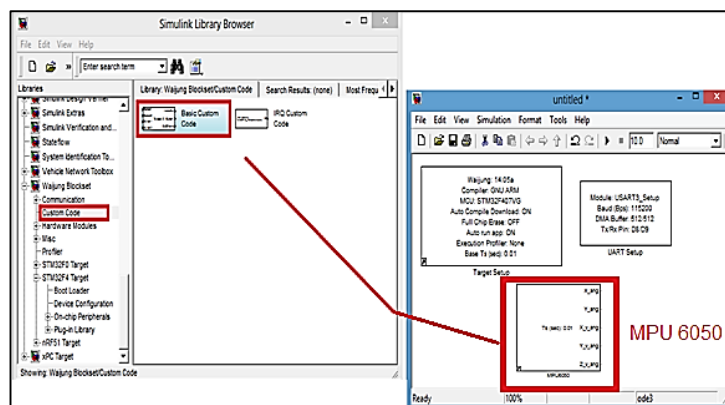


Figura 73. Inicialización MPU 6050

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Establecido las inicializaciones de las tarjetas electrónicas, al bloque sensor MPU se deberán seleccionar los ejes tanto en el acelerómetro como del giroscopio trabajaran para la lectura del ángulo de inclinación, estas variables pasaran a través de un acondicionamiento de señal; el filtro Kalman normalizado, que el programa Matlab nos proporciona y que se detallará su principio de funcionamiento en un subcapítulo posterior. Es hasta este punto en donde se tiene como lectura del sensor, el dato del ángulo de inclinación del sistema.

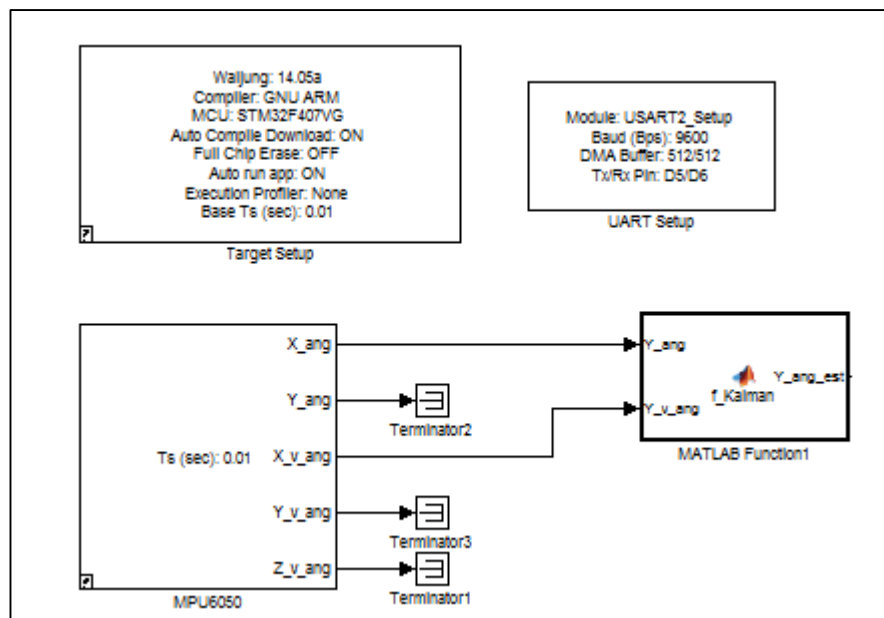


Figura 74. Lectura del sensor MPU6050

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Luego del acondicionamiento de la señal, se establecerán los valores constantes de setpoint, del escalar y la derivada del escalar, como ya se lo explico en el diagrama de flujo estos valores permitirán el cálculo del error y a partir de esto, poder escalar todos estos valores.

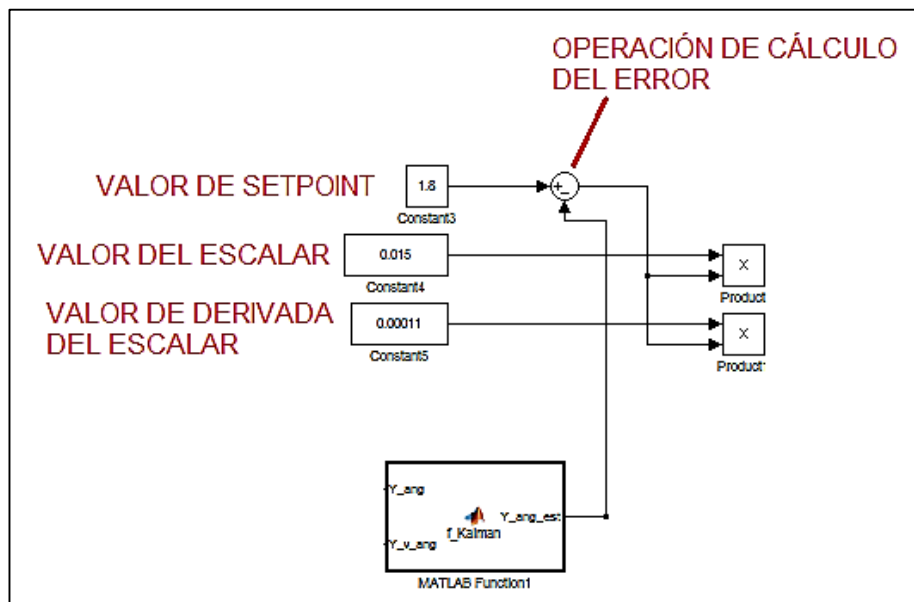


Figura 75. Cálculo del error y escalado del error

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

El cálculo de error es la diferencia entre el set point y la medición del sensor, con el valor obtenido, se el bloque de constantes del escalador y la derivada del escalador permitirá al resultado del error convertirlos a valores que vayan de -1 a 1 con el fin de utilizarlos en el cálculo de la acción de control con fuzzy.

Los bloques de producto indican la operación que se va a efectuar, y esta es la de multiplicar los valores constantes antes mencionados por el valor obtenido en el cálculo del error, con lo cual se obtendrá como resultado, la señal del escalado del error y la derivada del escalado del error.

Estas dos señales obtenidas pasaran nuevamente por un proceso antes de pasar a la acción de control. Por un lado el escalado del error pasa a un bloque de saturación; que limita al valor obtenido a no sobrepasar los valores establecidos de -1 a 1. La derivada del escalador del error pasa por un bloque de filtro gaussiano donde se busca con esto eliminar ruidos de la derivada ejercida, para posteriormente pasar por una derivada discreta. El

subproceso por el que pasará luego; al igual que el escalado de error; será la de saturación de señal, como nos indica la Figura 76.

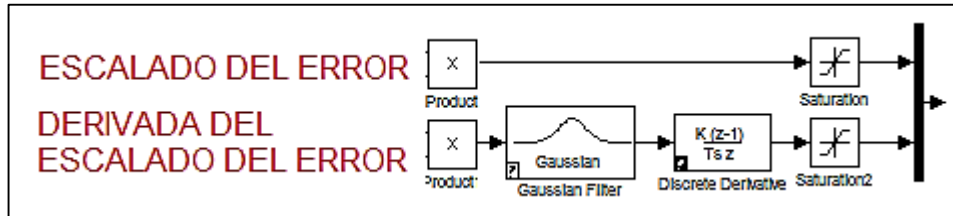


Figura 76. Valores del escalado y derivada del escalado del error

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Al pasar por estos procesos la señal obtenida pasará al cálculo de la acción de control fuzzy; que se detalla a fondo en un subcapítulo posterior; a partir de este procedimiento la señal obtenida se ve multiplicado por un bloque constante de valor 2.1, este término representará la ganancia de fuerza para los motores; que se lo determino a partir de condiciones de prueba y error, donde se hizo un estimado de comportamiento entre las baterías cuando están descargadas y cuando están completamente cargadas, dando como resultado un buen funcionamiento entre ambas condiciones con el factor 2.1.

El resultado obtenido de la multiplicación entre el valor obtenido de la acción de control y la ganancia de fuerza pasará nuevamente por un bloque de saturación para que su resultado quede entre los límites de -1 a 1. Posteriormente a esto, se encuentra un bloque constante de valor 1 que hace una operación de suma al valor obtenido anteriormente, lo que se pretende con esto es elevar a la señal a valores entre 0 y 2, que luego al ser multiplicados por un valor de 127/2, se obtendrá los caracteres seriales que nos servirán como señal para a nuestra comunicación UART.

Los caracteres seriales están explicados en la tabla 7, donde se determina que los motores al trabajar independientemente, se tendrá que

adicionar un valor; tal que; permita obtener los resultados de los caracteres de cada motor. Adicionando al resultado del Motor 1, una cantidad de 127 para que su resultado este en el rango de caracteres de 128 a 255 para el Motor 2. Con esto ya se puede conseguir la señal serial para que los motores trabajen conjuntamente como muestra la Figura 77.

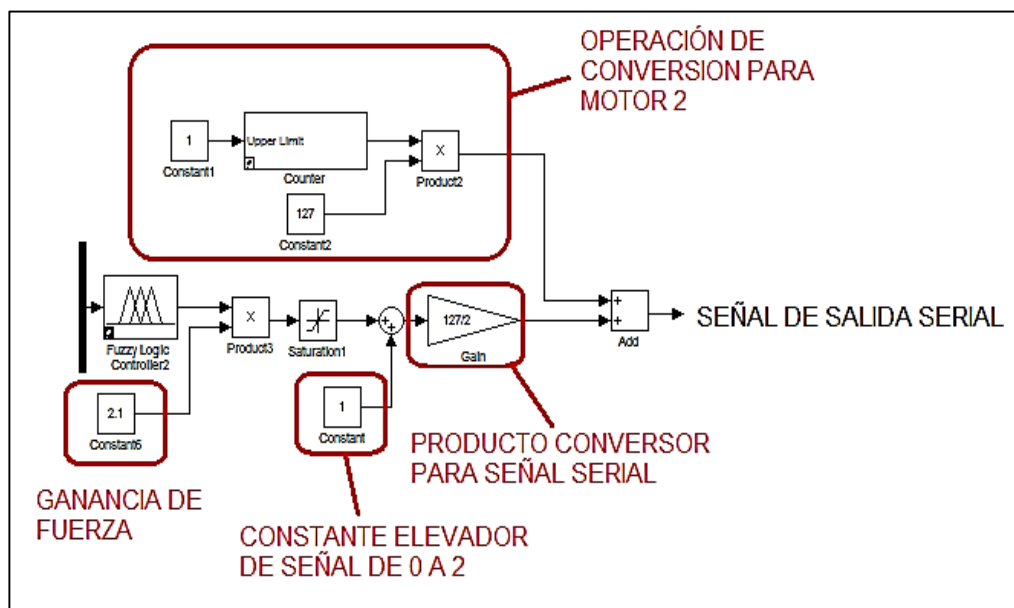


Figura 77. Etapa de conversión de señal para UART

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Una vez obtenida la señal serial, se debe tomar en cuenta que el VEAP solo cumple con la acción de ir hacia adelante o hacia atrás, es en este punto en donde se colocaran dos pulsadores que permitirá direccionar al vehículo a donde el conductor lo desee, siendo esta una acción que al activar cualquiera de los pulsadores, este dará la orden de administrar un 10% más a la velocidad del motor respectivo y por ende a la rueda con la que se pretende girar. Los bloques de programación vienen dados por una señal digital que en este caso serán los pulsadores; que normalmente en este tipo de bloques asigna el valor de 0 cuando están pulsados y el valor de 1 cuando no lo están, eh ahí la razón de introducir un bloque de operación

lógica NOT que permite revertir esta condición. Estas acciones vienen dadas como indica la Figura 78.

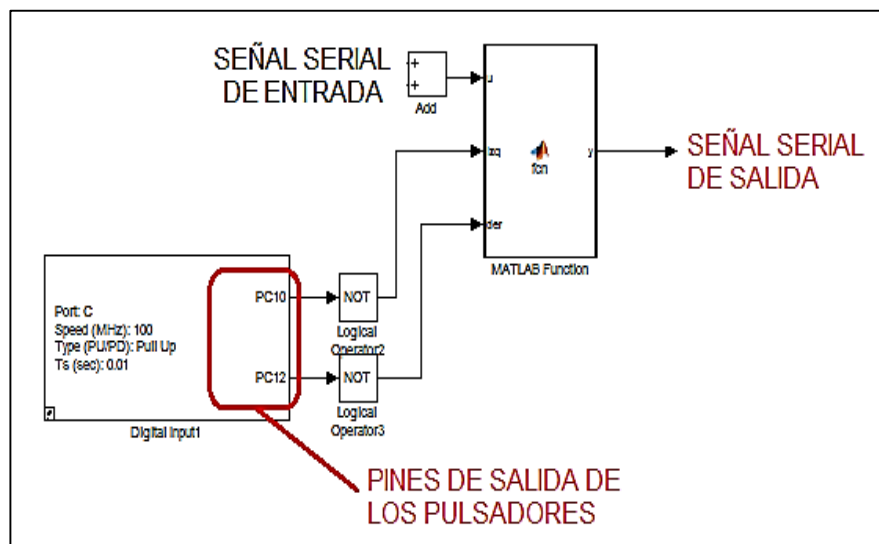


Figura 78. Pulsadores de dirección del VEAP

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Como normativa de seguridad mencionada en los diagramas de flujo, en este punto se procede con la programación del interruptor de emergencia. Un bloque de salida digital seguido de una operación lógica NOT que invierte su condición de apagado y encendido, en donde 0 y 1; serán los valores que al ser multiplicados mediante el bloque producto, por la señal emitida, este permitirá o no la ejecución del programa y por ende el funcionamiento o no del VEAP en caso de una emergencia. También se muestra que la salida de la señal se ve condicionada por otro factor de seguridad, el ángulo máximo al cual el VEAP está permitido inclinarse, que viene dado desde muy atrás a partir del valor de lectura del sensor, impidiendo que el vehículo funcione cuando este sobrepasa el ángulo estimado de seguridad, como se aprecia en la Figura 79.

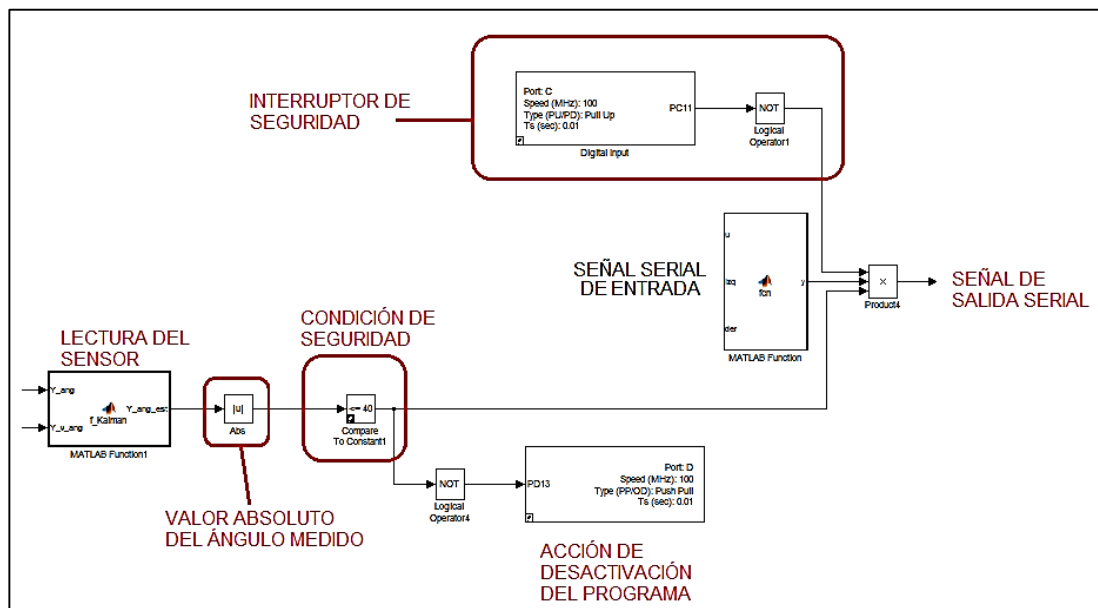


Figura 79. Condiciones de seguridad del VEAP

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Una vez establecidos los parámetros de seguridad y condiciones de control, la señal será enviada por puerto serial al driver Sabertooth 2x60, antes de eso pasará por un bloque de conversión de tipo de dato, que permitirá convertir el dato double con el que se viene trabajando durante todo el programa; a datos int, que es con el que trabaja el driver. A partir de aquí se hace la transferencia de datos a la sabertooth y así ejecutar la estrategia de control establecida; en el VEAP.

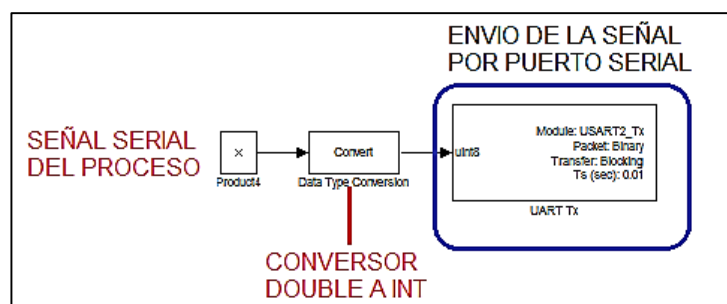


Figura 80. Condiciones de envío de señal por puerto serial

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Adicional a la programación de estrategia de control, para poder realizar las condiciones de prueba y error con los que se obtuvo los valores de las constantes antes mencionadas, se programó el encendido de un led que está integrada en la tarjeta STM32F4, lo cual hace que; el VEAP indicara mediante el led que está trabajando en el rango establecido de -45 a 45 grados, ahorrándonos con esto posibles fallos que serán detectados a tiempo.

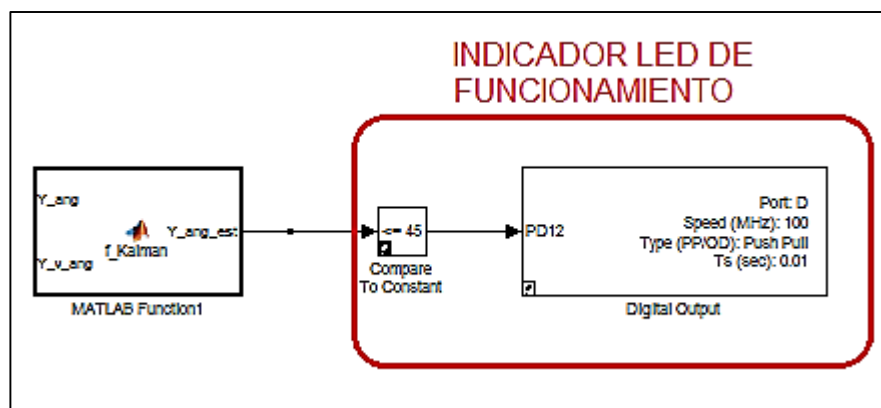


Figura 81. Indicador led de funcionamiento

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

El ensamble total de la programación por bloques, así como la lógica de programación en diagramas de flujo se muestran en los anexos C y B respectivamente.

4.4.2. Acción de control Fuzzy

El controlador Fuzzy es una estrategia de control fácil de implementar y que no necesita conocer la planta, es decir no se necesita el modelo matemático del cuerpo para determinar sus valores; lo que si se debe conocer es que acción va a realizar ante la presencia de un determinado error.

En nuestro proyector se tomará un control Fuzzy PD porque se toma en cuenta el error y la derivada del error. El controlador Fuzzy asigna valores lingüísticos (grande, pequeño, etc.) a las variables que intervienen en el control (error, manipulada y controlada).

Estos valores lingüísticos vienen dados de la siguiente manera:

- Grande negativo: -1
- Pequeño negativo: -0.5
- Cero: 0
- Pequeño positivo: 0.5
- Grande positivo: 1

Tabla 8.

Acción de control Fuzzy

Acción de control	Error	Derivada del error				
		-1	-0.5	0	0.5	1
-1		1	1	1	0.5	0
	-0.5	1	1	0.5	0	-0.5
	0	1	0.5	0	-0.5	-1
	0.5	0.5	0	-0.5	-1	-1
	1	0	-0.5	-1	-1	-1

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

La tabla 8 muestra la acción de control que Fuzzy calcula en varias condiciones; así de esta manera como se muestra en la Figura 82, el ángulo medido cuando va hacia adelante se considerará negativo, a su vez el valor del error y derivada del error también tomaran errores negativos y viceversa cuando el ángulo de inclinación se vaya hacia atrás.

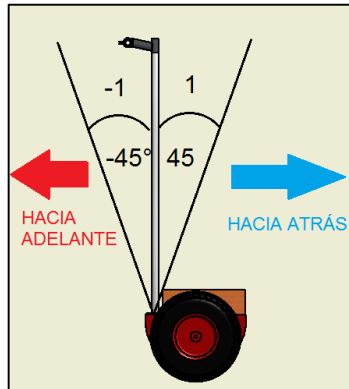


Figura 82. Condición del vehículo para la medición angular

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Explicándolo de mejor manera se tomará tres ejemplos en distintas condiciones:

Cuando el vehículo toma una inclinación hacia adelante, los valores que toma serán negativos, así; cuando tome el valor máximo permitido de inclinación que en nuestro caso es 45 grados, la programación lo interpreta como $-45^\circ = -1$ escalando la señal, lo que hará el fuzzy en esta condición es calcularlo y asignarle el valor de 1 como valor de salida de la acción de control, con este valor se sumara a la constante uno para elevarlo a valores de 0 a 2 con el fin de transformarlos a una señal con caracteres seriales.

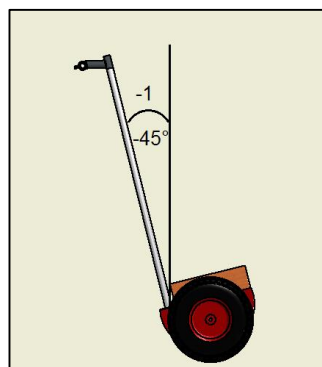


Figura 83. Condición del vehículo hacia adelante

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

De esta manera si la señal de salida de fuzzy es 1 considerando las condiciones anteriores y sumándolo a la contante 1 dará como resultado el valor de 2 y al multiplicarlo por el convertidor seria se tiene: $2 \times 127/2$ con el cual nos dar el resultado de 127 para el motor 1 y 255 para el motor 2 considerando la otra contante designada para llegar al valor de esta, comparándola con la tabla 7, son los valores asignado que se posee para ir hacia adelante a velocidad máxima.

La siguiente condición se tendrá cuando el vehículo se encuentra en la parte vertical, es decir sin ningún ángulo de inclinación, el valor del escalado del error como el de la derivada serán igual a 0, y para la acción de control en este caso viene dado por el valor de 0 que al sumarlo con la constante 1 para elevarlo nos da el valor de 1 y este a su vez al ser multiplicado por el convertidor serial nos arrojava el resultado de 64 para el motor 1 y 192 para el motor 2, que son los valores para detener a los motores.

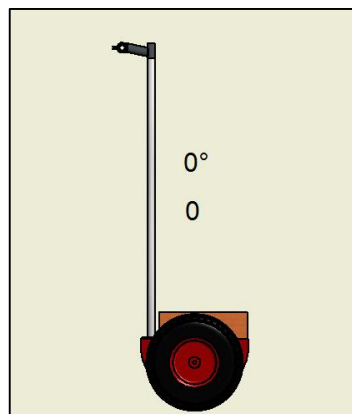


Figura 84. Condición del vehículo en posición vertical

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

La otra consideración a ser tomada en cuenta es cuando el vehículo va hacia atrás tomando como lectura máxima en el sensor de 45° y como escalado y derivada del escalado de 1, la acción de fuzzy en esta condición dará como resultado el valor de -1; nuevamente este resultado será sumado a la constante 1 la cual le da el resultado de 0, pero como esto es una

consideración teórica el valor real que estimara será de 1 para el motor 1 y de 129 para el motor 2 permitiendo ir a su máxima capacidad hacia atrás.

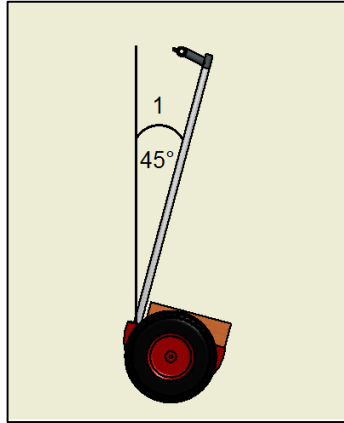


Figura 85. Condición del vehículo hacia atrás

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

4.4.3. Filtro Kalman

Pozo, D. (2010) “El Filtro de Kalman es un estimador óptimo que puede implementarse de manera sencilla en sistemas de carácter tanto lineal como no lineal, y cuyo procesamiento de datos es de carácter recursivo. Se denomina óptimo ya que recibe y procesa todas las mediciones disponibles y en base a estas, estimar el valor actual de las variables de interés.”

Pozo, D. (2010) “La palabra recursivo está relacionada con un algoritmo en el cual el filtro no tiene la necesidad de mantener almacenados todos los datos anteriores de las variables, por lo tanto no tiene que reprocesarlos cada vez que una nueva medida es tomada, en vez de esto hace uso de estados anteriores, es decir del último valor calculado, a partir del cual y junto con las nuevas medidas tomadas, el algoritmo entrega nuevos resultados que posteriormente serán considerados como estados anteriores. Con lo cual la implementación de este filtro resulta muy útil en sistemas de tiempo real.”

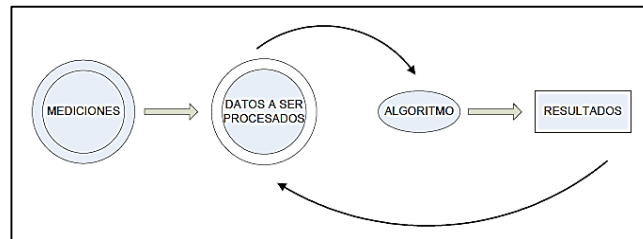


Figura 86. Recursividad en el filtro kalman

Fuente: Pozo, D. (2010)

Pozo, D. (2010) “Estas características hacen del filtro Kalman una poderosa herramienta para la estimación de estados pasados, presentes y futuros, e inclusive puede trabajar en circunstancias en las que la naturaleza precisa del modelo del sistema resulte desconocida.”

Pozo, D. (2010) “Como se mencionó el filtro de Kalman usa un algoritmo de carácter recursivo con el fin de obtener una variable estimada que se acerque lo más posible a la realidad. A continuación se presentará el modelo general del sistema de la variable a ser estimada, así como también la ecuación del observador.”

a. Modelo del sistema

Pozo, D. (2010) “El sistema dinámico en el cual se desea aplicar el filtro de Kalman debe expresarse como un modelo de carácter lineal en el cual se trata de estimar el estado $x \in R^n$, dicho sistema se lo puede describir de manera general mediante la siguiente ecuación de estado.”

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_k + w_{k-1}$$

Ecuación 29. Relación de estado en el momento K -1 y el instante K.

Fuente: Pozo, D. (2010)

Con una medición $z \in R^m$:

$$z_k = Hx_k + v_k$$

Ecuación 30. Relación del estado x con la observación z_k

Fuente: Pozo, D. (2010)

Dónde:

x = estado del sistema

k = tiempo

z = valor observado

u = entrada del sistema

v = ruido en la medición

w = ruido en el proceso

A, B, H = Matrices determinísticas que definen la dinámica del sistema.

Pozo, D. (2010) "Cabe aclarar que tanto la matriz A como la matriz H pueden cambiar en cada paso de tiempo o medición, pero si bien esto es posible también es completamente válido que estas puedan permanecer constantes en las ecuaciones en todo el tiempo."

Pozo, D. (2010) "Los vectores w y v son independientes el uno del otro y representan el ruido gaussiano blanco con media cero presente en el proceso y en las observaciones respectivamente."

b. Implementación del algoritmo filtro Kalman

Pozo, D. (2010) "El filtro de Kalman es una herramienta que permitirá obtener la actitud sin los errores inherentes a las características propias tanto del giroscopio como del acelerómetro, tomando esto como fundamento, a continuación se presenta la manera como estos sensores trabajan en forma conjunta para entregar un valor de actitud que no

responda únicamente a datos individuales sino a una interacción de dichos sensores.”

Pozo, D. (2010) “Como se indicó, la medición del ángulo de inclinación se tiene un modelo que puede ser considerado lineal y que regirá el proceso del cálculo de la inclinación.”

$$\hat{\text{ángulo}}_k^- = \hat{\text{ángulo}}_{k-1} + u_k * dt - w_{k-1} * dt$$

Ecuación 31. Modelo algoritmo filtro kalman

Fuente: Pozo, D. (2010)

u_k = señal acondicionada del giroscopio

dt = tiempo de muestreo

$\hat{\text{ángulo}}_k^-$ = estado estimado

$\hat{\text{ángulo}}_{k-1}$ = estado anterior

w_{k-1} = perturbación en el proceso

Pozo, D. (2010) “Donde la perturbación en el proceso va estar dada en [°/s], y al estar en continua variación, es difícil proporcionar un valor que permanezca constante para esta variable a lo largo del tiempo. Tomando en cuenta esta idea, lo que se presenta como viable, es tomar esta variable como un dato que forme parte del vector de estados que estará bajo el algoritmo de Kalman, donde al estar sujeta a cambios provocados por todas las variables que se incluyen en el sistema, su valor de carácter aleatorio en el proceso se verá reflejado con mayor veracidad.”

Así se tiene lo siguiente:

$$w_k^- = w_{k-1}$$

Ecuación 32. Vector de estados bajo algoritmo Kalman

Fuente: Pozo, D. (2010)

Pozo, D. (2010) “Ahora, también se tiene el acelerómetro como parte del sistema comportándose como un observador de éste. De esta manera la medida entregada por el acelerómetro sirve para determinar el error suscitado entre el ángulo estimado (giroscopio) y la observación realizada en un instante de tiempo.”

Teniendo esto presente se tiene el siguiente modelo para el observador:

$$z_k = Hx_k^- + v_k$$

Ecuación 33. Variable de observación del acelerómetro

Fuente: Pozo, D. (2010)

Pozo, D. (2010) “Claramente se aprecia que la medida entregada por el observador presenta un cierto margen de error (v_k) con respecto al valor estimado en base al giroscopio.”

$$v_k = z_k - Hx_k^-$$

Ecuación 34. Margen de error en base al giroscopio

Fuente: Pozo, D. (2010)

Pozo, D. (2010) “A esta diferencia también se le denomina como la innovación, por el papel que juega en el algoritmo del Filtro de Kalman.”

Pozo, D. (2010) “Con los antecedentes presentados anteriormente se propone el siguiente modelo para incluirlo en el algoritmo de filtro de Kalman.”

$$\begin{pmatrix} \text{ángulo}^- \\ \text{deriva}^- \end{pmatrix}_k = \begin{pmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{ángulo} \\ \text{deriva} \end{pmatrix}_{k-1} + \begin{pmatrix} dt \\ 0 \end{pmatrix} u_k$$

Ecuación 35. Modelo incluido al algoritmo de filtro Kalman

Fuente: Pozo, D. (2010)

Resolviendo la matriz se obtiene:

$$\hat{\text{ángulo}}_k^- = \hat{\text{ángulo}}_{k-1} + u_k * dt - \text{deriva}_{k-1} * dt$$

$$\text{deriva}_k^- = \text{deriva}_{k-1}$$

$$z_k = H \hat{x}_k^- + v_k$$

Ecuación 36. Modelo algoritmo filtro Kalman acelerómetro giroscopio

Fuente: Pozo, D. (2010)

Dónde:

z_k = ángulo entregado por el acelerómetro

u_k = rapidez angular entregada por el giroscopio

$\text{deriva} = w$ = perturbaciones en el sistema expresado en [°/s]

CAPÍTULO V

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1. Pruebas de funcionalidad del VEAP

Para garantizar el buen funcionamiento del proyecto se efectuará varias pruebas donde se comprobará que en cada condición a la cual se mencionará posteriormente, que el VEAP responda de la mejor manera para cumplir con la meta de estabilización del sistema.

5.1.1. Respuesta de estabilización mediante voltajes de la batería

Una de las condiciones de funcionalidad con las que debe cumplir el VEAP, es el comportamiento que va a tener a plena carga y a carga baja con las baterías, ya que como es de suponerse, el sistema de control se comportará de maneras diferentes con cada condición de la batería, ya que como se explicó, la estrategia de control está basada mediante resultados de prueba y error para determinar los valores y constantes que regirán al sistema de control de estabilidad.

La primera condición que deberá cumplirse es cuando las baterías se encuentren totalmente cargadas, dándonos un valor de 25,2 V de alimentación para el sistema, dando como resultado una buena estabilización debido a que el sistema está trabajando en óptimas condiciones, pero con la contrariedad que la ganancia de fuerza adquirida por los motores provocará que se produzca un cierto cascabeleo en la estructura.

Como segunda condición que debe manejar el VEAP es cuando se encuentre con la batería en un punto crítico de descarga, al estar trabajando con baterías de polímero de litio se debe tener en cuenta que existe un

rango de descarga a la cual se le puede someter a la batería, caso contrario se corre el riesgo de dañarla si se sobrepasa de este nivel, el rango adecuado a la cual es recomendable su uso, es hasta los 18 voltios, pero para no irnos tanto al límite recomendado, se efectuará el trabajo hasta los 20 voltios. De esta manera en este rango de voltaje el sistema de control no pierde la estabilidad y no se genera cambios significativos en la conducción.

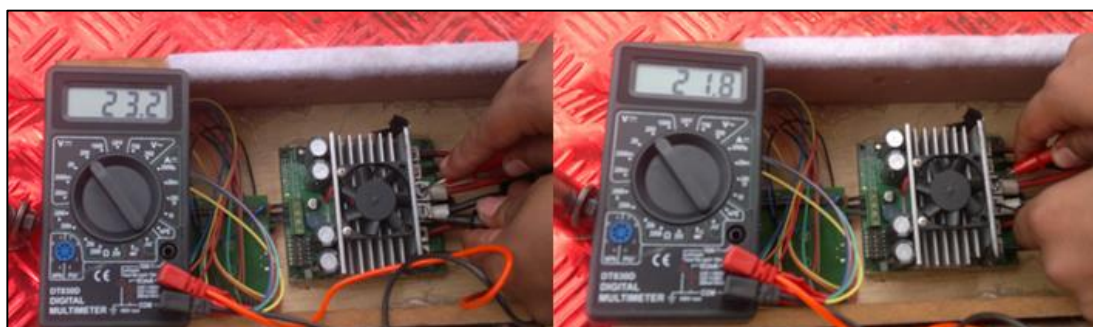


Figura 87. Comprobación de voltajes de las baterías

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Como se puede ver en la Figura 87, se realizó la comprobación de funcionalidad del sistema, realizando la medición de las baterías por separado, teniendo como condiciones dos voltajes diferentes: de 23,2 y 21,8 voltios respectivamente, dándonos como resultado un funcionamiento adecuado y sin ninguna contrariedad que afecte en la estabilización del VEAP.

5.1.2. Autonomía y tiempos de carga del VEAP

Como una de las características y resultados fundamentales que debe poseer el proyecto, está en la determinación de la autonomía que el vehículo va a adquirir luego de haber implementado el sistema mecánico como el sistema de control electrónico, refiriéndose a este como el período en que las baterías permitirán el funcionamiento ya sea mediante el tiempo de uso o

el kilometraje que el vehículo permite alcanzar antes de volver a cargar las baterías.

a. Tiempo de autonomía de las baterías

Las baterías de LiPo a parte de la especificación de los miliamperios de la batería, también se detalla una referencia de descarga máxima que viene expresada con un número seguido de una 'C' (30C), donde C es el amperaje de la batería. Para saber que amperaje descarga nuestra batería se tiene que multiplicar los miliamperios de esta por el número delante de la C. Para nuestro proyecto se cuenta con una batería de 5.000Mha y 30C, la descarga máxima a la que se puede someter esta batería sería 150.000 mAh (150Ah), con lo que se consigue proceder con el siguiente calculo:

$$C * \text{capacidad en Ah} = \text{max Amp}$$

Ecuación 37. Capacidad de descarga de las baterías LiPo

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Para continuar con el cálculo de autonomía de las baterías se tiene como dato real que el consumo de corriente de los motores en vacío de cada uno es de 15 amperios y el consumo con carga en el VEAP en una superficie plana aumenta a 37.5 amperios. Este segundo valor es el que se tomara como referencia para el cálculo de la autonomía ya que la mayor parte del tiempo, el vehículo circulara por superficies plana, exigiendo un consumo de corriente mucho menor que en superficies empinadas o de una superficie con mayor resistencia a la rodadura.

$$\text{Tiempo de autonomia} = \frac{\text{Carga maxima de batería}}{\text{Consumo de corriente}}$$

Ecuación 38. Tiempo de autonomía de las baterías

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Entonces reemplazando valores se tiene que:

$$\text{Tiempo de autonomía} = \frac{150 \text{ Ah}}{(37.5 * 2)A} = 2 \text{ horas}$$

Como resultado final se obtuvo que, la autonomía de cada batería es de aproximadamente 2 horas dando un total de 4 horas para las dos baterías, dependiendo del estilo de manejo y la superficie del terreno, con lo cual se cumple el objetivo de superar en autonomía al vehículo original Segway del cual se tomó los valores comparativos.

El valor obtenido se corrobora mediante el rango de voltaje con el cual trabajará las baterías, siendo así que el tiempo de prueba realizado entre 25,2 y 20 voltios en superficies planas y condiciones buenas, dieron como resultado un tiempo de recorrido de 2 horas con una sola batería.

b. Autonomía basado en el kilometraje alcanzado

Para poder determinar la autonomía de kilometraje que alcanzará el VEAP, se debe tomar como consideración las características de velocidad que nos otorgará los motores dependiendo de las condiciones a las cuales estén expuestos, y así mediante esos valores se determinará el recorrido completo que el VEAP puede alcanzar.

Como se determinó anteriormente el VEAP alcanza un tiempo de recorrido de 4 horas con las dos baterías, dato que se tomará como referencia para el cálculo de la autonomía en kilometraje.

Como se ve en la Figura 88, se tiene las condiciones a la cual trabajara el motor en dependencia al voltaje que se le suministre, los valores de consumo que aparecen en la tabla hacen referencia cuando el sistema permanece sin carga.

Como punto de referencia para el cálculo, se tomará como dato un valor promedio de voltaje de alimentación que en este caso es de 23,4 voltios y por consecuencia con este voltaje, cada motor entregará una velocidad de salida de 270 rpm.

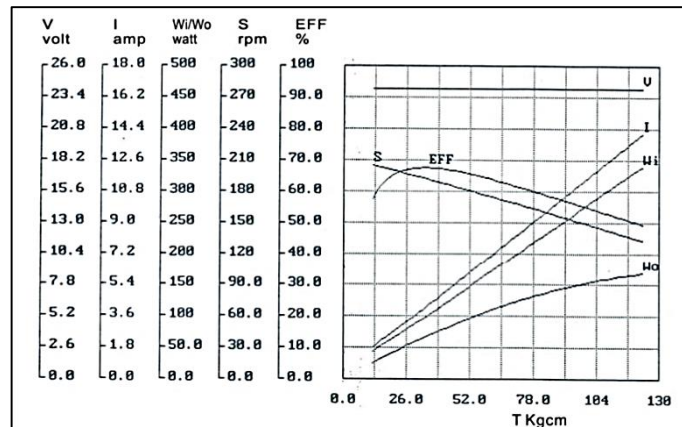


Figura 88. Condiciones de RPM del motor DC

Fuente: King Righth Motor CO., LTD. product calaloge

Este valor que se toma como referencia al transformarlo en velocidad lineal da como resultado que el vehículo alcanza los 16 Km/h promedio teórico, que llevados a la realidad el vehículo en una conducción normal alcanza los 10 km/h.

Con este valor se corrobora que del cálculo obtenido no existe una gran tolerancia entorno a la velocidad, y que mediante el tiempo de autonomía da como resultado lo siguiente:

$$\text{kilometraje} = \text{tiempo baterías} \times \text{velocidad lineal}$$

$$\text{kilometraje} = 4 \text{ h} \times 10 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 40 \text{ km}$$

Como se puede observar el kilometraje el cual puede recorrer el VEAP está en un promedio de 40 kilómetros.

c. Tiempos de carga para baterías de LiPo con Triton

Uno de los aspectos que se debe tomar en cuenta sobre las baterías elegidas para nuestro proyecto; es el tiempo en que demorará en cargar las baterías. Como sugerencia se tiene que las baterías no deben ser descargadas a un valor menor de 18 v, como cuidado especial para alargar la vida útil del mismo, a partir de esto una vez que las baterías se hallen descargadas, el proceso de carga debe estimar un tiempo necesario para hacer este procedimiento; y es que Triton; el cargador escogido posee un tiempo y corriente suministrado de carga ya establecidos de tal manera que las baterías son cargadas a dos amperios como se ve en la Figura 89.



Figura 89. Condiciones iniciales de carga

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Como se observa el cargador ya tiene establecido los parámetros de carga para las baterías; sin tener que preocuparnos por dar posibles valores para carga lenta o rápida, arriesgándonos a arruinar el buen funcionamiento el desempeño de las baterías.



Figura 90. Tiempo requerido para la carga de baterías

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Como se observa en la Figura 90 el tiempo de carga necesario que requerirá cada una de las baterías será de alrededor de 92 minutos (1 hora y media), teniendo un total para las dos baterías, de 3 horas de carga.

5.2. Resultados de estabilización del VEAP

Para garantizar el funcionamiento del VEAP, también se lo realizará mediante pruebas de conducción, dando como condiciones cuando el vehículo se encuentra de manera estática como también cuando el vehículo se empieza a mover.

5.2.1. Pruebas estáticas del VEAP

Para la comprobación del correcto funcionamiento del VEAP se realizó pruebas de estabilidad para así poder dar un análisis final del resultado obtenido luego de nuestra investigación e implementación del sistema



Figura 91. Prueba estática césped a) sin peso b) con peso

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

La primera prueba que se hizo fue la de comprobar la estabilidad de la maquina con el conductor encima, esta prueba se realizó de tres maneras diferentes: la primera se lo hizo sobre una superficie de césped; en la cual el vehículo se comportó de forma mucho más estable provocando que el vehículo se quede autobalanceado sin aplicar ninguna fuerza sobre él.

Otra de las pruebas de estabilidad estática también se las hizo sobre superficies de adoquín y asfalto teniendo como resultado lo siguiente:



Figura 92. Prueba estática adoquín

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.



Figura 93. Prueba estática asfalto equilibrio sin manos y en un pie

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Estas pruebas dieron como resultado la estabilidad que tiene el VEAP ya que se puso a prueba soltando el volante por completo y haciendo recorrer de esta forma al vehículo dando una estabilidad adecuada evitando que la persona se caiga, además de pararse en un solo pie teniendo el mismo resultado de estabilidad.

5.2.2. Pruebas dinámicas del VEAP

Como todo vehículo, este prototipo requiere un mecanismo de aceleración, lo cual se realiza al inclinar el volante hacia adelante con lo cual se alcanza diferentes velocidades.

Como parte de las pruebas realizada al VEAP, se evaluará en cada condición de superficie por las que el vehículo pueda rodar, al fin de cubrir todas las posibilidades de superficies tanto regulares como irregulares en las que el VEAP pueda perder su estabilización.

La primera prueba de campo que se evaluó, fue en la superficie en la que el vehículo pasará la mayoría de tiempo, en este caso se tiene asfalto en

buen estado como muestra la Figura 94, donde nos dio como resultado una buena estabilización sin sufrir ningún percance.



Figura 94. Pruebas dinámicas en asfalto

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

En una condición de superficie no tan irregular, se tendrá en césped, el cual por el comportamiento que se obtuvo al conducir, este no perdió la estabilidad ni el control en el manejo.



Figura 95. Prueba dinámica en césped

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Al someter el vehículo a conducción sobre superficies regulares este correspondió de buena manera a igual que lo hizo al exponerlo en superficies muy irregulares como es sobre un suelo de arenoso lleno de baches donde el control de la estabilidad siempre estuvo en óptimas condiciones.



Figura 96. Pruebas dinámicas en superficies irregulares

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.



Figura 97. Paso del VEAP a través de un rompe velocidades

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Otra de las pruebas hecho en el VEAP fue sobre una superficie inclinada, la misma se la realizó en calle asfaltada con ángulo de rapa de 30 grados de inclinación en la cual al subir la velocidad máxima disminuye un poco en comparación a circular en suelo plano, pero la estabilidad no cambia permanece muy estable y segura ya sea si se está subiendo o bajando de la superficie inclinada.



Figura 98. Prueba en superficie inclinada subida y bajada

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

5.3. Análisis financiero del VEAP

Para desarrollar el proyecto se debe de considerar aspectos como son recursos humanos, tecnológicos y recursos materiales que serán de gran ayuda para guiarnos y poder llegar a nuestro objetivo.

El análisis de costos asociados al desarrollo del prototipo se lo realiza en base a tres puntos fundamentales:

- Costo de materiales
- Costo de construcción del prototipo
- Costo de ingeniería total

5.3.1. Costo de materiales

Tabla 9.

Desglose de costos de materiales del sistema mecánico

Cantidad	Descripción	Precio unitario	Costo total
1	Tubo cuadrado estructural (6 metros)	15	15
2	Motorreductores King Motors	50	100
2	Ruedas neumáticas	18	36
2	Adaptador eje rueda	25	50
1	Retazos de láminas de tol	5	5
1	Conjunto volante/base	15	15
10	Tornillos 7/16-24-UNF de longitud 16mm, resistencia 12,9 y cabeza DIN912	0.15	1.50
Total de materiales			\$ 222.5

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

En la Tabla 9, se detalla los elementos empleados para la construcción del sistema mecánico o esqueleto del prototipo. Los costos presentados comprenden los costos de compra del ítem, ya que todos los elementos fueron adquiridos localmente, y que solo reflejan su precio de compra.

Tabla 10.

Desglose de costos de materiales eléctricos y electrónicos.

Cantidad	Descripción	Precio unitario	Costo total
1	Tarjeta STM32F4 Discovery	40	40
1	Sensor MPU 6050	20	20
1	Driver Sabertooth 2x60	193	193
2	Baterías LiPo	100	200
1	Cargador de baterías LiPo	100	100
1	Borneras	1.20	1.20
2	Cableado (metros)	0.80	1.60
20	Cables para protoboard	0,25	2.50
2	Interruptores	1	2
2	Pulsadores	0,60	1.20
Total de materiales			\$ 561.6

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

En la Tabla 10, se detallan los costos por compra de los elementos tanto eléctricos como electrónicos. Del mismo modo que para la Tabla 9, estos costos no incluyen impuestos adicionales debido a que se los adquirieron en el país a excepción de driver Sabertooth, ya que tuvo que ser importado de Estados Unidos debido a la ausencia de estos en el país; de ahí la justificación de su elevado precio. Dando como total de costos en materiales de 784 dólares.

5.3.2. Costo de construcción del VEAP

Para el análisis económico del costo de elaboración del vehículo, no se tomará en cuenta la mano de obra, debido a que la misma que fue realizada por nosotros; los investigadores; y realmente solo se puede evaluar los gastos en maquinaria y materiales para soldar las estructuras y el alquiler de herramientas y el espacio físico para poder trabajar. Aclarado eso se determinó que los gastos de construcción no ascienden a más de 20 dólares.



Figura 99. Proyecto VEAP diseño en Autodesk Inventor y vehículo real

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

5.3.3. Costo de ingeniería

Para la elaboración del prototipo se ha trabajado durante 10 meses, durante las cuales se ha trabajado entre 4 y 5 horas diarias; en los cuales se tuvo que desplazar a distintas ciudades del país en busca de componentes e información investigativa y considerando el costo de mano de obra invertido en investigación y desarrollo de 500 dólares; en resumen se tiene:

Tabla 11.

Análisis financiero del VEAP

Costo de materiales	\$ 784
Costo de construcción del proyecto	\$ 20
Costo de ingeniería	\$ 500
Total	\$ 1304

Elaborado por: Velasco, V. & Pilicita, E.

Como resultado final de la investigación se tiene que el gasto total del proyecto llega a los 1300 dólares, pero cabe recalcar que este costo valga la redundancia es de investigación, ya que si se quisiera elaborar prototipos en serie; el costo que se estimaría para el VEAP sería de 1000 dólares y por consiguiente, la posibilidad de construcción de estos vehículos a gran escala para su uso en el país puede ser una idea económicamente viable.

Como punto de comparación se toma el costo de un vehículo Segway comercial i2 y X2, donde el costo de estos es de \$ 7700 y \$ 9000 dólares respectivamente; en Estados Unidos, se puede ver que para ser un prototipo ha resultado bastante económico, ya que el objetivo en un principio siempre fue el elaborar el prototipo mediante materiales reciclados y de alcance nacional con el fin de reducir costos de construcción.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- Se diseñó y construyó un vehículo eléctrico autobalanceado personal (VEAP) de dos ruedas en paralelo estilo Segway, logrando satisfactoriamente el control de estabilidad y darle al vehículo la funcionalidad deseada, de modo que una persona sea capaz de trasladarse de un lugar a otro sin mayor dificultad.
- Se investigó y determinó el principio de funcionamiento de los transportadores personales tipo Segway, los componentes utilizados y autonomía que adquieren este tipo de vehículo para su correcto funcionamiento.
- La integración y programación de los sistemas electrónicos instalados en el vehículo se ha realizado de manera exitosa, dando lugar, junto con el diseño y construcción, a que se hayan podido realizar la puesta en marcha del vehículo y esté totalmente operativo.
- Se ejecutó la construcción del VEAP mediante el ensamblaje de componentes mecánicos y eléctricos de los que estaba previsto el proyecto. La construcción mecánica del VEAP requirió de sumo cuidado y de cálculos geométricos que determinaron notablemente el desempeño final del vehículo, y que además intervinieron, activamente, en el proceso de control del vehículo.
- Se logró establecer una autonomía del VEAP de 4 horas con el uso de dos baterías LiPo, que supera por mucho a los Segway comerciales.
- Los costos de construcción fueron rotundamente satisfactorios, ya que con el uso de materiales reciclados y adquiridos en el mercado nacional redujo enormemente su valor económico para poder fabricarlos en serie.

6.2. Recomendaciones

- Para futuras versiones y/o correcciones de este vehículo, se deberá mejorar la robustez de la parte mecánica, de manera que ésta pueda soportar tripulantes con mayor peso.
- Para el desarrollo de un vehículo de este tipo completamente funcional y seguro, se recomienda el uso de la implementación de más sensores sofisticados de tal manera que efectúen el control considerando cada parámetro que pueda afectar a la inestabilidad.
- También se debería cambiar el método en que se determina el giro deseado, ya que si bien el volante instalado es bastante intuitivo, es peligroso ya que en una eventual caída, en caso de no soltar uno de los dos lados, el vehículo tenderá a girar sin control.
- En términos de control, resultaría interesante buscar alguna alternativa que se ajuste mejor al tipo de sistema, como implementar un controlador difuso o adaptable.
- Utilizar un tipo de ruedas solidas son el fin de que el sistema mecánico de movimiento posea más tracción y se evite el estar reparando y cambiando las ruedas inflables cada vez que pierda la presión de aire en ellas.
- Agregar un tipo de motorreductor diferente y más sofisticado al que se usó en este proyecto, tomando en cuenta características de rpm, torque y potencia
- Agregar una circuitería que permita utilizar los motores como generadores, en determinados momentos del recorrido, para aprovechar la energía mecánica y convertirla en energía eléctrica, para su posterior uso.
- Dotar el vehículo con baterías de una tecnología superior que permitan tener una mayor autonomía y un menor tiempo de carga.

BIBLIOGRAFÍA

- Madero, V. (2009). Análisis y Control de Un Vehículo Basado en Péndulo Invertido. Sevilla, Universidad De Sevilla.
- Pereira, E. & Rivera, C. (2012). Diseño e implementación de un vehículo auto balanceado. Caracas, Universidad Central de Venezuela.
- Pontón, P., & Armijos, C. (Septiembre 2010). Diseño, construcción y control de un vehículo eléctrico de un eje unipersonal. Quito, Escuela Politécnica Nacional.
- Castro, D. & Peña, J. (2011). Diseño y construcción de un prototipo experimental de un vehículo eléctrico autobalanceado unipersonal VEAU. Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander.
- Pozo, D. (Febrero 2010). Diseño y construcción de una plataforma didáctica para medir ángulos de inclinación usando sensores inerciales como acelerómetro y giroscopio. Quito, Escuela Politécnica Nacional.
- Moreno L. (Junio 2009). Vehículo Autobalanceado sobre dos Ruedas. Santiago de Chile. Universidad de Chile.
- Arenas, M. (2008). Diseño e implementación de un sistema de adquisición de aceleraciones con procesamiento mediante microcontrolador. Sevilla, Universidad de Sevilla.
- Andrade, M., & Cortez, A. (2012). Aplicación del software matlab/simulink en la asignatura de fundamentos de comunicación de la carrera de ingeniería en telecomunicaciones. Guayaquil, Universidad Católica Santiago de Guayaquil.
- Roldan, J. (2005). Motores eléctricos accionamientos de máquinas, Editorial Praninfo 3 edición.
- Kindler, H. & Kynast, H. (1984). GTZ Matemática aplicada para la técnica del automóvil. Alemania. Editorial Reverté. 8va Edición

NETGRAFÍA

- Segway Inc. Energy Credits Spread. Citado el 23 de Mayo del 2014, de http://www.segway.com/downloads/pdfs/Energy_Credits_Spread.pdf
- Segway Inc. Explore Models. Citado el 27 de Mayo del 2014, de <http://www.segway.com/individual/models/index.php>
- Segway Inc. P.U.M.A. - Segway Advanced Development. Citado el 20 de Abril del 2014, de <http://www.segway.com/puma/>
- Blackwell, T. Building a Balancing Scooter. Citado el 23 de Mayo del 2014, de <http://www.tlb.org/scooter.html>
- MIT. The DIY Segway. Citado el 24 de Mayo del 2014, de <http://web.mit.edu/first/segway/>
- Dudash, P., & Eakins, G. The Two Wheel Deal. Citado el 24 de Mayo del 2014, de <http://cobweb.ecn.purdue.edu/~477grp12/index.html>
- Toyota. Toyota Develops Personal Transport Assistance Robot Winglet. Citado el 20 de Julio del 2014, de http://www.toyota.co.jp/en/news/08/0801_1.html
- St life.augmented. Discovery kit for STM32F407/417 lines - with STM32F407VG MCU. Citado el 20 de Septiembre del 2014, de <http://www.st.com/web/catalog/tools/FM116/SC959/SS1532/PF252419>
- St life.augmented. Guía de iniciación al kit de evaluación St STM32F4 Discovery. Citado el 20 de Septiembre del 2014, de

http://www.disca.upv.es/aperles/arm_cortex_m3/curset/guia_iniciacion_STM32F4_discovery.pdf

- InvenSense. MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4. Citado el 14 de Agosto del 2014, de <http://www.invensense.com/mems/gyro/documents/PS-MPU-6000A-00v3.4.pdf>
- DimensionEngineering. Sabertooth 2x60 User's Guide. Citado el 14 de Mayo del 2014, de <https://www.dimensionengineering.com/datasheets/Sabertooth2x60.pdf>

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores Víctor Manuel Velasco Ulco y Edison Enrique Pilicita Caiza bajo mi supervisión.

ING. FREDDY SALAZAR

DIRECTOR DEL PROYECTO

ING. JOSÉ QUIROZ

CODIRECTOR DEL PROYECTO

ING. JUAN CASTRO

DIRECTOR DE LA CARRERA

DR. FREDDY JARAMILLO

SECRETARIO ACADÉMICO