

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO EXPERIMENTAL DE UN
VEHÍCULO ELÉCTRICO AUTOBALANCEADO UNIPERSONAL VEAU**

**Diego Alejandro Castro Zaldúa
Jhon Sebastián Peña Delgado**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2011**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO EXPERIMENTAL DE UN
VEHÍCULO ELÉCTRICO AUTOBALANCEADO UNIPERSONAL VEAU**

**Diego Alejandro Castro Zaldúa
Jhon Sebastián Peña Delgado**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero mecánico**

**Director
CARLOS BORRAS PINILLA
Doctor, Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2011**

A mi padre, Pedro Castro, por su apoyo y consejo oportuno.
A mi madre, Luz Mery Zaldúa, por su enorme confianza en mí y por ser el motor de mis proyectos, no conoce límites cuando se trata de sus hijos.
A mis hermanos Andrés, Lina, Sara y Angelita que me contagian a diario con su inmensa alegría y quienes sin saberlo me fuerzan a mejorar en todos los aspectos de mi vida.

A Yolimar, por su amor desmedido y quien me acompaña día a día en la extensa tarea de ser mejor.

A mi familia, primos Castro, Cifuentes, Zaldúa, tíos, abuelos, Ana Judith, Vivi y
A mis amigos, Jhon, María Fernanda, Nicolás, Javier, Germán, Ana maría, Raúl, Marco, Felipe, Jimmy, Moisés, Johana, Tato, Ricardo, Olga, Melisa, Claudia y Nancy entre otros, que me han acompañado en las diferentes etapas de mi vida, los hago partícipes de mis logros y alegrías, espero se adueñen de ellos como si fueran propios. No sería tan feliz sin por lo menos uno de los momentos compartidos con cada uno de ellos.

Diego Castro

A mi padre Pedro Peña por confiar en mis capacidades, por impulsarme a luchar por mis sueños, enseñarme a ser un gran deportista y el valor de la perseverancia para conseguir lo que quiera y llegar a donde sea, porque siempre fui un orgullo para él.

A mi madre Gladys Delgado, que es mi razón de vivir, por darme su apoyo incondicional, porque nos enseñó cómo enfrentar los problemas de la vida e infundió grandes valores, porque ha entregado su vida a nosotros sus hijos, y porque sé que nadie me ama más que ella, este triunfo es por ella y para ella, la amo con toda mi alma.

A mis hermanos Julián y Mitzi, para los que he sido un buen ejemplo, que con su compañía han alegrado mi vida y han ayudado a superar los momentos más difíciles, que son mi soporte en cualquier circunstancia y son mi razón de vivir, y porque la promesa de estar juntos por toda la eternidad, me da alegría y tranquilidad.

A Dios porque ha reflejado su gran amor en mi hermosa familia de la que estoy orgullosamente feliz, y con sus enseñanzas me ha dado herramientas para enfrentar momentos difíciles, además ha puesto personas maravillosas junto a mí, para poder experimentar su compañía aquí en la tierra.

A mis amigos Diego Alejandro Castro que lo considero mi hermano, y será mi socio en todo lo que emprenda de aquí en adelante, porque pude aprender un poco de su abundante creatividad para solucionar problemas.

A Sebastián Miranda, a Oscar Moreno, Cristian Celis, Julián Vega que aunque estén lejos serán mi mayor patrimonio, les agradezco por alegrar mi vida.

A Martín Delgado, Carmen Delgado y mi abuelito Bernardo Delgado que me han demostrado el verdadero amor.

Jhon Peña

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander.

Al profesor Carlos Bórras por confiar en nosotros el desarrollo de este proyecto e incentivarnos a la investigación y al desarrollo de temas novedosos en la UIS.

Al profesor Omar Gélvez por motivarnos en el desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN	26
ANTECEDENTES.....	28
MARCO TEÓRICO	37
1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	66
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	66
1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	67
1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	67
1.3.1 Objetivo General	67
1.3.2 Objetivos Específicos	68
2 MODELO ESTRUCTURAL DEL VEAU COMO SISTEMA DE DINAMICO Y REQUERIMIENTOS DE DISEÑO PARA SU CONTROL	70
2.1 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO	71
2.2 PARTE OPERATIVA	72
2.2.1 La Planta Dinámica	73
2.2.2 Sensores	74
2.2.3 Características de selección de los sensores	80
2.2.4 Selección del sensor de inclinación.....	84
2.2.5 Selección del Giroscopio.....	102
2.2.6 Actuadores	107
2.3 PARTE DE CONTROL	108
2.3.1 Controlador	109
2.3.2 Pre actuador.....	110
2.4 PUENTE H.....	110
2.4.1 Integrado L298N.....	112
2.4.2 Puente H con Transistores MOSFET	114
3 MODELO MATEMATICO	118
3.1 MODELAMIENTO Y ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL VEAU.....	118
3.2 LINEALIZACION DEL SISTEMA	126

3.3	DESACOPLE DE SUBSISTEMAS INCLINACION-GIRO	128
3.4	FUNCION DE TRANSFERENCIA	130
3.5	SIMULACION DEL SISTEMA DINAMICO	132
3.6	REQUERIMIENTOS TECNICOS.....	137
4	CONTROL PID.....	139
4.1	INTRODUCCION.....	139
4.2	EL PRINCIPIO DE REALIMENTACION	139
4.3	CONTROL ON-OFF.....	140
4.4	CONTROL PROPORCIONAL	141
4.5	ERROR ESTACIONARIO.....	142
4.6	ACCIÓN INTEGRAL.....	143
4.7	ACCIÓN DERIVATIVA.....	143
4.8	CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO PID	144
4.9	ESTABILIZACIÓN DEL SISTEMA.....	145
5	IMPLEMENTACIÓN	148
5.1	PARAMETROS DE CONTROL	148
5.1.1	Compensación de la inclinación con giroscopio	149
5.1.2	Parámetros del <i>PID – G</i>	149
5.1.3	Secuencia de control.....	151
5.2	IMPLEMENTACION DE LOS SENSORES.....	152
5.2.1	Ubicación	152
5.2.2	Filtrado y prueba de los sensores	153
5.3	SINTONIZACIÓN DEL SISTEMA	158
5.3.1	Procedimiento para modificar y visualizar los valores	158
6	DISEÑO ESTRUCTURAL DEL VEAU	160
6.1	BASTIDOR DEL VEHÍCULO	162
6.2	MECANISMO DE DESLIZAMIENTO.....	165
6.2.1	Soportes.....	166
6.2.2	Tubos Riel.....	168
6.2.3	Rodillos	171
6.3	SOPORTE DE LAS BATERÍAS.....	175
6.4	SISTEMA DE POTENCIA Y TRANSMISIÓN.....	178

6.4.1	Motor DC.....	178
6.4.2	Eje.....	181
6.4.3	Chumacera.....	187
6.4.4	Manzana de freno de disco.....	188
6.4.5	Acople entre el eje y la manzana.....	189
6.4.6	Buje entre manzana y eje.....	192
6.4.7	Rueda de bicicleta.....	194
6.5	SILLA.....	196
6.5.1	Silla.....	196
6.5.2	Posa Pies.....	196
6.6	ENSAMBLE COMPLETO DEL VEAU.....	197
7	SISTEMA DE CONTROL.....	198
7.1	SISTEMA DE CONTROL EMBEBIDO.....	198
7.1.1	CARACTERÍSTICAS.....	198
7.2	MICROCONTROLADOR.....	199
7.2.1	MICROCONTROLADOR ATMEGA 1280 DE ATMEL.....	201
7.2.2	Características del Arduino.....	203
7.3	PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR.....	209
7.3.1	Software ARDUINO.....	209
7.3.2	Funciones implicadas en el control.....	213
7.3.2.1.	Declarar librerías.....	213
7.3.2.2.	Declaración de variables: en C++.....	214
7.3.2.4.	Inicializar la comunicación serial.....	216
7.3.2.5.	Estructura del programa.....	216
7.3.2.6.	Función (VOID) SETUP.....	217
7.3.2.7.	Función P_VA.....	217
7.3.2.8.	Función READREGISTER.....	217
7.3.2.9.	Función WRITEREGISTER.....	218
7.3.2.10.	Función P_VG.....	218
7.3.2.11.	Función CAL_ANGLE.....	218
7.3.2.12.	Funciones de interrupción.....	221
7.4.	CONTROL POR INTERRUPCIONES.....	223

7.4.2. Programación de la interrupción	226
7.5. COMUNICACIÓN SPI.....	228
7.5.2. Especificaciones del BUS	229
8. PRUEBAS	232
8.3. MODELO DE PRUEBAS 1	232
8.4. MODELO DE PRUEBAS 2	234
8.5. MODELO DE PRUEBAS 3	235
8.6. MODELO DE PRUEBAS 4	236
8.7. MODELO DE PRUEBAS 5	238
8.8. MODELO DE PRUEBAS 6	240
8.9. MODELO FINAL	243
8.10. REUMEN DE LAS PRUEBAS	244
9. CONCLUSIONES.....	246
10. RECOMENDACIONES	249
BIBLIOGRAFÍA.....	250
ANEXOS	253

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos Segway i2 y x2.	29
Tabla 2. Características de las versiones de Trevor Blackwell.	32
Tabla 3. Tipos de encapsulados para elementos electrónicos.	83
Tabla 4. Descripción de los pines g-Select y de los rangos y sensibilidades correspondientes.	90
Tabla 5. Parámetros de diseño del acelerómetro.	91
Tabla 6. Descripción de los pines del acelerómetro MMA7260.	92
Tabla 7. Parámetros de diseño del acelerómetro.	95
Tabla 8. Descripción de los pines acelerómetro ADXL320.	96
Tabla 9. Tabla de selección del acelerómetro	97
Tabla 10. Características principales del ADIS16203.	99
Tabla 11. Descripción de pines ADIS16203.	100
Tabla 12. Parámetros principales del inclinómetro.	102
Tabla 13. Características principales el giroscopio LISY300AL	104
Tabla 14. Características principales del giroscopio IDG500	106
Tabla 15. Tabla de de motores DC.	108
Tabla 16. Características principales de los transistores MOSFET utilizados.	114
Tabla 17. Parámetros principales del VEAU.	120
Tabla 18. Parámetros físicos aproximados del VEAU	130
Tabla 19. Constantes del control PD, y parámetros del sistema de control.	136
Tabla 20. Características Bastidor.	165
Tabla 21. Características Soporte Tubo Riel.	168
Tabla 22. Características Tubo Riel.	171
Tabla 23. Características del Rodillo	175
Tabla 24. Características del Soporte de Baterías.	178
Tabla 25. Características del Motor MATSUHITA.	179
Tabla 26. Características del Motor BANEBOTS.	180
Tabla 27. Torques requeridos por cada motor para diferentes inclinaciones.	181

Tabla 28. Características del Eje-Acople.	187
Tabla 29. Características de las Chumaceras	188
Tabla 30. Características de las manzanas.	189
Tabla 31. Características del acople eje-manzana.	192
Tabla 32. Características buje Eje-Manzana.	193
Tabla 33. Características de las Ruedas	195
Tabla 34. Funciones básica de alto nivel del software Arduino.	212
Tabla 35 Resumen de funciones.	222
Tabla 36. Resumen de las pruebas	245

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Segway i2 y x2 usados por Policías Colombianos.	28
Figura 2. Segway P.U.M.A.	30
Figura 3. Trevor Blackwell.	31
Figura 4. JOE. Fuente [2].	33
Figura 5. The DIY Segway.	33
Figura 6. The Two Wheel Deal.	34
Figura 7. Toyota Winglet TP..	35
Figura 8. Leonardo Moreno sobre su vehículo autobalanceado	36
Figura 9. Rotor y estator.	38
Figuras 10. Rotor tipo 1.	39
Figura 11. Rotor tipo 2. Fuente www.todorobot.com.ar	40
Figuras 12. Estator. Fuente www.todorobot.com.ar	40
Figura 13. Componentes básicos presentes en un microcontrolador,	43
Figura 14. Arduino Duemilanove. Fuente www.arduino.cc	44
Figura 15. Arduino MEGA. Fuente www.arduino.cc .	44
Figura 16. Esquema y configuración de un opto-acoplador 4N25.	47
Figura 17, Integrado 74LS04P, fotografía y representación esquemática.	47
Figura 18. Esquema de un amplificador operacional.	48
Figura 19. Representación Física de un Amplificador Operacional.	49
Figura 20. Filtros Pasa-Bajos de primer y cuarto orden, respectivamente.	51
Figura 21. MOSFET de agotamiento de canal N.	52
Figura 22. MOSFET de agotamiento de canal P	53
Figura 23. MOSFET de enriquecimiento de canal N	53
Figura 24. MOSFET de enriquecimiento de canal P	54
Figura 25. Diferentes encapsulados de MOSFET de Potencia	54
Figura 26. Ubicación de los conmutadores o transistores, formado una H	55

Figura 27. Flujo de la corriente a través de los conmutadores o transistores y el motor.	56
Figura 28. Los interruptores reemplazados por transistores MOSFET dentro del puente H y la circulación de corriente para lograr los dos sentidos de giro.	57
Figura 29. Señal de PWM a la que se le ha cambiado el ciclo de trabajo.	59
Figura 30. Control de velocidad con el PWM.	59
Figura 31. Estructura básica de un Sistema de control en lazo cerrado.	71
Figura 32. Elementos estructurales del VEAU.	72
Figura 33. Planta dinámica de pruebas	74
Figura 34. Ángulos de inclinación que permite leer un IMU.	75
Figura 35. Descomposición de la gravedad en los ejes X, Y.	77
Figura 36. Rotación del vehículo respecto las ruedas.	80
Figura 37. Configuración interna de los acelerómetros de Analog Devices de la serie ADXL250	86
Figura 38. Configuración interna del acelerómetro MMA7260 de freescale	87
Figura 39. Un ácaro cerca de un grupo de engranajes producidos utilizando MEMS.	88
Figura 40. Sistema de segundo orden, base para la construcción de un acelerómetro.	88
Figura 41. Diagrama de bloques simplificado del acelerómetro triaxial MMA7260	89
Figura 42. Vista trimétrica y superior del acelerómetro.	89
Figura 43. Esquema de conexión acelerómetro microcontrolador	93
Figura 44. Acelerómetro montado en PCB.	93
Figura 45. Diagrama de bloques simplificado del acelerómetro biaxial ADXL320.	94
Figura 46. Vista superior del acelerómetro ADXL320.	95
Figura 47. Acelerómetro ADXL montado en PCB de Sparkfun.	96
Figura 48. Diagrama de bloques funcional del ADIS16203.	99
Figura 49. Inclinómetro ADIS 16203 montado en PCB.	100
Figura 50. Respuesta de salida Vs orientación.	101
Figura 51. Conexiones en PCB del ADIS16203.	102

Figura 52. Giroscopio LISY300AI	103
Figura 53. Diagrama de bloques giroscopio LISY300AL	103
Figura 54. Diagrama de bloques del IDG-500.	105
Figura 55. Giroscopio IDG 500 montado en PCB, vista superior.	107
Figura 56. Parte de control del sistema dinámico VEAU.	108
Figura 58. Placa de desarrollo Arduino mega, integrando un microcontrolador atmega128 de Atmel	109
Figura 57. Configuración de un puente H.	110
Figura 59. Esquema simplificado de funcionamiento de un puente H.	111
Figura 60. Integrado L298N, representación en diagrama de bloques y fotografía.	112
Figura 61. Arreglo de integrados L298N en paralelo.	113
Figura 62. Puente H con transistores MOSFET.	116
Figura 63. Puente H con transistores MOSFET en paralelo y compuertas lógicas.	116
Figura 64. Esquema del puente H con transistores en paralelo y compuertas lógicas. Fuente: Los autores.	117
Figura 65. Péndulo invertido	118
Figura 66. Grados de libertad del VEAU.	119
Figura 67. Diagrama de cuerpo libre del VEAU.	120
Figura 68. Diagrama de cuerpo libre ruedas izquierda y derecha.	121
Figura 69. Diagrama de cuerpo libre plataforma.	123
Figura 70. Vista superior del vehículo.	124
Figura 71. Relación de posición entre la plataforma y las ruedas.	125
Figura 72. Grafica del lugar de las raíces del sistema.	131
Figura 73. Perturbación del sistema, aplicada por el pasajero.	133
Figura 74. Simulación del sistema dinámico, Simulink	133
Figura 75. Bloque subsistema, del sistema dinámico VEAU	134
Figura 76. Sistema de control PD, aplicado al sistema dinámico VEAU.	135
Figura 77. Señal de entrada al sistema, como perturbación.	135
Figura 78.inclinacion del vehículo.	136
Figura 79. Velocidad lineal del vehículo en m/s.	136

Figura 80. Diagrama de bloques del sistema de control de un proceso	140
Figura 81. (A) Característica de un controlador On-Off ideal, (B) con Zona muerta y (C) Histéresis.	141
Figura 82. Característica de un control proporcional, la entrada es el error e y la salida es la señal de control u .	142
Figura 83. Ejemplos de comportamientos control sub amortiguado, control con amortiguamiento crítico y control sobre amortiguado	146
Figura 84. Esquema 1 de la secuencia de control del VEAU.	152
Figura 85. Montaje para la realización de pruebas de los sensores.	154
Figura 86. Ubicación de los sensores en la parte superior del vehículo de pruebas.	155
Figura 87. Etapa de Filtrado Analógico.	155
Figura 88. Acelerómetro en estado estacionario	156
Figura 89. Giroscopio en estado estacionario.	156
Figura 90. Acelerómetro en movimiento oscilatorio leve	157
Figura 91. Giroscopio en movimiento oscilatorio leve	157
Figura 92. Representación del VEAU en SolidWorks.	161
Figura 93. Bastidor junto con los componentes. Representación hecha en SolidWorks.	162
Figura 94. Fotografía de una de las barras.	163
Figura 95. Representación en Ansys de las barras de la estructura base, Análisis deformación y esfuerzos respectivamente.	164
Figura 96. Mecanismo de deslizamiento. Representación hecha en SolidWorks	165
Figuras 97. Representación del soporte en SolidWorks y Fotografía, respectivamente.	166
Figura 98. Representación en Ansys de los soportes de los tubos riel, Análisis deformación y esfuerzos respectivamente.	167
Figura 99. Tubo Riel del mecanismo de deslizamiento. Representación hecha en SolidWorks.	168
Figura 100. Fotografía Tubo Riel del mecanismo de deslizamiento.	169

Figura 101. Representación en Ansys de los Tubos Riel, Análisis deformación y esfuerzos respectivamente.	170
Figura 102. Rodamientos usados en los rodillos.	172
Figura 103. Rodillo. Representación hecha en SolidWorks.	172
Figura 104. Fotografía de un conjunto de rodillos.	173
Figura 105. Representación en Ansys de un Rodillo, Análisis deformación y esfuerzos respectivamente.	174
Figura 106. Soporte Baterías junto con sus componentes más cercanos. Representación hecha en SolidWorks.	175
Figura 107. Soporte Baterías. Representación hecha en SolidWorks.	176
Figuras 108. Fotografía Soporte Baterías	176
Figura 109. Representación en Ansys del Soporte de las Baterías, Análisis deformación y esfuerzos respectivamente.	177
Figuras 110. Representación en SolidWorks y Fotografía de uno de los motores usados en el modelo de pruebas.	179
Figura 111. Fotografía del motor BANEBOTS, usado en el montaje final del VEAU.	180
Figura 112. Diagrama de fuerzas, cortante y momentos sobre el eje en la sección de la chumacera	183
Figura 113. Diagrama de fuerzas, cortante y momentos sobre el eje en la sección de la cuña	184
Figura 114. Eje con acople rígido, Representación hecha en SolidWorks y fotografía.	185
Figura 115. Representación en Ansys del Eje Acople-Motor, Análisis deformación y esfuerzos respectivamente.	186
Figura 116. Representación el SolidWorks y Fotografía de una de las chumaceras.	188
Figuras 117. Representación el SolidWorks y Fotografía de una de las Manzanas.	189
Figuras 118. Representación el SolidWorks y Fotografía de Acople Eje-Manzana	190

Figuras 119. Representación en ANSYS del Acople Eje-Manzana, Análisis deformación y esfuerzos respectivamente.	191
Figuras 120. Representación el SolidWorks y Fotografía de uno de los bujes.	193
Figura 121. Representación el SolidWorks y Fotografía de una de las Ruedas	194
Figura 122. Fotografías del montaje del subconjunto, transmisión de potencia.	195
Figura 123. Fotografía de la estructura tubular que soporta la silla.	196
Figura 124. Ensamble del prototipo de vehículo autobalanceado VEAU	197
Figura 125. Estructura básica de los microcontroladores.	200
Figura 126. Placa de desarrollo Arduino mega.	203
Figura 127. Transformador y batería con conectores machos de 2.1 mm, alimentación externa del Arduino.	204
Figura 128. Esquemático y asignación de pines de la tarjeta Arduino.	209
Figura 129. Entorno del software Arduino. Fuente: los autores	210
Figura 130. Sistema de control de lazo cerrado básico, con las funciones de cada bloque que lo compone.	213
Figura 131. Caracterización de pines del Arduino Mega.	215
Figura 132. Filtro implementado para la obtención del ángulo real.	219
Figura 133. Diagrama de bloques de la estructura del algoritmo de control implementado	224
Figura 134. Control sin interrupciones.	225
Figura 135. Control con interrupciones	225
Figura 136. Esquema de comunicación SPI múltiple.	229
Figura 137, envío de datos del microcontrolador al inclinómetro	230
Figura 138. Esquema de comunicación entre Arduino y inclinómetro.	231
Figura 139. Modelo de pruebas 1, carrito de balsa.	233
Figura 140. Fotografías del modelo de pruebas 1, ensamble total.	233
Figura 141. Fotografía del modelo de pruebas 2.	234
Figura 142. Fotografías del modelo de pruebas 3, péndulo invertido.	235
Figura 143. Fotografías del modelo de pruebas 4.	237

Figura 144. Fotografías del modelo de pruebas 5	239
Figura 145. Fotografías del modelo de pruebas 6.	241
Figura 146. Fotografías del modelo de pruebas 6, modulo de electrónica.	241
Figura 147. . Fotografías de los autores del proyecto, como pasajeros en el modelo de pruebas 6	242
Figura 148. Fotografía del modelo final.	243

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. DATASHEET INCLINOMETRO ADIS16203 DE ANALOG DEVICES.	252
ANEXO B. DATASHEET DEL MICROCONTROLADOR ATMEGA 1280.	257
ANEXO C. CODIGO FUENTE DEL CONTROLADOR EN ARDUINO.	263
ANEXO D. COMUNICACIÓN SPI CON INCLINOMETRO ADIS16203.	274
ANEXO E. RESUMEN DEL DATASHEET GIROSCOPIO IDG 500.	278
ANEXO F. RESUMEN DATASHEET GIROSCOPIO LISY300AL.	283

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO EXPERIMENTAL DE UN VEHÍCULO ELECTRICO AUTOBALANCEADO UNIPERSONAL VEAU*.

***Jhon Sebastián Peña Delgado.
Diego Alejandro Castro Zaldúa*****

Palabras Clave: Autobalanceado, control, capacidades disminuidas, eléctrico.

Resumen

Este Documento presenta la fase inicial del desarrollo de un Vehículo Eléctrico Autobalanceado Unipersonal, el cual 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 un filtro PID, el sistema automático acciona los motores acoplados a cada una de las ruedas, de acuerdo a la inclinación que el usuario produzca sobre el vehículo.

Este vehículo es el primero de este tipo de dispositivos en el país, por lo que fue fundamental realizar un análisis dinámico utilizando herramientas computacionales de simulación como matlab- simulink, para poder conocer el comportamiento, y variables de estado que definen el control del vehículo, este análisis nos permitió hacer una selección de los dispositivos que componen el hardware que al integrarlo con el software, se creó una unidad de control robusta confiable y eficiente.

El objetivo final del proyecto es crear un vehículo que tenga un impacto favorable respecto a los problemas de tráfico y contaminación que se presentan en las grandes ciudades, además este vehículo es una solución directa a los problemas de movilidad que tienen un gran porcentaje de personas que presentan capacidades motoras disminuidas, como personas que han sufrido lesiones de medula espinal o accidentes.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Carlos Bórras Pinilla.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PROTOTYPE OF A PROTOTYPE OF A VEHICLE ELECTRIC EXPERIMENTAL SELF-BALANCING UNPERSONAL VEAU*

***Jhon Sebastián Peña Delgado.
Diego Alejandro Castro Zaldúa*****

KEY WORDS: Auto balanced, control, diminished capacity, electric.

ABSTRACT

This document presents the initial development phase about an electric auto balanced vehicle for one person of one shaft. It has a main characteristic: the use of two concentric wheels (parallel), one on each side, the system generates a state of unstable equilibrium, which is controlled by the implementation of a PID filter; also, the system automatically activates the combined motors each of the wheels, according to the inclination that the user produces in the vehicle.

This vehicle is the first type of devices in the country, that is why, it was fundamental to realize a dynamic analysis using the development of the software by using mathematical tools as matlab- simulink, with the objective of knowing the behavior and variable of state that define the control of the vehicle. This analysis allowed to do a selection of the devices that compose the hardware, when it was integrated with the software, it developed a reliable and efficient robust control unit.

The final aim of the project is to create a vehicle that it has a beneficial impact as regards the problems of traffic and pollution that the big cities are presenting right now. Also, this vehicle is a direct solution to the problems of mobility because it exists a big percentage of people that they present motor diminished skills such as: people that they have had serious injuries of spinal cord or in common accidents.

* Work Degree

** Faculty Physic Mecanic. Mecanic Engineer School. Director: Carlos Bórras Pinilla.

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas que se presentan en las grandes ciudades están relacionados con la industria del transporte, entre estos se encuentran la gran cantidad de tráfico y contaminación que esta genera, ya que los automóviles que funcionan con motores de combustión interna, aportan considerables partículas contaminantes al ambiente, llevando al colapso del tráfico y empeorando ampliamente la calidad del aire en las ciudades, produciendo graves enfermedades, disminuyendo la calidad de vida de los ciudadanos.

Dentro de las posibles alternativas de solución se encuentran la aplicación de energía eléctrica en los vehículos, dotándolos de sistemas electrónicos que permiten utilizar la energía de manera eficiente, estas nuevas tecnologías son impulsadas por los altos costos del petróleo. Ahora es más común ver en las grandes ciudades del mundo vehículos impulsados por energía eléctrica, enfocados a tramos cortos y con reducida capacidad de carga (una o dos personas), debido a la menor autonomía en comparación a los vehículos que funcionan con motores de combustión interna.

En Colombia los vehículos eléctricos no han penetrado el mercado ampliamente, debido a que un nuevo producto de gran impacto requiere apoyo político y social. En Colombia el vehículo utilizado ampliamente para fácil transporte y movilidad en tramos cortos es la motocicleta, un vehículo que produce altos índices de accidentalidad en el país.

En la actualidad se está utilizando un vehículo eléctrico unipersonal penetrando el mercado del transporte en tramos cortos. Es un vehículo que funciona en base al péndulo invertido lineal, el vehículo presenta dos ruedas paralelas montando sobre estas una plataforma, donde el conductor va de pie, el equilibrio es mantenido por la acción de los motores eléctricos y un sistema de control elaborado. Algunas de las ventajas de este vehículo son, ocupa el

mismo espacio que una persona, el manejo del vehículo es sencillo y requiere de poco tiempo para aprenderlo manejar.

Además del impacto favorable que presenta este vehículo respecto a los problemas de tráfico y contaminación, este vehículo es una solución directa a los problemas de movilidad que tienen un gran porcentaje de personas que presentan capacidades motoras disminuidas, como personas que han sufrido lesiones de medula espinal y accidentes. Este trabajo se enfocó al diseño y construcción de un prototipo de vehículo eléctrico autobalanceado para personas con capacidades disminuidas motoras, además de presentar una alternativa a los problemas ecológicos y de transporte ya mencionados.

ANTECEDENTES

Este tipo de vehículo tiene básicamente un único exponente, denominado Segway [1], el cual fue el primer vehículo comercial de esta categoría. A la fecha, existen algunos trabajos similares entre sí, orientados al control de un vehículo inestable basados en ese primer diseño. A continuación se describirán brevemente estos diseños y sus características.

SEGWAY [1]

En el año 2001, el desarrollador estadounidense Dean Kamen presentó un dispositivo de transporte revolucionario para la época, cuyo funcionamiento está basado en el equilibrio natural de las personas: el Segway PT.



Figura 1. Segway i2 y x2 usados por Policías Colombianos.

Fuente: <http://villanoticias.blogspot.com/2008/12/imagen-del-dia-las-motos-segway-hacen.html>

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, 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.

En la tabla1 se muestran las principales características de los principales modelos comerciales que tiene Segway el i2 y x2. Ver figura 1.

Modelo	Segway i2	Segway x2
Peso	47.7 [kg]	54.4 [kg]
Tamaño Ruedas	19"	33"
Tamaño Base	48x63 [cm]	53x84 [cm]
Velocidad máxima	20 [km/hr]	20 [km/hr]
Autonomía	38 [km]	19 [km]
Motores	Brushless	Brushless

Tabla 1. Datos Segway i2 y x2.

Sin embargo, este vehículo no logró el éxito comercial esperado, principalmente por el alto costo de acceder a una unidad (alrededor de US\$5.000 en EEUU). Así, dichos vehículos pasaron a aplicaciones específicas, siendo un popular reemplazo de los caddies en las canchas de golf, o en aplicaciones de empresas, como lo es el marketing o las rondas de guardias de seguridad. También logró penetrar en un grupo de usuarios de elite cuyo nivel de ingresos les permite acceder a este tipo de tecnologías. En el primer semestre del 2009, Segway Inc. presentó un diseño experimental en conjunto con General Motors, denominado proyecto P.U.M.A¹. Este proyecto, que se observa en la Figura 2, busca posicionar definitivamente este tipo de vehículos como una solución real de transporte urbano dotando al diseño original de ciertas características que lo hacen más amigable. En particular, este vehículo se basa en el diseño clásico, pero permite transportar dos pasajeros sentados, haciéndolo más parecido a un auto. El prototipo incluye ruedas extra, las que se utilizan en las detenciones del vehículo, pero en sus desplazamientos se sigue equilibrando dinámicamente sobre las dos ruedas centrales. Este vehículo puede, además, ser una gran oportunidad para los discapacitados, ya

¹ www.segway.com/puma

que permite desplazamientos naturales para una persona (inclinándose), pero esta vez sin el riesgo de caerse.



Figura 2. Segway P.U.M.A.
Fuente: www.segway.com/puma

De este modo, a pesar del aparente poco éxito del vehículo, se generó una interesante área de desarrollo de vehículos personales que llamó la atención de muchos desarrolladores, generando una serie de prototipos que emulan el equilibrio humano basados en estructuras análogas al péndulo invertido, ampliando la definición del vehículo como un modelo en particular de una compañía a una categoría de medio de transporte.

BALANCING SCOOTER - TREVOR BLACKWELL

Construido el 2002 por el desarrollador estadounidense Trevor Blackwell y mejorado el año 2005, este vehículo es la principal referencia al momento de buscar alternativas a la versión comercial Segway, sin ser este mismo un

desarrollo con fines de lucro. El funcionamiento es análogo al Segway, pero con menores medidas de seguridad en cuanto a redundancia en el estado del vehículo (no utiliza más de un sensor por variable).



Figura 3. Trevor Blackwell.
Fuente:www.tlb.org/scooter.html

La primera versión realizada (Figura 3), si bien lograba un funcionamiento óptimo, no lograba igualar al Segway, por lo que la versión 2 agregó una serie de mejoras, en particular agrandando el tamaño de las ruedas, logrando así velocidades de casi 25 km/h. En la Tabla 2 se pueden ver las características de ambas versiones realizadas:

Modelo	Versión 1	Versión 2
Peso	40.8 [kg]	31.75 [kg]
Tamaño Ruedas	14"	20"
Velocidad Máxima	14.5 [km/hr]	24 [km/hr]
Motores	CC con imanes	CC con imanes

Tabla 2. Características de las versiones de Trevor Blackwell.

JOE: A Mobile, Inverted Pendulum [2]

Este desarrollo consiste en una versión a escala radio controlada de un vehículo autobalanceado. En este trabajo se presenta el desarrollo del modelo matemático del sistema y una descripción del sistema de control implementado. El vehículo mide 65 cm, pesa 12 kgs y es capaz de inclinarse hasta 30 grados sin caer. Su velocidad máxima es de 1.5 m/s.

THE DIY SEGWAY [3]

Este trabajo fue desarrollado por estudiantes de secundaria de EEUU asesorados por estudiantes del MIT (ver Figura 5). Es un poco más pequeño que los otros desarrollos anteriores, su estructura es una de las más simples existentes, basada íntegramente en aluminio para reducir el peso final.

Utiliza como unidad de procesamiento una placa de desarrollo basada en un microprocesador PIC16F877. Lo interesante es que utiliza dos motores relativamente pequeños (50 W aproximadamente, 337 W en pico) siendo totalmente funcional, pero con restricciones de velocidad, masa e inclinación mayores a otras implementaciones.



Figura 4. JOE. Fuente [2].



Figura 5. The DIY Segway.
Fuente: <http://web.mit.edu/first/segway>

THE TWO WHEEL DEAL [4]

Esta versión ha sido finalizada por 4 estudiantes de la Universidad de Purdue (ver Figura 6). En el trabajo se muestra una implementación desde cero, desarrollando toda la electrónica necesaria para el proyecto. Se realiza además un estudio detallado de factibilidad de patentar el vehículo, intentando diferenciarlo de la competencia directa, el Segway [1].



Figura 6. The Two Wheel Deal.

Fuente: <https://engineering.purdue.edu/ece477/Webs/S08-Grp12/index.html>

TOYOTA WINGLET PT [5]

Esta versión es la segunda versión comercial de este tipo de vehículos (ver Figura 7). Desarrollado por Toyota, cuenta con 3 modelos de diferentes

tamaños, donde destacan las versiones más pequeñas. Éstas se manejan únicamente con la inclinación de los pies. Sin embargo, no apuntan al mismo mercado que el Segway, ya que las velocidades que alcanza son muy bajas (del orden de los 6 km/h), lo que lo hace más adecuado para transportarse dentro de edificios.



Figura 7. Toyota Winglet TP..

Fuente: http://www.toyota.co.jp/en/news/08/0801_1.html

VEHÍCULO AUTOBALANCEADO SOBRE DOS RUEDAS [6]

Este vehículo fue desarrollado por Leonardo Felipe Moreno Bustamante como trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil Electricista de la

Universidad de Chile. Este vehículo fue el primero en ser desarrollado en Sur América. Emplea un control proporcional derivativo.



Figura 8. Leonardo Moreno sobre su vehículo autobalanceado
Fuente: [6].

MARCO TEÓRICO

MOTORES DC²

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.

La principal característica del motor de corriente continua es la posibilidad de regular la velocidad desde vacío a plena carga.

Una máquina de corriente continua (generador o motor) se compone principalmente de dos partes, un estator que da soporte mecánico al aparato y tiene un hueco en el centro generalmente de forma cilíndrica. En el estator además se encuentran los polos, que pueden ser de imanes permanentes o devanados con hilo de cobre sobre núcleo de hierro. El rotor es generalmente de forma cilíndrica, también devanado y con núcleo, al que llega la corriente mediante dos escobillas.

El motor de corriente continua está compuesto de 2 piezas fundamentales que se ilustran en la figura 9.

- Rotor
- Estator

² Fuente www.todorobot.com.ar



Figura 9. Rotor y estator.
Fuente: www.todorobot.com.ar

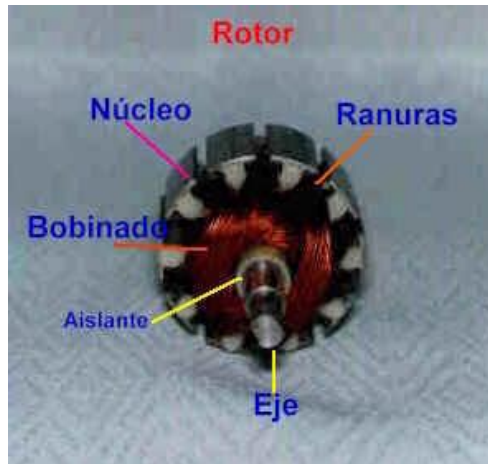
Dentro de éstas se ubican los demás componentes como:

- Escobillas y porta escobillas
- Colector
- Eje
- Núcleo y devanado del rotor
- Imán Permanente
- Armazón
- Tapas o campanas

Rotor

Constituye la parte móvil del motor, proporciona el torque para mover a la carga (ver figura 10). Está formado por:

- Eje: Formado por una barra de acero fresada. Imparte la rotación al núcleo, devanado y al colector.
- Núcleo: Se localiza sobre el eje. Fabricado con capas laminadas de acero, su función es proporcionar un trayecto magnético entre los polos para que el flujo magnético del devanado circule.



Figuras 10. Rotor tipo 1.
Fuente www.todorobot.com.ar

Las laminaciones tienen por objeto reducir las corrientes parásitas en el núcleo. El acero del núcleo debe ser capaz de mantener bajas las pérdidas por histéresis. Este núcleo laminado contiene ranuras a lo largo de su superficie para albergar al devanado de la armadura (bobinado).

- **Devanado:** Consta de bobinas aisladas entre sí y entre el núcleo de la armadura. Estas bobinas están alojadas en las ranuras, y están conectadas eléctricamente con el colector, el cual debido a su movimiento rotatorio, proporciona un camino de conducción conmutado.
- **Colector:** Denominado también conmutador, está constituido de láminas de material conductor (delgas), separadas entre sí y del centro del eje por un material aislante, para evitar cortocircuito con dichos elementos. El colector se encuentra sobre uno de los extremos del eje del rotor, de modo que gira con éste y está en contacto con las escobillas. La función del colector es recoger la tensión producida por el devanado inducido, transmitiéndola al circuito por medio de las escobillas (llamadas también cepillos)

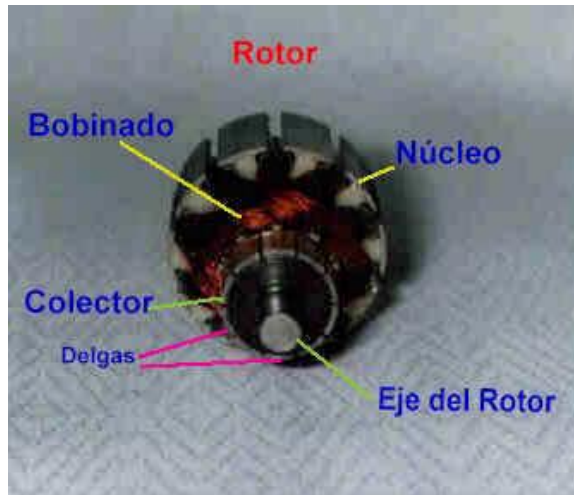


Figura 11. Rotor tipo 2. Fuente www.todorobot.com.ar

Estató

Constituye la parte fija de la máquina. Su función es suministrar el flujo magnético que será usado por el bobinado del rotor para realizar su movimiento giratorio, la figura 11 ilustra el estator de un motor DC.

Está formado por:

- Armazón: Denominado también yugo, tiene dos funciones primordiales: servir como soporte y proporcionar una trayectoria de retorno al flujo magnético del rotor y del imán permanente, para completar el circuito magnético (Ver figura 12).



Figuras 12. Estator. Fuente www.todorobot.com.ar

Imán permanente: Compuesto de material ferro magnético altamente remanente, se encuentra fijado al armazón o carcasa del estator. Su función es proporcionar un campo magnético uniforme al devanado del rotor o armadura, de modo que interactúe con el campo formado por el bobinado, y se origine el movimiento del rotor como resultado de la interacción de estos campos.

Escobillas: Las escobillas están fabricadas de carbón, y poseen una dureza menor que la del colector, para evitar que éste se desgaste rápidamente. Se encuentran albergadas por los porta escobillas. Ambos, escobillas y porta escobillas, se encuentran en una de las tapas del estator.

La función de las escobillas es transmitir la tensión y corriente de la fuente de alimentación hacia el colector y, por consiguiente, al bobinado del rotor.

La función del porta escobillas es mantener a las escobillas en su posición de contacto firme con los segmentos del colector. Esta función la realiza por medio de resortes, los cuales hacen una presión moderada sobre las escobillas contra el colector. Esta presión debe mantenerse en un nivel intermedio pues, de ser excesiva, la fricción desgastaría tanto a las escobillas como al colector; por otro lado, de ser mínima esta presión, se produciría lo que se denomina "chisporroteo", que es cuando aparecen chispas entre las superficies del colector y las escobillas, debido a que no existe un buen contacto.

MICROCONTROLADOR³

Un Microcontrolador es Circuito integrado o chip que incluye en su interior las tres unidades funcionales de un ordenador: CPU, Memoria y Unidades de E/S, es decir, se trata de un computador completo en un solo circuito integrado. Aunque sus prestaciones son limitadas, además de dicha integración, su característica principal es su alto nivel de especialización. Aunque los hay del tamaño de una moneda, lo normal es que sean incluso más pequeños, ya que, lógicamente, forman parte del dispositivo que controlan.

³ http://www.olimex.cl/present.php?page=que_es_un_microcontrolador

Un microcontrolador típico posee en su interior un generador de reloj integrado, una pequeña cantidad de memoria RAM y ROM/EPROM/EEPROM. Para hacerlos funcionar todo lo que se necesita son unos pocos programas de control, alimentación (típicamente 3.3V o 5V) y un cristal de sincronización.

De la Figura 13 observamos, que sin importar el fabricante del microcontrolador, siempre encontraremos que cuenta con:

- Procesador o CPU (Unidad Central de Proceso).
- Memoria RAM para contener los datos.
- Memoria para el programa tipo ROM/EPROM/EEPROM/Flash.
- Líneas de E/S para comunicarse con el exterior.
- Diversos módulos para el control de periféricos (temporizadores, puertos serie y paralelo, CAD: Conversores Analógico/Digital, CDA: Conversores Digital/Analógico, etc.).
- Generador de impulsos de reloj que sincronizan el funcionamiento de todo el sistema.

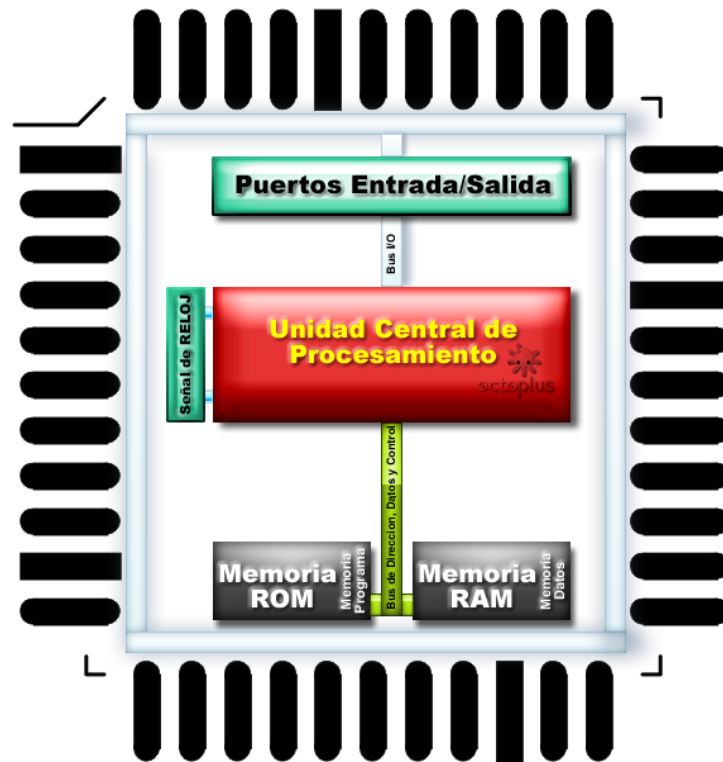


Figura 13. Componentes básicos presentes en un microcontrolador,
Fuente: www.octoplusaz.com

ARDUINO⁴

Arduino es una plataforma de hardware libre basada en una sencilla placa de entradas y salidas simple y un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación Processing/Wiring. Arduino se puede utilizar para desarrollar objetos interactivos autónomos o puede ser conectado a software del ordenador (por ejemplo: Macromedia Flash, Processing, Max/MSP, Pure Data). Las placas se pueden montar a mano o adquirirse. El entorno de desarrollo integrado libre se puede descargar gratuitamente.

Las plataformas Arduino están basadas en los microcontroladores Atmega168, Atmega328, Atmega1280, ATmega8 y otros similares, chips sencillos y de bajo coste que permiten el desarrollo de múltiples diseños.

⁴ www.arduino.cc

Al ser open-hardware, tanto su diseño como su distribución son libres. Es decir, puede utilizarse libremente para el desarrollo de cualquier tipo de proyecto sin haber adquirido alguna licencia. Además en la página www.arduino.cc se puede encontrar una gran cantidad de tutoriales, proyectos pasos a paso y el respaldo de toda una comunidad a través de foros.

En las figuras 14 y 15 se observan dos de las placas ARDUINO más utilizadas, el Arduino Duemilanove y el Arduino MEGA.

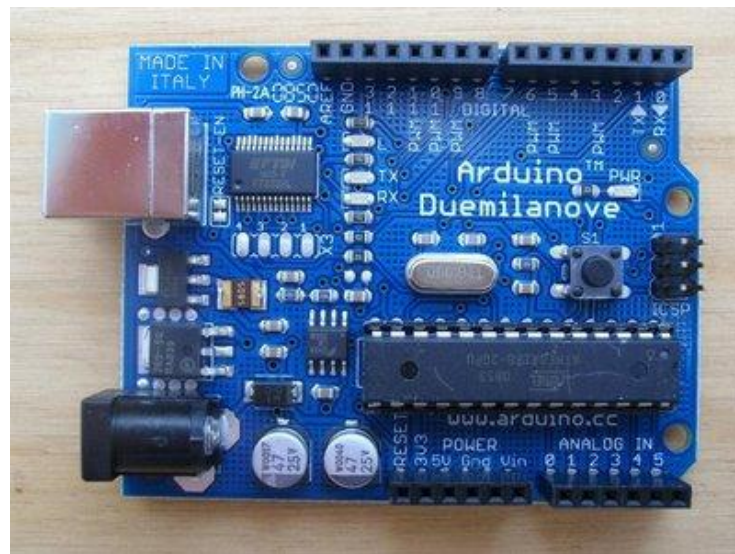


Figura 14. Arduino Duemilanove. Fuente www.arduino.cc

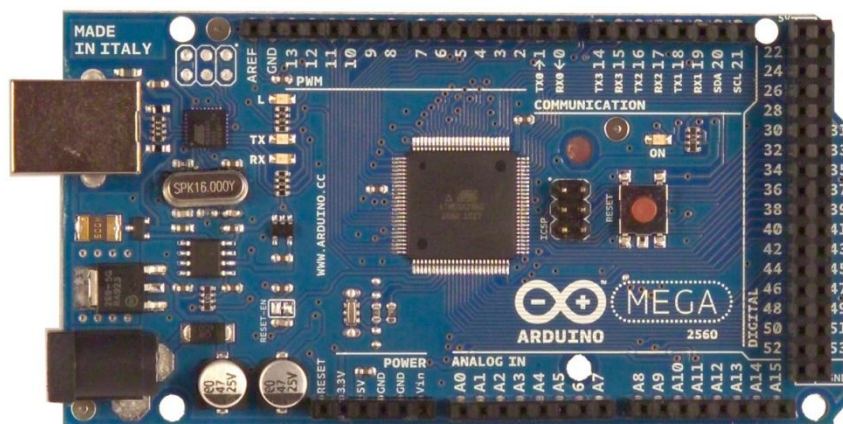


Figura 15. Arduino MEGA. Fuente www.arduino.cc.

El Arduino Mega es 100% compatible con la versión Duemilanove.

El Arduino MEGA utiliza un potente procesador de AVR ATMEGA1280 o AVR ATMEGA 2560 con un amplio espacio de memoria para programar y corre a 16Mhz. Es ideal para proyecto de robótica ya que lo mejor es su elevada cantidad de pines de entrada y salida 54, (14 con PWM) y sus 4 puertos UART por hardware.

Características técnicas:

- Microcontrolador: ATmega1280, 2560.
- Tensión de alimentación: 5V.
- Tensión de entrada recomendada: 7-12V.
- Límite de entrada: 6-20V.
- Pines digitales: 54 (14 con PWM).
- Entradas analógicas: 16.
- Corriente máxima por pin: 40 mA.
- Corriente máxima para el pin 3.3V: 50 mA.
- Memoria flash: 128 KB (4 KB usado por el bootloader).
- SRAM: 8 KB.
- EEPROM: 4 KB.
- Velocidad de reloj: 16 MHz.

OPTO-ACOPLADOR

Un opto-acoplador, también llamado optoaislador o aislador acoplado ópticamente, es un dispositivo de emisión y recepción que funciona como un interruptor excitado mediante la luz emitida por un diodo LED que satura un componente optoelectrónico, normalmente en forma de fototransistor o fototriac. De este modo se combinan en un solo dispositivo semiconductor, un

fotoemisor y un fotorreceptor cuya conexión entre ambos es óptica. Estos elementos se encuentran dentro de un encapsulado que por lo general es del tipo DIP. Se suelen utilizar para aislar eléctricamente a dispositivos muy sensibles.

La figura 16, muestra un opto-acoplador 4N25 formado por un LED y un fototransistor. La tensión de la fuente de la izquierda y la resistencia en serie establecen una corriente en el LED emisor cuando se cierra el interruptor S1. Si dicha corriente proporciona un nivel de luz adecuado, al incidir sobre el fototransistor lo saturará, generando una corriente en R2. De este modo la tensión de salida será igual a cero con S1 cerrado y a V2 con S1 abierto.

Si la tensión de entrada varía, la cantidad de luz también lo hará, lo que significa que la tensión de salida cambia de acuerdo con la tensión de entrada. De este modo el dispositivo puede acoplar una señal de entrada con el circuito de salida, aunque hay que tener en cuenta que las curvas tensión/luz del LED no son lineales, por lo que la señal puede distorsionarse. Se venden opto-acopladores especiales para este propósito, diseñados de forma que tengan un rango en el que la señal de salida sea casi idéntica a la de entrada.

La ventaja fundamental de un opto-acoplador es el aislamiento eléctrico entre los circuitos de entrada y salida. Mediante el opto-acoplador, el único contacto entre ambos circuitos es un haz de luz. Esto se traduce en una resistencia de aislamiento entre los dos circuitos del orden de miles de MΩ. Estos aislamientos son útiles en aplicaciones de alta tensión en las que los potenciales de los dos circuitos pueden diferir en varios miles de voltios.

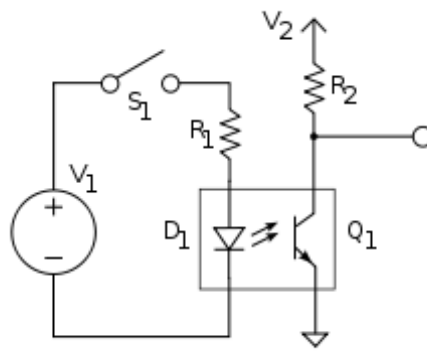


Figura 16. Esquema y configuración de un opto-acoplador 4N25.

INTEGRADO NEGADOR LÓGICO

Un negador lógico consiste en una puerta INVERSORA. Tiene una única entrada y una única salida, y puede convertir una señal verdadera en falsa, efectuando de esta manera la función negación (NOT). Es decir si a la compuerta le llega un 1 lógico (alto o voltaje) en su salida habrá un 0 lógico (bajo o 0 volts), ahora, si en la entrada de la compuerta hay 0l, en su salida se tendrá la salida de un 1.

En la Figura 17 se observa un encapsulado de una compuerta lógica negadora muy común, la 74LS04P y su representación esquemática.

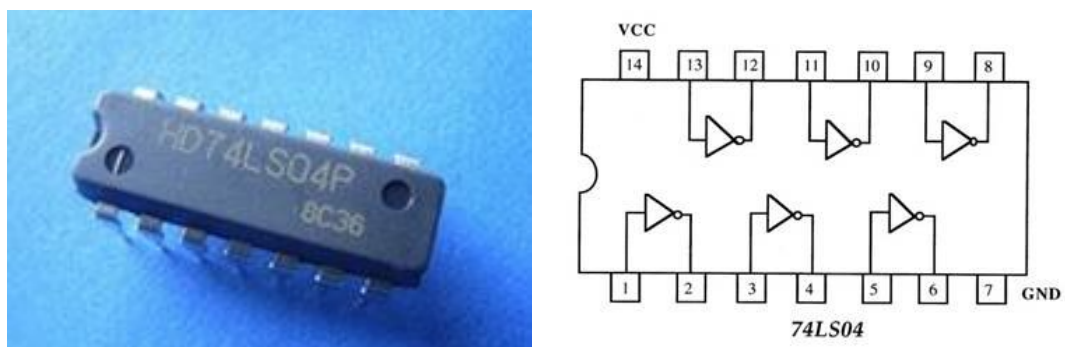


Figura 17, Integrado 74LS04P, fotografía y representación esquemática.
Fuente: <http://store.pchome.com.tw/echannel/S978890.htm>

AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Básicamente el Amp. Op. (Op. Amp.) es un dispositivo amplificador de la diferencia de sus dos entradas, con una alta ganancia, una impedancia de entrada muy alta, (mayor a 1 Mega ohm) y una baja impedancia de salida (de 8 a 20 ohmios).

Con estas características se deduce que las corrientes de entrada son prácticamente nulas y que tiene la característica de poder entregar corriente relativamente alta. En la Figura 18 se ve el símbolo eléctrico de un amplificador operacional.

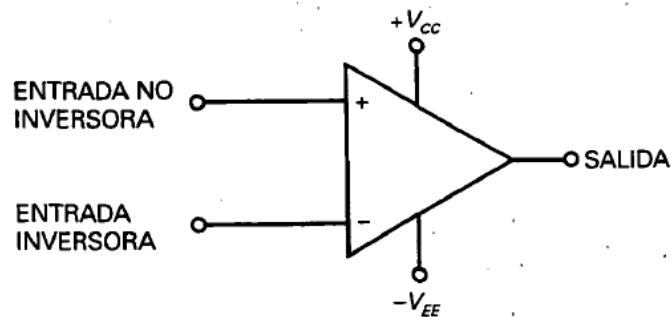


Figura 18. Esquema de un amplificador operacional.

Internamente el Amplificador Operacional contiene un gran número de transistores, resistores, capacitores, etc.

El terminal + es el terminal no inversor.

El terminal - es el terminal inversor

Hay varios tipos de presentación de los amplificadores operacionales, como el paquete dual en línea (DIP) de 8 pines o patitas.

Para saber cuál es el pin 1, se ubica una muesca entre los pines 1 y 8, siendo el número 1 el pin que está a la izquierda de la muesca cuando se pone el integrado como se muestra en la figura 19.

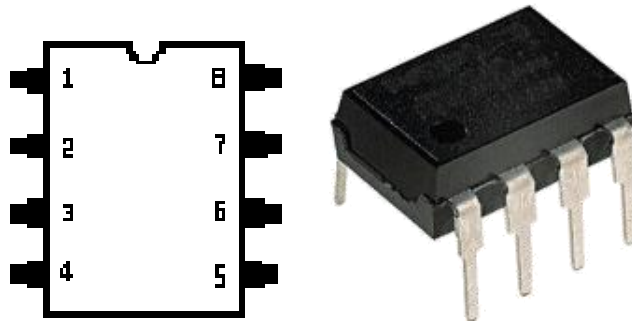


Figura 19. Representación Física de un Amplificador Operacional.
Fuente: <http://aliatron.com/loja/catalog/index.php>

La distribución de los terminales del Amplificador operacional en el Circuito integrado DIP de 8 patillas es:

- pin 2: entrada inversora (-)
- pin 3: entrada no inversora (+)
- pin 6: salida (out)

Para alimentar un amplificador operacional se utilizan 2 fuentes de tensión:

- una positiva conectada al pin 7 y
- otra negativa conectada al pin 4

FILTROS

Un filtro eléctrico o filtro electrónico es un elemento que discrimina una determinada frecuencia o gama de frecuencias de una señal eléctrica que pasa a través de él, pudiendo modificar tanto su amplitud como su fase.

Tipo de filtros:

Filtro paso bajo: Es aquel que permite el paso de frecuencias bajas, desde frecuencia 0 o continua hasta una determinada. Presentan ceros a alta frecuencia y polos a bajas frecuencia.

Filtro paso alto: Es el que permite el paso de frecuencias desde una frecuencia de corte determinada hacia arriba, sin que exista un límite superior especificado. Presentan ceros a bajas frecuencias y polos a altas frecuencias.

Filtro paso banda: Son aquellos que permiten el paso de componentes frecuenciales contenidos en un determinado rango de frecuencias, comprendido entre una frecuencia de corte superior y otra inferior.

Filtro elimina banda: También llamado filtro rechaza banda, atenua banda o filtro Notch, es el que dificulta el paso de componentes frecuenciales contenidos en un determinado rango de frecuencias, comprendido entre una frecuencia de corte superior y otra inferior.

Filtro multibanda: Es que presenta varios rangos de frecuencias en los cuales hay un comportamiento diferente.

Filtro variable: Es aquel que puede cambiar sus márgenes de frecuencia.

Atendiendo a sus componentes constitutivos, naturaleza de las señales que tratan, respuesta en frecuencia y método de diseño, los filtros se clasifican en los distintos grupos que a continuación se indica.

Pueden ser activos o pasivos:

Filtro pasivo: Es el constituido únicamente por componentes pasivos como condensadores, bobinas y resistencias.

Filtro activo: Es aquel que puede presentar ganancia en toda o parte de la señal de salida respecto a la de entrada. En su implementación se combinan elementos activos y pasivos. Siendo frecuente el uso de amplificadores operacionales, que permite obtener resonancia y un elevado factor Q sin el empleo de bobinas.

Los filtros activos se componen de resistores, capacitores y dispositivos activos como Amplificadores Operacionales o transistores.

En un filtro activo la salida puede ser de igual o de mayor magnitud que la entrada, a diferencia de los pasivos.

En la figura 20 se ve la representación de un filtro pasa bajos activos de primer y cuarto orden usando un amplificador operacional.

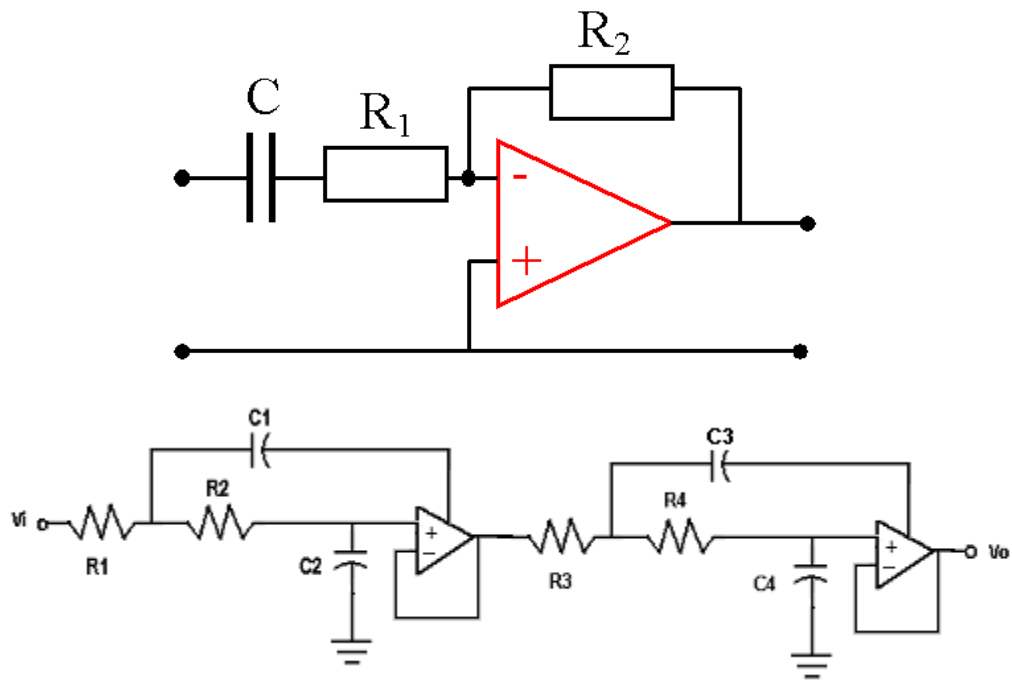


Figura 20. Filtros Pasa-Bajos de primer y cuarto orden, respectivamente.
Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Filtro_activo

TRANSISTORES MOSFET [7]

Un transistor MOSFET es un dispositivo controlado por voltaje, que requiere de una pequeña corriente de entrada. La velocidad de conmutación es muy alta siendo los tiempos de conmutación del orden de los nanosegundos. Los MOSFET tienen problemas de descargas electrostáticas, por lo que su manejo requiere de cuidados especiales. Además, es relativamente difícil protegerlos bajo condiciones de falla por corto circuito.

Los MOSFET son de dos tipos, de agotamiento y de enriquecimiento. Un MOSFET de agotamiento de canal N se forma en un sustrato de silicio de tipo

P, tal y como se muestra en la figura 21, con dos silicios N fuertemente dopados para tener conexiones de baja resistencia. La compuerta está aislada de canal mediante una delgada capa de óxido. Las tres terminales se conocen como compuerta drenaje y fuente. Normalmente el sustrato se conecta a la fuente. El voltaje de compuerta a fuente V_{gs} , puede ser positivo o negativo. Si V_{gs} es negativo, algunos de los electrones del areal del canal n serán repelidos y se creara una región de agotamiento por debajo de la capa de óxido que resultara en un canal efectivo más angosto y en una resistencia de drenaje para la fuente, R_{ds} . Si V_{gs} se hace suficientemente negativo, el canal se agotará totalmente, ofreciendo un alto valor de RDS, y no habrá flujo de corriente de drenaje a fuente, $I_{ds} = 0$. Cuando esto ocurre el valor de V_{gs} se conoce como voltaje de estrechamiento, V_p . Por otra parte, V_{gs} se hace positivo, el canal se ensancha y la corriente I_{ds} aumenta debido a la reducción de R_{ds} . Con un MOSFET de Agotamiento de canal P, las polaridades de V_{ds} , I_{ds} y V_{gs} se invierten.

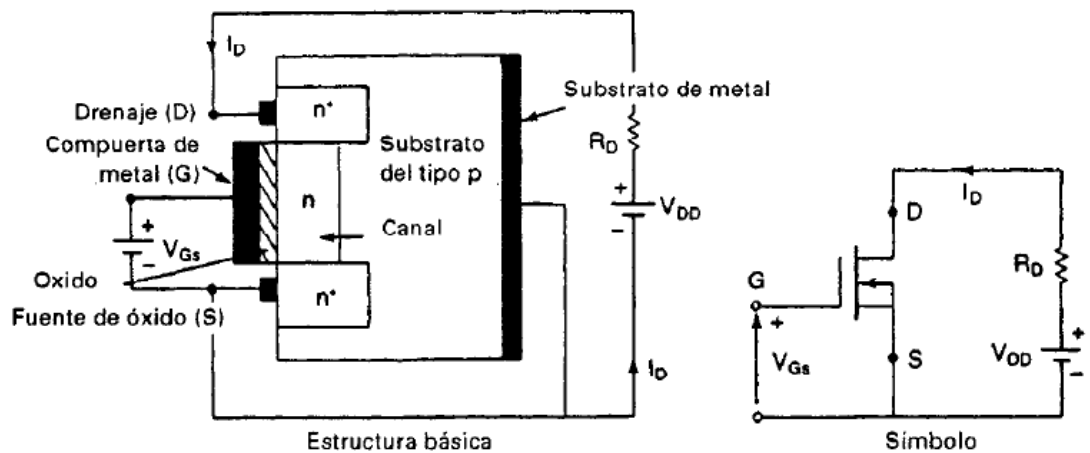


Figura 21. MOSFET de agotamiento de canal N.

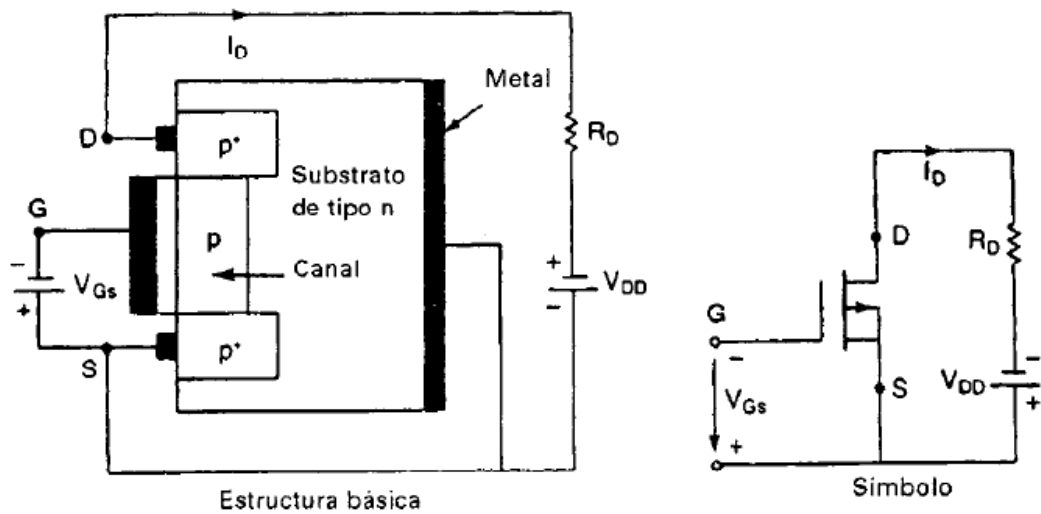


Figura 22. MOSFET de agotamiento de canal P

Un MOSFET de tipo enriquecimiento de canal N, no tiene un canal físico, tal y como se puede observar en la figura 23. Si V_{GS} es positivo, un voltaje inducido atraerá los electrones del sustrato P, y los acumulará en la superficie por debajo de la capa de óxido. Si V_{GS} es mayor que o igual a un valor conocido como voltaje de umbral, V_t , se acumulará un número suficiente de electrones para formar un canal virtual N y la corriente fluirá del drenaje a la fuente. Si se trata de un MOSFET de enriquecimiento de canal P (ver figura 24), las polaridades de V_{ds} , I_{ds} y V_{GS} se invierten. En la figura 25 aparecen varios transistores MOSFET de diferentes tamaños y encapsulados.

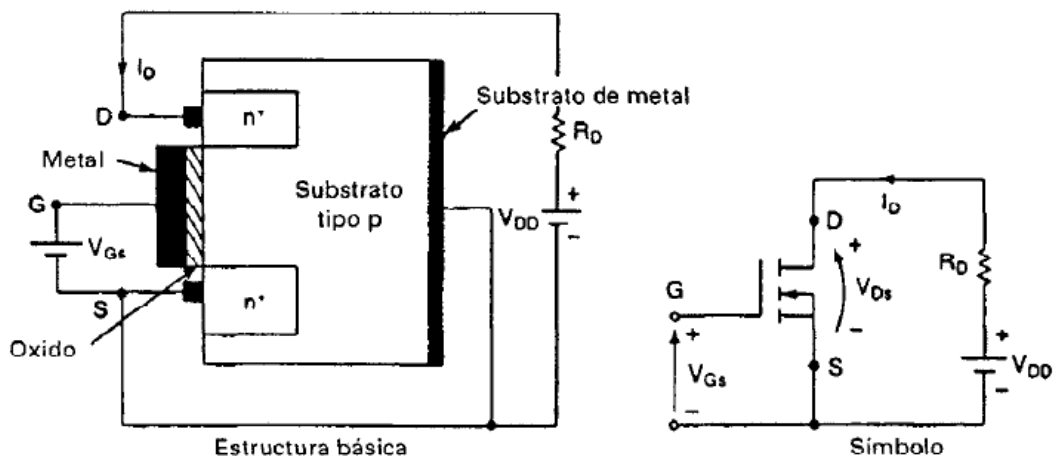


Figura 23. MOSFET de enriquecimiento de canal N

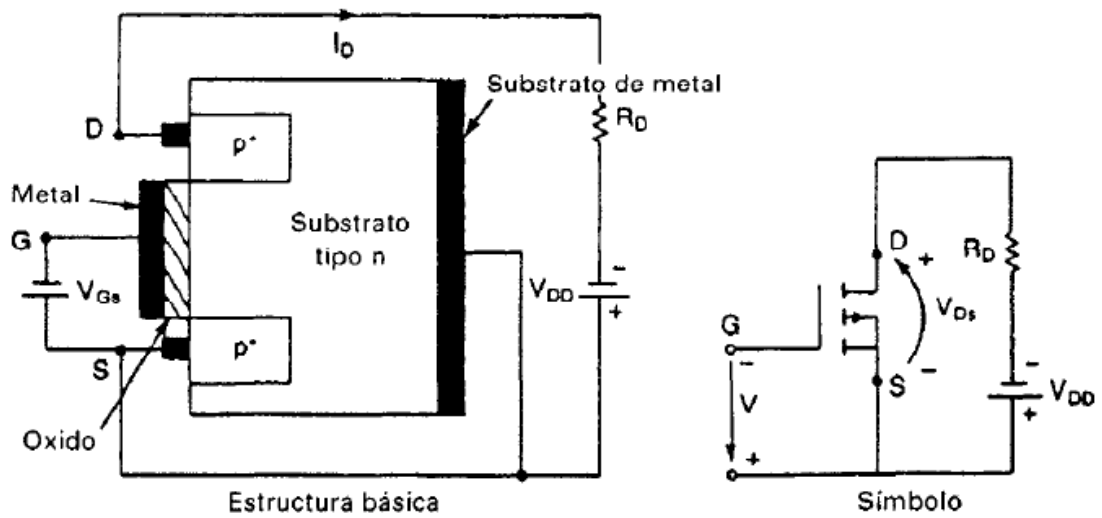


Figura 24. MOSFET de enriquecimiento de canal P

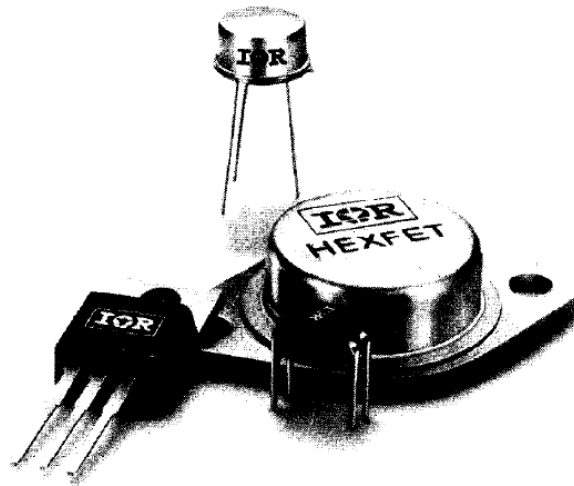


Figura 25. Diferentes encapsulados de MOSFET de Potencia

PUENTE H⁵

Un puente H adopta la letra H, por ello su nombre debido a la forma que presenta dentro de un circuito esquemático simplificado, como el que se ve en la Figura 26. En la barra central se encuentra ubicado el motor y en cada “rama lateral” ascendente o descendente se ubican los conmutadores que, activados de manera apropiada, brindarán al sistema los movimientos necesarios para que el motor utilizado pueda girar en un sentido u otro

⁵ www.neoteo.com

La letra H queda formada por la ubicación de los conmutadores en el circuito.

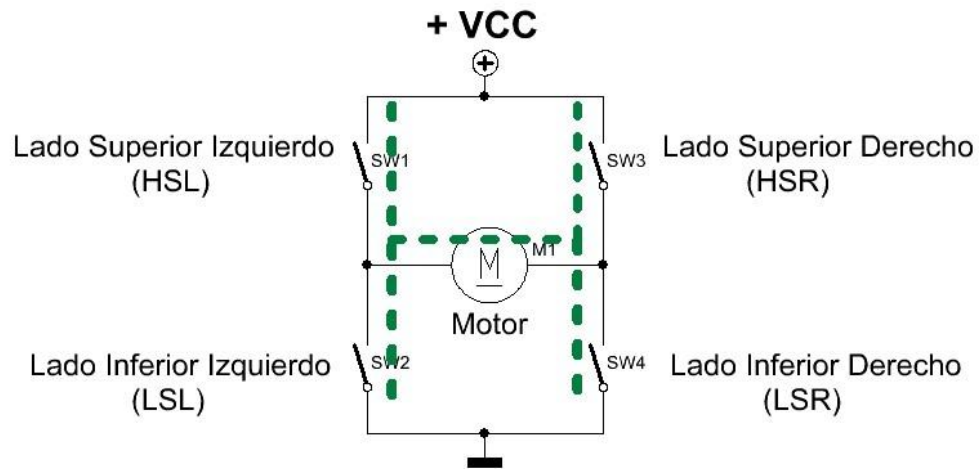


Figura 26. Ubicación de los conmutadores o transistores, formado una H

De acuerdo al apropiado manejo de los conmutadores, obtendremos todos los movimientos sobre el motor. Para conectar el motor y hacerlo girar se deben activar los conmutadores por pares opuestos en lo que respecta a lados y a posición (superior o inferior). Un error en la activación que permita la conexión de elementos superiores e inferiores de un mismo lado provocará una descarga muy rápida y abrupta de la batería que se esté utilizando o, en el peor de los escenarios, destruirá los elementos conmutadores. Como se ve en la Figura 27, para un giro seguro en uno de los dos sentidos, se debe cerrar SW1 y SW4, observando que SW2 y SW3 permanezcan abiertas (líneas rojas). En el caso inverso sería SW2 y SW3 cerradas, mientras que SW1 y SW4 deberán permanecer abiertas (líneas azules).

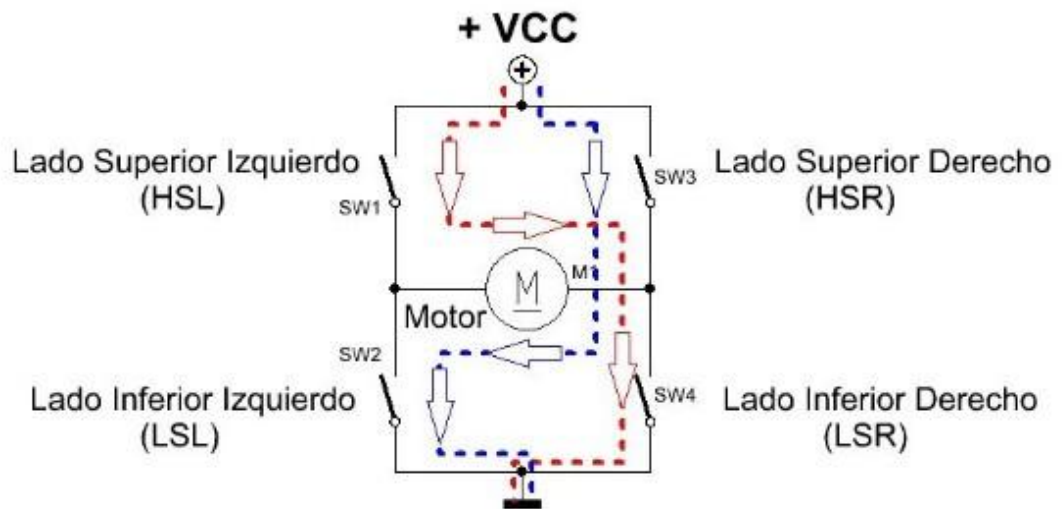


Figura 27. Flujo de la corriente a través de los conmutadores o transistores y el motor.

En la actualidad, para operar motores de CC permitiendo un funcionamiento de giro en ambos sentidos se utilizan, en la mayoría de los casos, circuitos con transistores MOSFET en lugar de los conmutadores genéricos SW1 a SW4 mencionadas con anterioridad. Algunos diseñadores prefieren utilizar transistores de canal P para los lados superiores y de canal N para los inferiores. La ventaja de este concepto de diseño es que las tensiones necesarias para activar los Gates de los transistores de canal P se podrán sacar directamente de la alimentación utilizada para el motor. Si por el contrario se utilizan transistores de Canal N en el lado superior de la H, la tensión necesaria para activar los Gates deberá provenir de un elevador de tensión que funcione por encima del valor nominal de alimentación del motor. Observando la figura 28 se comprende mejor este concepto:

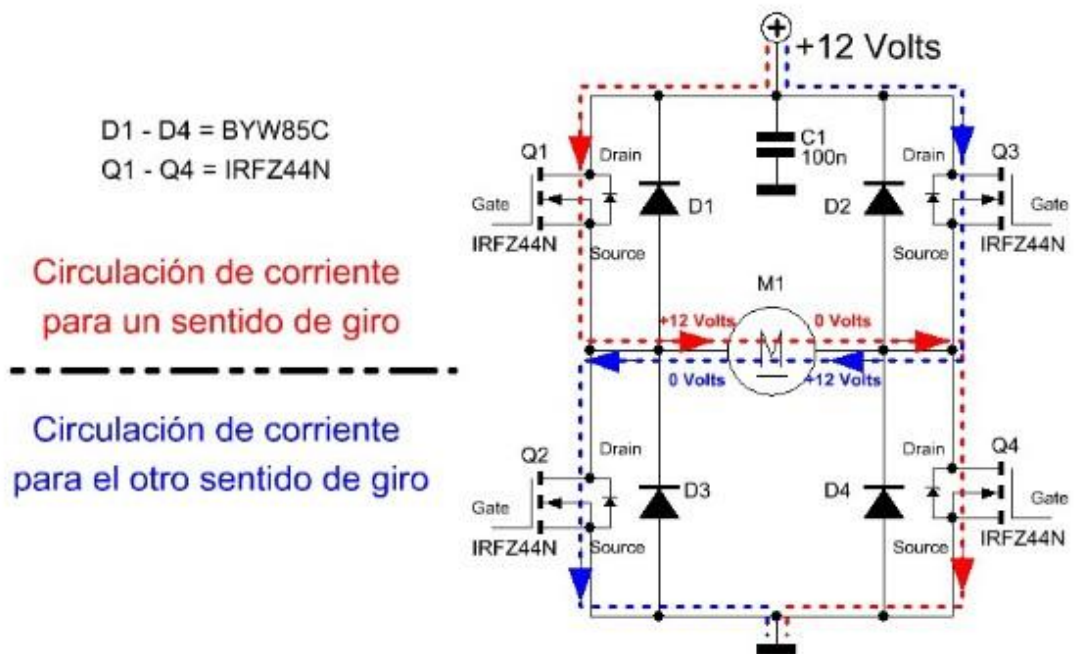


Figura 28. Los interruptores reemplazados por transistores MOSFET dentro del puente H y la circulación de corriente para lograr los dos sentidos de giro.

Para obtener un sentido de giro determinado, los transistores MOSFET IRFZ44N mostrados en Figura 28 deberán comportarse como verdaderas llaves conmutadoras. Tal como se desprende de la hoja de datos del transistor empleado, para que este tipo de transistor MOSFET de canal N conduzca a pleno, ofreciendo la menor resistencia entre Drain y Source, la tensión de Gate respecto a Source deberá ser más positiva y el orden de los 2 a 4 Volts. Si se asume que el transistor Q1 (en un sentido de giro) y Q3 (en el otro sentido de giro) ofrecen la mínima resistencia, el potencial de 12 Volts que alimenta los Drains respectivos pasará (según el giro seleccionado) hacia el motor, tal como muestra la figura 28.

Para que en el Source existan los 12 Volts, en el Gate se debe aplicar una tensión entre los 14 y los 16 Volts, es decir, 2 a 4 Volts por sobre el Source. De lo contrario, la tensión necesaria para activar el transistor a la máxima conducción se descontará de la tensión de alimentación y al motor le llegarán 10 Volts o menos. De este modo, se tendrá una máxima circulación de

corriente a través de Drain – Source para hacer girar el motor al máximo, con una diferencia de potencial de 2 Volts o más entre estos dos terminales del transistor.

Esto equivale, según la fórmula de potencia, que 2 Volts multiplicados por la máxima corriente del motor será una potencia que disipará en forma de calor en el transistor. Cuanto mayor sea la corriente para hacer funcionar el motor, mayor será el calor generado por los transistores, por lo tanto, mayor será el tamaño de los disipadores.

Muchos diseñadores prefieren evitar estos inconvenientes utilizando transistores de canal P en las ramas superiores del puente H, pero ocurre que estos dispositivos son más caros y difíciles de conseguir que los de canal N.

PWM

La modulación por ancho de pulsos (también conocida como PWM, siglas en inglés de pulse-width modulation) de una señal o fuente de energía es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (una senoidal o una cuadrada, por ejemplo), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

Los parámetros fundamentales del PWM son el periodo (T) y el ciclo de trabajo o duty cycle (D). El ciclo de trabajo indica el tiempo que la función vale uno respecto al tiempo total (el periodo). La figura 29 muestra tres ciclos de trabajo distintos. Observa que el periodo del PWM se mantiene constante, y lo que cambia es el tiempo en que la señal se mantiene a uno respecto al periodo total.

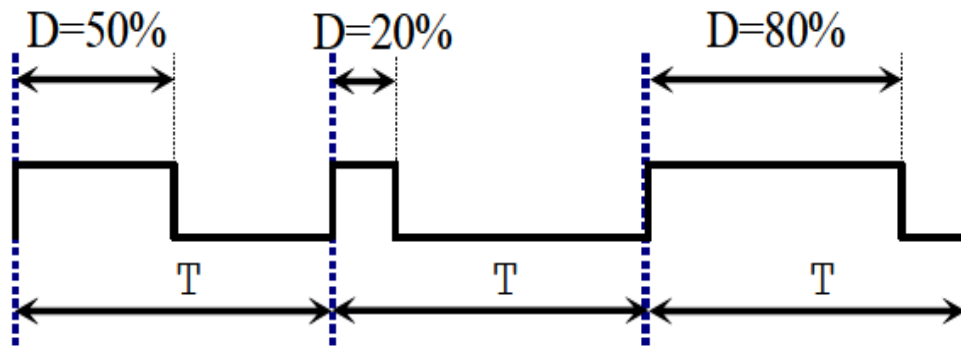


Figura 29. Señal de PWM a la que se le ha cambiado el ciclo de trabajo.
 Fuente: http://laimbio08.escet.urjc.es/assets/files/docencia/EDII/ed2_prac12_pwm.pdf.

Si el periodo del PWM es suficientemente pequeño, el dispositivo que está gobernado (por ejemplo, el motor) no notará las variaciones de la tensión y el resultado es que el motor recibirá una corriente promedio dada por el ciclo de trabajo

En la figura 30 se muestran dos señales PWM, la primera equivale a una tensión continua del 50% de la nominal: El motor irá a un 50% de la velocidad máxima. Y la segunda equivale a una tensión continua del 20% de la nominal: el motor irá a un 20% de la velocidad máxima.

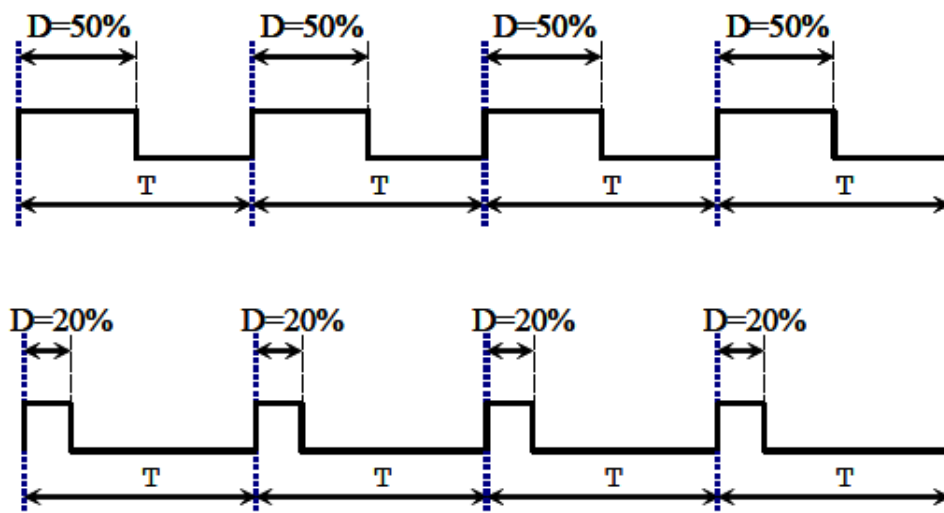


Figura 30. Control de velocidad con el PWM.
 Fuente: http://laimbio08.escet.urjc.es/assets/files/docencia/EDII/ed2_prac12_pwm.pdf.

BATERÍAS⁶

Batería, batería eléctrica, acumulador eléctrico o simplemente acumulador, se le denomina al dispositivo que almacena energía eléctrica, usando procedimientos electroquímicos y que posteriormente la devuelve casi en su totalidad; este ciclo puede repetirse por un determinado número de veces. Se trata de un generador eléctrico secundario; es decir, un generador que no puede funcionar sin que se le haya suministrado electricidad previamente mediante lo que se denomina proceso de carga.

El término pila, en castellano, denomina los generadores de electricidad basados en procesos químicos normalmente no reversibles, o acumuladores de energía eléctrica no recargables; mientras que batería se aplica generalmente a los dispositivos electroquímicos semi-reversibles, o acumuladores de energía eléctrica que sí se pueden recargar. Tanto pila como batería son términos provenientes de los primeros tiempos de la electricidad, en los que se juntaban varios elementos o celdas: en el primer caso uno encima de otro, "apilados", y en el segundo, adosados lateralmente, "en batería", como se sigue haciendo actualmente, para así aumentar la magnitud de los fenómenos eléctricos y poder estudiarlos sistemáticamente.

De esta explicación se desprende que cualquiera de los dos nombres serviría para cualquier tipo, pero la costumbre ha fijado la distinción.

El término acumulador se aplica indistintamente a uno u otro tipo, así como a los capacitores eléctricos o a futuros métodos de acumulación, erigiéndose de este modo como el término neutro capaz de englobar y describir a todos ellos.

Tipos de baterías

⁶[http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_\(electricidad\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_(electricidad))

Según su naturaleza interna, en el comercio se encuentran generalmente baterías de los siguientes tipos:

Acumulador de plomo (Pb)

Está constituido por dos electrodos de plomo, de manera que, cuando el aparato está descargado, se encuentra en forma de sulfato de plomo (II) (PbSO_4) incrustado en una matriz de plomo metálico (Pb); el electrólito es una disolución de ácido sulfúrico. Este tipo de acumulador se sigue usando aún en muchas aplicaciones, entre ellas en los automóviles.

Ventajas:

- Bajo coste
- Fácil fabricación

Desventajas:

- No admiten sobrecargas ni descargas profundas, viendo seriamente disminuida su vida útil.
- Altamente contaminantes.
- Baja densidad de energía: 30 Wh/Kg
- Peso excesivo, al estar compuesta principalmente de plomo, paradójicamente es más liviana una carga de ladrillos que un acumulador de plomo de 24 volts, por esta razón su uso en automóviles eléctricos es considerado como un absurdo por los técnicos electrónicos con experiencia. Su uso se restringe por esta razón en aplicaciones estacionarias como por ejemplo fuentes de alimentación ininterrumpidas para equipos médicos.

Voltaje proporcionado: 12V Densidad de energía: 30 Wh/K

Batería alcalina

También denominada de ferróníquel, sus electrodos son láminas de acero en forma de rejilla con panales rellenos de óxido níqueloso (NiO), que constituyen el electrodo positivo, y de óxido ferroso (FeO), el negativo, estando formado el electrólito por una disolución de potasa cáustica (KOH). Durante la carga se produce un proceso de oxidación anódica y otro de reducción catódica, transformándose el óxido níqueloso en níquelico y el óxido ferroso en hierro metálico. Esta reacción se produce en sentido inverso durante la descarga.

Se utilizan para aparatos complejos y de elevado consumo energético. En sus versiones de 1,5 voltios, 6 voltios y 12 voltios se emplean, por ejemplo, en mandos a distancia (control remoto) y alarmas.

Baterías alcalinas de manganeso

Con un contenido de mercurio que ronda el 0,1% de su peso total, es una versión mejorada de la pila anterior, en la que se ha sustituido el conductor iónico cloruro de amonio por hidróxido de potasio (de ahí su nombre de alcalina). El recipiente de la pila es de acero, y la disposición del zinc y del óxido de manganeso (IV) (o dióxido de manganeso) es la contraria, situándose el zinc, ahora en polvo, en el centro. La cantidad de mercurio empleada para regularizar la descarga es mayor. Esto le confiere mayor duración, más constancia en el tiempo y mejor rendimiento. Por el contrario, su precio es más elevado. También suministra una fuerza electromotriz de 1,5 V. Se utiliza en aparatos de mayor consumo como: grabadoras portátiles, juguetes con motor, flashes electrónicos.

Este tipo de baterías presenta algunas desventajas:

Una pila alcalina puede contaminar 175.000 litros de agua, que llega a ser el consumo promedio de agua de toda la vida de seis personas.

Una pila común, también llamada de zinc-carbono, puede contaminar 3.000 litros de agua.

Zinc, manganeso (Mn), bismuto (Bi), cobre (Cu) y plata (Ag): Son sustancias tóxicas, que producen diversas alteraciones en la salud humana. El zinc,

manganeso y cobre son esenciales para la vida, en cantidades mínimas, y tóxicos en altas dosis. El bismuto y la plata no son esenciales para la vida.

Baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd)

Utilizan un cátodo de hidróxido de níquel y un ánodo de un compuesto de cadmio. El electrolito es de hidróxido de potasio. Esta configuración de materiales permite recargar la batería una vez está agotada, para su reutilización. Sin embargo, su densidad de energía es de tan sólo 50 Wh/kg, lo que hace que tengan poca capacidad. Admiten sobrecargas, se pueden seguir cargando cuando ya no admiten mas carga, aunque no la almacena. Admiten un gran rango de temperaturas de funcionamiento.

Voltaje proporcionado: 1,2V

Densidad de energía: 50 Wh/Kg

Capacidad usual: 0.5 a 1.0 Amperios (en pilas tipo AA)

Efecto memoria: muy Alto

Baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH)

Utilizan un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de una aleación de hidruro metálico. Este tipo de baterías se encuentran menos afectadas por el llamado efecto memoria. No admiten bien el frío extremo, reduciendo drásticamente la potencia eficaz que puede entregar. Voltaje proporcionado: 1,2V Densidad de energía: 80 Wh/Kg Capacidad usual: 0.5 a 2.8 Amperios (en pilas tipo AA) Efecto memoria: bajo

Baterías de iones de litio (Li-ion)

Las baterías de iones de litio (Li-ion) utilizan un ánodo de grafito y un cátodo de óxido de cobalto, trifilina (LiFePO₄) u óxido de manganeso. Su desarrollo es más reciente, y permite llegar a altas densidades de capacidad. No admiten descargas, y sufren mucho cuando éstas suceden por lo que suelen llevar acoplada circuitería adicional para conocer el estado de la batería, y evitar así

tanto la carga excesiva, como la descarga completa. Apenas sufren el efecto memoria y pueden cargarse sin necesidad de estar descargadas completamente, sin reducción de su vida útil. No admiten bien los cambios de temperatura.

Voltaje proporcionado:

- A Plena carga: Entre 4.2V y 4.3V dependiendo del fabricante
- A carga nominal: Entre 3.6V y 3.7V dependiendo del fabricante
- A baja carga: Entre 2,65V y 2,75V dependiendo del fabricante (este valor no es un límite, se recomienda).

Densidad de energía: 115 Wh/Kg

Capacidad usual: 1.5 a 2.8 Amperios (en pilas tipo AA)

Efecto memoria: muy bajo

Baterías de polímero de litio (LiPo)

Son una variación de las baterías de iones de litio (Li-ion). Sus características son muy similares, pero permiten una mayor densidad de energía, así como una tasa de descarga bastante superior. Estas baterías tienen un tamaño más reducido respecto a las de otros componentes. Su tamaño y peso las hace muy útiles para equipos pequeños que requieran potencia y duración, como manos libres bluetooth.

Pilas de combustible

La pila de combustible no se trata de un acumulador propiamente dicho, aunque sí convierte energía química en energía eléctrica y es recargable. Funciona con hidrógeno. (Otros combustibles como el metano o el metanol son usados para obtener el hidrógeno).

Condensador de alta capacidad

Aunque los condensadores de alta capacidad no sean acumuladores electroquímicos en sentido estricto, en la actualidad se están consiguiendo capacidades lo suficientemente grandes (varios faradios, F) como para que se los pueda utilizar como baterías cuando las potencias a suministrar sean pequeñas, en relación a su capacidad de almacenamiento de energía.

Por ello se usan como batería en algunos relojes de pulsera que recogen la energía en forma de luz a través de células fotovoltaicas, o mediante un pequeño generador accionado mecánicamente por el muelle de la cuerda del reloj.

Aunque funcionan como acumuladores se les suele llamar "condensadores", ya que condensan o almacenan la corriente eléctrica aunque ésta fluctúe en el circuito.

1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Las personas que tras sufrir una lesión de médula espinal (SCI), amputación de miembro(s) inferior(es) o daño en sus piernas, además el aporte de pacientes que genera el conflicto armado en Colombia que por diversas circunstancias han disminuido su capacidad motora, aquellas presentan una significativa disminución en su calidad de vida. De igual forma ocurre con la personas de tercera edad que se ven obligadas a disminuir aquellas actividades cotidianas que implican un desplazamiento que normalmente realizaban caminando. Para mejorar la calidad de vida de aquellas personas cuya capacidad este disminuida o presentan algún grado de minusvalía, una parte de la ingeniería se ha enfocado en el desarrollo de sistemas que mejoran y facilitan su movilidad disminuyendo la dependencia de sus semejantes.

En la actualidad se encuentra en el mercado un amplio número de dispositivos de transporte que pueden cumplir con el objetivo de ayudar a movilizar personas con capacidad disminuida calificada motora, tales como sillas de ruedas eléctricas y scooters, que brindan independencia de movimiento al usuario. Sin embargo, estos dispositivos presentan algunas desventajas como lo son su elevado peso y volumen, su alto costo y su reducida versatilidad para moverse en espacios reducidos, además de los estigmas sociales asociados al uso de estos dispositivos tradicionales para el desplazamiento de personas con capacidad motora reducida en miembros inferiores [3.2.1]. Por otro lado, no es fácil encontrar este tipo de dispositivos de transporte para niños debido a que su demanda es menor, en cuyos casos se debe recurrir a diseños por encargo los cuales suelen resultar muy costosos. Razón por la cual se decidió enfocar este proyecto a la población discapacitada infantil.

1.2 JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

Se propone como una solución al problema de movilidad mencionado, un Vehículo Eléctrico Autobalanceado Unipersonal, al cual se le adiciona un mecanismo de desbalanceo tipo timón para dar mayor sensación de control sobre el vehículo al usuario, a diferencia del Segway, donde la conducción se hace de manera intuitiva, inclinándose en la dirección en que se quiere avanzar, dicha maniobra es difícil de ejecutar por una persona que presente capacidad disminuida o algún grado de minusvalía pues de antemano se sabe que no cuentan con la capacidad física que le permite apoyar los pies en caso de caída.

Aún cuando en el mercado internacional se encuentra disponible el Segway como producto desarrollado, se prefiere realizar el diseño y la construcción de un vehículo autobalanceado unipersonal por una razón principal: la población objetivo sobre la cual está enfocado el diseño del Segway no corresponde a personas con algún tipo de discapacidad motora, a diferencia del VEAU, su diseño estará enfocado hacia la satisfacción de las personas (niños, en su fase inicial) con capacidades disminuidas calificadas motoras o algún grado de minusvalía.

1.3 OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.3.1 Objetivo General

Contribuir con la misión de la Universidad de atender y dar solución a las necesidades de la comunidad, en este caso, la población infantil con capacidades disminuidas, mediante el diseño, construcción de la estructura, mecanismos necesarios para el funcionamiento y ensamble de un prototipo experimental de un vehículo autobalanceado tipo Segway [1] , el cual, como una silla de ruedas, cumpla con la función de movilizar estas personas.

1.3.2 Objetivos Específicos

- ✓ Diseño, construcción de la estructura, mecanismos necesarios para el funcionamiento y ensamble de un Prototipo Experimental de un Vehículo Autobalanceado Unipersonal VEAU, cuyo desarrollo comprenderá:
 - Diseño y construcción de la estructura del VEAU usando herramientas computacionales de apoyo CAD y CAE, tales como SolidWorks, Cosmos o Ansys Workbench y de simulación como Matlab (Simulink). o LabView. Este diseño comprenderá:
 - Diseño y construcción del bastidor del vehículo.
 - Diseño y construcción del mecanismo de deslizamiento.
 - Selección del sistema de acople, Motor-Rueda.
 - Diseño y construcción de la barra de dirección
 - Selección de los diferentes elementos que constituyen el hardware del VEAU como son:
 - Sensores (Acelerómetro, encoder, giroscopio).
 - Motor (Dos motores DC con encoder, [100 – 200 W] cada uno).
 - Ruedas.
 - Controlador digital embebido.
 - Baterías.
 - Estructura (Silla, riel, armazón).
 - Control de potencia eléctrica tipo Puente “H” con capacidad hasta 18 Ampere y 24 Volt.
- ✓ Selección de una tarjeta de control embebida, basada en el microcontrolador ATMEGA y/o similar.
- ✓ Desarrollo del modelo matemático y dinámico del VEAU y propuesta de control PID y su sintonización.

- ✓ Diseño y programación de un algoritmo embebido de control de prueba para evaluar el desempeño del VEAU, basado en técnicas de control PID.

2 MODELO ESTRUCTURAL DEL VEAU COMO SISTEMA DE DINAMICO Y REQUERIMIENTOS DE DISEÑO PARA SU CONTROL

El VEAU es un vehículo auto balanceado que se basa en el funcionamiento del péndulo invertido lineal [8], por tanto el sistema dinámico que se estudió es básicamente una modificación del péndulo invertido lineal, las variaciones más significativas son:

- Vehículo auto balanceado no se encuentra sujeto a una carrera finita en el movimiento lineal.
- Necesita de dos actuadores para poder realizar las funciones de rotación en su eje central, y el respectivo control del vehículo.

En el modelo matemático estudiado en el capítulo 3, se resaltan las diferencias entre estos dos sistemas, además nos permite observar el comportamiento dinámico del vehículo y estimar variables físicas que definen los parámetros constructivos y de diseño del vehículo.

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.

El proyecto se enfocó el diseño y construcción de un vehículo auto balanceado, para a una persona con capacidades disminuidas. Por medio de la investigación de trabajos anteriormente realizados, se estimo que el control del vehículo cuenta con un regulador PD (proporcional-derivativo), además la rotación del vehículo se realiza con un control P en lazo abierto, los elementos que corresponden al sistema de control como sensores, controlador y actuador, se seleccionaron basándonos en tablas de selección que indican

características relevantes de las diferentes opciones, se resalta las ventajas y desventajas de porque se utilizaron los elementos que hacen parte del VEAU.

El sistema de control VEAU se puede representar en forma básica como un sistema de control en lazo cerrado como el visto en la figura (). Para este caso el sistema controla el ángulo de inclinación del vehículo, controlando el movimiento lineal del vehículo.

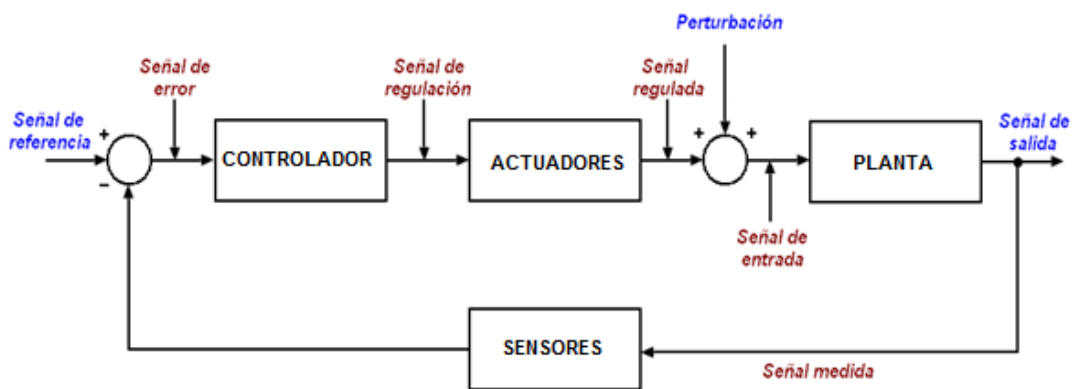


Figura 31. Estructura básica de un Sistema de control en lazo cerrado.

2.1 REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

Debido al comportamiento de este sistema dinámico, en el que el ángulo es la principal variable a controlar, además de otras variables que son relevantes en el control del vehículo se requiere la medición o estimación en cada instante de las siguientes variables:

- Inclinación / Velocidad de inclinación (θ , $\dot{\theta}$). Este parámetro es la principal variable a ser controlada, ya que de ella depende directamente el equilibrio del sistema.
- Velocidad lineal (x): velocidad de traslación del vehículo, es una variable no incluida en algún control como feedback, solo sería para información al usuario de velocidad del vehículo.
- Estado baterías. Para asegurar el correcto funcionamiento de todos los sistemas involucrados, se debe monitorear constantemente el estado de

las baterías para evitar una mala alimentación a todo el sistema de control, evitando la pérdida de control del vehículo.

- 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.

Para poder explicar de mejor manera los elementos que constituyen el sistema dinámico y su respectivo sistema de control se divide el sistema total en su parte operativa y de control.

2.2 PARTE OPERATIVA

La parte operativa de un sistema dinámico controlado, está compuesta por el conjunto (estructura, sensores y actuadores), los cuales están dispuestos en un maquina de manera adecuada para dar soporte a estos y permiten asegurar el perfecto funcionamiento de todo el conjunto.

En la figura () se muestra la estructura del vehículo, en la que se disponen los sensores y actuadores, además elementos adicionales para el funcionamiento del vehículo según el diseño establecido.



Figura 32. Elementos estructurales del VEAU.

El diseño consta de una estructura de aluminio, en las que se disponen los sensores que componen un IMU (unidad de medición inercial) acelerómetro o inclinómetro y giroscopio, estos permiten obtener el ángulo de inclinación del vehículo sin necesidad de una referencia, al combinar los dos sensores por medio de la programación del microcontrolador.

Esto permite hacer la retroalimentación en el sistema de control, la fuerza motriz esta suministrada por dos motores DC acoplados a ruedas que permiten mediante una acción de control actuar sobre el vehículo, haciendo que el vehículo se mantenga en posición vertical, permitiendo el autobalanceo.

2.2.1 La Planta Dinámica

La planta dinámica del VEAU es una planta inestable, la cual necesita de control de lazo cerrado para poder ser estabilizada, entre muchas estrategias de control que se usan para controlar este tipo de planta se encuentran, la lógica fuzzy, redes neuronales, algoritmos genéticos, y el utilizado en la construcción del VEAU los reguladores PID que presenta un buen comportamiento de control gracias a la característica del PID de permitir eliminar el polo inestable de la planta, y realiza una modificación de la planta dinámica cambiando su naturaleza y dándole estabilidad.

Una de las características importantes del VEAU, es la distribución de la masa para poder ser estabilizado correctamente, debido a que la persona va sentada y en la parte alta del vehículo, el centro de masa del vehículo se traslada a la parte alta del vehículo, alejándose del pivote que está en el eje de las ruedas de este modo el momento de inercia aumenta haciendo que el sistema responda más lento ante cambios dinámicos, esto permite al controlador ser más rápido que el sistema y actuar ante cambios del sistema, esta característica del sistema permite ser controlado correctamente.

En el vehículo de pruebas que se muestra en la figura 33 permite observar que se le añadió peso en la parte superior para poder simular el cuerpo de la persona (en escala) que modifica el centro de masa del vehículo, y hacer unas pruebas del controlador mucho más reales, de esta forma se probó el controlador y se hicieron las pruebas iniciales para poder avanzar en el prototipo real del VEAU.

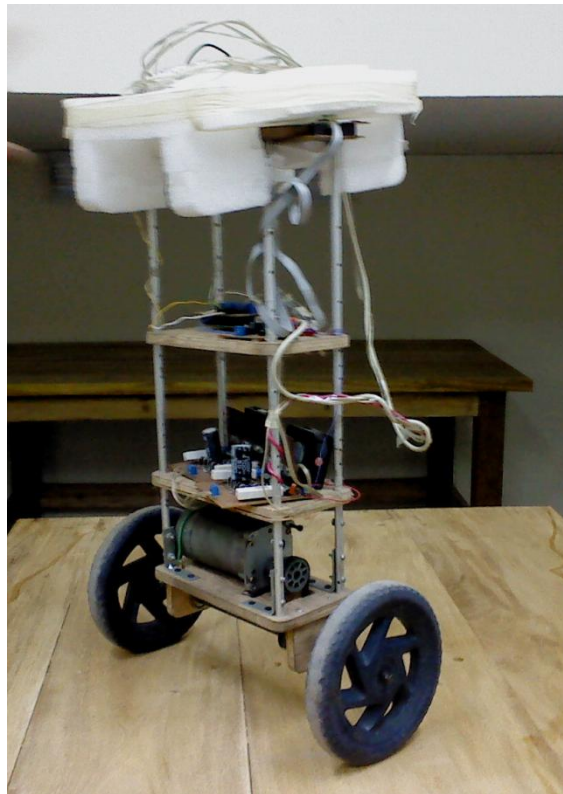


Figura 33. Planta dinámica de pruebas

2.2.2 Sensores

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 o rata de 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.

Para el control de la planta dinámica del VEAU, se requiere medir ángulo de inclinación del vehículo, se presentan una serie de factores relativos a la naturaleza de los sensores asociados a dicha medición que se analiza a continuación.

2.2.2.1 Estimación del ángulo

Esta medición presenta gran complejidad, en ciertas aplicaciones en donde se necesita medir inclinación de manera inercial, para ello se utiliza un IMU o unidad de medición inercial. Se utilizan en sistemas de navegación inercial para la medición de variables cinemáticas como la posición, velocidad y aceleración, ya sea lineal o angular, además de la orientación de cualquier objeto en los tres ejes coordenados sin ninguna referencia, son de gran utilidad en las aeronaves, barcos y misiles perseguidores entre otras aplicaciones, en la figura () se muestran los ángulos de inclinación que un IMU puede medir necesarios para la aeronavegación.



Figura 34. Ángulos de inclinación que permite leer un IMU.

Un IMU integra, acelerómetros triaxiales, giroscopios triaxiales y compas electrónico, además una computadora que pueda integrar digitalmente las señales de los diferentes sensores de manera que pueda calcularse las variables cinemáticas necesarias (posición, velocidad, aceleración, tanto lineal como angular), la calibración de estos sensores requiere de un complejo cálculo matemático para las múltiples integraciones numéricas y la implementación de filtros digitales para el respectivo tratamiento de la señal.

2.2.2.2 Acelerómetro como sensor de inclinación

Un acelerómetro triaxial, es un sensor que detecta aceleraciones externas en los tres ejes coordenados, referenciando el valor respecto de la gravedad.

Los acelerómetros analógicos entregan un voltaje proporcional a la aceleración externa que se someta, este voltaje permite cuantiar la aceleración en m/s^2 .

Cuando se requiere utilizar un acelerómetro para medir inclinación se toma como referencia la aceleración de la gravedad, sabiendo que la dirección de esta aceleración apunta al centro de la tierra o en dirección vertical, la magnitud de la aceleración en dirección vertical es $-1g$, si se inclina el sensor se puede apreciar que la aceleración en el eje vertical disminuye hasta cero cuando el eje vertical se encuentra perpendicular a la dirección de la gravedad, este cambio permite cuantificar un valor de inclinación utilizando las siguientes formulas que se basan en la figura 35.

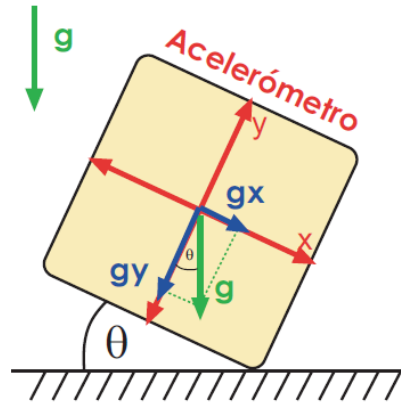


Figura 35.Descomposición de la gravedad en los ejes X,Y.

Al descomponer la gravedad en los ejes X, Y se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$g_y = g * \cos(\theta)$$

$$g_x = g * \sin(\theta)$$

Es importante notar que dependiendo del cuadrante en que se encuentre el ángulo se debe usar una u otra ecuación, ya que solo una permitirá establecer el signo del ángulo.

Por lo tanto el acelerómetro dará las componentes de la aceleración (g_x, g_y). El cálculo del valor de inclinación se hace de la siguiente manera:

$$\theta = \arccos\left(\frac{g_y}{g}\right)$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{g_x}{g}\right)$$

Vale resaltar que este valor de inclinación será tan preciso como lo sea el sensor utilizado, y que la aceleración calculada sea únicamente la de la gravedad, al no ser así, al incluirse aceleraciones externas debido a movimientos bruscos del sensor, este incluirá un error significativo en el valor

de inclinación, el VEAU es un vehículo en movimiento por lo que estará expuesto a aceleraciones externas distintas a las de la gravedad.

2.2.2.3 Giroscopio electrónico como sensor de inclinación

Un giroscopio es un sensor que permite medir velocidad angular (ω), este sensor cuando es analógico, entrega un voltaje proporcional a la velocidad angular y dependiendo de la resolución del sensor se podrán detectar velocidades angulares muy pequeñas.

Sabemos que la velocidad angular es la derivada de la posición angular, es decir la variable que se busca estimar es:

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

$$d\theta = \omega * dt$$

Integrando respecto dt:

$$d\theta = \omega * dt$$

Se obtiene:

$$\theta = \theta_0 + \omega * dt$$

Esta integración requiere de una condición inicial que pueda ser dada por el acelerómetro, y la integración se hace durante un periodo de tiempo constante dt llamado tiempo de muestreo del sensor. Esta integración numérica se hace con ayuda de un microcontrolador.

Esta opción tiene la gran ventaja respecto del acelerómetro que las aceleraciones externas no le afectan.

El problema más claro de esta solución es el error acumulado asociado a la integración numérica, que provoca que luego de transcurrido cierto tiempo de cómputo la estimación del ángulo tenga errores incluidos, en este tipo de aplicaciones este error es conocido como drift, ya que el valor asociado a la inclinación nula se desplazará algunos grados conforme pasa el tiempo de procesamiento.

Apreciando las ventajas y desventajas que presentan cada uno de los sensores que integran el IMU, se debe hacer el cálculo del Angulo lo más preciso posible para poder tener una correcta estabilización del vehículo, como el acelerómetro presenta una buena estimación del ángulo a largo plazo, de manera estática cuando el vehículo no se mueve bruscamente, mientras el giroscopio presenta buena estimación del ángulo a corto plazo en donde el vehículo presenta cambios de dirección o aceleraciones significativas, el ángulo se calcula utilizando los dos sensores al unisonó, podría utilizarse la siguiente ecuación ().

$$\theta_{real} = \theta_{gyro} * \beta + \theta_{acelerometro} * (1 - \beta)$$

Este valor de $\beta \in [0, 1]$ determina el porcentaje de creencia de cada estimación, y el valor se debe calcular de manera empírica observando el comportamiento del vehículo, los IMU son más precisos en cuanto tengan más giroscopios y las resoluciones y rangos de los sensores sean aun más altas, además, cuando se requiere estimar el ángulo en diferentes ejes se debe tener acelerómetros y giroscopios de múltiples grados de libertad, en este caso que se requiere calcular únicamente el ángulo rotación de la plataforma respecto al eje de las ruedas como lo muestra la figura 36, por lo que será necesario la utilización de un giroscopio de un grado de libertad y un acelerómetro de dos ejes.

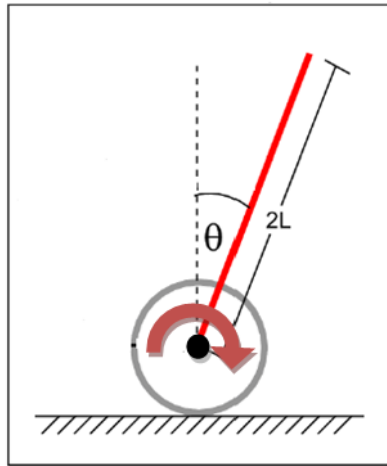


Figura 36. Rotación del vehículo respecto las ruedas.

Selección de sensores: como sabemos la variable principal que debemos estimar es el ángulo, y por tanto es indispensable implementar la IMU (inertial measurement unit), y por tanto la precisión y exactitud de esta estimación es dependiente de los sensores seleccionados, en la selección se evalúan diferentes aspectos respecto a la disponibilidad, costo, resolución, voltaje de alimentación, etc. Se muestran las opciones que se evaluaron en la tabla () para el acelerómetro y giroscopio.

2.2.3 Características de selección de los sensores

- *Voltaje de alimentación del sensor (V_{ad}):* 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 modulo de sensores con su respectiva fuente y separarlos de la fuente de alimentación de potencia que involucra ruido.

- *Consumo de corriente (I_{dd}):* 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 (I_{dd}):* 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 (g_{fs}):* 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 al 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 (S_h)*: permite obtener la relación entre los voltios entregados por el sensor y la variable física censada, en este caso particular de medición de aceleración tenemos la sensibilidad dada en milivoltios por gravedad ($\frac{mV}{g}$), 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.
- *Offset (V_{off})*: Este será el valor de tensión que suministre el sensor en ausencia de aceleración. Como se pueden disponer de censado en diferentes ejes esta tensión puede variar de eje en eje, la mayoría de sensores tienen un V_{off} equivalente a la mitad de la tensión de alimentación:

$$V_{off} = \frac{V_{dd}}{2}$$

- *XY bandwidth (f_{3db})*: Es el ancho de banda del sensor, corresponde a la respuesta en frecuencia del sensor, se refiere a como el sensor puede seguir a una fuente de excitación respecto a frecuencia, en nuestro caso sería la frecuencia máxima a la que podemos realizar cambios de aceleración, y el sensor pueda notarlas, la importancia de conocer el ancho de banda, radica en dos aspectos, primero que el sensor pueda tener la capacidad de censar la variable física que requerimos en cuanto a frecuencia, lo segundo es respecto al muestreo de datos en el programa, la frecuencia de muestreo debe ser por lo menos el doble de la frecuencia del ancho de banda del sensor, basándonos en el teorema de Nyquist-Shannon que afirma: “La razón de muestreo debe ser igual, o

mayor, al doble de su ancho de banda de la señal analógica”. [referencia que hable sobre el teorema de muestreo]

- *Encapsulado:* Dado que los chips de silicio son muy delicados, incluso una pequeña partícula de polvo o de gota de agua puede afectar su funcionamiento. Para combatir estos problemas, los chips se encuentran protegidos por una carcasa o encapsulado.

Existen 2 clasificaciones generales para lo encapsulados, según contengan circuitos integrados o componentes discretos, encapsulados IC y encapsulados discretos respectivamente, la tabla 3 muestra los diferentes tipos de encapsulados para estas dos clasificaciones.

Tipos de Encapsulados				
IC		Discreto		
De Inserción	Montaje Superficial	De Inserción	Montaje Superficial	
DIP	SOP	SP-8	SC-59	TO-252
SIP	TSOP	SST	SC-62	TO-263
PGA	QFP	TO-3	SC-70	HVSON
	SOJ	TO-92	SC-74	HWSON
	QFJ	TO-126	SC-75	XSOF
	QFN	Isolated TO-220	SC-84	SOP8
	TCP	TO-220AB	SC-88	TSSOP
	BGA/LGA	TO-251	SC-89	MLP
			SC-95	EFLIP

Tabla 3. Tipos de encapsulados para elementos electrónicos.

La razón de que el encapsulado sea una característica de selección de los sensores, es debido a que debemos realizar un módulo de sensores donde se deben conectar, debido a la carencia equipos para soldar circuitos integrados superficiales de requiere de sensores montados sobre PCB, algunos fabricantes venden el sensor y también el sensor en el PCB, la facilidad de montar el sensor el modulo de sensores no inclina a seleccionar sensores que tengan montaje en PCB.

- *Interfaz:* existen dos tipos de señales digitales y análogas, de la misma forma los sensores suministran una señal análoga o digital, las señales análogas son procesadas por un ADC (convertidor análogo digital) que codifica la señal en bits para que pueda ser manejada por una computadora y realizar alguna acción de control, al contrario algunos sensores entregan la información de manera digital, por medio de algún protocolo de comunicación para permitir intercambio de información entre circuitos integrados, o entre el sensor y la computadora que no necesita de un ADC para poder manejar los datos, los protocolos de comunicación que pueden utilizarse definen la interfaz del sensor, los sensores digitales son muy apreciados cuando estos se encuentran en una ambiente de ruido electromagnético ya que no se dejan afectar, lo contrario pasa con los sensores análogos sensibles al ruido, incluyendo errores en la lectura de la variable.
- *Costo:* Debido a que el presupuesto es limitado, se selecciono 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.

2.2.4 Selección del sensor de inclinación

Antes de la selección del sensor de aceleración se definen a groso modo, las características y el funcionamiento de estos tipos de sensores electrónicos; Podemos definir un acelerómetro como un elemento de instrumentación mecánico o electromecánico que se utiliza para medir la aceleración de un

cuerpo en movimiento. El acelerómetro puede medir las componentes de la aceleración de un movimiento rectilíneo.

Estos dispositivos determinan la aceleración de un cuerpo midiendo la fuerza desarrollada por una masa que se une al cuerpo en dirección al eje donde se desea medir la aceleración, esta medición de fuerza se hace utilizando un material elástico que proporciona una corriente o voltaje dependiendo proporcional a su deformación la interpretación de dichas señales eléctricas nos permitirá obtener información sobre nuestro cuerpo analizado. La fuerza se calcula utilizando la ley de Hooke, ecuación (1) (La deformación de un cuerpo es proporcional a la fuerza externa al que ha sido sometido) también basados en la segunda ley de Newton ecuación (2) se obtiene la aceleración del cuerpo:

$$F = K * (\Delta x) \quad (1)$$

$$F = m * a$$

$$a = \frac{F}{m} \quad (2)$$

Los acelerómetros en que se ofrecen en el mercado utilizan diferentes principios, para la obtención de la aceleración, es el caso de los acelerómetros de la serie ADXL250 de Analog Devices utiliza la capacitancia para medir el desplazamiento de un sistema elástico que consiste de una barra de silicio sujeta por cuatro hilos deformables, a la configuración se le adiciona dos placas metálicas paralelas para formar dos condensadores, la placa de la mitad unida a la barra de silicio cambia la capacitancia de los condensadores mostrado en la figura 37, este cambio de capacitancia, sabiendo que la capacitancia está dada por:

$$C = \frac{K}{d}$$

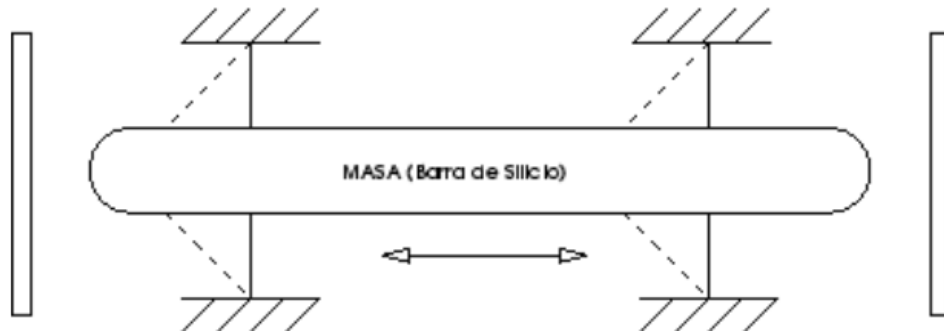


Figura 37. Configuración interna de los acelerómetros de Analog Devices de la serie ADXL250

Donde K es el coeficiente del material entre las placas y d es la separación de las placas.

En el ADXL250, el movimiento produce un movimiento de la barra de silicio que desplaza la placa central variando la separación de las placas en los condensadores, suministrado un valor de tensión proporcional a este movimiento.

El fabricante freescale presenta su acelerómetro triaxial serie MMA7260, se encuentra entre los acelerómetros capacitivos, operan con una técnica donde la capacitancia del elemento sensor interno varía en función de la aceleración aplicada.

En la figura 38 se representa el elemento sensor, que consiste en dos placas conductoras paralelas (electrodos) con área de exposición A , y una masa m suspendida por medio de un elemento con rigidez k . Entre la masa y los electrodos existe una distancia base d simétrica, que se controla con precisión, por lo que el aire que existe en el hueco entre cada electrodo y la masa sísmica forma un “capacitor mecánicamente variable”.

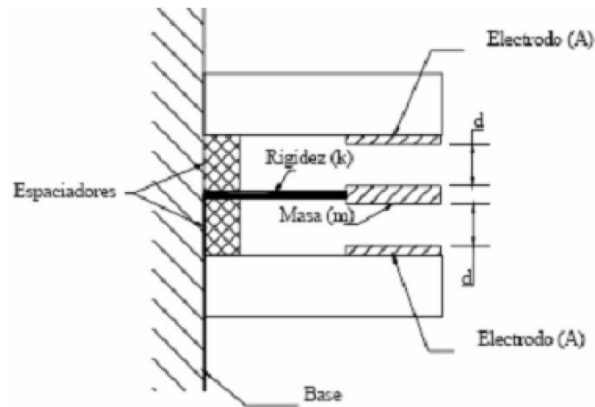


Figura 38. Configuración interna del acelerómetro MMA7260 de freescale

El cambio en la distancia “d” corresponde a los cambios en la capacitancia. Estos acelerómetros incorporan circuitos micro-eléctricos que usan puentes capacitivos para convertir el cambio de capacitancia a una señal de voltaje útil proporcional a la aceleración.

Analog Devices presenta la nueva tecnología en diseño y construcción de sensores, MEMS (maquinas micro electromecánicas), es tecnología electromecánica, micrométrica y sus productos, son construidos a escalas relativamente más pequeñas nanométricas. MEMS también se denominan 'Micro Máquinas' en Japón o tecnología de micro sistemas (MST) en Europa, los MEMS en general varían en tamaño desde un micrómetro a un milímetro. En este nivel de escala de tamaño, las construcciones de la física clásica no son siempre ciertas. Debido a la gran superficie en relación al volumen de los MEMS, los efectos de superficie como electrostática y viscosidad dominan los efectos de volumen tales como la inercia o masa térmica⁷.

Los MEMS se convirtieron en prácticos una vez que pudieran ser fabricados utilizando modificación de tecnologías de fabricación de semiconductores, normalmente utilizadas en electrónica. Estos incluyen moldeo, galvanoplastia, grabado húmedo (KOH, TMAH), grabado en seco (RIE y DRIE), mecanizado por electro descarga (EDM), y otras tecnologías capaces de fabricar dispositivos muy pequeños, La MEMS permitió la construcción de engranajes a

⁷ http://es.wikipedia.org/wiki/Sistemas_microelectromec.

escalas muy pequeñas para la construcción de micromotores, la figura 39 ilustra microengranajes construidos utilizando tecnología MEMS.

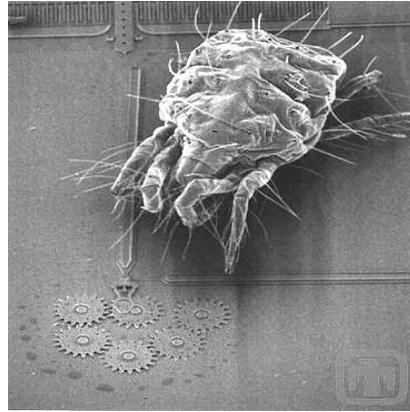


Figura 39. **Un ácaro cerca de un grupo de engranajes producidos utilizando MEMS.**
Fuente: www.wikipedia.com/MEMS.

Los sensores que se encuentran en el mercado utilizando tecnología MEMS son giroscopios, acelerómetros e inclinómetros. La configuración interna de los sensores basados en MEMS, utilizan sistemas de segundo orden, resorte masa amortiguador para medir indirectamente la aceleración de un cuerpo. La figura 40 muestra el sistema básico para medición de aceleración.

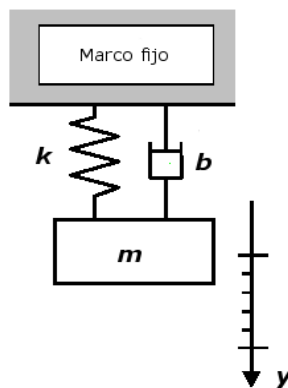


Figura 40. Sistema de segundo orden, base para la construcción de un acelerómetro.

2.2.4.1 Acelerómetro MMA7260 FREESCALE

Una de las opciones que se tuvo en cuenta en la selección del acelerómetro, fue la utilización de un acelerómetro triaxial MMA7260, del cual solo se tomarán señales de dos ejes para estimar la inclinación, el sensor tiene un encapsulado tipo QFN con 16 pines, sus dimensiones son de 6[mm] x 6[mm] x 1,45[mm]. La configuración interna básica en diagrama de bloques se muestra en la figura 41.

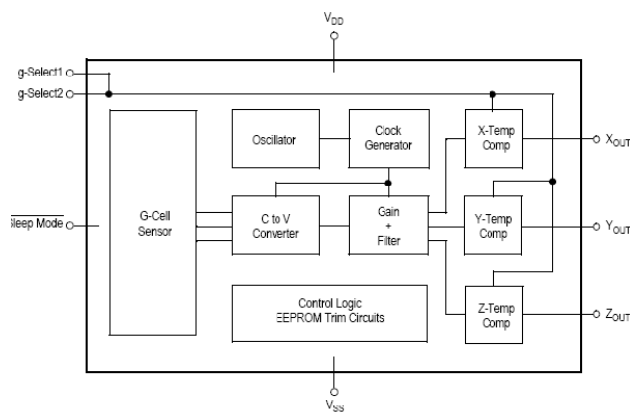


Figura 41. Diagrama de bloques simplificado del acelerómetro triaxial MMA7260

Cada uno de los pines en el encapsulado se muestran en la figura 42, vista superior y trimétrica.

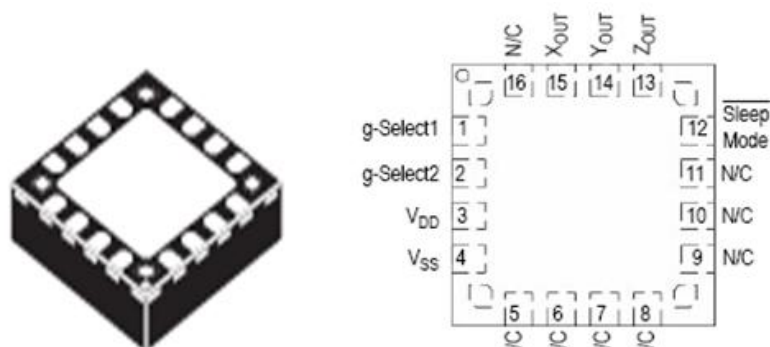


Figura 42. Vista trimétrica y superior del acelerómetro.

La propiedad g-Select permite la selección de cuatro sensibilidades distintas. En función de las entradas lógicas de los pines 1 y 2, la ganancia interna del dispositivo variara para desplegar sensibilidades de 1.5g, 2g, 4g o 6g, tal como se puede observar en la tabla ().Para la aplicación se escogió un rango de 1.5 g debido a que en aplicaciones como inclinómetros, el valor máximo de aceleración sería 1 gravedad, además la sensibilidad es mucho más alta, esto con el fin de tener una lectura confiable respecto a la resolución del convertidor análogo digital del microcontrolador utilizado.

g-Select2	g-Select1	g-Range	Sensitivity
0	0	1.5g	800 mV/g
0	1	2g	600 mV/g
1	0	4g	300 mV/g
1	1	6g	200 mV/g

Tabla 4. Descripción de los pines g-Select y de los rangos y sensibilidades correspondientes.

El acelerómetro de tres ejes viene provisto de un Sleep Mode un estado del sensor de bajo consumo adecuado para sistemas que no estén conectados a la red eléctrica y necesiten de una fuente de tensión portátil como baterías. Para activar el mode sleep, se debe dejar el pin 12 sin tensión, o un 0 lógico, con esta configuración las salidas no muestran medición de aceleración, disminuyendo el consumo a 3 μA . para poder activar el acelerómetro deberá alimentarse el pin 12, con 3.3 volts, el consumo de corriente aumentara a 500 μA , debido a que la autonomía del vehículo es un aspecto importante en los vehículos de transporte, se mantendrá el acelerómetro en mode sleep, en momentos donde el vehículo no necesite estabilizarse o cuando no esté en operación.

Las especificaciones para poner en correcto funcionamiento el acelerómetro y parámetros generales del sensor, se muestran en la tabla ().

CARACTERÍSTICA	SÍMBOLO	MIN	TYP	MAX	UNIDAD
Tensión de alimentación	V_{DD}	2.2	3.3	3.6	V
Corriente de alimentación	I_{DD}	-	500	800	μA
Corriente de alimentación en Sleep Mode	I_{DD}	-	3.0	10	μA
Salida para 0g	V_{OFF}	1.485	1.65	1.815	V
XY Bandwidth Response	f_{-3dB}	-	350	-	Hz
Z Bandwidth Response	f_{-3dB}	-	150	-	Hz
Ruido RMS	n_{RMS}	-	4.7	-	mVrms
Ruido PSD	n_{PSD}	-	350	-	μ/\sqrt{Hz}

Tabla 5. Parámetros de diseño del acelerómetro.

Como vemos la alimentación máxima del acelerómetro es 3.6 voltios, pero es necesario alimentar a la tensión típica de 3.3 voltios, debido a que disponemos de una fuente de 5 voltios, un regulador de voltaje a 3.3 voltios se dispondrá en el modulo de sensores para dicha alimentación.

Descripción de pines

El dispositivo consta de 16 pines, tres son entradas lógicas, tres son salidas analógicas y otros dos son alimentación y tierra. El resto de pines quedan sin conectar. De las entradas digitales, dos de ellas se dedican a la selección del rango de aceleración y la sensibilidad (g-Select1, g-Select2), y la otra es para la selección del modo de consumo (Sleep mode). Las tres salidas analógicas (XOUT, YOUT, ZOUT) representan niveles de tensión análogos correspondientes a las aceleraciones en los ejes X, Y y Z, respectivamente. Estas tres señales presentan un offset igual a 1.65V, es decir, este será el valor de tensión que muestren en ausencia de aceleración. Esta información queda resumida en la tabla 6.

Pin No.	Pin Name	Description
1	g-Select1	Logic input pin to select g level.
2	g-Select2	Logic input pin to select g level.
3	V _{DD}	Power Supply Input
4	V _{SS}	Power Supply Ground
5 - 7	N/C	No internal connection. Leave unconnected.
8 - 11	N/C	Unused for factory trim. Leave unconnected.
12	Sleep Mode	Logic input pin to enable product or Sleep Mode.
13	Z _{OUT}	Z direction output voltage.
14	Y _{OUT}	Y direction output voltage.
15	X _{OUT}	X direction output voltage.
16	N/C	No internal connection. Leave unconnected.

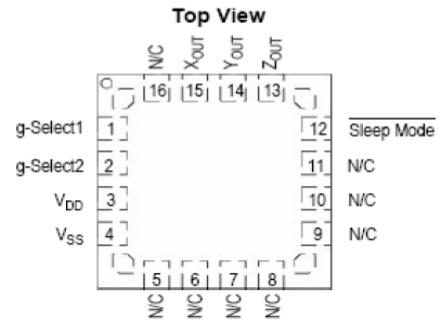


Tabla 6. Descripción de los pines del acelerómetro MMA7260.

Conexión con la tarjeta de adquisición de datos

Aunque el acelerómetro dispone de filtros internamente, en la conexión con el microcontrolador se deben integrar algunos componentes electrónicos para poder tener una lectura de aceleración confiable, además se exige en la DATASHEETS del mismo, garantizando los valores de aceleración y lecturas confiables de aceleración.

Es necesario añadir un condensador de 0.1 μF a VDD para desacoplar la componente de continua de la fuente de alimentación. Por otro lado, también resulta beneficioso utilizar filtros RC a la salida de XOUT, YOUT y ZOUT para minimizar el ruido proveniente del oscilador presente en el circuito de capacidades conmutadas. Los valores adecuados para este filtro son 1k Ω y 0.1 μF respectivamente. Las tres entradas digitales se conectarán directamente a tres puertos digitales del microprocesador según la configuración que se haya establecido. La figura 43 ilustra un esquema de conexión que se encuentra en el datasheet del sensor.

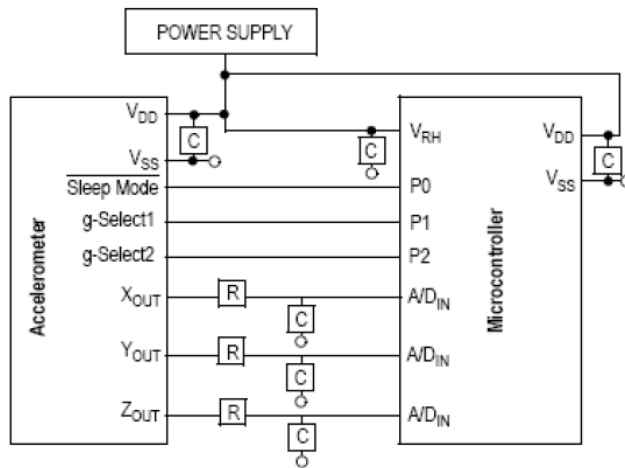


Figura 43. Esquema de conexión acelerómetro microcontrolador

Debido a que no se dispone de un soldador para encapsulados QFN superficiales, se importó el acelerómetro MMA7260 en PCB de la empresa sparkfun, esta PCB incluye los filtros que se exigen, además de los condensadores en la alimentación. La figura 44 ilustra el acelerómetro triaxial en PCB con los pines principales, Vdd, GND, Xaccel, Yaccel, Zaccel, g-select1, gselect2, sleep mode.

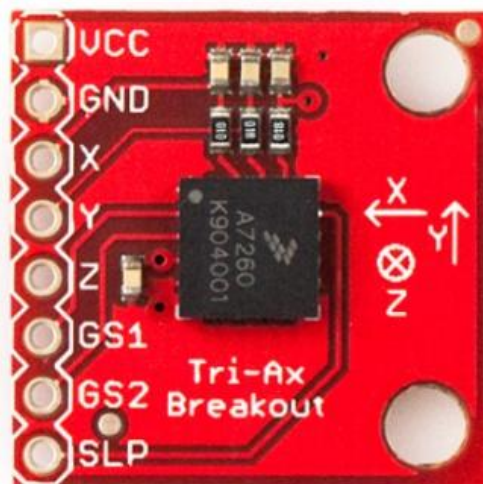


Figura 44. Acelerómetro montado en PCB.

2.2.4.2 Acelerómetro ADXL230

La familia ADXL de acelerómetros del fabricante Analog Devices, que ofrece una gran variedad de posibilidades para un gran número de aplicaciones de diversa índole. Se basan en la tecnología MEMS (integrated Micro Electro Mechanical System) para su fabricación, garantizando así una fiabilidad del de 1FIT (1 fallo cada billón de horas en operación). Estos sensores miden aceleraciones estáticas (gravedad) como dinámicas (vibración, movimiento o impactos).

Este acelerómetro posee medición de aceleración en dos ejes su tamaño es reducido, las tensiones de alimentación son estándar, sin embargo hay dos características que nos desaconseja su uso, el rango fijo y la reducida sensibilidad, debido al convertidor análogo digital del microcontrolador a utilizar es relativamente reducida (10 bits), y por tanto se hace necesario utilizar sensores que presenten sensibilidades por encima de 500 mV/g, permitiendo lecturas confiables, otra razón es el costo del sensor que es sensiblemente superior a los sensores que se encuentran en el mercado.

Características del acelerómetro ADXL320

Analog Devices nos ofrece un sensor LFCSP con 16 pines, sus dimensiones son de 4[mm] x 4[mm] x 1,45[mm]. La configuración interna básica en diagrama de bloques se muestra en la figura 45.

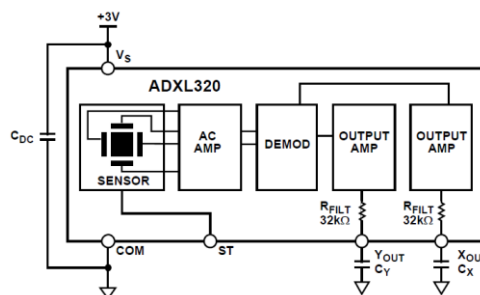


Figura 45. Diagrama de bloques simplificado del acelerómetro biaxial ADXL320.

Cada uno de los pines en el encapsulado se muestran en la figura 46, vista superior.

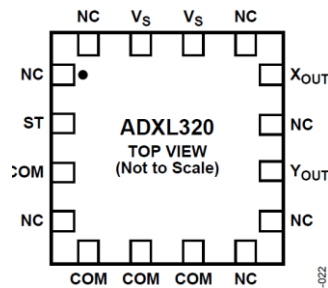


Figura 46. Vista superior del acelerómetro ADXL320.

El acelerómetro ADXL320 presenta las siguientes desventajas respecto al acelerómetro MMA7260 analizado anteriormente, este acelerómetro tiene rango y sensibilidad única de 5 g y 174 mV/g, debido a la baja resolución del ADC (convertidor análogo digital) del microcontrolador arduino(10 bits) se necesitan sensibilidades mayores de 500 mV/g, para tener una estimación de aceleración confiable, además este sensor no cuenta con la opción de modo de bajo consumo por lo que constantemente está activo teniendo un consumo de 350 μA , de corriente, por último el acelerómetro es biaxial no teniendo muchas implicaciones en esta aplicación, ya que dos ejes son necesarios para construir el inclinómetro.

Las especificaciones para poder poner en correcto funcionamiento el acelerómetro ADXL320 y parámetros generales del sensor, se muestran en la tabla 7.

CARACTERISTICAS	SIMBOLO	MIN	TYP	MAX	UNIDADES
Tensión de alimentación	V_{dd}	2.4	-	5.25	V
Corriente de alimentación	I_{dd}	350	-	450	μA
Salida para 0 g	V_{off}	1.2	-	2.625	V
X Y bandwidth	f_{3db}	1	-	500	Hz

Tabla 7. Parámetros de diseño del acelerómetro.

Descripción de pines

El dispositivo consta de 16 pines, dos son salidas analógicas, otros dos son alimentación y cuatros son de tierra. El resto de pines quedan sin conectar, Las dos salidas analógicas (XOUT, YOUT) representan niveles de tensión análogos correspondientes a las aceleraciones en los ejes X, Y, respectivamente. Estas tres señales presentan un offset igual a 1.2 V para alimentación de 2.4, es decir, este será el valor de tensión que muestren en ausencia de aceleración. En la tabla 6 se muestra la configuración de pines.

Pin No.	Mnemonic	Description
1	NC	Do Not Connect
2	ST	Self-Test
3	COM	Common
4	NC	Do Not Connect
5	COM	Common
6	COM	Common
7	COM	Common
8	NC	Do Not Connect
9	NC	Do Not Connect
10	Y _{OUT}	Y Channel Output
11	NC	Do Not Connect
12	X _{OUT}	X Channel Output
13	NC	Do Not Connect
14	V _S	2.4 V to 5.25 V
15	V _S	2.4 V to 5.25 V
16	NC	Do Not Connect

Tabla 8. Descripción de los pines acelerómetro ADXL320.

Debido a que este integrado fue diseñado con encapsulado LFCSP, este debe ser soldado especialmente, al no disponer del equipo de soldado para el PCB de este acelerómetro, se importó la versión en PCB que nos ofrece Sparkfun, esta integra Las diferentes resistencias que se necesitan, la figura 47 ilustra el acelerómetro ADXL320 en PCB.

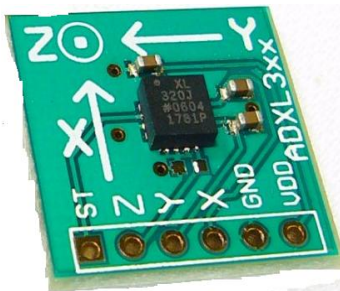


Figura 47. Acelerómetro ADXL montado en PCB de Sparkfun.

Tabla 9. Tabla de selección del acelerómetro

CARACTERÍSTICA	SÍMBOLO	FREESCALE MMA7260	AD ADXL	UNIDAD
ALIMENTACIÓN	VDD	3.3	3	V
CONSUMO	IDD	500	400	μA
BAJO CONSUMO	IDD	3	-	μA
RANGO	gFS	1.5, 2, 4, 6	2	g
SENSIBILIDAD MAX	S	800	167	mV/g
OFFSET	VOff	1.65	1.65	V
XY BANDWIDTH	f-3dB	350	600	Hz
DIMENSIONES		6x6x1.45	4x4x1.45	mm
INTERFAZ		análoga	análoga	
COSTO		19.95	29.95	\$US
DISPONIBLE		Nacional	Internacional (importación de USA)	

El comportamiento del acelerómetro, configurado para funcionar como inclinómetro presenta buenas características de linealidad, tras estudiar esta opción y de acuerdo con la aplicación en nuestro sistema que por obvias razones estará en constante movimiento y sometido a aceleraciones variables, la lectura de aceleración y por tanto la de inclinación, incluirá errores debido a estas aceleraciones dinámicas a las que está sometido, este problema que se presenta nos permitió descartar el acelerómetro como sensor de inclinación, y se estudió la posibilidad de utilizar un sensor de inclinación, que tenga interfaz digital, descartando el problema de ruido electromagnético producido por los motores y demás dispositivos electrónicos que componen el sistema de control.

2.2.4.3 Inclinómetro ADIS16203

Este inclinómetro de Analog Devices basado en tecnología MEMS, incluye dentro de este, acelerómetros configurados de manera que entreguen una medición de inclinación correcta, sin necesidad de cálculos trigonométricos, utilizados para adaptar el acelerómetro como un inclinómetro, el inclinómetro presenta interfaz digital, descartando algún error que pueda ser producido por ruido electromagnético, todas estas características hacen de este sensor un excelente elemento de instrumentación.

Otra de las ventajas del inclinómetro es la interfaz digital SPI, para la comunicación con el microcontrolador, esta interfaz es altamente programable. La medición de inclinación puede entregarse en distintos formatos (0° - 360° , o bien $\pm 180^{\circ}$), configurar el ángulo 0° en distintas posiciones, determinar tiempos de muestreo, generar alarmas para distintas condiciones, integra también un sensor de temperatura y conversores digital-análogo, entre otras características, todas las características anteriormente nombradas son de gran utilidad para diferentes aplicaciones, en nuestro se utilizará únicamente la medición del ángulo, para lo cual se debe ajustar el sensor en términos de calibrar el cero y el tiempo de muestreo.

Características del inclinómetro ADIS16203.

Este sensor de inclinación posee múltiples características integradas, de las cuales están medición de temperatura, medición de inclinación, además es altamente programable. El diagrama de bloques del inclinómetro se muestra en la figura ().

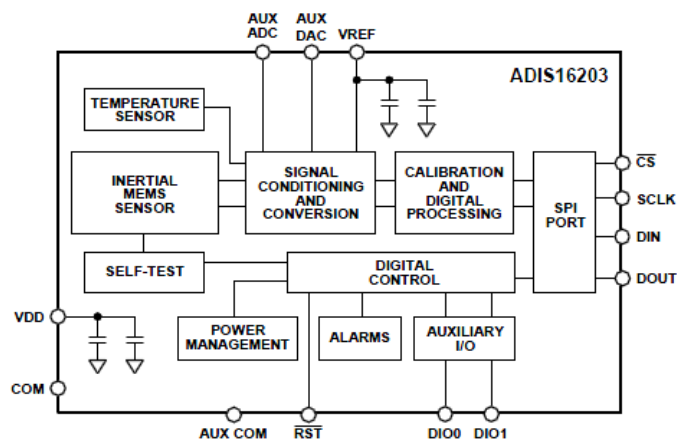


Figura 48. Diagrama de bloques funcional del ADIS16203.

Este sensor posee interfaz digital, por lo tanto la señal de inclinación va codificada en una palabra de 14 bits (0-16384), estos bits son comunicados por medio de SPI, que luego son transformados a grados sabiendo que el rango máximo de medida es 360°.

CARACTERÍSTICA	SÍMBOLO	MIN	TYP	MAX	UNIDADES
ALIMENTACIÓN	V_{dd}	3.0	3.3	3.6	Volts
BAJO CONSUMO	I_{dd}	-	11	14	mA
RANGO	R	0 - +/-180°	-	0-360°	°
SENSIBILIDAD	S	-	0.025	-	%/LSB
BANDWIDTH	f_{3dB}	-	2250	-	Hz

Tabla 10. Características principales del ADIS16203.

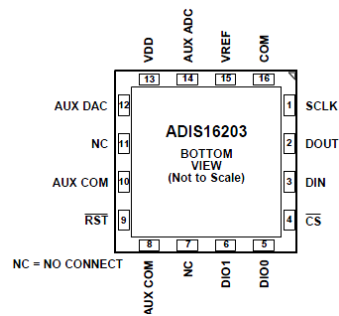
La tabla 10 presenta las características principales del inclinómetro ADIS1603 y la figura 49, ilustra el inclinómetro montado sobre la placa PCB de la que dispone Analog Devices para este modelo de inclinómetro.



Figura 49. Inclinómetro ADIS 16203 montado en PCB.

Descripción de pines.

En la tabla 11 se encuentra la descripción de los pines del sensor de inclinación ADIS16203 en su vista superior con su descripción de pines correspondiente.



Pin No.	Mnemonic	Type ¹	Description
1	SCLK	I	SPI Serial Clock.
2	DOUT	O	SPI Data Out.
3	DIN	I	SPI Data In.
4	CS	I	SPI Chip Select, Active Low. This input frames the serial data transfer.
5, 6	DIO0, DIO1	I/O	Multifunction Digital I/O Pin.
7, 11	NC	-	No Connect.
8, 10	AUX COM	S	Auxiliary Grounds. Connect to GND for proper operation.
9	RST	I	Reset, Active Low. This input resets the embedded microcontroller to a known state.
12	AUX DAC	O	Auxiliary DAC Analog Voltage Output.
13	VDD	S	+3.3 V Power Supply.
14	AUX ADC	I	Auxiliary ADC Analog Input Voltage.
15	VREF	O	Precision Reference Output.
16	COM	S	Common. Reference point for all circuitry in the ADIS16203.

Tabla 11. Descripción de pines ADIS16203.

Respuesta de salida.

El ángulo de inclinación que suministra el ADIS16203, es lineal en grados y suministra la inclinación dependiendo de cómo sea su orientación, así como lo ilustra la figura 50.

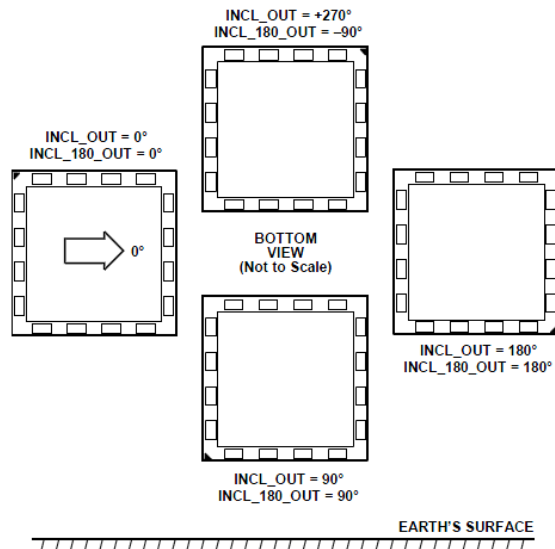


Figura 50. Respuesta de salida Vs orientación.

El inclinómetro posee un encapsulado LGA, el cual no es posible ser soldado en las instalaciones por lo que se debe importar el ADIS16203 en PCB, aunque el precio tuvo un incremento notable respecto al encapsulado nos ahorramos la tediosa tarea de soldar este integrado, el PCB conecta las salida de sensor a los pines correspondientes los cuales permiten realizar las conexiones fácilmente.

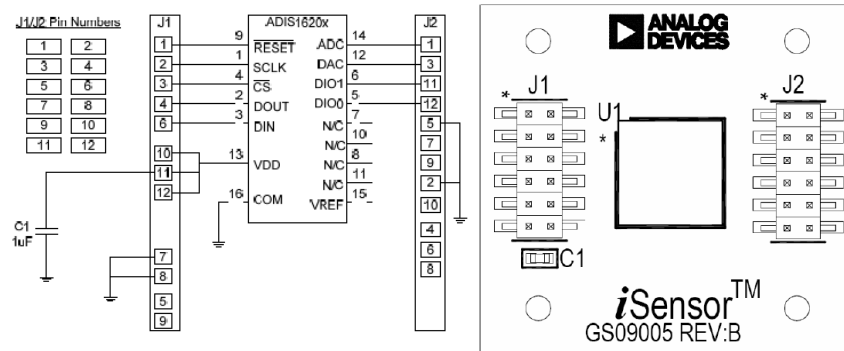


Figura 51. Conexiones en PCB del ADIS16203.

En la tabla 12. Se dan los parámetros principales de este sensor.

Modelo	ADIS16203
Voltaje	3.3 V
Interfaz	SPI
Rango	360°
Resolución	14 bits, 0.025°/bit
Empaquetado	LGA

Tabla 12. Parámetros principales del inclinómetro.

2.2.5 Selección del Giroscopio

El giroscopio es un sensor que permite estimar la velocidad angular respecto a los ejes para los que haya sido diseñado, en nuestro diseño se incluyó la utilización de este sensor, para integrar el IMU, sistema que permitirá calcular la inclinación del vehículo en todo momento. La selección de estas dos alternativas que se estudiaron tiene en cuenta parámetros de consumo, alimentación disponibilidad, sensibilidad y rango.

2.2.5.1 Giroscopio LISY 300AL

Un modelo de ST Electronics, referencia lisy300AI, montado en PCB, se muestra en la figura 52.

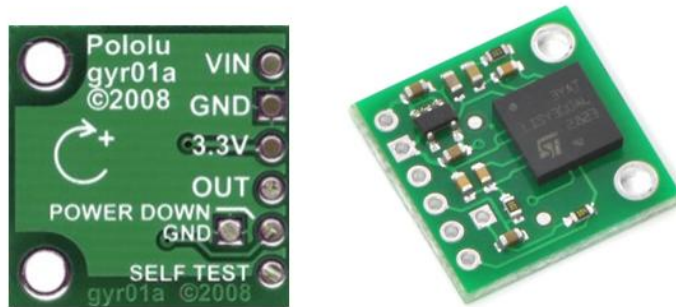


Figura 52. Giroscopio LISY300AI

El giroscopio LISY300AL es un tipo sensor de bajo consumo de energía, de un solo eje. Incluye un elemento de detección y un IC(circuito integrado) capaz de proporcionar una medida de velocidad angular, a través de una tensión de salida análoga, el sensor es capaz de detectar la velocidad angular, se ha fabricado con un dedicado proceso de micro mecanizado (MEMS) desarrollados por ST para producir sensores inerciales y actuadores en obleas de silicio, el diagrama de bloques del LISY300AL se ilustra en la figura 53.

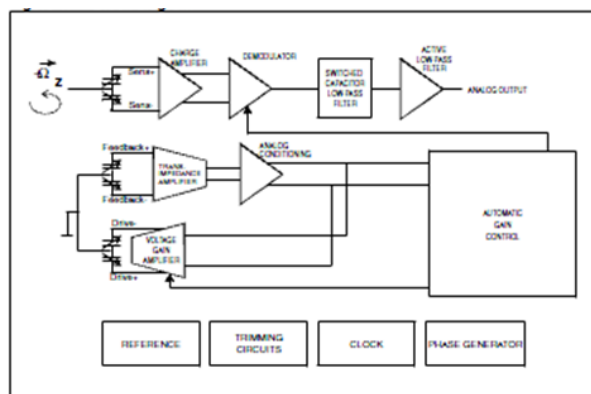


Figura 53. Diagrama de bloques giroscopio LISY300AL

El LISY300AL tiene una escala de $\pm 300^\circ / s$, capaz de medir las tasas con un 3 dB de ancho de banda de hasta 88 Hz. puede funcionar dentro de un rango de temperatura de $-40^\circ C$ a $+85^\circ C$.

En la tabla 13 se resumen las características principales del giroscopio LISY300AL, para mayor información acerca de este sensor se encuentra el datasheet del LISY300AL en el anexo F.

CARACTERÍSTICA	SÍMBOLO	LISY300AL	UNIDAD
ALIMENTACIÓN	V_{DD}	3.3	V
CONSUMO	I_{DD}	500	μA
RANGO	$^\circ/s$	300	$^\circ/s$
SENSIBILIDAD MAX	S	3.3	mV/ $^\circ/s$
OFFSET	V_{off}	1.65	V
XY BANDWIDTH	f_{3dB}	80	Hz
DIMENSIONES		7x7x1.5	mm
INTERFAZ		análoga	
COSTO		19.95	\$US
DISPONIBLE		Nacional	

Tabla 13. Características principales el giroscopio LISY300AL

2.2.5.2 Giroscopio IDG 500 de invensense

El IDG-500 es un giróscopo de tecnología MEMS suministra velocidad angular en dos ejes, este está diseñado específicamente para el procesamiento de movimiento complejo.

Ofrece mejoras de rendimiento significativas, el IDG-500 ofrece $500^\circ / s$ a gran escala, y $2mV / ^\circ / s$ de sensibilidad, en un tamaño $4x5x1.2mm$.

Con la incorporación de la tecnología patentada función Auto Cero, para reducir al mínimo la deriva sesgo respecto a la temperatura, el IDG-500 ofrece un rendimiento sin precedentes.

Además ofrece una alta sensibilidad para un bajo rango de velocidad angular, de 9.1 mV/°/s, esto es ideal para tarjetas de adquisición de datos de baja resolución, el rango que ofrece a esta sensibilidad es de 110°/s. En la figura 54, se observa el diagrama de bloques que compone este sensor, vemos porque este sensor posee tan altas prestaciones.

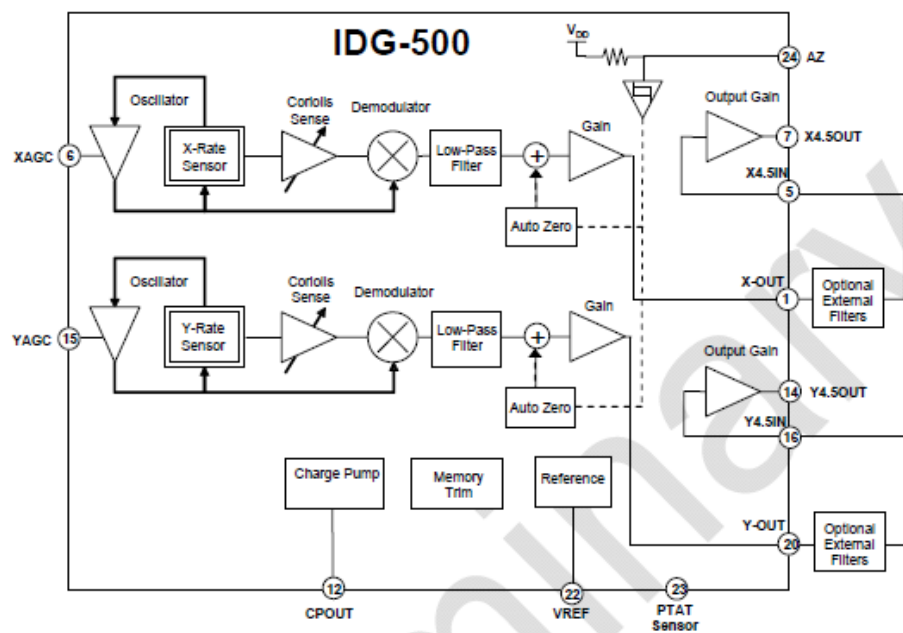


Figura 54. Diagrama de bloques del IDG-500.

La tabla 14. Resume las características principales de este sensor biaxial, además se comparan las dos alternativas, donde se observan las diferencias claras, para mayor información sobre giroscopio IDG 500, se dispone el datasheet en el anexo E.

Tabla 14. Características principales del giroscopio IDG500

CARACTERÍSTICA	SÍMBOLO	IDG500	LISY300AL	UNIDAD
ALIMENTACIÓN	V_{DD}	3.0	3.3	V
CONSUMO	I_{DD}	2	500	mA
RANGO	$^{\circ}/s$	500	300	$^{\circ}/s$
SENSIBILIDAD MAX	S	9.1	3.3	mV/ $^{\circ}/s$
OFFSET	V_{off}	1.35	1.65	V
XY BANDWIDTH	f_{3dB}	31	80	KHz
DIMENSIONES		4x5x1.2	7x7x1.5	mm
INTERFAZ		análoga	análoga	
COSTO		39.95	19.95	\$US
DISPONIBLE		internacional	Nacional	

Luego de el análisis de las diferencias hecho a los dos sensores, se puede concluir que para la aplicación en este proyecto, sugerimos la utilización de el giroscopio IDG 500 de invensense, debido a su alta sensibilidad (tres veces la del LISY300AL), aunque a un rango bajo (110 $^{\circ}/s$) no teniendo mucha relevancia en nuestra aplicación, esta alta sensibilidad permite optimizar la adquisición de datos, debido a que la resolución de ADC del microcontrolador utilizado es relativamente baja (10bits). El consumo de corriente es alto, pero esto no tendrá mayores implicaciones, el ancho de banda es otra ventaja de este sensor, 31 KHz para la aplicación es bastante bueno, aunque el costo es alto (39.95 \$US), comparado con el LISY300AL (19.95 \$US), podemos tener mejor rendimiento en el sistema de control utilizando este sensor, que muestra significativas ventajas con las opciones que se ofrecen en el mercado.

Debido a que el encapsulado del IDG 500, no es posible ser solado al PCB en el laboratorio, se decidió importar el IDG 500 en PCB que ofrece sparkfun, la figura 55. ilustra el giroscopio IDG 500 montado en PCB.

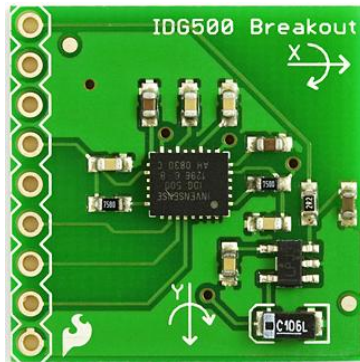


Figura 55. Giroscopio IDG 500 montado en PCB, vista superior.

2.2.6 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 opto 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.

En muchas aplicaciones de este tipo [2,3,6], se seleccionaron motores de potencias y torques muy similares, en la tabla 15 se muestran cuales motores podrían ser una alternativa para el proyecto VEAU, ya que cumple con los requerimientos de velocidad, torque y potencia que se exige en esta aplicación.

La elección del motor permitió determinar parámetros generales de diseño en términos estructurales, como son el peso y tamaño, en términos de la electrónica de potencia, como son la corriente pico y voltaje de alimentación, a el elemento que compone la electrónica de potencia se le llama el pre actuador, uno de las elementos principales de este proyecto ya que este elemento es la interface entre el controlador y el actuador.

MODELO	NPC-T64	M4-R0062-12	226-3001	UNIDADES
VENDEDOR	<i>NPC-Robotics</i>	<i>Banebots</i>	<i>AM-equipment</i>	
VOLTAJE	24	12	12	V
CAJA REDUCTORA	20:1	16:1	16:1	
VELOCIDAD NOMINAL	230	5310	95.9	RPM
POTENCIA	0.7	0.46	0.3	HP
CORRIENTE NOMINAL	21	2.7A	3.4	A
CORRIENTE PICO	110 A	19.8	15.7	A
TORQUE MÁXIMO	93	2.4	15	N-m

Tabla 15. Tabla de de motores DC.

2.3 PARTE DE CONTROL

La parte de control en el sistema dinámico VEAU está constituida por el pre actuador y el controlador, adicionalmente las comunicaciones entre los distintos dispositivos que componen la planta dinámica del VEAU, en la figura 56 se señala la parte de control.

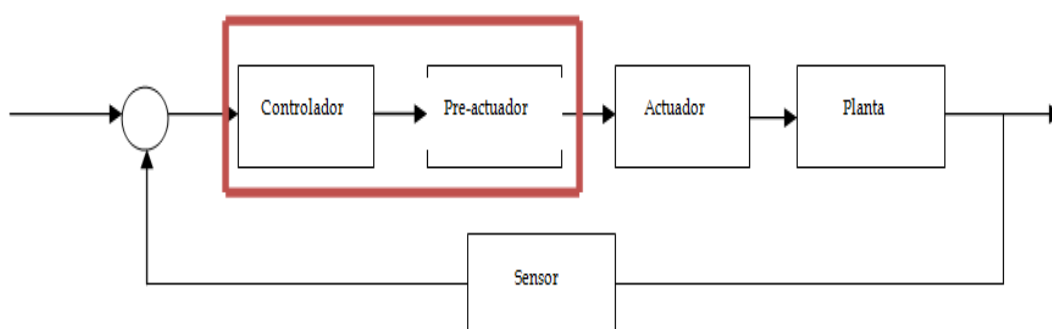


Figura 56. Parte de control del sistema dinámico VEAU.

2.3.1 Controlador

Se utilizó una tarjeta de desarrollo llamada Arduino mega se ilustra en la figura 58, esta tarjeta incluye todos los dispositivos electrónicos necesarios para integrar un microcontrolador atmega1280 del fabricante Atmel, en la cual se diseñó un controlador embebido para la planta dinámica del VEAU por medio de la programación en el software de alto nivel Arduino, basado en C++.

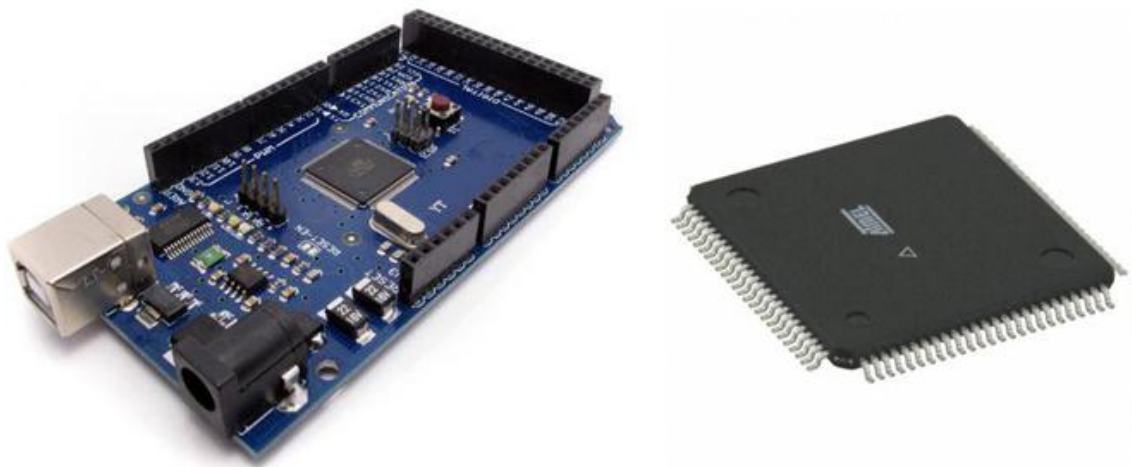


Figura 58. Placa de desarrollo Arduino mega, integrando un microcontrolador atmega128 de Atmel

Características Principales de la tarjeta ARDUINO mega

- Clock de 16 MHz
- Memoria 128 KB (flash)
- Memoria 16 KB (RAM)
- Rango alimentación de la tarjeta 5-9 Volts
- 16 pines de entradas analógicas con un ADC de 10 bits
- Rango de temperatura -40°C a +105°C
- 11 pines de PWM de 8 bits.
- 4 channel de comunicación (SPI/UART).
- Comunicación con el ordenador mediante puertos USB o COM.

2.3.2 Pre actuador

Para el control de los motores se requirió implementar dispositivo llamado puente H, capaz de controlar la dirección y velocidad de los actuadores, dependiendo de las señales de control que entregue el controlador. Este dispositivo acopla la parte control con la parte de potencia de nuestro sistema, y su importancia es clara en el funcionamiento del vehículo, una configuración básica de un puente H se observa en la figura 57.

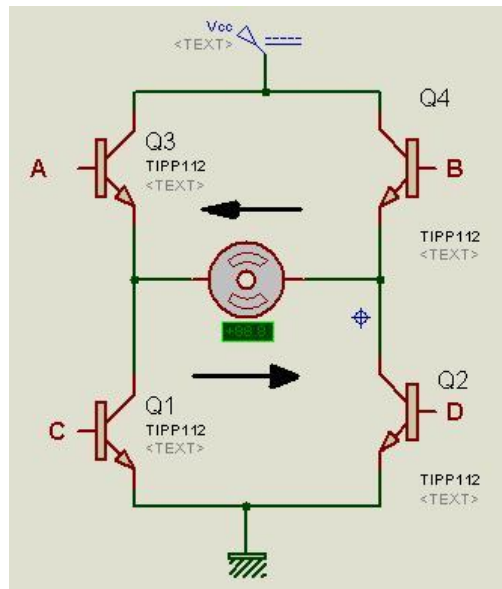


Figura 57. Configuración de un puente H.

El dispositivo puente H basado en transistores que soporten los voltajes y corrientes necesarios para alimentar correctamente el motor.

La alimentación será a 24 V, en base a 2 baterías de 12 V. El control del voltaje entregado al motor será mediante señales PWM que excitan el semiconductor, permitiendo un control de velocidad y dirección.

2.4 PUENTE H

El control de velocidad de los motores se realiza por medio de regulación de voltaje promedio que llegue al motor, esta regulación se realiza por medio de la utilización de un transistor que no es más que una válvula que regula corriente al motor, regulando el voltaje entre las terminales del motor.

Para el control de la dirección del motor se configuran el encendido de los MOSFETS de manera secuencial como se muestra en la figura 59.

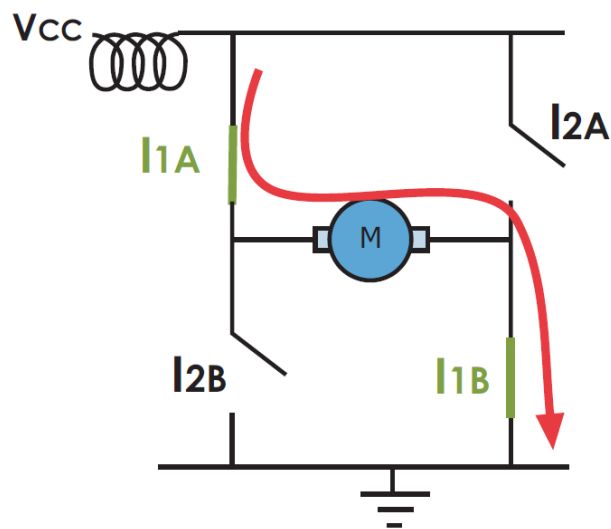


Figura 59. Esquema simplificado de funcionamiento de un puente H.

El interruptor I1A como el I1B se encuentra encendidos, lo que permite que la corriente fluya a través de ellos y de la armadura del motor. Para cambiar el sentido de giro, basta apagar I1A y I1B, y encender I2A y I2B.

Para regular la tensión suministrada al motor, se varía el ciclo de trabajo del PWM que se entrega al transistor, haciendo una analogía sería regular la apertura de una válvula que regula flujo, entre mayor sea el ciclo de trabajo mayor apertura de la válvula.

Para las diferentes etapas del proyecto se realizaron diferentes arreglos de puentes H. Conforme iba aumentando el tamaño del montaje, así mismo lo hacían los motores y con estos la capacidad del puente H también debió

aumentar. A continuación se explica brevemente cada uno de los arreglos que se implementaron.

2.4.1 Integrado L298N

Primer arreglo: Para manejo de corrientes entre 0 y 1.5 Amp, se usó el integrado L298N [11]. Este integrado está compuesto por una serie de transistores BJT que forman dos puentes H con una capacidad máxima de manejo de corriente de 2 A continuos y hasta 3 A, en picos que no se repitan continuamente. En la figura 60 se observa el equivalente en un diagrama de bloques del este integrado y una fotografía del mismo.

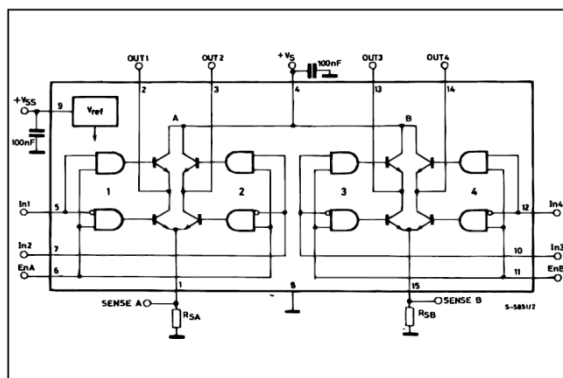


Figura 60. Integrado L298N, representación en diagrama de bloques y fotografía.

Para su funcionamiento este integrado requiere de una entrada de potencia de hasta 46 Volt, una entrada que alimenta el integrado que va entre 5 y 7 Volt y dos entradas de control. Si una entrada recibe la señal en PWM la otra debe estar en cero para que el motor gire en un sentido. Para girar en sentido contrario, se deben invertir las entradas, es decir, la que recibía el PWM ahora está en cero y la que está en cero ahora recibe PWM.

Para manejar corrientes mayores a dos ampere, los dos arreglos internos de este integrado se pueden conectar en paralelo, así como también se puede realizar un montaje en paralelo de varios integrados. El comportamiento en

paralelo de este tipo de integrado no es proporcional al número de integrados que se usen, es decir, si se conectan en paralelo cuatro puentes H (cada uno soporta 2 A) no quiere decir que el “Puente H” resultante vaya a soportar 8 A, puesto que los transistores BJT no permiten la distribución exacta de la carga entre los transistores que se encuentren en paralelo, es decir, se recargan unos más que otros hasta quemarse.

Para manejar corrientes entre 2 y 4 ampere continuos y 13 ampere en pico se realizó el arreglo que se ve en la figura 61, con 6 integrados L298N. En esta figura se puede observar que en la parte trasera de los integrados hay una placa disipadora de calor refrigerada por dos ventiladores que ayudan al sistema a mantener una temperatura adecuada.



Figura 61. Arreglo de integrados L298N en paralelo.

2.4.2 Puente H con Transistores MOSFET

Para manejo de corrientes altas se realizaron dos montajes usando transistores MOSFET. En el primer montaje se implementó una estructura de puente H como se muestra en la figura 62. Este montaje usa un solo transistor en donde va cada switch. Mientras que para el segundo montaje y para garantizar una mayor capacidad de manejo de corriente se usaron transistores en paralelo. Ver figura 63.

Para la implementación estos puentes H utilizaron MOSFET NPN, IRF48N [11] en la parte superior del arreglo, mientras que en la inferior se usaron PNP, IRF4905 [10]. Las características principales se muestran en la Tabla 16.

Modelo	IRF48N	IRF4901
$V_{ds}(\text{máximo})$	55 V	55 V
R_{ds}	0.016 Ω	0.02 Ω
<i>Corriente máxima</i>	64 A	74 A

Tabla 16. Características principales de los transistores MOSFET utilizados.

El puente H mostrado en la figura 62 está compuesto por dos transistores IRF48N y dos IRF4905. Funciona con 24 Volt. Tiene incorporado un arreglo de compuertas lógicas que permiten que este use solo dos entradas de control de tal forma que mientras una recibe la señal PWM la otra debe estar en cero para que el motor gire en un sentido y al contrario para que el motor gire en el otro sentido. Debe cuidarse de que en ningún momento queden ambas entradas en ALTO (5 Volt), pues esto implica un corto en los transistores, lo que los daña inmediatamente.

Para su funcionamiento requiere además de la entrada de potencia (24 Volt) una entrada de voltaje de alimentación (5 Volt) de los integrados lógicos, ambas deben llevar tierras independientes.

Las entradas de este puente H están aisladas por medio de un opto-acoplador [13], de tal forma que en caso se corto o daño en los transistores no dañe el microcontrolador.

Para el manejo de corrientes más altas que en el caso anterior fue necesario el desarrollo de un puente H con transistores en Paralelo (ver figura 63), lo cual casi duplica la capacidad del puente H anterior.

La corriente máxima que maneja la etapa de potencia implementada en este proyecto es de 19.8 A en pico y bajo ciertas condiciones se puede alcanzar el estado de Stall current (133A). Este arreglo asegura que la electrónica de potencia este por encima de los requerimientos de los motores, el cual puede soportar hasta 148 A bajo apropiadas condiciones de disipación de calor, razón por la cual se fijo un ventilador sobre los transistores.

Para su funcionamiento este puente H requiere de una entrada de potencia (12 Volt), una entrada de alimentación de la parte lógica (5 Volt), ambas con tierras independientes y dos señales de control.

Por medio de un circuito hecho con compuertas lógicas, el funcionamiento de las señales de control para este puente H es diferente a las usadas en los casos anteriores. Requiere de dos señales A y B. Si A es ALTO (5 Volt) el motor gira hacia un sentido, si es bajo (0 Volts) el motor gira hacia el otro lado. B recibe la señal en PWM. De esta forma se evita que en algún momento ambas ramas del puente H queden en ALTO, evitando así un corto en los transistores.

En la figura 64 se observa el esquema de este puente H.

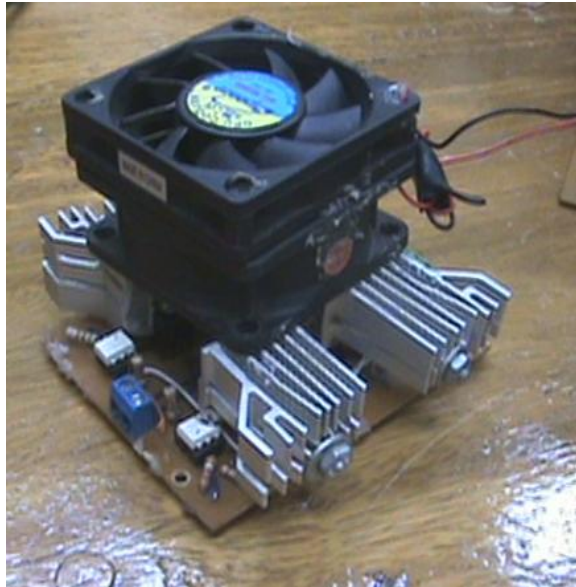


Figura 62. Puente H con transistores MOSFET.

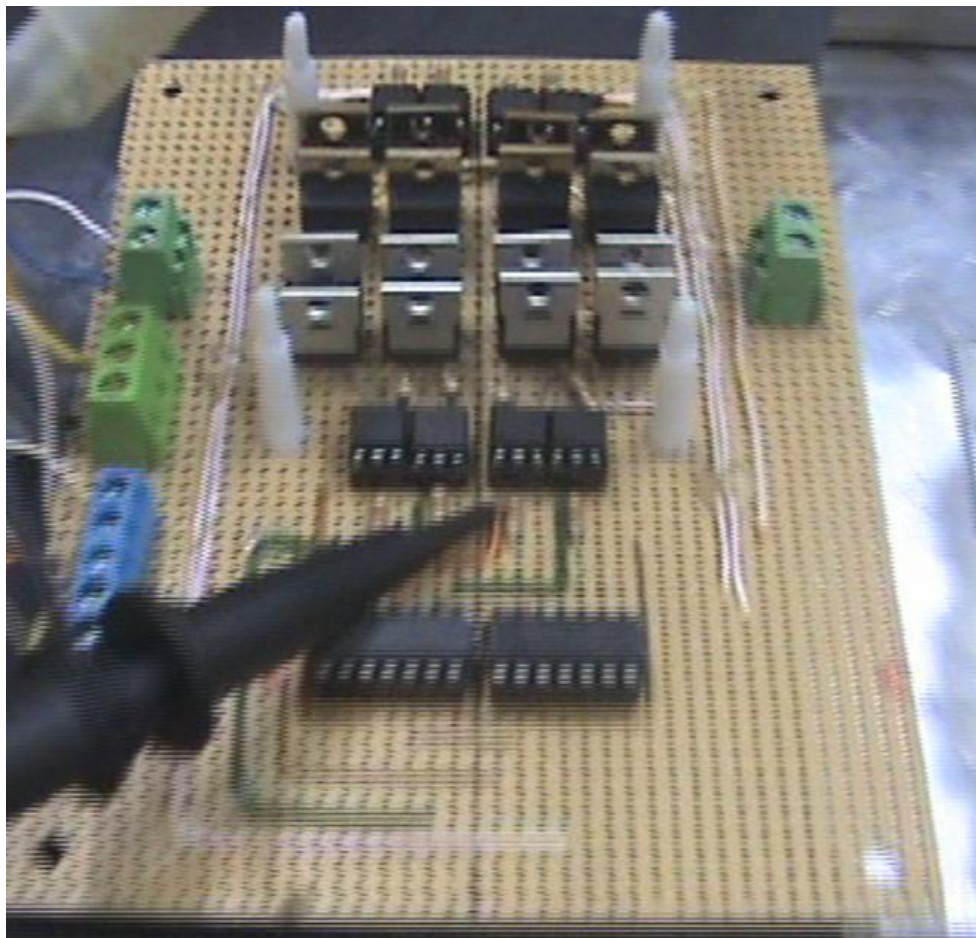


Figura 63. Puente H con transistores MOSFET en paralelo y compuertas lógicas.

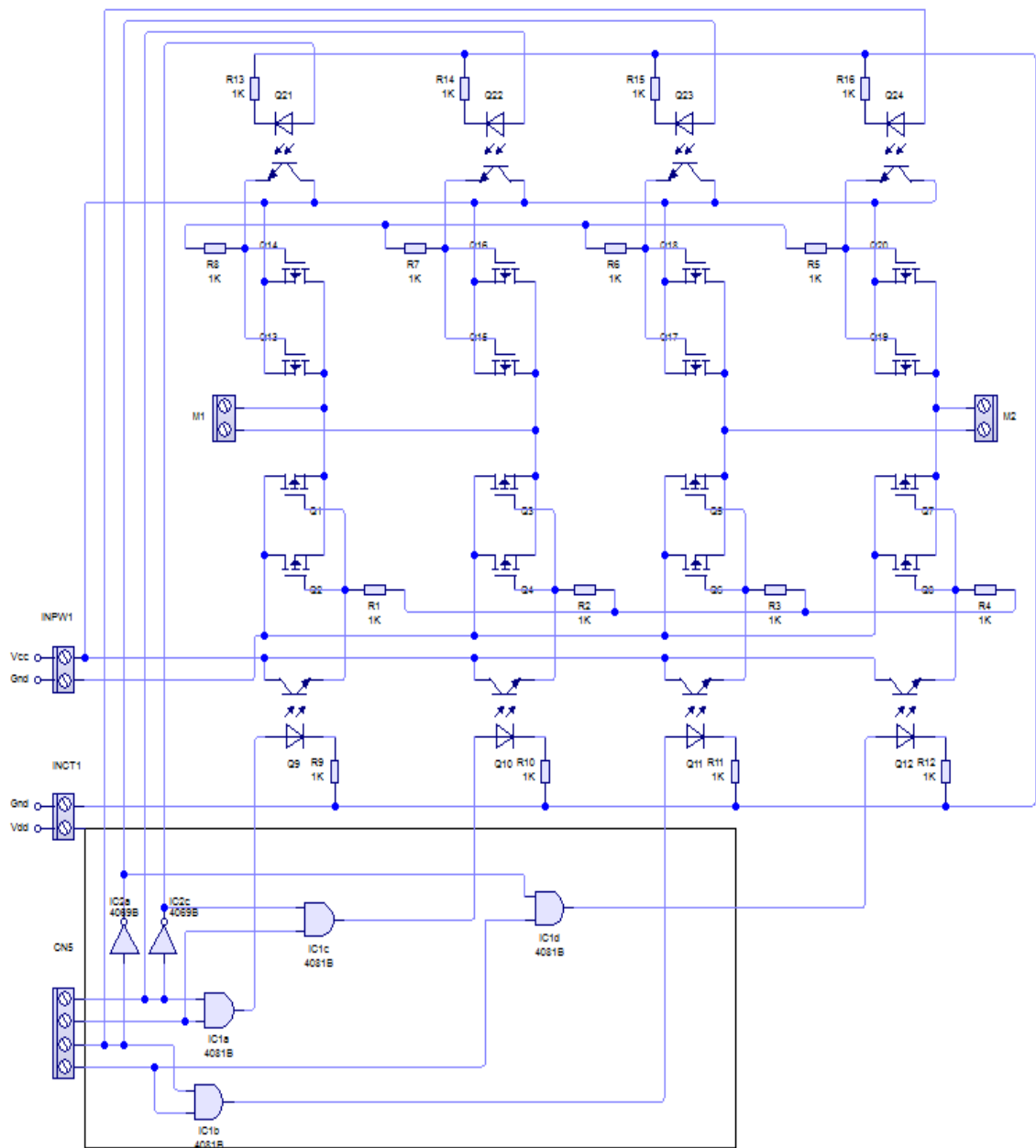


Figura 64. Esquema del puente H con transistores en paralelo y compuertas lógicas. Fuente: Los autores.

3 MODELO MATEMATICO

3.1 MODELAMIENTO Y ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL VEAU

Antes de implementar cualquier método de control para el sistema dinámico que se implemento, se desarrollo un modelo matemático para estimar el comportamiento del sistema, y de esta forma poder hallar los requerimientos técnicos de control, entré los cuales se encuentran; la energía que debemos suministrar, variables de estado, materiales a utilizar, perturbaciones, etc.

El sistema que se desarrolló está basado en el péndulo invertido que se muestra en la figura 65, este es un sistema dinámicamente inestable de dos grados de libertad (2 DOF), inclinación (θ) y desplazamiento (X).

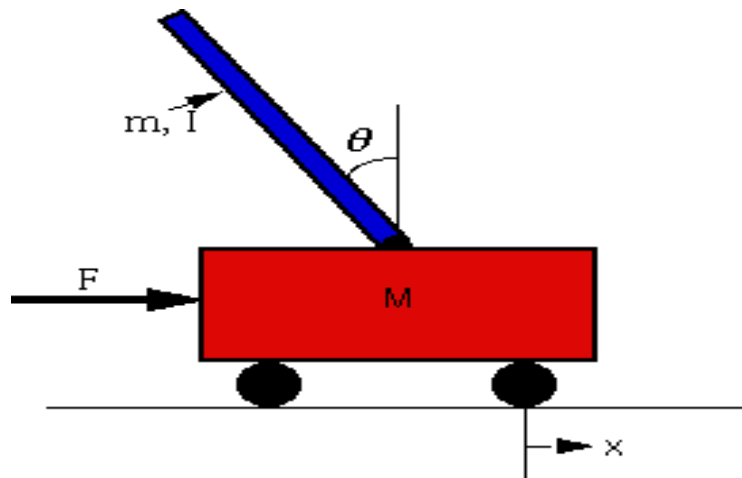


Figura 65. Péndulo invertido
Fuente: <http://www.ib.cnea.gov.ar>

El sistema desarrollado en este proyecto es un sistema de tres grados de libertad (3 DOF), inclinación, rotación y desplazamiento. La Figura 66 muestra, la rotación respecto al eje Z llamado "pitch angle" (θ_p), rotación respecto al eje Y llamado "yaw angle" (δ), y el desplazamiento en el eje X (X_{RM}). La complejidad del control aumenta cuando se exija controlar cada uno de estos tres grados de libertad, pero se debe buscar cual variable es la más relevante y

que pueda indirectamente controlar las otras, así se reduce la complejidad de control de sistemas múltiples.

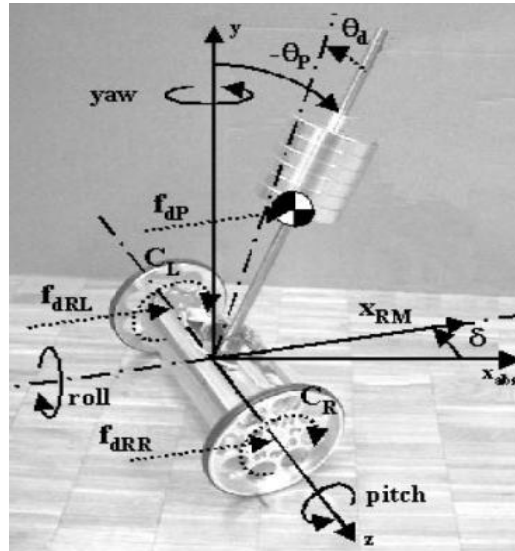


Figura 66. Grados de libertad del VEAU.

Fuente: Grasser Felix, D'arrigo Aldo, Colombi Silvio, Rufer Alfred; JOE: A Mobile Inverted Pendulum.

El modelo matemático se basó en trabajos anteriores, se resumen en el capítulo de antecedentes, en los que se dan pautas para el diseño y construcción de un vehículo auto balanceado, el alcance de estos trabajos han sido el desarrollo e implementación de un vehículo auto balanceado⁸.

Para el desarrollo del modelo matemático se simplificó el sistema en cuanto a su estructura y parámetros dimensionales, a una barra horizontal con dos ruedas en sus extremos, unidos a su vez con una barra vertical en su centro, esta simplificación permite obtener un vehículo más fácil de analizar. Se muestra en la figura 67.

⁸ Diseño e implementación de un vehículo auto balanceado sobre dos ruedas; Leonardo Felipe Moreno Bustamante.

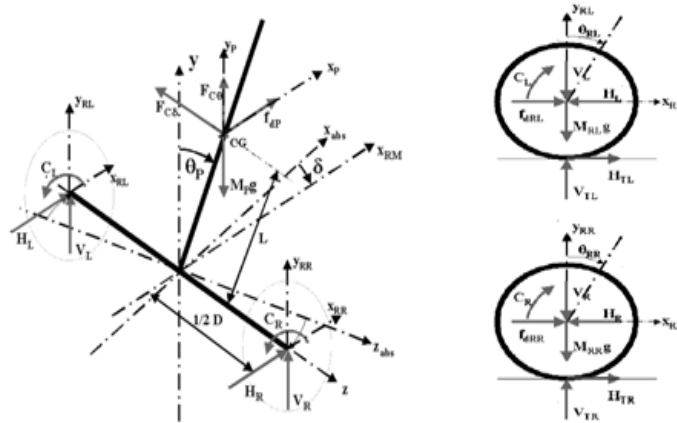


Figura 67. Diagrama de cuerpo libre del VEAU.

Para el vehículo se seleccionaron las siguientes variables y parámetros que se integran en la tabla 17, que definen el comportamiento dinámico del vehículo.

NOMBRE	TIPO	SIGNIFICADO
X_r	Variable	Posición del CM de las ruedas, respecto al eje x .
\dot{X}_r	Variable	Velocidad del CM de la ruedas respecto al eje x .
X_p	Variable	Posición del CM de la plataforma respecto al eje x .
\dot{X}_p	variable	Velocidad del CM de la plataforma respecto al eje x .
Y_p	Variable	Posición del CM de la plataforma respecto al eje y .
\dot{Y}_p	Variable	velocidad del CM de la plataforma respecto al y .
θ_p	Variable	Angulo de inclinación respecto a la vertical.
$\dot{\theta}_p$	Variable	Velocidad angular respecto eje z
δ_p	variable	Velocidad angular de giro del vehículo respecto al eje Y
L	parámetro	Distancia del CM del sistema, respecto al eje de la rueda
$D/2$	parámetro	Distancia entre el centro del vehículo y el centro de la rueda
M_p	parámetro	Masa de la plataforma
M_r	parámetro	Masa de la rueda
$I_{b\theta}$	parámetro	Momento de Inercia respecto al centro de masas de la plataforma en inclinación.
$I_{b\delta}$	parámetro	Momento de Inercia respecto al centro de masas de la plataforma en giro.
I_r	parámetro	Inercia de las ruedas.
τ_d, τ_i	parámetro	Torque del motor derecho e izquierdo respectivamente

Tabla 17. Parámetros principales del VEAU.

Se aplico, dinámica fundamental para el análisis y obtención del modelo matemático del sistema, el sistema simplificado se dividió en dos partes, ruedas y plataforma, se analizo independiente las dos partes. En la figura 68 se

muestra el DCL de las ruedas izquierda y derecha con sus respectivos parámetros que las caracteriza.

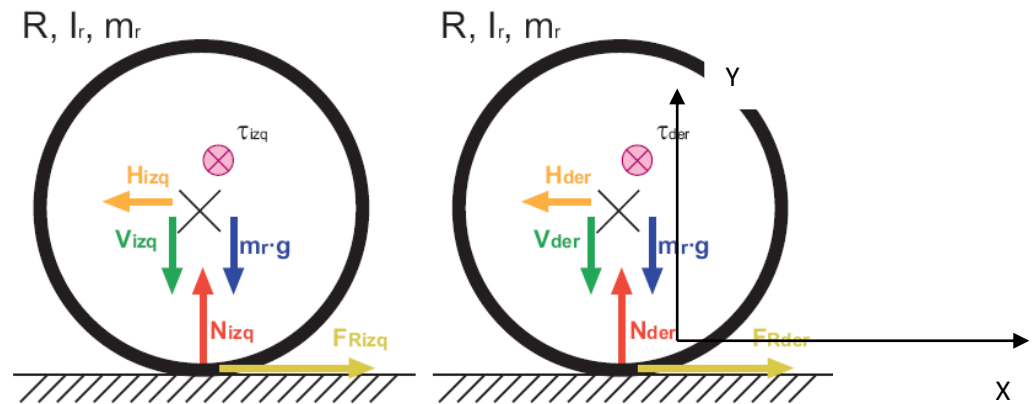


Figura 68. Diagrama de cuerpo libre ruedas izquierda y derecha.

Como las ruedas se desplazan horizontalmente, estas experimentan aceleración proporcional a las fuerzas externas aplicadas, de acuerdo a la segunda ley de Newton se obtuvo las siguientes ecuaciones:

$$F_{xd} = M_r * X_{rd}$$

$$M_r * X_{rd} = F_{Rd} - H_d \quad (1)$$

$$F_{xi} = M_r * X_{ri}$$

$$M_r * X_{ri} = F_{Ri} - H_i \quad (2)$$

En el eje Y, la rueda no experimenta aceleración:

$$F_{yd} = 0$$

$$M_r * g - V_d + N_d = 0 \quad (3)$$

$$F_{yi} = 0$$

$$M_r * g - V_i + N_i = 0 \quad (4)$$

Se aplico la ecuación de sumatoria de torques en las ruedas izquierda y derecha respecto al centro de masa de la rueda:

$$\tau_{cmd} = I_{cm} * \alpha_{rd}$$

$$I_{cm} * \frac{X_{rd}}{R} = \tau_{md} - F_{Rd} \quad (5)$$

$$\tau_{cmi} = I_{cm} * \alpha_{ri}$$

$$I_{cm} * \frac{X_{ri}}{R} = \tau_{mi} - F_{Ri} \quad (6)$$

Debido al que el sistema de referencia está montado en el centro de la rueda del vehículo:

$$X_{ri} = X_{rd} = X_r \quad (7)$$

Para el análisis de las fuerzas que actúan en la plataforma, se utilizó la figura 69 donde se muestran los parámetros que le caracterizan:

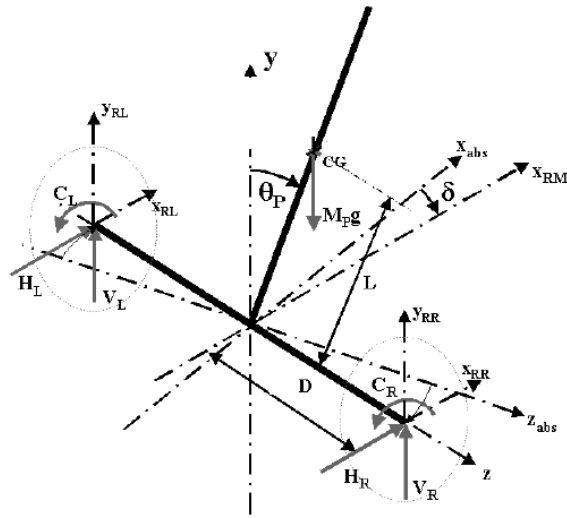


Figura 69. Diagrama de cuerpo libre plataforma.

Fuente: Grasser Felix, D'arrigo Aldo, Colombi Silvio, Rufer Alfred; JOE: A Mobile Inverted Pendulum.

$$F_{xp} = M_p * X_p$$

$$M_p * X_p = H_i + H_d \quad (8)$$

$$F_{yp} = M_p * Y_p$$

$$M_p * Y_p = (V_d + V_i) - M_p * g \quad (9)$$

Se aplico la ecuación de sumatoria de torques aplicados sobre la plataforma, respecto al eje de las ruedas obteniendo:

$$\tau_{cmp} = I_p * \theta_p$$

$$I_p * \theta_p = (V_d + V_i) * \sin \theta_p * L - H_i + H_d * \cos \theta_p * L - (\tau_{md} + \tau_{mi}) \quad (10)$$

Se aplico sumatoria de torques, respecto al centro del eje de la rueda, para análisis del giro del vehículo, en este caso el momento de inercia de la plataforma se toma con respecto CM de la plataforma, en la figura 70 se observa el vehículo en vista superior, donde el momento de inercia depende de la distancia entre ruedas.

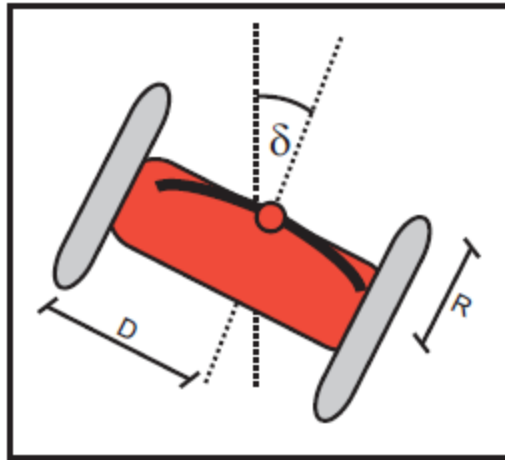


Figura 70. Vista superior del vehículo.

$$\tau_{cmp} = I_{p\delta} * \delta_p$$

$$I_{p\delta} * \delta_p = H_i - H_d * D \quad (11)$$

Se relaciono los desplazamientos del CM de la plataforma, con los del CM de la rueda, observando la figura 71, se obtuvieron las siguientes relaciones:

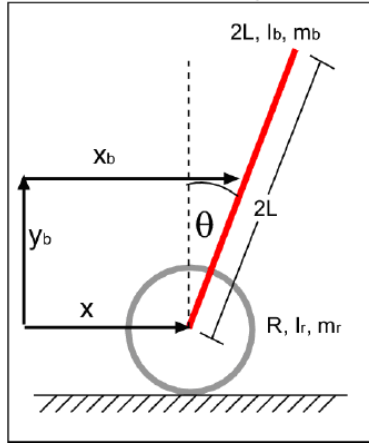


Figura 71. Relación de posición entre la plataforma y las ruedas.

$$X_p = X_R + L * \sin(\theta_p)$$

$$X_p = X_R + L * \cos \theta_p * \theta_p$$

$$X_p = X_R + L * \cos \theta_p * \theta_p - L * \sin \theta_p * \theta_p^2 \quad (12)$$

$$Y_p = L * \cos(\theta_p)$$

$$Y_p = -L * \sin \theta_p * \theta_p$$

$$Y_p = -L * \sin \theta_p * \theta_p - L * \cos \theta_p * \theta_p^2 \quad (13)$$

Se combinó adecuadamente las ecuaciones (8 a 10) con las (12 y 13), se obtuvo:

$$M_p * X_p - M_p * L * \theta_p^2 * \sin \theta_p + M_p * L * \theta_p * \cos \theta_p = (H_i + H_d) \quad (14)$$

$$-M_p * L * \theta_p^2 * \cos \theta_p - M_p * L * \theta_p * \sin \theta_p = (V_d + V_i) - M_p * g \quad (15)$$

$$I_{p\theta} * \ddot{\theta} = (V_d + V_i) * \sin \theta_p * L - H_i + H_d * \cos \theta_p * L - (\tau_{md} + \tau_{mi}) \quad (16)$$

$$I_{p\delta} * \ddot{\delta}_p = H_i - H_d * D \quad (17)$$

Al combinar las ecuaciones (14 a 16) y las ecuaciones (3 a 6) se obtienen las siguientes ecuaciones dinámicas del sistema:

$$I_{p\theta} * \ddot{\theta}_p - M_p * g * \sin \theta_p * L + M_p * L * \ddot{X}_p * \cos \theta_p + M_p * L^2 * \ddot{\theta}_p = -(\tau_{md} + \tau_{mi}) \quad (17)$$

$$M_p + 2 * M_R + \frac{2 * I_R}{R^2} * X_p - M_p * L * \theta_p^2 * \sin \theta_p + M_p * L * \ddot{\theta}_p * \cos \theta_p = \frac{(\tau_{md} + \tau_{mi})}{R} \quad (18)$$

$$I_{p\delta} * \ddot{\delta}_p = \frac{\tau_{mi} - \tau_{md} * D}{R} \quad (19)$$

Las ecuaciones 17 a 19 permite obtener la relación entre el desplazamiento y la inclinación, además la relación entre el giro del vehículo con las demás variables del sistema, se pudo obtener una primera conclusión, el giro del vehículo solo depende de la diferencia de torques entre los dos motores y no depende de la inclinación de la plataforma. Además se observa la dependencia del desplazamiento lineal con la inclinación del vehículo.

3.2 LINEALIZACION DEL SISTEMA

Para simplificar el análisis del sistema se realizó la linealización del sistema en torno a un ángulo de cero grados, debido a que la posición angular del CM de la plataforma debe ser controlada para que siempre se mantenga a cero grados, esto permite obtener el comportamiento dinámico del vehículo auto balanceado, que es estabilizado haciendo un control de la inclinación de la plataforma.

Se realizo la linealización del sistema obteniendo:

$$(I_{p\theta} + M_p * L^2) * \theta_p - M_p * g * \theta_p * L + M_p * L * X_p = -(\tau_{md} + \tau_{mi}) \quad (20)$$

$$M_p + 2 * M_R + \frac{2 * I_R}{R^2} * X_p + M_p * L * \theta_p = \frac{(\tau_{md} + \tau_{mi})}{R} \quad (21)$$

$$I_{p\delta} * \delta_p = \frac{\tau_{mi} - \tau_{md} * D}{R} \quad (22)$$

Se combino las ecuaciones adecuadamente obteniendo:

$$\theta_p = a * \theta_p + b * (\tau_{md} + \tau_{mi}) \quad (23)$$

$$X_p = c * \theta_p + d * (\tau_{md} + \tau_{mi}) \quad (24)$$

$$\delta_p = e * (\tau_{mi} - \tau_{md}) \quad (25)$$

$$a = \frac{M_p + 2 * M_R + \frac{2 * I_R}{R^2} * L * M_p * g}{M_p + 2 * M_R + \frac{2 * I_R}{R^2} * (I_{p\theta} + M_p * L^2) - L * M_p^2}$$

$$b = \frac{M_p + 2 * M_R + \frac{2 * I_R}{R^2} + L * M_p * R}{M_p + 2 * M_R + \frac{2 * I_R}{R^2} * (I_{p\theta} + M_p * L^2) - L * M_p^2}$$

$$c = \frac{-L * M_p^2 * g}{M_p + 2 * M_R + \frac{2 * I_R}{R^2} * (I_{p\theta} + M_p * L^2) - L * M_p^2}$$

$$d = \frac{L * M_p + \left(\frac{M_p + 2 * M_R + \frac{2 * I_R}{R^2}}{R} \right)}{M_p + 2 * M_R + \frac{2 * I_R}{R^2} * (I_{p\theta} + M_p * L^2) - L * M_p^2}$$

$$e = \frac{D}{R * I_{p\delta}}$$

Las ecuaciones (23 a 25) permitió observar un comportamiento simplificado del sistema, la posición, velocidad y aceleración son dependientes del ángulo de inclinación de la plataforma, esto permite tener un control de la plataforma el ángulo.

Para la acción de giro, (ecuación 25) no hay dependencia de la posición, tampoco del ángulo de inclinación, solo depende de la diferencia de torques de los motores izquierdo y derecho.

Por el tanto se puede realizar control del ángulo, separadamente del control de giro, y el movimiento lineal del vehículo queda dependiente del ángulo de inclinación.

3.3 DESACOPLE DE SUBSISTEMAS INCLINACION-GIRO

Debido a que el giro y el ángulo son dependientes de los torques de los motores, debemos desacoplar los dos subsistemas, giro e inclinación utilizando torques virtuales asociados a cada subsistema estos torque virtuales se definen:

$$\tau_{md} + \tau_{mi} = \tau_{\theta}$$

$$\tau_{mi} - \tau_{md} = \tau_{\delta}$$

De modo matricial se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \tau_{\theta} \\ \tau_{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \tau_{md} \\ \tau_{mi} \end{bmatrix}$$

A la matriz de 2x2 que obtuvo es llamada matriz de desacople y permite desacoplar los dos subsistemas involucrados, su inversa permite calcular cada una de las acciones de control a cada motor una vez teniendo las acciones de control virtuales, se obtienen las ecuaciones que simplifican el comportamiento del vehículo:

$$\theta_p = a * \theta_p + b * (\tau_{\theta}) \quad (26)$$

$$X_p = c * \theta_p + d * (\tau_{\theta}) \quad (27)$$

$$\delta_p = e * (\tau_{\delta}) \quad (28)$$

Para hallar las acciones de control se debe hallar, el torque virtual necesario para controlar la inclinación del sistema y un torque virtual que controle el giro, teniendo solo un torque por manejar, la simulación del sistema se simplifica, luego de hallar los torques virtuales se pudo obtener los torques suministrados a cada motor con la inversa de la matriz de desacople:

$$M_{desacople} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$(M_{desacople})^{-1} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & -0.5 \end{bmatrix}$$

Se obtuvo el torque virtual para el control de inclinación τ_{θ} , y los torques de los motores serán.

$$\tau_{md} = 0.5 * \tau_{\theta}$$

$$\tau_{mi} = 0.5 * \tau_{\theta}$$

Para un torque virtual en giro τ_{δ} , se obtienen los torques para cada motor:

$$\tau_{md} = 0.5 * \tau_{\delta}$$

$$\tau_{mi} = -0.5 * \tau_{\delta}$$

3.4 FUNCION DE TRANSFERENCIA

Para el análisis de cualquier sistema de control continuo se requiere hallar la función de transferencia, observando el comportamiento de manera analítica, para obtener la función de transferencia del sistema dinámico, se utilizó la función LINMODE2 ('nombre del modelo en simulink'), que entrega las matrices de estado del modelo importado desde simulink, realizando una linealización en torno a un punto de operación óptimo que escoge el software Matlab.

Para obtener la función de transferencia del sistema, se tomó las matrices del espacio de estados y se calculó la función de transferencia del sistema, para los parámetros establecidos que se indican en la tabla 18.

NOMBRE	VALOR	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
L	0.75	[m]	Distancia del CM del sistema, respecto al eje de la rueda
$D/2$	0.7/2=0.35	[m]	Distancia entre el centro del vehículo y el centro de la rueda
M_p	50	[Kg]	Masa de la plataforma
M_r	2	[kg]	Masa de la rueda
$I_{b\theta}$	9.357	[kg * m ²]	Momento de Inercia respecto al centro de masas de la plataforma en inclinación.
$I_{b\delta}$	2.0417	[kg * m ²]	Momento de Inercia respecto al centro de masas de la plataforma en giro.
I_r	0.0196	[kg * m ²]	Inercia de las ruedas.

Tabla 18. Parámetros físicos aproximados del VEAU

La función de transferencia obtenida, me relaciona la entrada que es el torque $\tau_{\theta} s$ con la inclinación de la plataforma $\theta_p(s)$.

$$\frac{\theta_p(s)}{\tau_{\theta}(s)} = \frac{-1.277 \times 10^{15} * s^3 + 0.5253 * s^2 - 1.691 \times 10^{14} * s - 4.516}{s^4 - 8.882 \times 10^{16} * s^3 - 33.51 s^2}$$

La función de transferencia H(s), permite concluir que el sistema es altamente inestable con polos en el eje real positivo, como lo muestra la grafica del lugar de las raíces, de la figura 72, este sistema presenta polos en -5.78 y 5.78 puede ser estabilizado utilizando un regulador PD que reubica los polos en el eje negativo real.

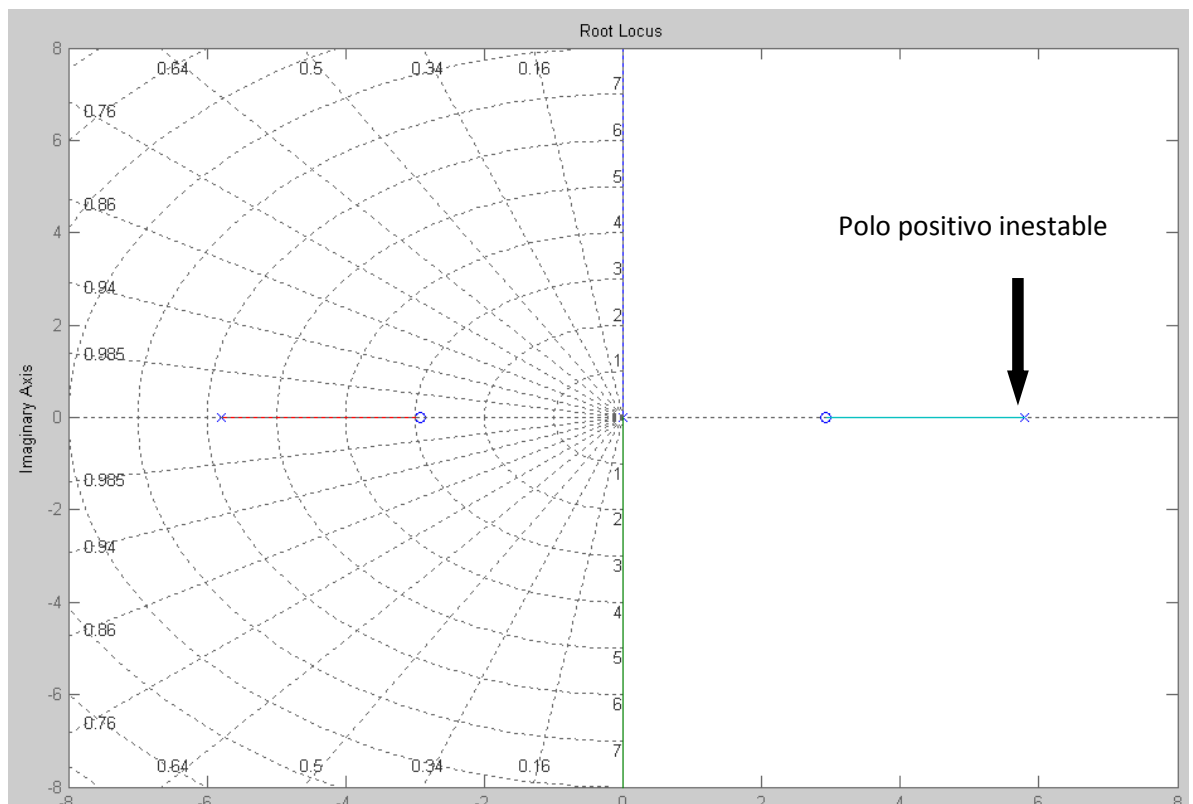


Figura 72. Grafica del lugar de las raíces del sistema.

Para poder hallar las constantes que controlen el sistema se realizó la simulación en Simulink, se aplicó un regulador PD, y se obtuvieron los resultados que se exponen a continuación.

3.5 SIMULACION DEL SISTEMA DINAMICO

La simulación del sistema se realizó con el software de simulación dinámica *SIMULINK*, junto con programación en *MATLAB*, la simulación consiste en introducir las ecuaciones diferenciales obtenidas en el desarrollo del modelo matemático, con parámetros y variables que se indicaron en la tabla 17, Se indican cuáles son las entradas, salidas y perturbaciones del sistema.

La programación en *MATLAB* se hizo, para introducir los valores de los parámetros físicos del sistema, en simulink, además para la obtención de un modelo linealizado del modelo principal, modelado en el espacio de estados con sus matrices respectivas, y la función de transferencia del sistema.

El sistema desarrollado requiere de un control de inclinación, este control busca siempre mantener el vehículo en su posición vertical, por lo tanto el setpoint es fijo y el valor es de 0° de inclinación. El control de movimiento del vehículo se hizo perturbando la inclinación del sistema, por lo tanto el pasajero controla el movimiento del vehículo inclinándose en el sentido que se quiera desplazar.

Esta perturbación de inclinación del pasajero se simula como un torque suministrado a las ruedas aplicado en sentido contrario a la inclinación que requiera el pasajero, la figura 73 ilustra esta perturbación.

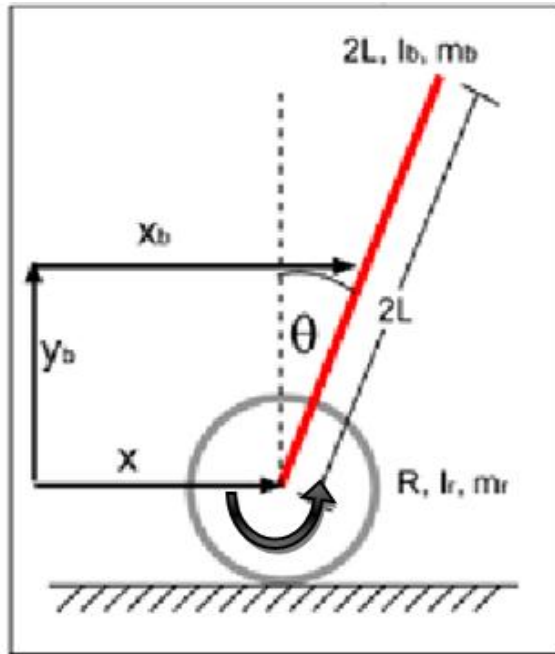


Figura 73. Perturbación del sistema, aplicada por el pasajero.

Los parámetros se introducen inicialmente dentro del Workspace de Matlab, que luego son enviados a Simulink. La figura 74 podemos observar el modelo del sistema completo.

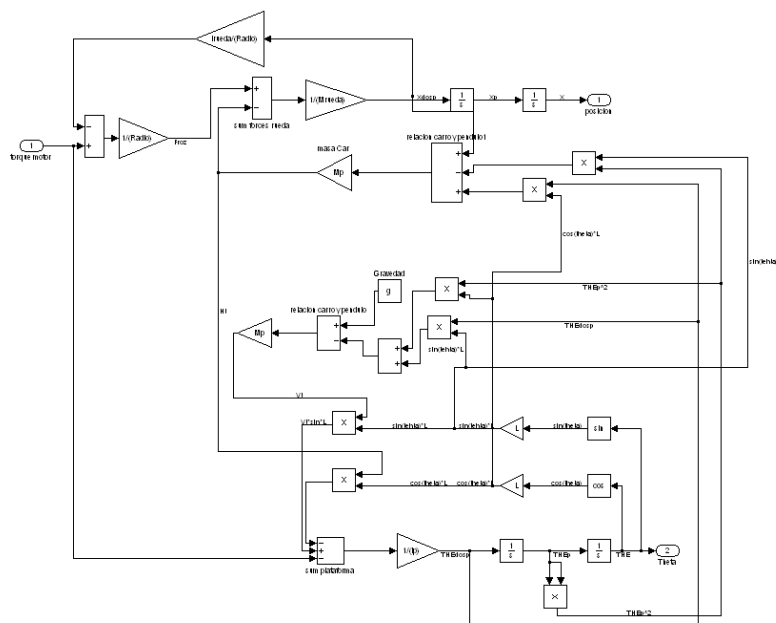


Figura 74. Simulación del sistema dinámico, Simulink

Este modelo tiene una entrada torque (es la variable que permite definir el comportamiento del sistema es lo que se le introduce al sistema dinámico) y dos salidas, ángulo de inclinación y posición, este modelo se introduce en un bloque (subsystem) indicando las entradas y la salidas, se ilustra en la figura 75.

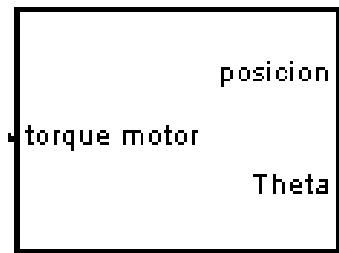


Figura 75. Bloque subsistema, del sistema dinámico VEAU

Para realizar el control del sistema se aplicó un bloque de control PID, del cual se excluyó la función integral, dejando solo un control PD, el setpoint del sistema de control, se indica como una constante 0° que se resta con la señal del sensor de inclinación.

La perturbación se simuló como un tren de pulsos, que se configuró para suministrar una función escalón, esta perturbación se integra en un punto de suma con la salida que entrega el bloque PD, se introduce al bloque del sistema, la figura 76 ilustra lo que se describe anteriormente.

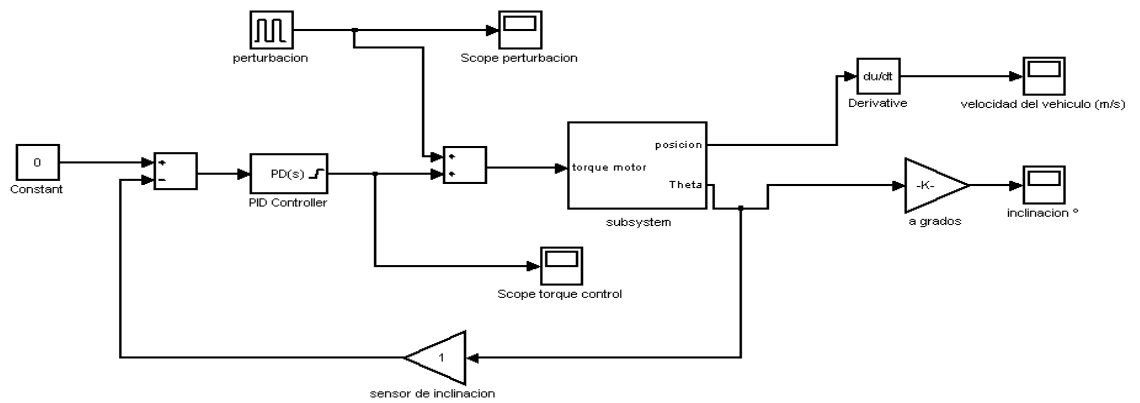


Figura 76. Sistema de control PD, aplicado al sistema dinámico VEAU.

Se Suministro un tren de pulsos como perturbación; con amplitud de 20 N.m, ilustrado en la figura 77.

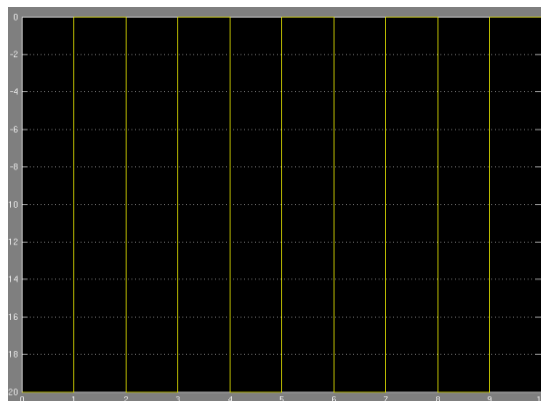


Figura 77. Señal de entrada al sistema, como perturbación.

Obteniendo una respuesta de ángulo de inclinación, velocidad y torque, para constantes K_p y K_d calculadas por el auto sintonizador del bloque PID de *MATLAB*; estas constantes se obtienen para un tiempo de establecimiento y overshoot (Es necesario que el sistema no supere el 10 %, para no alejarse del rango lineal) configurados en el auto-sintonizador del bloque PID que ofrece *SIMULINK*, las figuras 78 y 79 se observa el comportamiento de inclinación y velocidad del sistema respectivamente. En la tabla 19 se incluyen estas constantes y cada uno de sus efectos en el control del sistema.

$T[S]$	KP	KD	$\theta_{MAX}[^{\circ}]$	T_{MAX}	$X[M/S]$
0.4	-1921.608	-75.75	0.65	25	0.25

Tabla 19. Constantes del control PD, y parámetros del sistema de control.

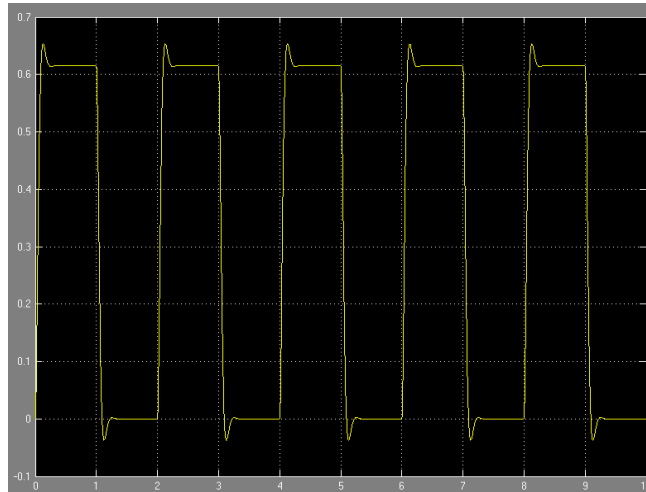


Figura 78. inclinacion del vehículo.

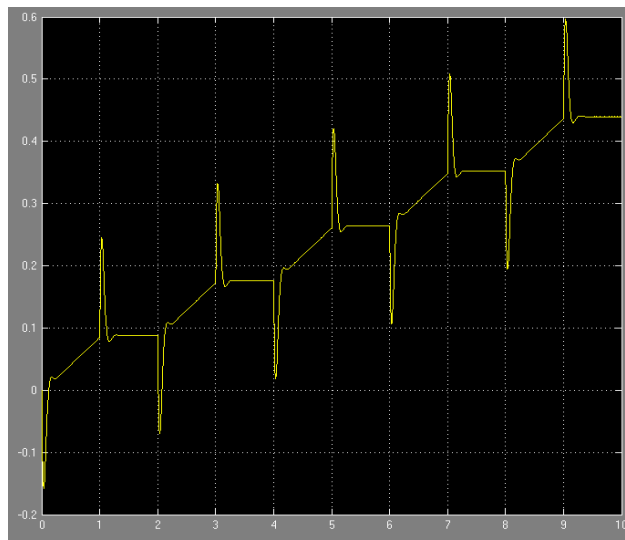


Figura 79. Velocidad lineal del vehículo en m/s.

De la grafica de inclinación se concluye; al perturbar el sistema se logra inclinar el vehículo hasta 0.7° en los cuales se estabiliza en 0.65° , el vehículo se

mantiene a una velocidad en incremento hasta los 0.6 m/s, cuando la perturbación se retira el vehículo vuelve al setpoint establecido, que son cero grados respecto a la gravedad, el tiempo de estabilización es de 0.4 segundos. El torque de estabilización que entrega el motor para una inclinación de 0.6° es de 0.25 N.m, el cual se mantiene oscilando alrededor del cero cuando el vehículo está en la posición vertical.

Se observa que el vehículo es controlado satisfactoriamente utilizando técnicas de control Proporcional y derivativo.

3.6 REQUERIMIENTOS TECNICOS

Luego del desarrollo del modelo matemático, se selecciono los sensores necesarios para medir las variables de estado del sistema, para realizar el control retroalimentado, según el análisis que se llevo a cabo en el capítulo anterior, se concluyo que las variables de estado a medir para tener un control del vehículo son:

- *Inclinación (θ):* Es la variable principal a medir ya que el movimiento del vehículo y su estabilización dependen de esta variable.
- *Velocidad lineal (X):* Es la velocidad lineal del vehículo, dependiente de la velocidad de ambas ruedas.
- *Referencia del giro (δ):* es la velocidad angular de giro del vehículo, básicamente es dependiente de la diferencia de velocidad de ambas ruedas, que giran en sentidos contrarios.
- *Estado de baterías:* Debido que los actuadores (motores) deben ser alimentados correctamente y suministrando una corriente necesaria para producir el respectivo torque para la estabilización, se debe monitorear

constantemente el estado de las baterías y de las fuentes de alimentación.

Corriente en motores: Para proteger la etapa de potencia del sistema, se debe monitorear la corriente que se entrega a los motores.

4 CONTROL PID

4.1 INTRODUCCION

El controlador PID (Proporcional, Integral y Derivativo) es un controlador realimentado cuyo propósito es hacer que el error en estado estacionario, entre la señal de referencia y la señal de salida de la planta, sea cero, lo que se logra. Además el controlador tiene la capacidad de anticipar el futuro.

4.2 EL PRINCIPIO DE REALIMENTACION

La idea de la realimentación es bastante simple y muy poderosa. A lo largo de su historia, ha tenido una fuerte influencia en la evolución de la tecnología. Las aplicaciones del principio de realimentación han tenido éxito en los campos del control, comunicaciones e instrumentación. Para entender el concepto, se asume que el proceso es tal que cuando el valor de la variable manipulada se incrementa, entonces se incrementan los valores de las variables del proceso. Bajo este concepto simple, el principio de realimentación puede ser expresado como sigue

Incrementar la variable manipulada cuando la variable del proceso sea más pequeña que la referencia y disminuirla cuando ésta sea más grande.

Este tipo de realimentación se llama “realimentación negativa” debido a que la variable manipulada se mueve en la dirección opuesta a la variable del proceso. El principio puede ser ilustrado por el diagrama de bloques que se muestra en la figura 80. En este diagrama el proceso y el controlador están representados por cajas negras y las flechas denotan las entradas y salidas a cada bloque. Existe un símbolo especial que denota una suma de señales. El diagrama de bloques muestra que el proceso y el controlador están conectados

en un lazo realimentado. La presencia del signo en el bloque de retorno indica que la realimentación es negativa.

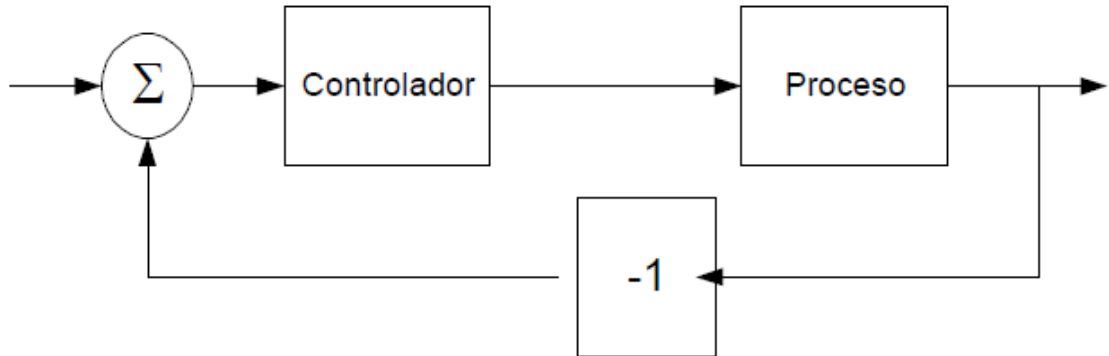


Figura 80. Diagrama de bloques del sistema de control de un proceso

4.3 CONTROL ON-OFF

El mecanismo de realimentación más simple se puede describir matemáticamente como sigue:

$$u = \begin{cases} u_{\max} & e > 0 \\ u_{\min} & e < 0 \end{cases} \quad (29)$$

Donde $e = y - y_{sp}$ es la diferencia entre la referencia especificada por el operador y la salida medida del proceso, lo que se denomina “error de control”. Esta condición de control implica que siempre se usa la acción correctiva máxima. De esta manera, la variable manipulada tiene su valor más grande cuando el error es positivo y su valor más pequeño cuando el error es negativo.

El proceso de control de este tipo se llama “control on-off”. Es simple y no tiene parámetros que configurar, aparte de las acciones mínima y máxima que se ejecutan en el cálculo de la señal de control. El control on-off muchas veces es apropiado para mantener la variable controlada del proceso cerca del valor de

la referencia que fue especificada, pero típicamente resulta en un sistema donde las variables oscilan.

Se puede ver en la ecuación 29 que la variable de control no está definida cuando el error es cero. Es común tener algunas modificaciones ya sea introduciendo histéresis o una zona muerta como se muestra en la Figura 81.

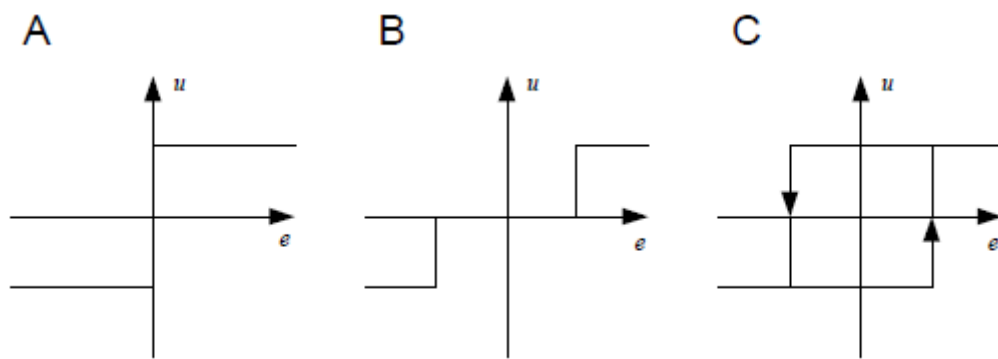


Figura 81. (A) Característica de un controlador On-Off ideal, (B) con Zona muerta y (C) Histéresis.

4.4 CONTROL PROPORCIONAL

La razón por la que el control on-off resulta en oscilaciones es que el sistema sobreactúa cuando ocurre un pequeño cambio en el error que hace que la variable manipulada cambie sobre su rango completo. Este efecto se evita en el control proporcional, donde la característica del controlador es proporcional al error de control cuando éstos son pequeños. La figura 82 muestra la característica de un controlador proporcional. De esta manera, el controlador está caracterizado por la función lineal $u = K * e$, dependiente del error de control, que se muestra en la figura.

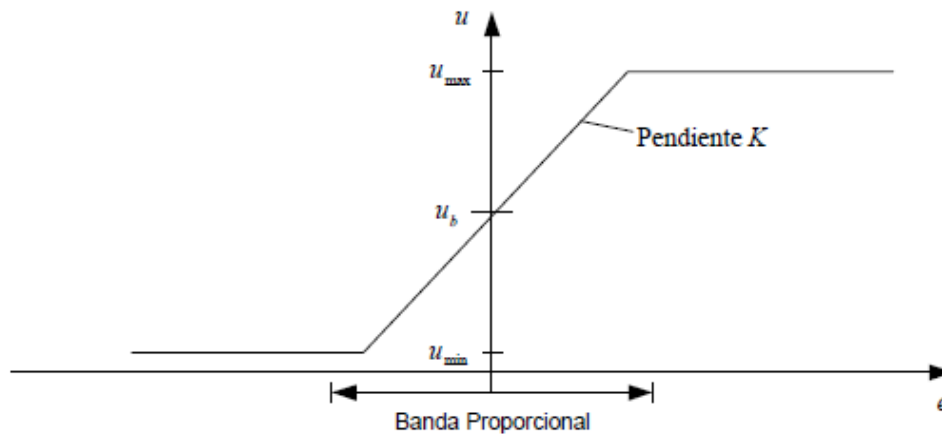


Figura 82. Característica de un control proporcional, la entrada es el error e y la salida es la señal de control u .

4.5 ERROR ESTACIONARIO

El control proporcional presenta el problema que la Variable de Proceso (Pv) jamás se estabilizará justo en el valor del Setpoint. La razón es fácil de entender recurriendo a un ejemplo. Suponiendo que la Pv es la temperatura de un horno, la cual se estacionará en 200 °C en forma estable y permanente, entonces la salida sería 0%. Pero siempre es necesario suministrarle al horno algo de potencia, por lo menos cómo para compensar las pérdidas de calor al medio ambiente o calor contenido en el material que sale del horno.

Es evidentemente imposible que el horno se mantenga a 200°C con los calefactores permanentemente apagados. Luego la temperatura tiene que descender un poco, lo suficiente para que la potencia de suministrada por los calefactores sea igual a las pérdidas de energía del horno (energía que sale del horno).

El error estacionario se puede disminuir reduciendo la banda proporcional, pero reducirla mucho implica que el sistema oscile y se comporte como un control

On-Off, luego hay un límite al cual se puede reducir la banda proporcional, por lo tanto siempre habrá error estacionario.

4.6 ACCIÓN INTEGRAL

Otra forma de corregir el error estacionario es incorporar al control Proporcional, la acción Integral, llamado también a veces "automatic reset" o "reset action".

El control será el mismo proporcional, pero a la salida se le suma la acción integral, que la corrige tomando en cuenta la magnitud del error y el tiempo que este ha permanecido. Para ello se le programa al control una constante K_i , que es formalmente "la cantidad de veces que aumenta la acción proporcional por unidad de tiempo".

La salida se corrige en una cantidad equivalente a la integral del error multiplicada por K_i . La ecuación (30) representa de forma discreta la acción del término integral.

(30)

$$Out = \left[100\% * \frac{E + I \cdot (EAcumulado)}{banda} \right]$$

$$E = (Sp - Pv)$$

$$banda = (Pb / 100\%) * Sp$$

4.7 ACCIÓN DERIVATIVA

Un control PD es uno proporcional al que se le agrega la capacidad de considerar también la velocidad de cambio de la Pv en el tiempo. De esta forma se puede "adelantar" la acción de control del mando de salida para obtener así una Pv más estable. Si la Pv está por debajo del Sp , pero subiendo muy

rápidamente y se va a pasar de largo el S_p , entonces el control se adelanta y disminuye la potencia de salida.

Al revés si la P_v es mayor que el S_p , la salida debería ser 0% pero si el control estima que la P_v cae muy rápido y se va pasar para abajo del S_p , entonces coloca algo de potencia para ir frenando el descenso brusco.

La acción derivativa es llamada a veces "rate action" por algunos fabricantes de controles porque considera la "razón de cambio" de la P_v . La ecuación (31) representa de forma discreta la acción del término derivativo

(31)

$$Out = \left[100\% * \frac{(E - D * Vel)}{banda} \right]$$

$$banda = (Pb / 100\%) * S_p$$

4.8 CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO PID

Un control PID es un controlador proporcional con acción derivativa y acción integral superpuestas.

La ecuación 32 reúne los términos componen el sistema de control PID.

Es fundamental para el correcto funcionamiento del control PID la elección de los parámetros K_p, K_i, K_d . Existe un conjunto de estos valores que darán el rendimiento óptimo y encontrarlos requiere: conocimientos teóricos, habilidad obtenida mediante la experiencia y suerte.

$$Out = Kp \cdot (E + Ki \cdot \int E dt + Kd \cdot \frac{dE}{dt})$$

$$Kp = \frac{100\%}{Pb} \frac{1}{Sp}$$

$$Ki = \frac{I}{10000}$$

$$Kd = D \tag{32}$$

En la práctica cualquier conjunto de valores cercano al óptimo brindará un rendimiento aceptable y probablemente casi igual al óptimo.

Además existe varios métodos de sintonización de estas constantes, entre estos los más usados son los métodos de Ziegler-Nichols, el cual es una buena aproximación de estos parámetros.

4.9 ESTABILIZACIÓN DEL SISTEMA

Siempre se busca que el sistema de control sea estable, pero además, dentro de las condiciones de estabilidad existen 3 tipos de comportamiento bien definidos: *control sub amortiguado*, *control con amortiguamiento crítico* y *control sobre-amortiguado*.

En la Figura 83 se muestran ejemplos de estos comportamientos. En cada uno de estos casos varía la velocidad de respuesta del sistema ante perturbaciones y a la vez la propensión a tener comportamiento inestable u oscilatorio.

El sistema sobre-amortiguado tiene una velocidad de respuesta lenta, después que ocurra una perturbación, el sistema puede tardar en volver al Sp , pero la ventaja es que el sistema es muy estable y no adquiere comportamientos oscilatorios indeseables.

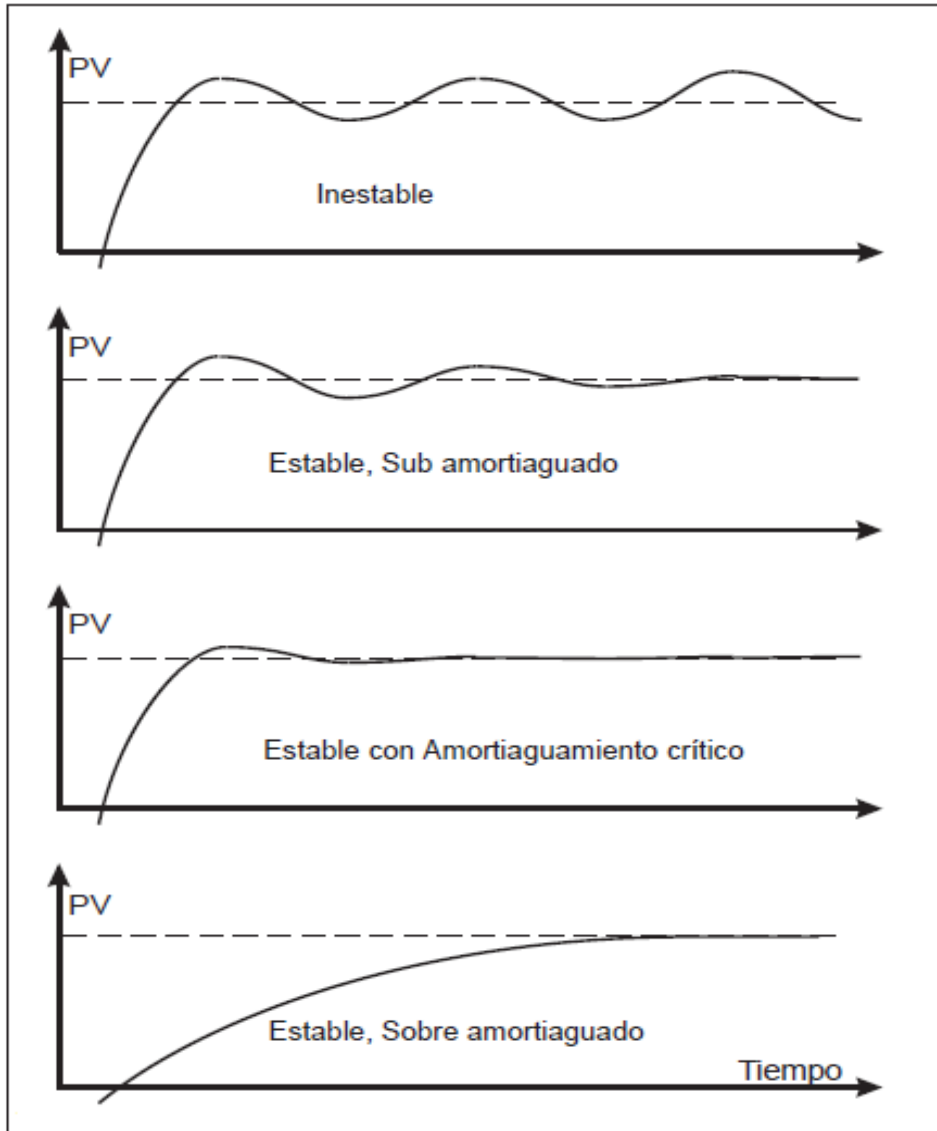


Figura 83. Ejemplos de comportamientos control sub amortiguado, control con amortiguamiento crítico y control sobre amortiguado

El sistema sobre-amortiguado tiene una velocidad de respuesta lenta, después que ocurra una perturbación, el sistema puede tardar en volver al S_p , pero la ventaja es que el sistema es muy estable y no adquiere comportamientos oscilatorios indeseables.

Esta condición tiende a ocurrir cuando la banda proporcional P_b es más grande de lo necesario. También puede deberse a una constante derivativa D muy

grandes, basta acordarse que la acción derivativa tiende a frenar la temperatura.

En el otro extremo, cuando un sistema se comporta de modo sub-amortiguado la velocidad de respuesta es muy buena pero pueden ocurrir varias oscilaciones de cierta amplitud antes que la temperatura llegue a un valor estable. Suele ocurrir esta condición cuando la banda proporcional es pequeña, la constante derivativa Kd chica y la constante de integración Ki grande.

El justo medio entre las condiciones anteriores es el amortiguamiento crítico. A esta condición corresponde los valores óptimos de los parámetros Kp, Kd, Ki . En este caso el sistema es bastante estable y la velocidad de respuesta es la mejor que se puede lograr.

5 IMPLEMENTACIÓN

5.1 PARAMETROS DE CONTROL

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 θ : Es la variable principal del sistema, la cual puede ser medida con diferentes sensores, tales como acelerómetros, inclinómetros, sensores de distancia, etc. Los sensores usados en este caso para las diferentes pruebas fueron acelerómetro e inclinómetro.

Velocidad de Inclinación θ : 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 un giroscopio o indirectamente con un sensor de inclinación, 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.

Byas: Es un valor de PWM, el cual equivale para este caso a una diferencia de potencial en las entradas de los motores, en el cual se considera que el sistema está en movimiento inminente, es decir, con solo un pequeño aumento en el PWM (voltaje en los motores), el sistema entraría en movimiento.

5.1.1 Compensación de la inclinación con giroscopio

Variable de Proceso Pv: Cuando el sensor usado para medir la inclinación del sistema es un acelerómetro, el movimiento Lineal acelerado y Rotacional del vehículo afectan 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 Pv se puede expresar como:

$$Pv = Accel + \Delta_{Gyro} * K_{gg}$$

Donde $Accel$ es la medida tomada por el acelerómetro y Δ_{Gyro} es la variación entre una medida y la anterior del giroscopio.

El valor final obtenido es la Variable de Proceso Pv es usada para calcular el error del sistema y las condiciones de inclinación para determina el sentido y la magnitud del giro de las ruedas.

Si el sensor usado para medir la inclinación es uno tal que no se afecte con las aceleraciones del sistema, tal como un inclinómetro o sensor de distancia, el procedimiento anterior se vuelve innecesario.

5.1.2 Parámetros del PID – G

Proporcional P : Este término permite entregarle al sistema una potencia que varía de forma proporcional al *error*. De tal forma que si el error crece o para este caso, el vehículo se inclina más, la energía que le llega a los motores también aumenta proporcionalmente en un factor Kp .

El cálculo de este parámetro se calcula por medio de la expresión:

$$P = error * Kp = (SetPoint - Pv) * Kp$$

Kp es la constante que multiplica al error del sistema, obteniendo así la salida proporcional de este.

Derivativo *D*: Por medio de este término se puede adelantar la acción de control del mando de salida para así obtener una respuesta del sistema más estable. De tal forma que si el ángulo medido (*Pv*) se encuentra por debajo del punto de equilibrio (*SetPoint*), pero se va acercando a este rápidamente, entonces el control se adelanta y disminuye la potencia en los motores para que el sistema no vaya a pasar de largo el *SetPoint*. Ahora, si en un determinado instante el vehículo ya pasó por el *SetPoint* y además de eso cae a una cierta velocidad, el control se adelanta y envía una mayor potencia a los motores para contrarrestar el impulso que lo lleva a una caída.

El cálculo de este parámetro se calcula por medio de la expresión:

$$D = (error - errorPrevio) * Kd$$

Donde *Kd* es la constante derivativa y el *ErrorPrevio* es el error calculado con los datos en la toma de datos inmediatamente anterior.

Integral *I*: Es de uso común este término en control para la corrección del error estacionario de un sistema, el cual para este caso no será otra cosa más que una perturbación (inclinación) constante por parte del usuario.

Para cada inclinación del vehículo se tiene una salida proporcional a la magnitud de ésta, el término derivativo complementa la salida proporcional, siempre y cuando el vehículo esté rotando con respecto al eje de sus ruedas. ¿Pero qué ocurre si el usuario mantiene una inclinación casi constante de tal forma que el giroscopio no registre una velocidad significativa de giro y el valor de la derivada sea mínimo? Si para evitar que el vehículo caiga se requiere de una aceleración lineal para contrarrestar la componente de la gravedad que hala al vehículo hacia el piso. Por lo tanto se hace necesario incluir el término integral *I*, el cual tiene en cuenta el tiempo que el sistema ha estado fuera de su posición de equilibrio incrementando la salida del sistema de forma proporcional al *error* y al tiempo que este se mantenga

En otras palabras el término integral suma los errores en el tiempo, los multiplica por una constante *Ki* y agrega este incremento a la salida en PWM

El cálculo de este parámetro se calcula por medio de la expresión:

$$I = (I + error) * Ki$$

Velocidad de Giro G: Este término es importante para la estabilidad del sistema, puesto que es bastante sensible a cualquier giro que realice el vehículo respecto del eje de sus ruedas y no se afecta por movimientos lineales, lo que permite hacer una compensación al acelerómetro. Se adquiere por medio del giroscopio. El valor registrado por este sensor, además de la compensación, se tomó como un cuarto parámetro en la ecuación del PID, multiplicado por su constante respectiva Kg .

El cálculo de este parámetro se calcula por medio de la expresión:

$$G = (SetPointGyro - Gyro) * Kg$$

Donde $SetPointGyro$ y $Gyro$ son el SetPoint del giroscopio en cualquier posición sin movimiento y el valor leído del giroscopio, respectivamente.

5.1.3 Secuencia de control

Inicialmente se implementó una estrategia de control como se observa en la figura 84, se observa la obtención de las señales de los sensores (acelerómetro y giroscopio), pasando antes por sus respectivos filtros pasa baja de segundo orden, con el setpoint definido como cero, se aplicó una estrategia de control PID integrada con un giroscopio G, luego de la aplicación de esta estrategia de control, se obtiene la señal de control que debe llegarle al puente H, que manejarán la alta corriente que consumen los motores, así según la perturbación que se le suministre al sistema se obtiene movimiento del vehículo en un sentido u otro.

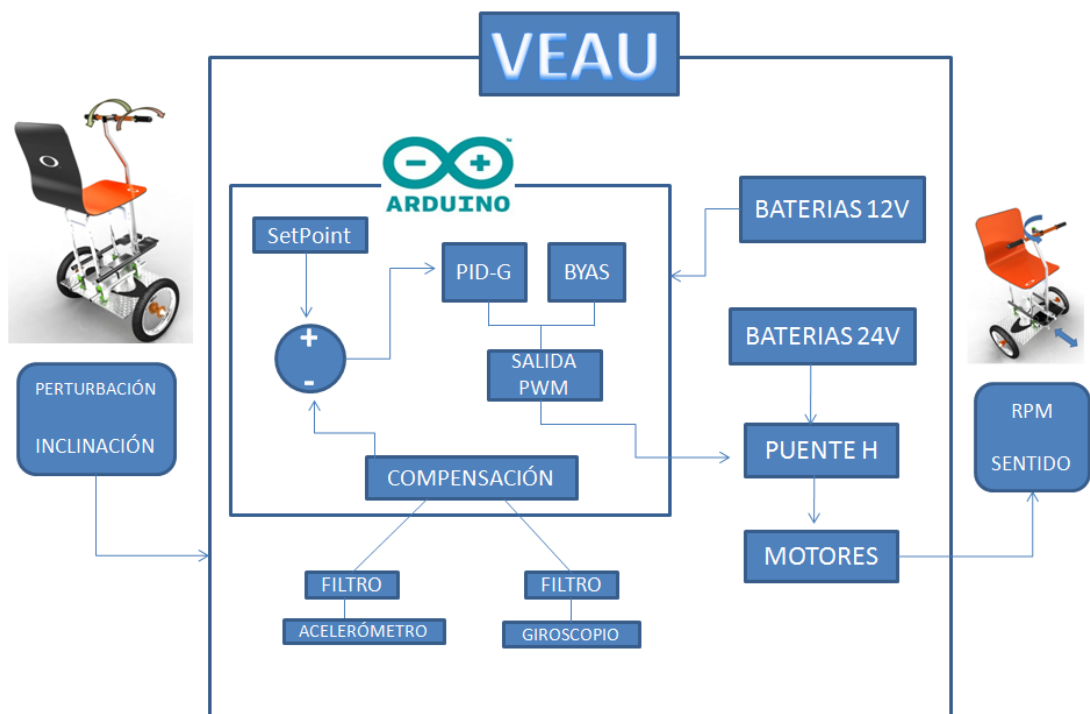


Figura 84. Esquema 1 de la secuencia de control del VEAU.

5.2 IMPLEMENTACION DE LOS SENSORES

5.2.1 Ubicación

De la configuración física del vehículo depende la ubicación del acelerómetro (el giroscopio funciona independientemente de la ubicación sobre el vehículo). Se tienen dos principales formas de distribuir la masa del vehículo, si se quiere hacer un control de equilibrio usando como sensor principal de inclinación un acelerómetro. Ruedas livianas (poca inercia) con la mayor cantidad de masa ubicada lo más arriba posible y ruedas masivas (mucho inercia) con poco peso en la parte superior.

En la primera configuración que se observa en la figura 85, la parte superior del vehículo, la más pesada, es decir la que tiene mayor inercia, va a presentar un movimiento lineal (adelante, atrás) significativamente menor que la parte inferior del vehículo. Esto debido a que mientras sea más masivo, será menos susceptible a vibraciones, y en tanto que si el centro de gravedad se encuentra alejado del eje de rotación, el momento de inercia de éste aumenta, por lo que

se vuelve más lento, dando un mayor tiempo para controlar el sistema. El problema de esta disposición es que requiere de una mayor potencia para realizar el control, por lo cual no se puede alejar mucho el centro de gravedad del eje de giro de las ruedas.

Conociendo el comportamiento del vehículo en la primera configuración y sabiendo que el acelerómetro es sensible a los movimientos lineales acelerados, es conveniente que el sensor se ubique en la parte superior, en la figura 86 se ilustra la disposición de los sensores giroscopio y acelerómetro en la parte superior del vehículo.

En la segunda opción, el comportamiento del vehículo es diferente, la parte superior se mueve más que la inferior. Para comprender mejor su funcionamiento se puede pensar que en el caso límite en que las ruedas sean muy pesadas, el efecto sería tal como si estas estuvieran bloqueadas respecto al piso, por lo tanto el torque que se generaría en el motor tan solo lograría que se mueva la parte superior del sistema, por lo tanto allí es donde se debe generar mayor movimiento. Suponiendo que se usara esta configuración, los sensores, según lo dicho anteriormente deben ir ubicados en la parte inferior del vehículo que es donde se genera menor movimiento lineal.

Dado que la mayor cantidad de peso del sistema la aporta el usuario, no es posible usar la segunda configuración, pues requeriría unas ruedas muy pesadas (o gran inercia), lo que incrementaría la cantidad de energía requerida para mover el sistema, además de lo lento que este sería. Por lo tanto la primera configuración teórica se adapta mejor al VEAU, siempre y cuando el sensor usado para la inclinación sea un acelerómetro. Otros sensores tales como sensores de distancia o inclinómetros no se verían afectados por la ubicación en el vehículo.

5.2.2 Filtrado y prueba de los sensores

Antes de la instalación de los sensores se realizó una prueba para verificar su respuesta en dos condiciones, reposo y movimiento leve.

Para dicha prueba se tomaron 1000 datos en cada condición, los cuales se graficaron en Matlab, ver figuras 88 y 89.

Para la adquisición de los datos se realizó el montaje que se observa en la figura 85 y 86.

El filtro analógico pasa bajas de segundo orden que se diseñó y construyó, para la eliminación de ruido de altas frecuencias, se muestra montado en placa en la figura 87, en esta placa se observan dos filtros iguales debido a que se requiere filtrar las señales de dos sensores acelerómetro y giroscopio.

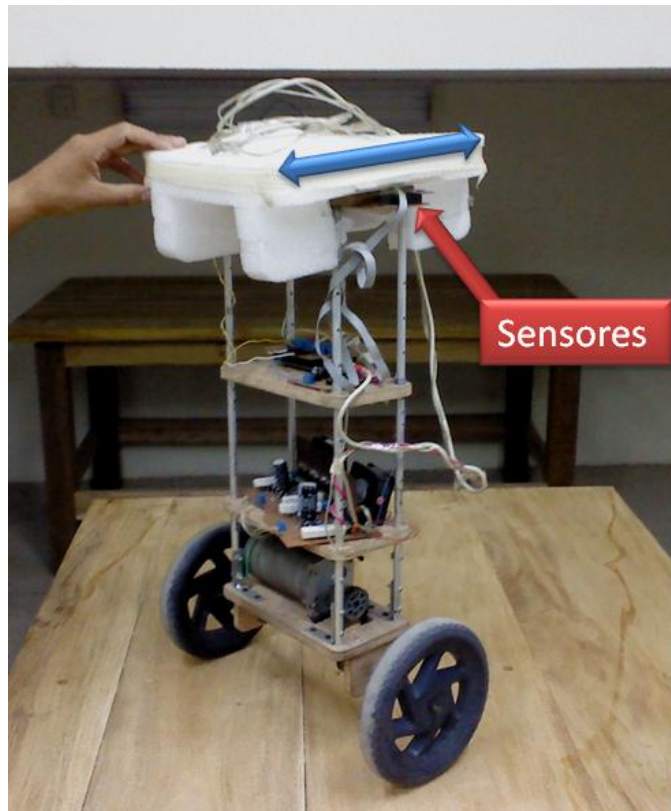


Figura 85. Montaje para la realización de pruebas de los sensores.

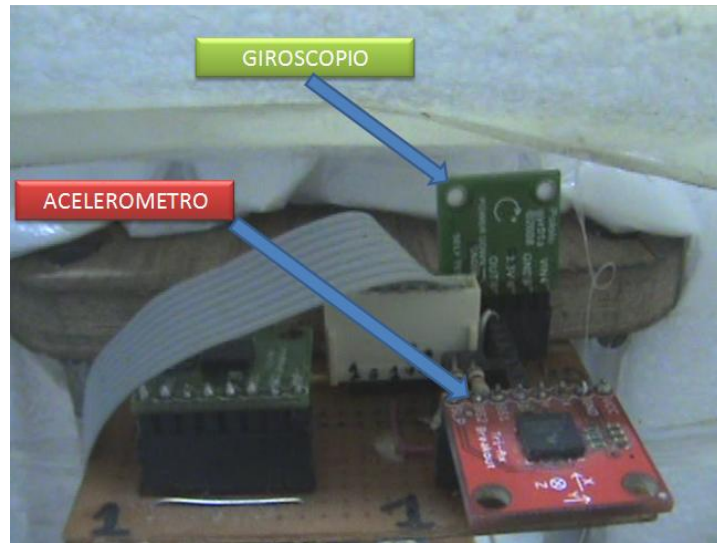


Figura 86. Ubicación de los sensores en la parte superior del vehículo de pruebas.

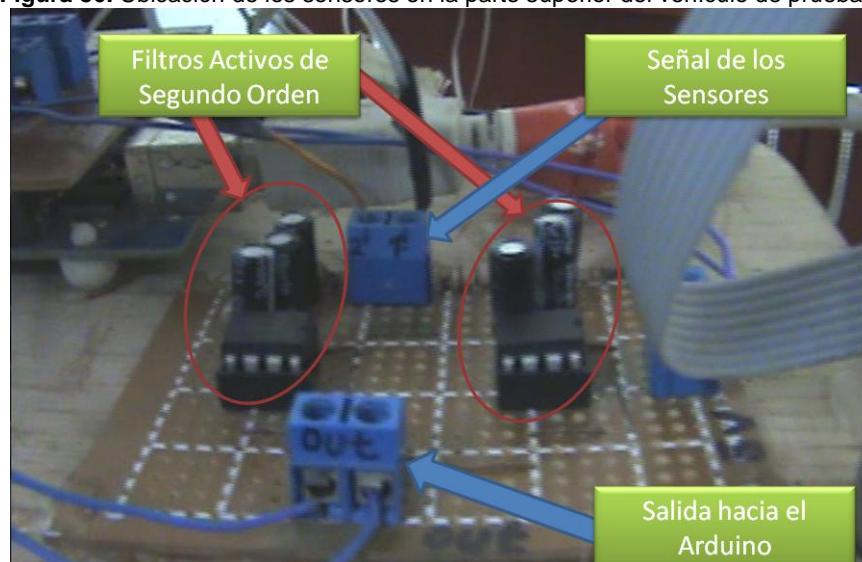


Figura 87. Etapa de Filtrado Analógico.

5.2.2.1 Sistema en estado de reposo

Las líneas azules representan la señal obtenida directamente del acelerómetro y del giroscopio, mientras que la verde representa la señal de cada sensor luego de pasar por un filtro pasa-bajos activo analógico y un filtro digital promediador, con un número de muestras de 100 para el acelerómetro y 10 el giroscopio respectivamente, como se puede observar en las figuras 88 y 89, se observa que la señal que proviene directamente de los sensores trae consigo

ruido, el cual opaca la variación de la salida de cada sensor debido a la inclinación del dispositivo, además de que genera ciertos picos que el sistema de adquisición tomar como inclinación del sistema generando una salida hacia los motores no necesaria. Por lo tanto se hace indispensable la implementación de una etapa de filtrado.

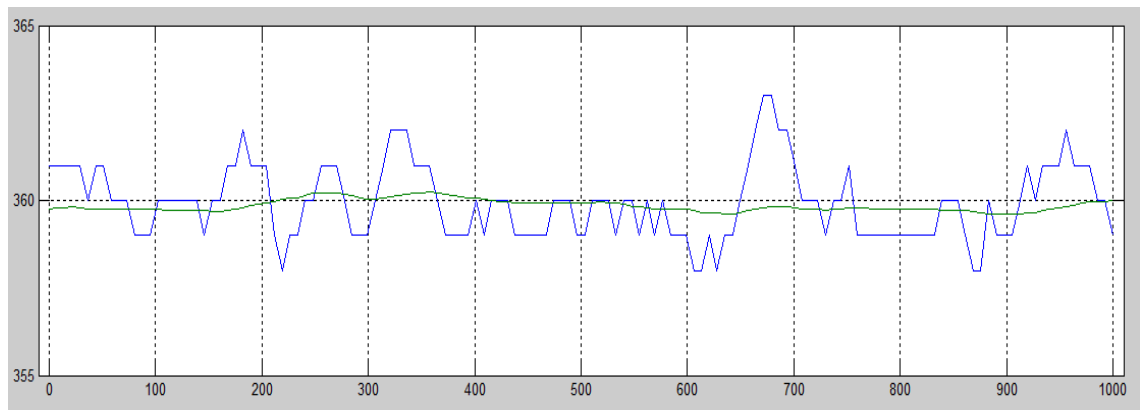


Figura 88. Acelerómetro en estado estacionario



Figura 89. Giroscopio en estado estacionario.

5.2.2.2 Sistema sometido a pequeñas perturbaciones (inclinaciones)

En las figuras 90 y 91, se observan las señales de salida de los sensores, acelerómetro y giroscopio luego de ser sometidos a pequeñas perturbaciones (inclinación hacia adelante y hacia atrás). En la figura 90 se observan 6 picos y 6 crestas correspondientes a pequeñas pero rápidas inclinaciones a las que se sometió el sistema, se ve que la línea azul correspondiente al acelerómetro sin filtros sigue notoriamente, aunque de forma ruidosa, el movimiento del sistema. Al aplicar la etapa de filtrado digital y analógico, correspondiente a línea verde,

se observa un comportamiento menos ruidoso, pero mucho más tenue, observando que la información real de inclinación después del filtro es de mala calidad, lo cual tampoco favorece el control del sistema pues así se hacen menos notorias las perturbaciones, lo que se sugiere es complementar esta señal con la señal proveniente del giroscopio, además de realizar un promedio con un número menor de muestras.

En la figura 91 (correspondiente al giroscopio se observan los mismos picos y crestas que con el acelerómetro, a diferencia de la señal tomada directamente del sensor (línea azul) que es mucho mas “limpia” y al aplicar el filtro se elimina el ruido considerablemente con tan solo un pequeño desfase entre la señal sin filtrar y la filtrada, permitiendo hacer un complemento importante a la señal tomada por el acelerómetro pues la señal filtrada del giroscopio al tener un desfase mínimo permite tener en cuenta los movimientos rápidos para el cálculo del PID-G.

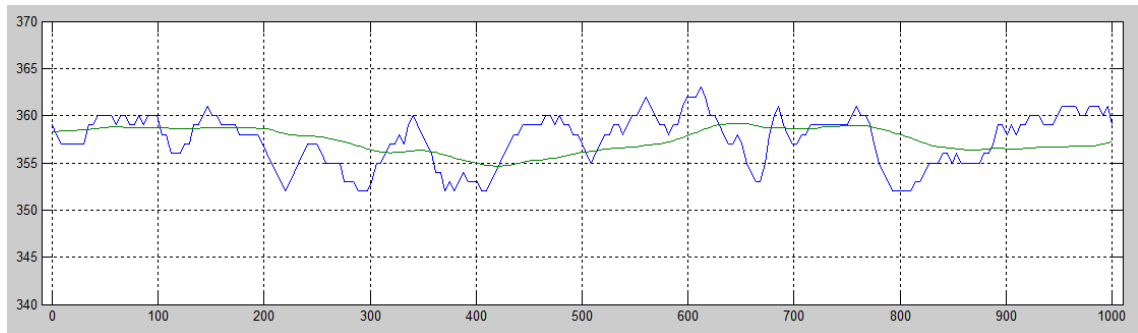


Figura 90. Acelerómetro en movimiento oscilatorio leve

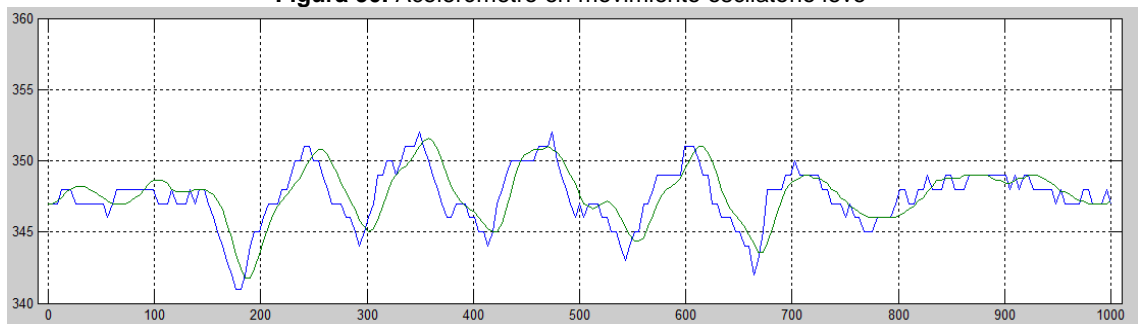


Figura 91. Giroscopio en movimiento oscilatorio leve

5.3 SINTONIZACIÓN DEL SISTEMA

Para la sintonización (estimación de las constantes) del sistema, se utilizó el método de prueba y error, iniciando generalmente con valores bajos de las constantes.

Comandos del Arduino usadas para la sintonización del sistema:

`AnalogRead(x)`: Usada para adquirir la señal proveniente del potenciómetro entre 0 y 5 volts, la cual es convertida en el conversor analógico-digital a un número entre 0 y 1023. Donde x es el número del pin (ente 0 y 15 para el Arduino MEGA) de la entrada analógica (ANALOG IN) que se esté usando.

`AnalogWrite(x, y)`: Usada para generar una escritura como señal de control para mover los motores. La salida es en PWM y va de 0 a 255, lo que equivale a una señal de 0 a 5 volts donde x es el número del pin (entre 2 y 13 para el Arduino MEGA) de la salida en PWM y y es la variable que se quiere como salida en el pin x .

`serial.Print(x)`: Usada para visualizar en pantalla (Serial Monitor, del Arduino), la variable x .

`Delay(x)`: Permite hacer una pausa de x milisegundos en el programa.

5.3.1 Procedimiento para modificar y visualizar los valores

Setpoint: Manualmente se llevó el sistema a su posición de equilibrio y por medio de la función `serial.Print ()` del Arduino se visualizó en el Serial Monitor el valor que indicaba el acelerómetro en este punto, se realizaron varias mediciones, y se tomo el valor que más se repitió.

Byas: Usando un programa de control On-Off se calculo este valor. Dependiendo de la inclinación del vehículo, las ruedas giran en sentido horario o anti-horario a una salida de PWM fija. La magnitud del PWM hacia el motor

graduó con un potenciómetro corriente para cada sentido de rotación y se visualizó su valor por medio de la función `serial.Print ()` del Arduino.

Se inició con un valor suficientemente alto como para que el sistema entrara en movimiento cada vez que el sistema cambiara de inclinación, con lo que se obtuvo un movimiento oscilatorio alrededor del SetPoint.

Se redujo gradualmente con los potenciómetros la salida en PWM hacia cada lado, hasta llegar a una amplitud en la oscilación del sistema imperceptible o nula. Se obtuvo un valor diferente de byas para cada sentido de giro del motor.

Constante Proporcional K_p : Esta constante se calculó usando un código de control Proporcional + byas en el cual los valores de K_p se graduaron por medio un potenciómetro para cada sentido de giro. Dichos valores se visualizaron usando de la función `serial.Print()` del Arduino. Se inició en valores bajos y se fue aumentando mientras se verificaba la respuesta del sistema, hasta llegar a una oscilación constante cuando el sistema se encontraba alrededor del SetPoint, y donde además se observó una respuesta del sistema ante una perturbación de algunos pocos grados, tal que el vehículo no se cayera hacia el lado donde se perturbaba.

Constante Derivativa K_d : Luego de tener el valor de la constante proporcional, con la cual el sistema muestra un comportamiento de oscilación casi constante alrededor del SetPoint, gradualmente se aumentaron los valores de la constante derivativa K_d usando un potenciómetro, hasta reducir la oscilación del sistema, es decir, que este alcance la posición de equilibrio en un tiempo corto con el menor overshoot posible. El valor de esta constante se visualizó usando de la función `serial.Print()` del Arduino, a medida que se iba modificando con el potenciómetro.

Constante Giroscópica K_g : Con un potenciómetro se fue graduando el valor de K_g iniciando en valores pequeños y aumentando lentamente hasta llegar a un valor en donde el comportamiento sea aceptable respecto de valores por encima y por debajo de este. El valor de esta constante se visualizó usando de la función `serial.Print ()` del Arduino, a medida que se iba modificando.

6 DISEÑO ESTRUCTURAL DEL VEAU



El VEAU está compuesto por una serie de subconjuntos los cuales de muestran en la figura 92 y se listan a continuación:

- Bastidor del vehículo o estructura base.
- Mecanismo de deslizamiento.
- Soporte de baterías.
- Sistema de potencia y transmisión
- Silla
- Mecanismo barra de dirección



Figura 92. Representación del VEAU en SolidWorks.

A continuación se lista cada una de las partes principales que conforman al VEAU, se explica su función, características principales, se muestran algunas fotografías, gráficos hechos en SolidWorks y de algunos componentes, los más representativos para el sistema, se muestran dos imágenes que provienen del análisis hecho en Ansys Workbench, una de esfuerzos y otra de deformaciones.

6.1 BASTIDOR DEL VEHÍCULO

Bastidor del Vehículo: Encargada de dar soporte a todos los demás subsistemas del vehículo, además del peso del usuario. Se encuentra compuesto por dos perfiles cuadrados de acero estructural Colmena (Ver figura 94), dispuestos en forma paralela uno respecto del otro a lo ancho del VEAU. La figura 93 muestra el bastidor del vehículo junto con los componentes que causan algún tipo de carga sobre este.

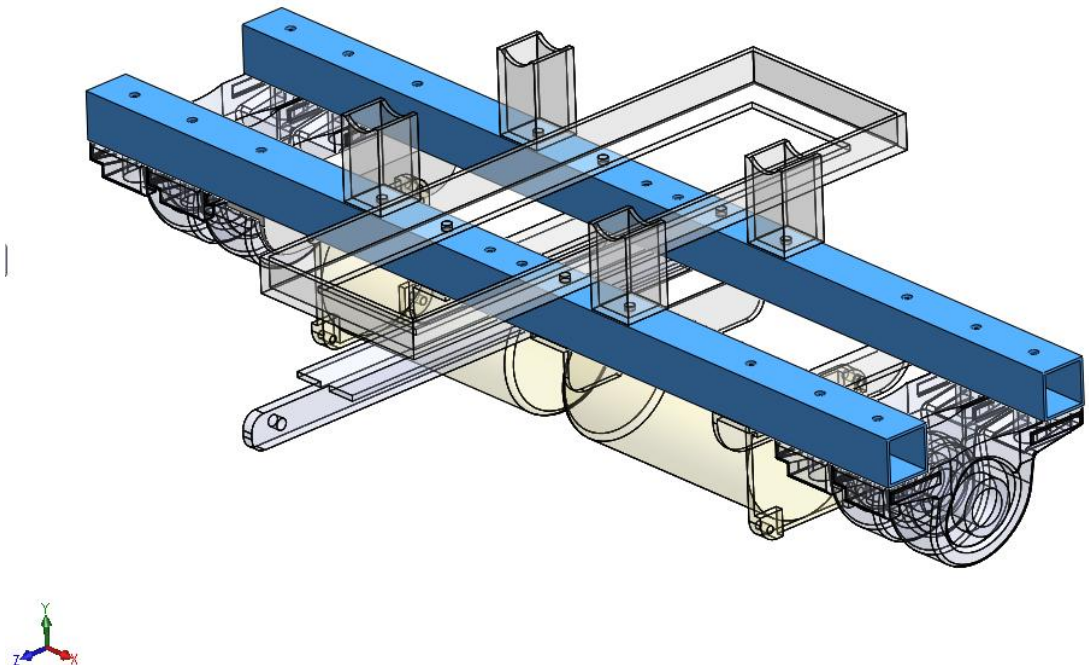


Figura 93. Bastidor junto con los componentes. Representación hecha en SolidWorks.



Figura 94. Fotografía de una de las barras.

Para su análisis se tomó en cuenta cada una de las cargas que actúan sobre estas barras, las cuales son el peso de cada uno de los sistemas que componen el vehículo, el peso de la persona y la carga interna generada sobre las barras por acción del torque de los motores. En la figura 97 se ve la respuesta del sistema en cuanto a deformación y esfuerzos en la parte superior e inferior respectivamente, en la tabla 20 se listan las características principales de este subsistema.

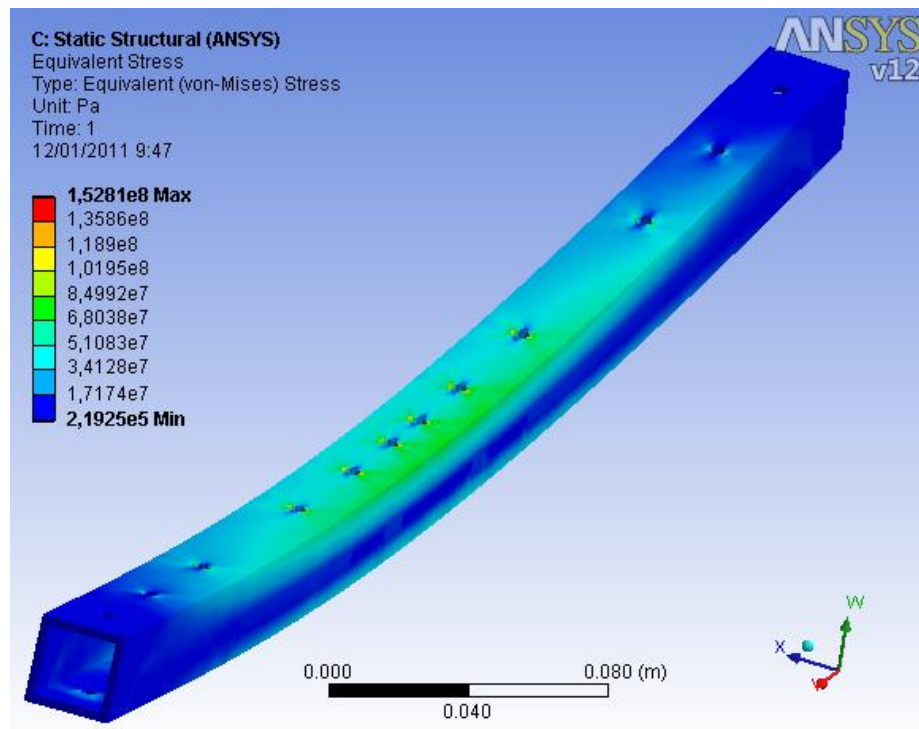
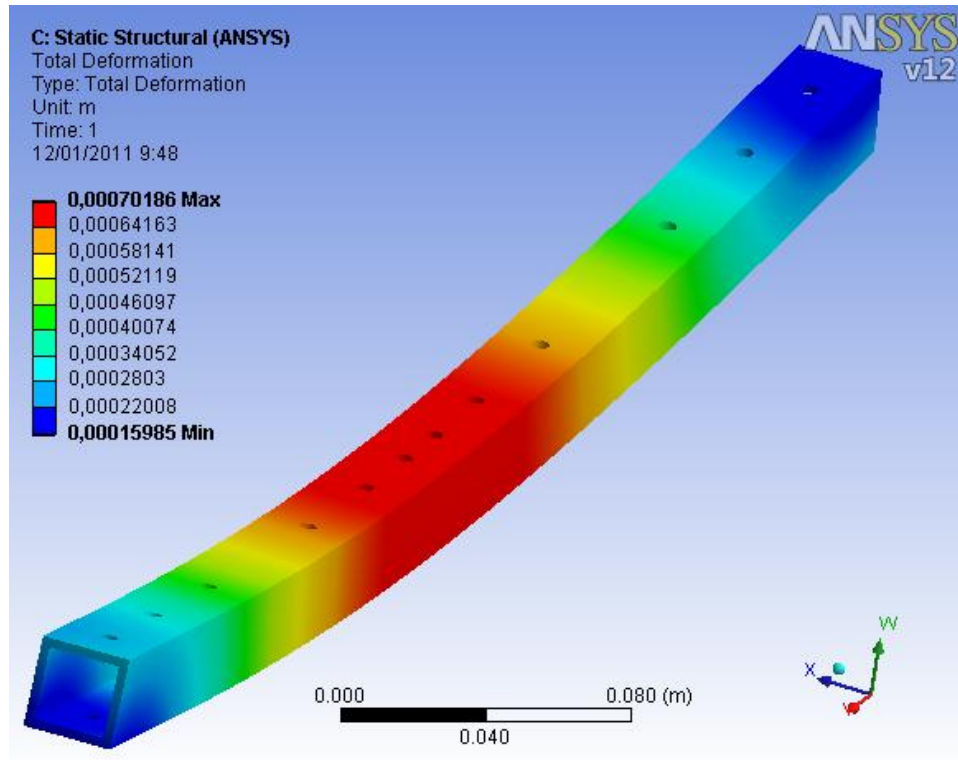


Figura 95. Representación en Ansys de las barras de la estructura base, Análisis deformación y esfuerzos respectivamente.

CARACTERÍSTICAS
<i>Material:</i> Acero Estructural Colmena. AISI/SAE 1015
<i>Esfuerzo Máximo:</i> 22161 Psi
<i>Esfuerzo Admisible:</i> 46000 Psi
<i>Factor de Seguridad:</i> 1.63
<i>Dimensiones:</i> 550 x 25.4 x 25.4, espesor de pared 2.5 mm

Tabla 20. Características Bastidor.

6.2 MECANISMO DE DESLIZAMIENTO

Se encuentra compuesto por cuatro soportes verticales de acero, dos tubos de aluminio y cuatro conjuntos de rodillos. El sistema completo se puede ver en la figura 96.

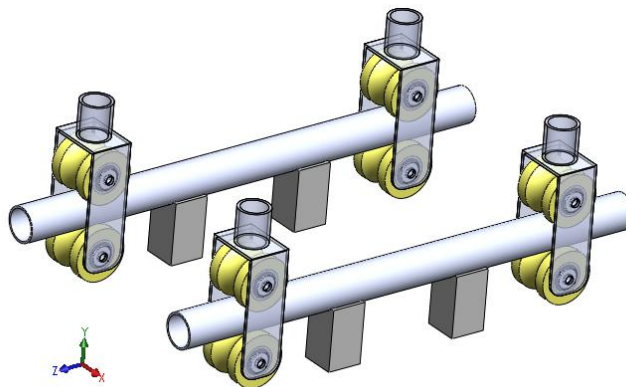
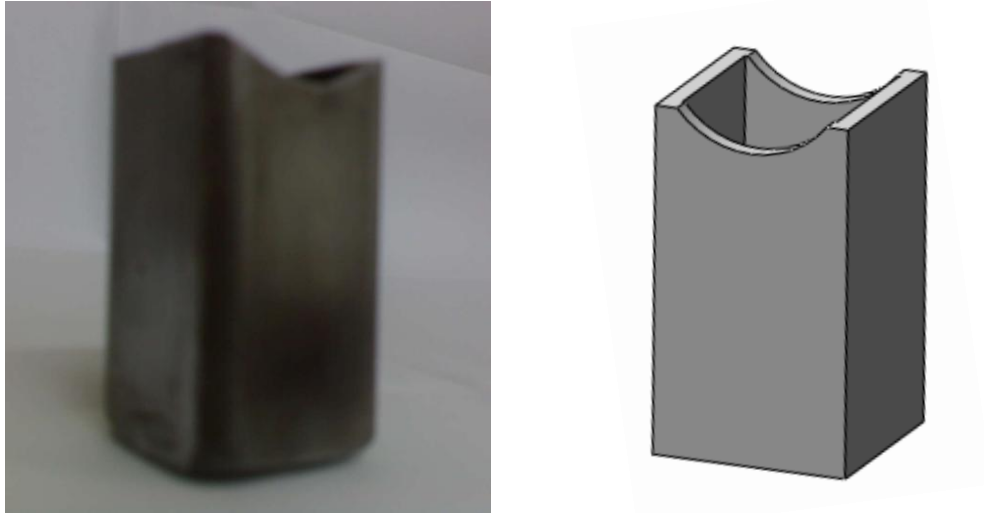


Figura 96. Mecanismo de deslizamiento. Representación hecha en SolidWorks

6.2.1 Soportes

Soportan los Tubos del Riel. Hechos de sección cuadrada de un perfil de 1" (ver figura 97).



Figuras 97. Representación del soporte en SolidWorks y Fotografía, respectivamente.

Para su análisis en Ansys se distribuyó un peso máximo sobre la estructura de 100 Kg, dividido en cada una de las cuatro bases, equivalente a 25 Kg. Se observa la respuesta de los soportes a la aplicación de la carga en cuanto a deformación y esfuerzos en la parte superior e inferior de la figura 98 respectivamente, con lo que se obtuvo un factor de seguridad superior a 15. En la tabla 21 se listan las características principales

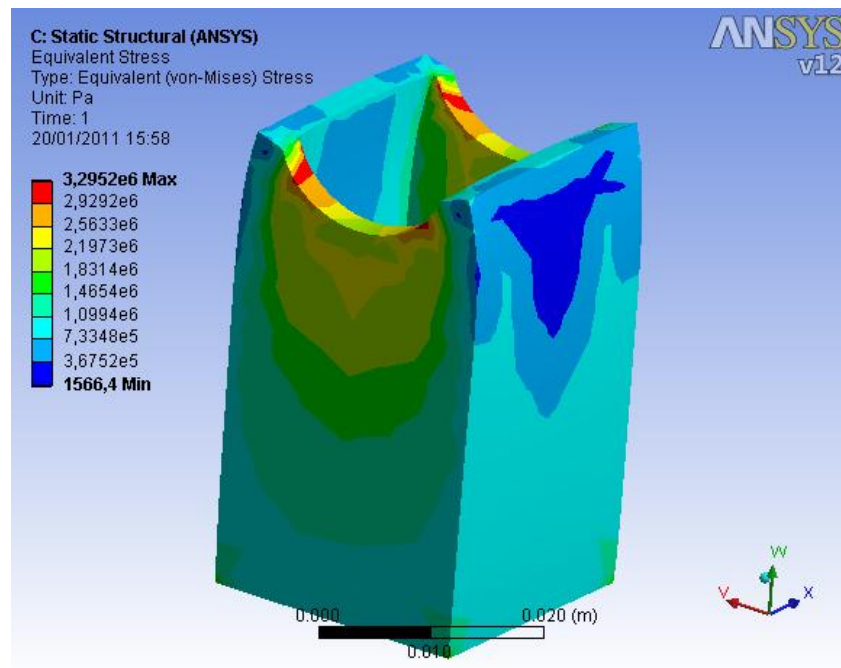
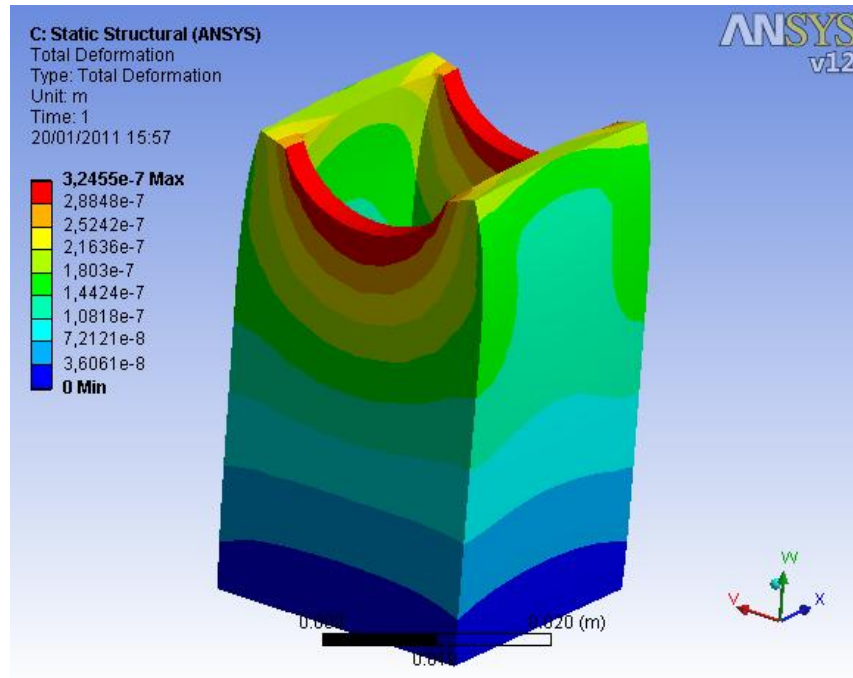


Figura 98. Representación en Ansys de los soportes de los tubos riel, Análisis deformación y esfuerzos respectivamente.

CARACTERÍSTICAS

Material: Acero Estructural Colmena
AISI/SAE 1015.

Dimensiones: 45 x 25.4 x 25.4 mm,
espesor de pared 2.5 mm

Factor de Seguridad: Superior a 15.

Carga Aplicada: 25 Kg.

Tabla 21. Características Soporte Tubo Riel.

6.2.2 Tubos Riel

Sobre estos tubos se deslizan los rodillos. Soportan el peso de la silla y la persona. Las figuras 99 y 100, ilustran el Tubo Riel y la disposición de este, junto con los dos componentes más cercanos.

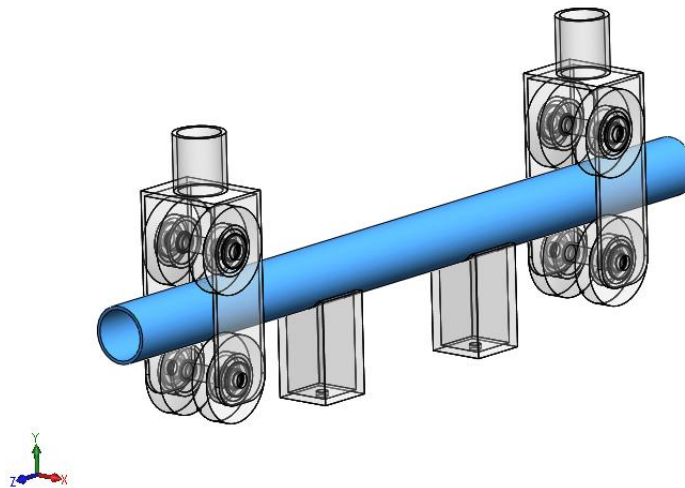


Figura 99. Tubo Riel del mecanismo de deslizamiento. Representación hecha en SolidWorks.



Figura 100. Fotografía Tubo Riel del mecanismo de deslizamiento.

Para el análisis en ANSYS Workbench se le aplicó una fuerza de 250 N en cada extremo correspondiente a un cuarto del peso máximo para el que fue diseñada la estructura.

Para las condiciones de apoyo y carga sobre los Tubos Riel, el factor de seguridad es de $N = 2,95$. En la figura 101 se ve la respuesta del sistema en cuanto a deformación y esfuerzos respectivamente, en la tabla 22 se listan las características principales

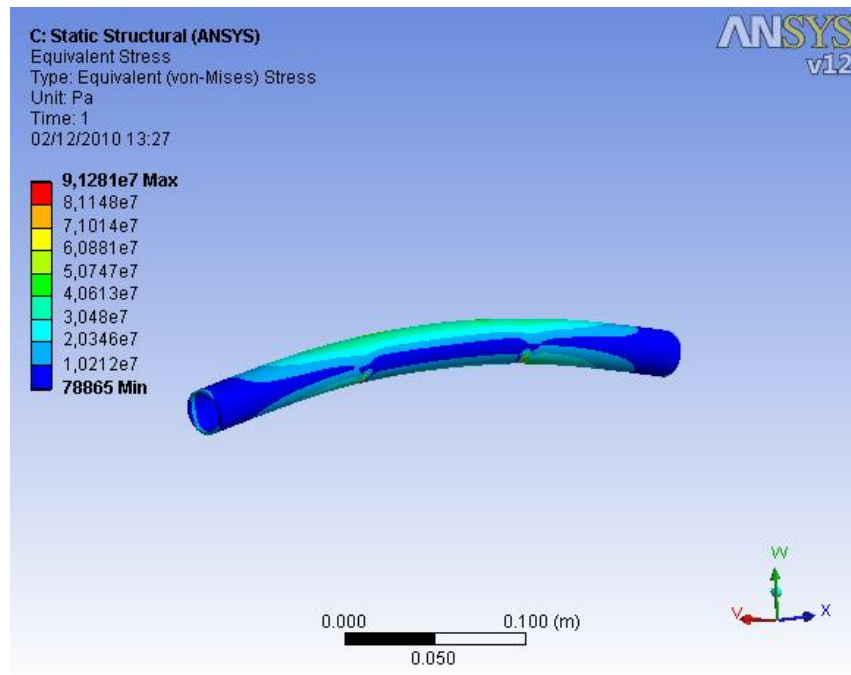
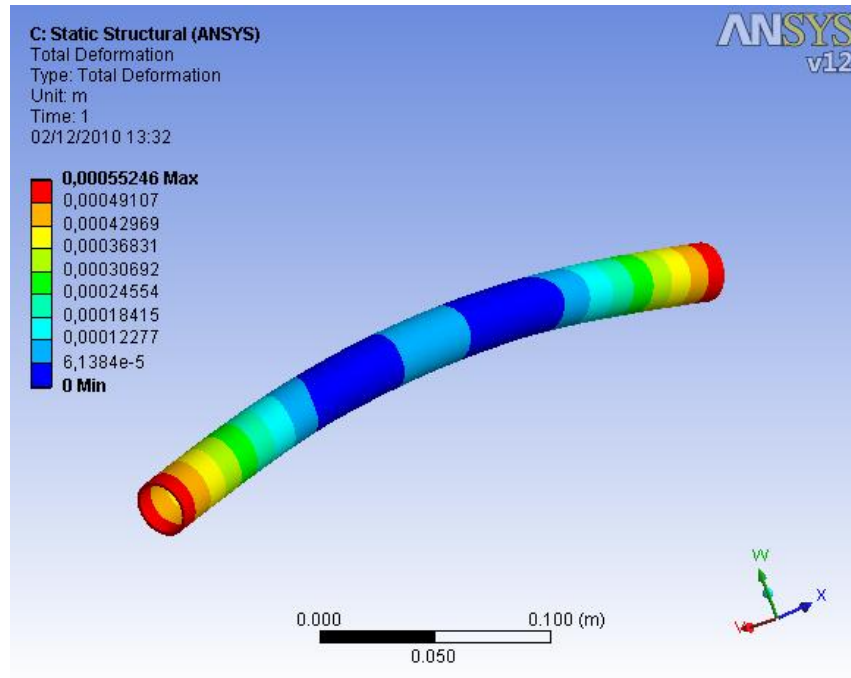


Figura 101. Representación en Ansys de los Tubos Riel, Análisis deformación y esfuerzos respectivamente.

CARACTERÍSTICAS
<i>Material:</i> Aluminio, Alúmina
<i>Dimensiones:</i> Longitud 360 mm
Diámetro 1"
Espesor de pared 1.5 mm
<i>Factor de Seguridad:</i> 2.95
<i>Carga Aplicada:</i> Dos fuerzas en sus extremos de 25 Kg cada una.

Tabla 22. Características Tubo Riel.

6.2.3 Rodillos

Este sistema permite el deslizamiento del sub conjunto Silla junto con el pasajero logrando hacer que el sistema se incline. Los rodillos están fabricados en Nylon y van soportados sobre un par de rodamientos 608Z (ver figura 102), usados comúnmente para ruedas de patines. Se eligió este tipo de rodamiento por varias razones. Aun cuando en el VEAU solo estarán sometidos a unos pocos giros, si se sabe de antemano que soportan bien el peso de una persona, además, traen un par de tapones que permiten ajustarlos axialmente con el tornillo especial para patines, se consiguen fácilmente en el comercio local y son económicos.



Figura 102. Rodamientos usados en los rodillos.

Los rodillos se dimensionaron de tal forma que se pudiera usar tornillos estándar para patines, junto con sus respectivos rodamientos, por lo tanto, estos tienen el ancho aproximado de una rueda de patín.

Cada conjunto de Rodillos consta de dos rodillos debidamente distanciados y apoyados sobre rodamientos montados en una base en forma de C hecha con lámina de dos milímetros de acero inoxidable

Las Figuras 103 y 104 muestran el rodillo y el conjunto de rodillos respectivamente.

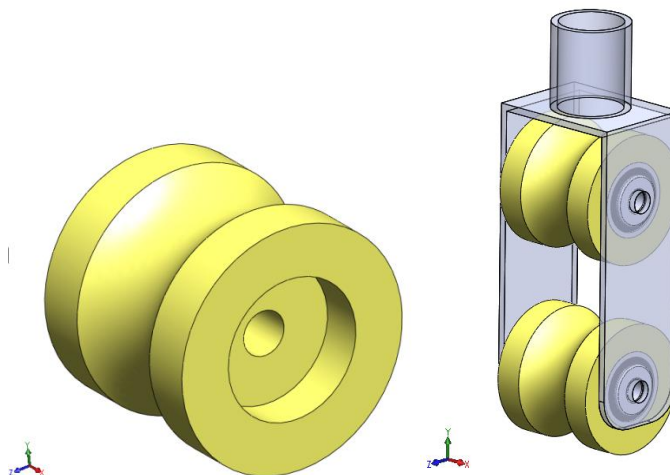


Figura 103. Rodillo. Representación hecha en SolidWorks.

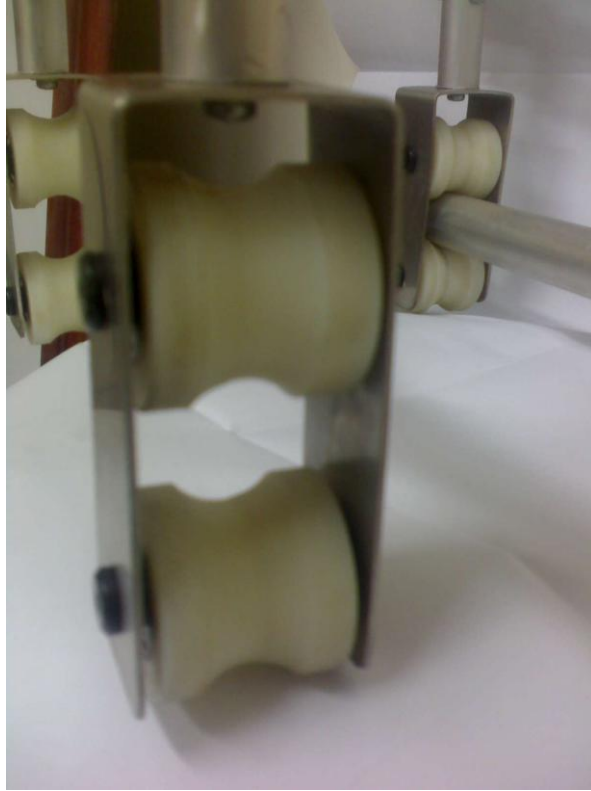


Figura 104. Fotografía de un conjunto de rodillos.

Para el análisis en ANSYS Workbench se usó una carga sobre el rodillo de 250 N. Para lo cual se obtuvo un factor de seguridad de $N = 13,9$. La figura 105 muestra el comportamiento en cuanto a deformación y esfuerzo bajo carga de este componente, la tabla 23 muestra las características principales de los rodillos.

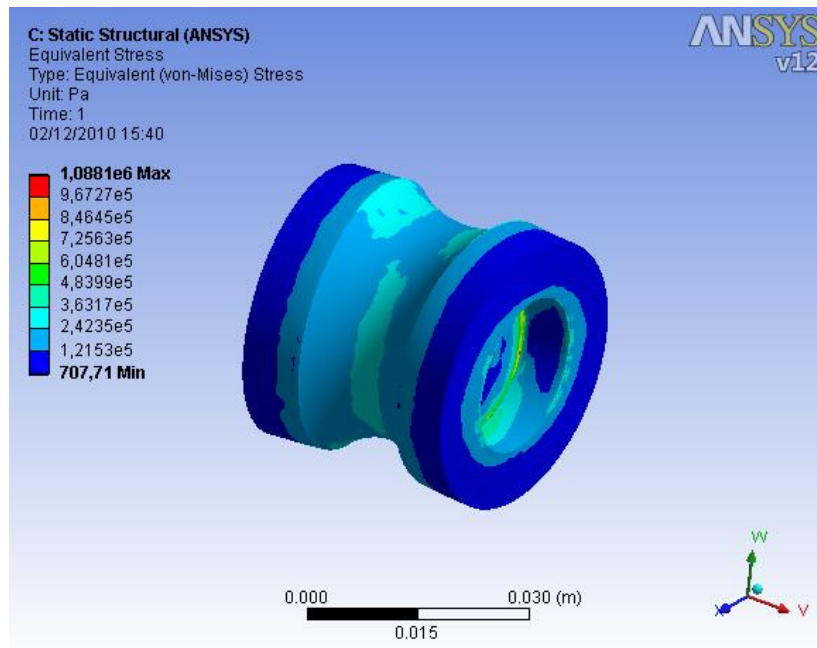
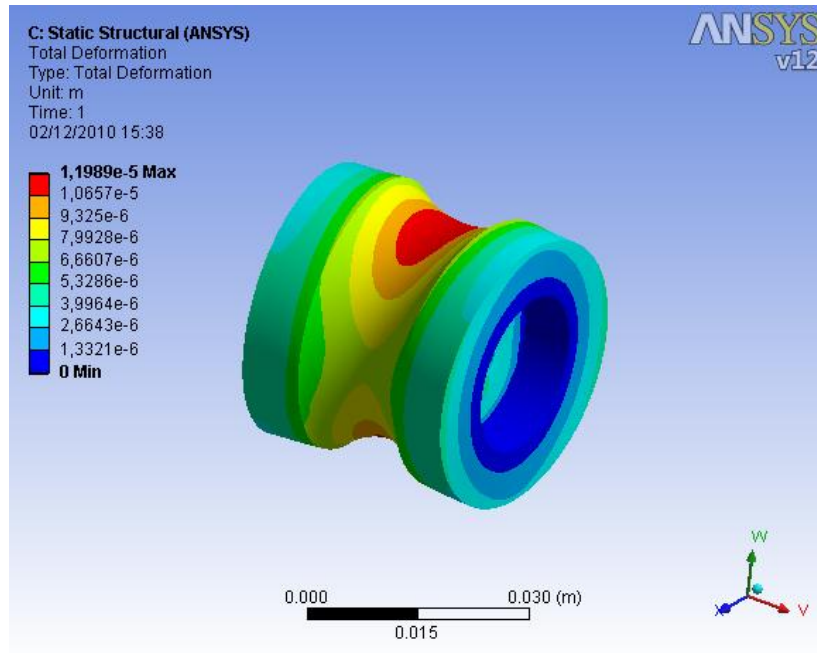


Figura 105. Representación en Ansys de un Rodillo, Análisis deformación y esfuerzos respectivamente.

CARACTERÍSTICAS
<i>Material:</i> Nylon
<i>Factor de Seguridad:</i> 13,9.
<i>Carga Aplicada:</i> 25 Kg.

Tabla 23. Características del Rodillo

6.3 SOPORTE DE LAS BATERÍAS

Se trata de un perfil en L de 3/4 " doblado y soportado por el bastidor del vehículo. Las figuras 106 y 107 muestran el soporte solo y el soporte junto con los componentes con lo que este interactúa.

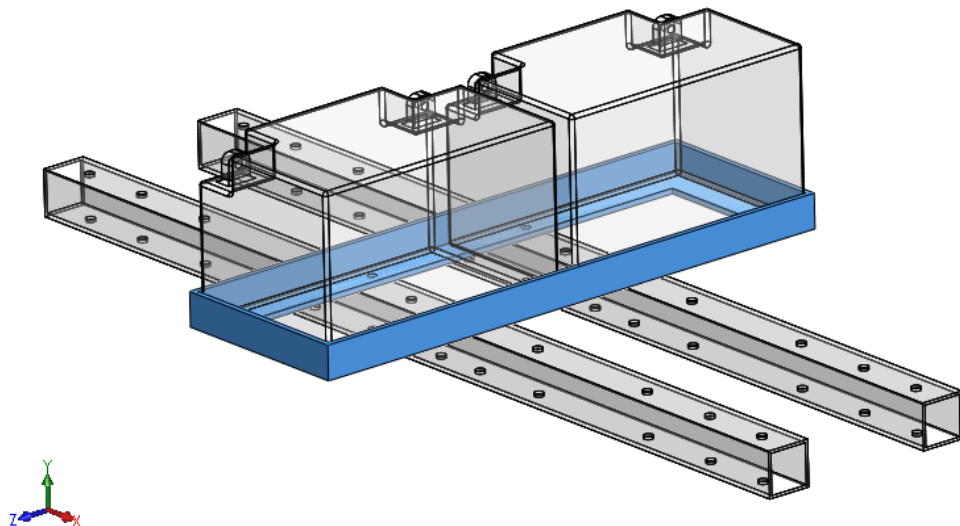


Figura 106. Soporte Baterías junto con sus componentes más cercanos. Representación hecha en SolidWorks.

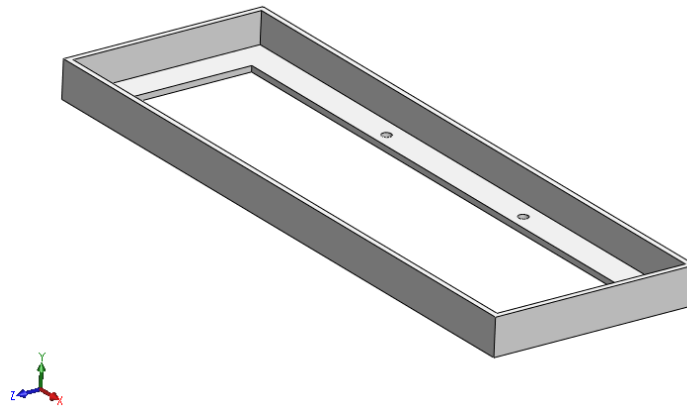


Figura 107. Soporte Baterías. Representación hecha en SolidWorks.



Figuras 108. Fotografía Soporte Baterías

Peso de dos baterías, $P_b=15$ Kg.

Presión ejercida por las baterías sobre el soporte, 30500 Pa (para cálculos en ANSYS Workbench). Para lo cual se obtuvo un factor de seguridad mayor que $N = 15$. La figura 109 muestra el comportamiento del soporte de las baterías bajo el peso de estas, en cuanto a deformación y esfuerzo.

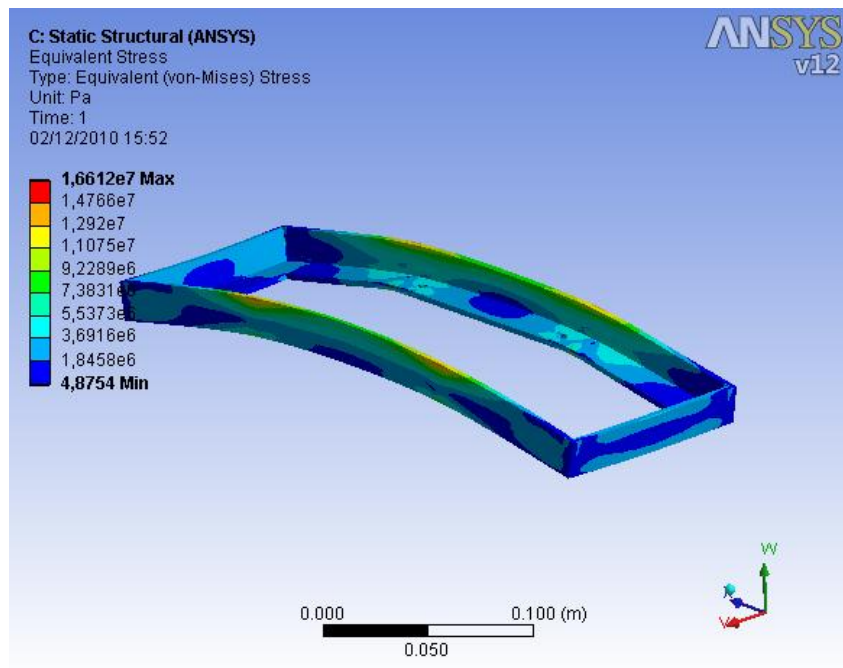
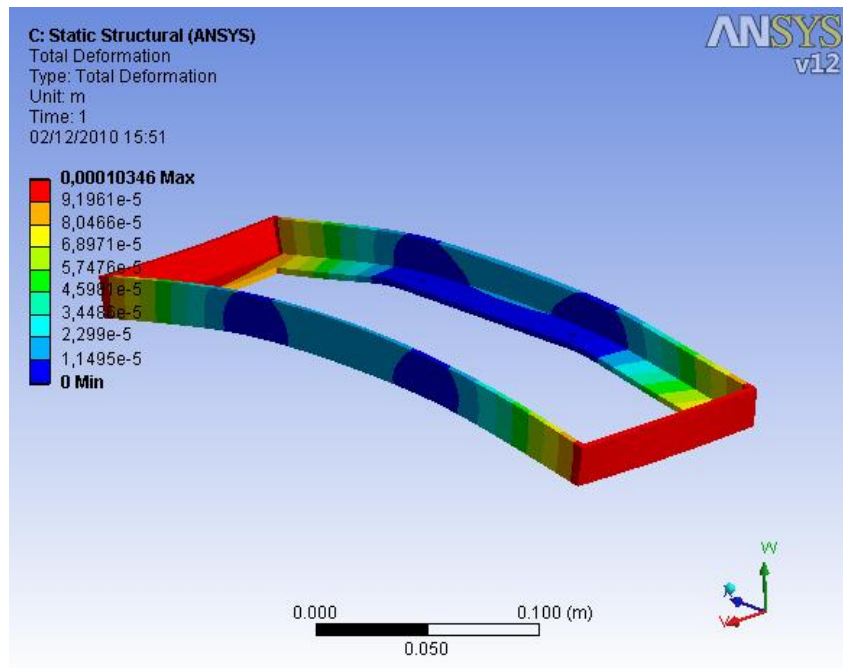


Figura 109. Representación en Ansys del Soporte de las Baterías, Análisis deformación y esfuerzos respectivamente.

CARACTERÍSTICAS
<i>Material:</i> Aluminio. Alúmina.
<i>Dimensiones:</i> 315 x 215 x 19 mm, espesor de pared 3 mm
<i>Factor de Seguridad:</i> Superior a 15.
<i>Carga Aplicada:</i> 30500 Pa.

Tabla 24. Características del Soporte de Baterías.

6.4 SISTEMA DE POTENCIA Y TRANSMISIÓN

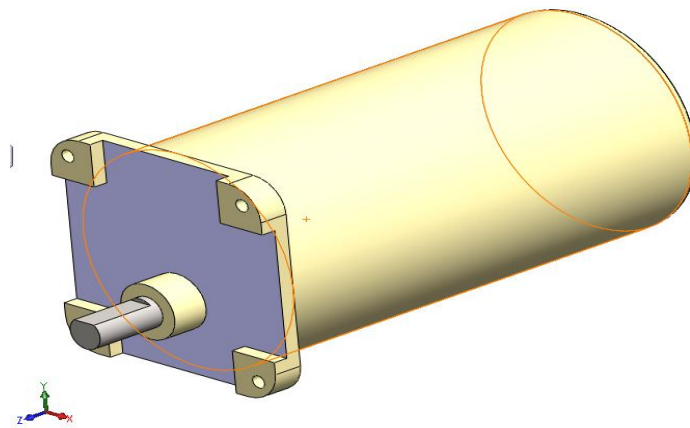
Compuesto por dos salidas de potencia, cada una de ellas compuesta por:

6.4.1 Motor DC

En la figura 110 se observa, los motores utilizados inicialmente en el modelo de pruebas, se observa el modelo en SolidWorks y una fotografía del mismo.

En la tabla 25 se incluyen las características principales de los motores utilizados en el modelo de pruebas.

En la figura 111 se observa, uno de los motores utilizados en el vehículo terminado, son motores de 12 Volts y de alta potencia



Figuras 110. Representación en SolidWorks y Fotografía de uno de los motores usados en el modelo de pruebas.

CARACTERÍSTICAS

Motoreductor DC MATSUHITA de 24 Voltios con encoder.

Reducción de 16:1 Piñones

Corriente pico: 15 A

Tabla 25. Características del Motor MATSUHITA.



Figura 111. Fotografía del motor BANELOTS, usado en el montaje final del VEAU.

CARACTERÍSTICAS
Moto reductor DC BANELOTS de 12 Voltios
Reducción de 16:1 planetaria.
Corriente sin Carga 2.7 A
Corriente pico 19.8 A
Torque máximo: 14.5 N-m

Tabla 26. Características del Motor BANELOTS.

6.4.2 Eje

Calculo de los requerimientos del sistema.

Tabla de requerimientos de torque del sistema basado en las ecuaciones, por motor.

M = Masa del vehículo más la del pasajero / 2 pues se calcula para un solo motor, en Kg.

a = Aceleración a la que debe moverse el sistema para no caer, en m/s²

θ = Angulo de inclinación del sistema respecto de la vertical, en radianes.

τ = Torque requerido por el sistema para mantenerse a una aceleración constante dependiendo del ángulo de inclinación en el que se encuentre, en Nm.

r = Radio de la rueda, en metros.

$$a = g * \tan(\theta)$$

$$\tau = M * a * r$$

Gravedad [m/s²]	9,81		
M+m [kg]	50		
Radio Rueda [m]	0,15		
Aceleración [m/s²]	radianes	grados	Torque mínimo
0,858263061	0,087266389	5	6,436972954
1,031071671	0,104719667	6	7,73303753
1,204515515	0,122172944	7	9,033866361
1,378704409	0,139626222	8	10,34028306
1,553750025	0,1570795	9	11,65312519
1,72976619	0,174532778	10	12,97324642
1,906869182	0,191986056	11	14,30151886
2,085178056	0,209439333	12	15,63883542
2,264814975	0,226892611	13	16,98611231

Tabla 27. Torques requeridos por cada motor para diferentes inclinaciones.

Torque máximo en el motor: 0.3178 Nm

Reducción: 16:1

Torque a la salida del reductor: 14.5 Nm = 128 Lb-pulg.

De acuerdo con la tabla 27 se espera que el sistema sea capaz de responder adecuadamente hasta una inclinación de 11° para un peso del conjunto vehículo pasajero de 100 Kg.

Conociendo el torque máximo entregado por los motores se calcula la cuña ubicada entre el eje y el acople manzana-eje.

Se elige un ancho de cuña W estándar de 1/4".

Cálculo de la longitud de la cuña.

$$L = \frac{4 * \tau * N}{D * W * S_y} = \frac{4 * 128 * 2}{\frac{3}{4} * \frac{1}{4} * 30000} = 0,182 \text{ Pulg.} \cong 0,5 \text{ cm.}$$

Por efectos de maquinado se realizo una cuña de 1.5 cm, longitud superior a la requerida. Material, acero AISI 1020.

Diseño del eje.

Se presume hay dos puntos sobre el eje los cuales están sometidos a un esfuerzo mayor, el apoyo sobre la chumacera y el punto donde se ubica el cuñero.

Distribuyendo el peso de la persona y del vehículo en las dos ruedas corresponde a cada eje aproximadamente 100 Lb de carga.

Apoyo sobre la chumacera.

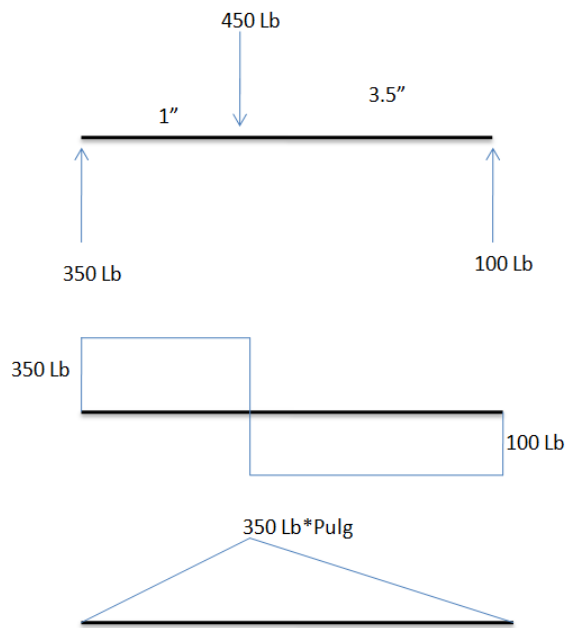


Figura 112. Diagrama de fuerzas, cortante y momentos sobre el eje en la sección de la chumacera

Aplicando la ecuación [14]

$$D = \left[\frac{32 * N}{\pi} * \sqrt{\frac{K * M^2}{Sn} + \frac{3}{4} * \left(\frac{T}{Sy}\right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D=3/4''$$

k=1 Para eje sin hombros.

$$M=350 \text{ Lb} * \text{Pulg}$$

$$Sn=72000 \text{ Psi}$$

$$Sy=42000 \text{ Psi}$$

$$T=128 \text{ Lb} * \text{Pulg}$$

Solucionando para N se obtiene un factor de seguridad de N=7,5. Con el cual se puede asegurar que la resistencia del eje está por encima del requerimiento teórico en la parte del eje que se encuentra en contacto con la chumacera.

Punto donde se ubica el cuñero.

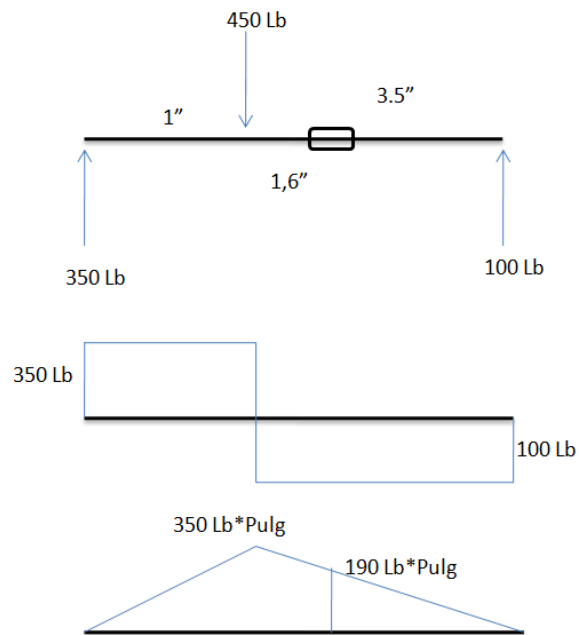


Figura 113. Diagrama de fuerzas, cortante y momentos sobre el eje en la sección de la cuña

Aplicando la ecuación [14]

$$D = \left[\frac{32 * N}{\pi} * \sqrt{\frac{K * M^2}{Sn} + \frac{3}{4} * \left(\frac{T}{Sy}\right)^2} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$D=3/4''$$

k= 2 Para cuñero de perfil.

$$M=190 \text{ Lb} \cdot \text{Pulg}$$

$$Sn=72000 \text{ Psi}$$

$$Sy=42000 \text{ Psi}$$

$$T=128 \text{ Lb} \cdot \text{Pulg}$$

Solucionando para N se obtiene un factor de seguridad de $N=7$. Con el cual se puede asegurar que la resistencia del eje está por encima del requerimiento teórico en la parte del eje donde se ubica el cuñero.

Eje de $3/4$ " con un acople rígido fijo en uno de sus extremos en donde entra el eje del motor de 12 mm. El diámetro de la sección del acople es de $1\ 1/8$ ". Ver figura 112.

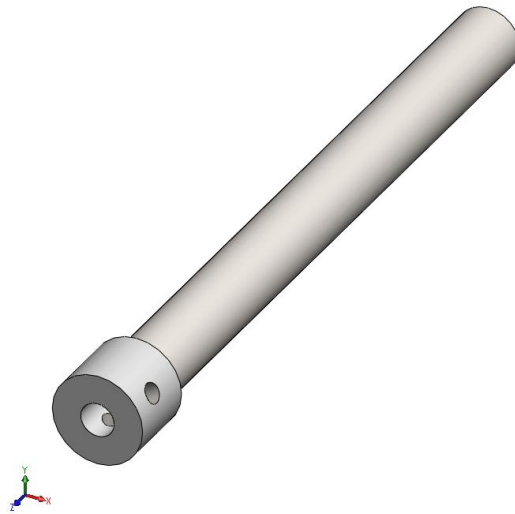


Figura 114. Eje con acople rígido, Representación hecha en SolidWorks y fotografía.

Para su análisis en ANSYS se tuvo en cuenta la fuerza radial en el sitio donde se ubica la rueda, el momento ejercido por el motor, el cual es transmitido a la rueda a través de la chaveta y las restricciones radiales que hacen los cojinetes.

La figura 113 muestra el comportamiento del eje soporte de las baterías bajo el peso de estas, en cuanto a deformación y esfuerzo.

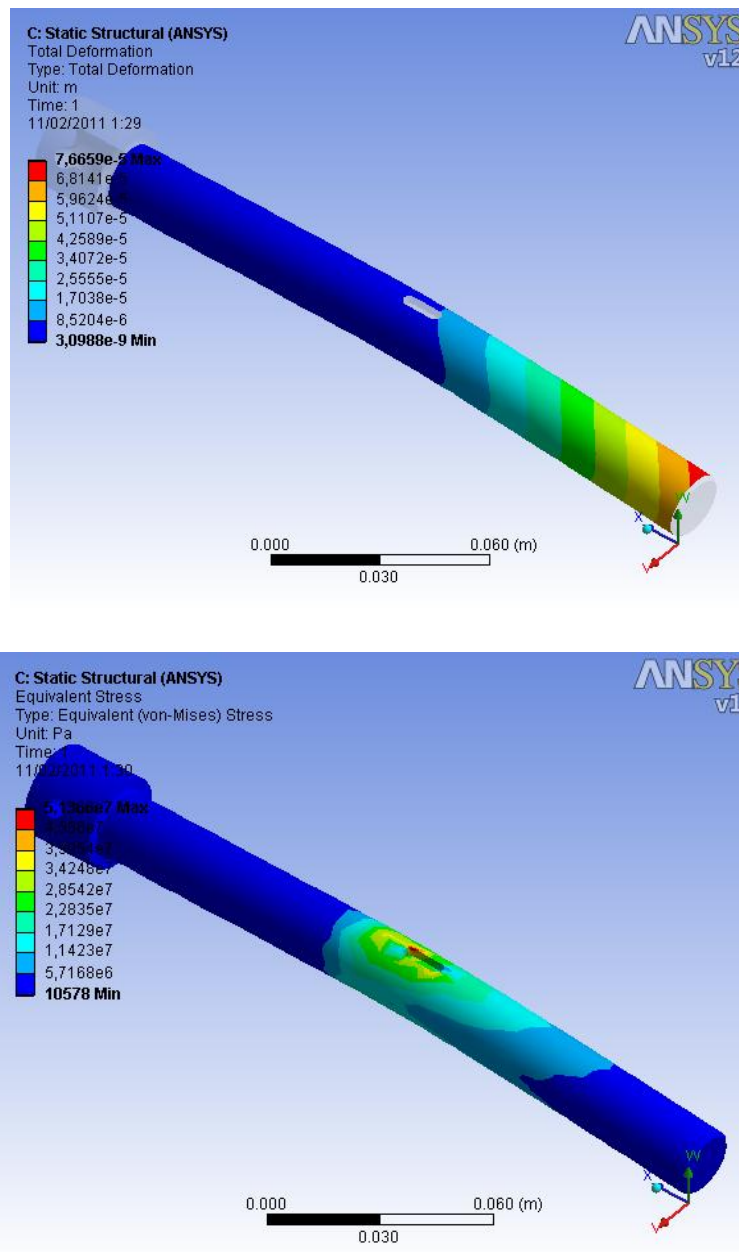


Figura 115. Representación en Ansys del Eje Acople-Motor, Análisis deformación y esfuerzos respectivamente.

CARACTERÍSTICAS

Material: Acero AISI/SAE 1045.

Dimensiones: D=3/4", L=220mm

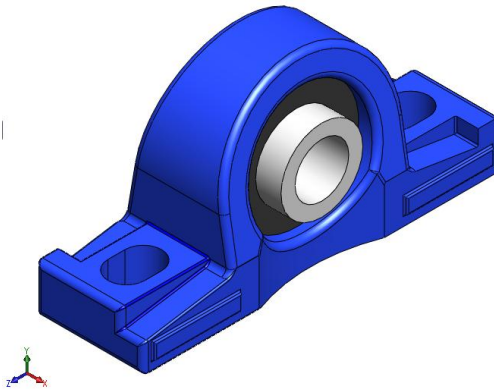
Factor de Seguridad: 5.8

Carga Aplicada: Combinación del peso de la persona y estructura, torque y restricciones hechas por las chumaceras.

Tabla 28. Características del Eje-Acople.

6.4.3 Chumacera

Se seleccionaron chumaceras con rodamientos de la marca FK, referencia P204⁹. Al trabajar a baja velocidad, no hay restricción por este motivo y respecto a la carga radial, el límite de este rodamiento es de 9880 N, muy superior a la carga a la cual van a estar sometidos, la cual será el peso del vehículo mas el de la persona. Ver figura 114.



⁹ www.fk-bearings.com

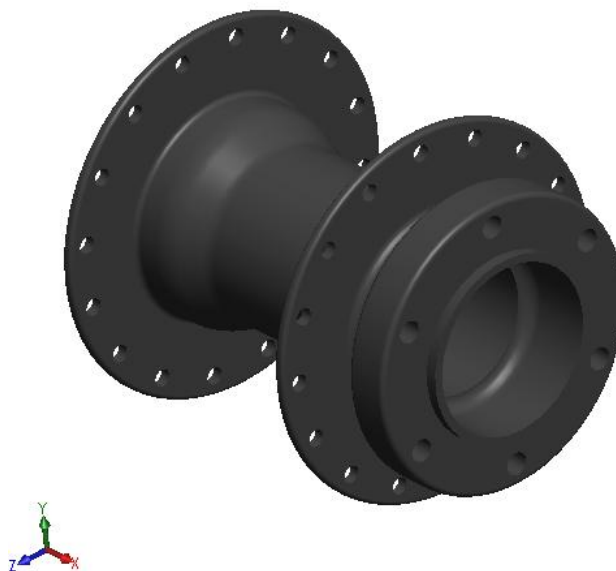
Figura 116. Representación en SolidWorks y Fotografía de una de las chumaceras.

CARACTERÍSTICAS
Chumacera con rodamiento de bolas Marca FK, referencia P204.
<i>Carga máxima radial Soportada: 9880 N</i>
<i>Carga máxima Aplicada: 1000N.</i>

Tabla 29. Características de las Chumaceras

6.4.4 Manzana de freno de disco

Se aprovechó la entrada de los tornillos de la manzana para el freno de disco para fijar el acople que permite la transmisión de torque, en la figura 115 se observan las manzanas para freno de disco utilizadas en el modelo.





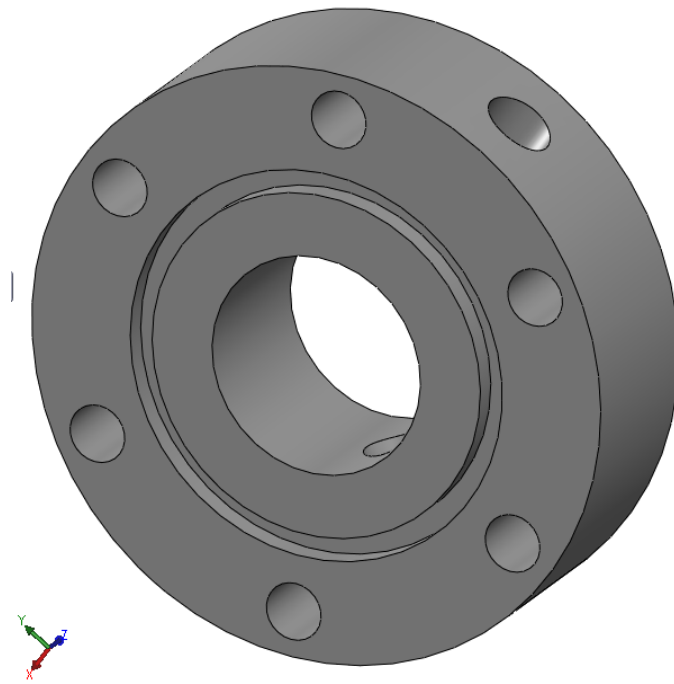
Figuras 117. Representación el SolidWorks y Fotografía de una de las Manzanas.

CARACTERÍSTICAS
<i>Material:</i> Aluminio.
<i>Marca:</i> K9
<i>Carga Aplicada:</i> 50 Kg.

Tabla 30. Características de las manzanas.

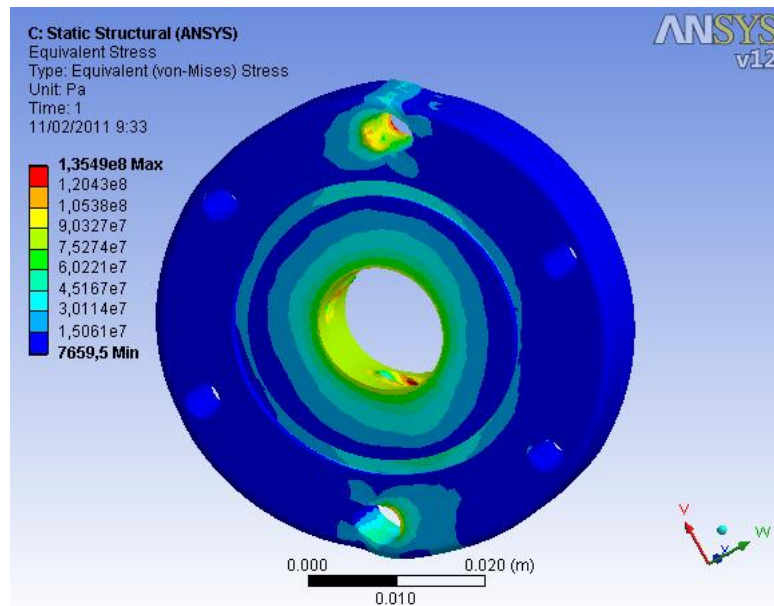
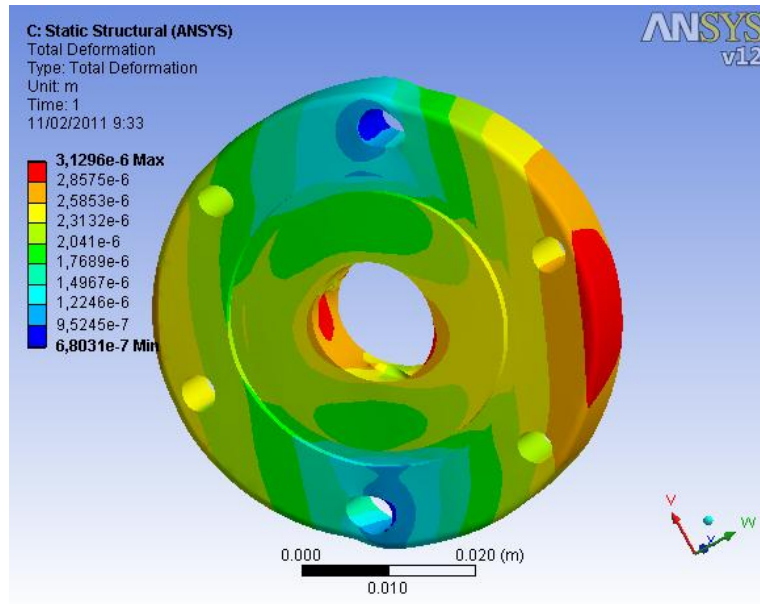
6.4.5 Acople entre el eje y la manzana

Esta pieza permite transmitir el torque desde el eje a la rueda, por medio de la manzana, además de servir de soporte radial. Ver figura 116, en la tabla 30 podemos observar las características de esta pieza.



Figuras 118. Representación el SolidWorks y Fotografía de Acople Eje-Manzana

Para su análisis en ANSYS se tuvo en cuenta la fuerza radial de compresión a la que se encuentra sometida y el torque que proviene del motor. La figura 117 muestra el comportamiento del Acople Eje-Manzana, en cuanto a deformación y esfuerzo.



Figuras 119. Representación en ANSYS del Acople Eje-Manzana, Análisis deformación y esfuerzos respectivamente.

CARACTERÍSTICAS

Material: Acero Estructural Colmena
AISI/SAE 1015.

Dimensiones: 450 x 25.4 x 25.4, espesor de
pared 2.5 mm

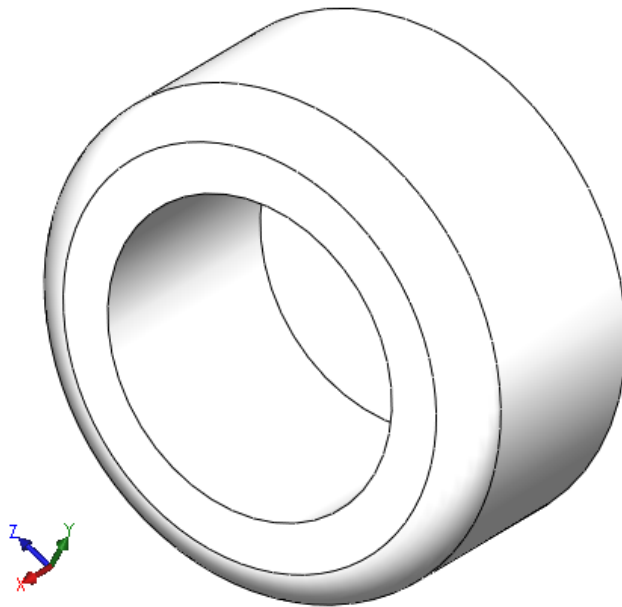
Factor de Seguridad: Superior a 15.

Carga Aplicada: 25 Kg.

Tabla 31. Características del acople eje-manzana.

6.4.6 Buje entre manzana y eje

Permite centrar el eje dentro de la manzana. Ver figura 118.





Figuras 120. Representación el SolidWorks y Fotografía de uno de los bujes.

<p>CARACTERÍSTICAS</p> <p><i>Material: Nylon</i></p> <p><i>Carga Aplicada: 30 Kg.</i></p>
--

Tabla 32. Características buje Eje-Manzana.

6.4.7 Rueda de bicicleta

Se seleccionó la rueda de bicicleta más pequeña que se encontró en el mercado, Rin 12. Ver figura 119.

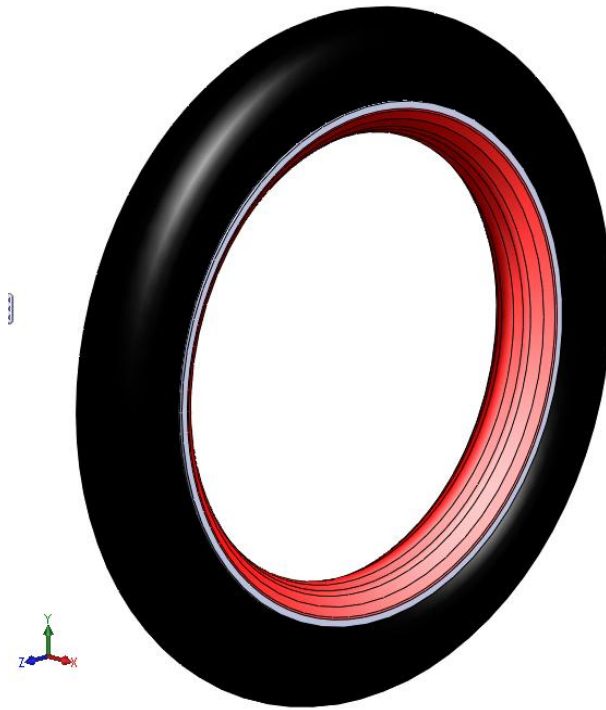


Figura 121. Representación el SolidWorks y Fotografía de una de las Ruedas

CARACTERÍSTICAS

Material: Rin de aluminio, Radios de acero, llantas de caucho con labrado

Dimensiones: 12 Pulgadas de Diámetro

Tabla 33. Características de las Ruedas

En la figuras 120, se muestra el montaje de la subconjunto de transmisión de potencia.



Figura 122. Fotografías del montaje del subconjunto, transmisión de potencia.

6.5 SILLA

6.5.1 Silla

Se selecciona una silla plástica tipo oficina. Esta se soporta sobre una estructura tubular en aluminio de 3/4" de diámetro. Ver figura 121.



Figura 123. Fotografía de la estructura tubular que soporta la silla.

6.5.2 Posa Pies

Este elemento tiene dos funciones, servir de descanso de los pies del usuario y por medio de él se transmite movimiento hacia adelante y atrás a través de la barra de mando. En la figura 121 aparece como un tubo en forma de U dispuesto horizontalmente, justo debajo de la silla, se acopla a los tubos por medio de tornillos pasantes.

6.6 ENSAMBLE COMPLETO DEL VEAU

La figura 122 se observa, el prototipo ensamblado, con cada una de las partes antes analizadas, con sus sistemas electrónicos, y sus sistemas de mando, este es el modelo final.

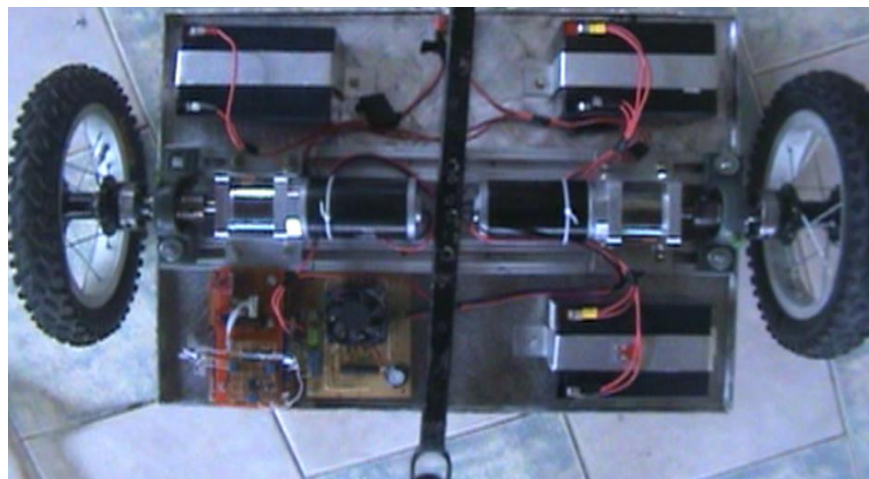
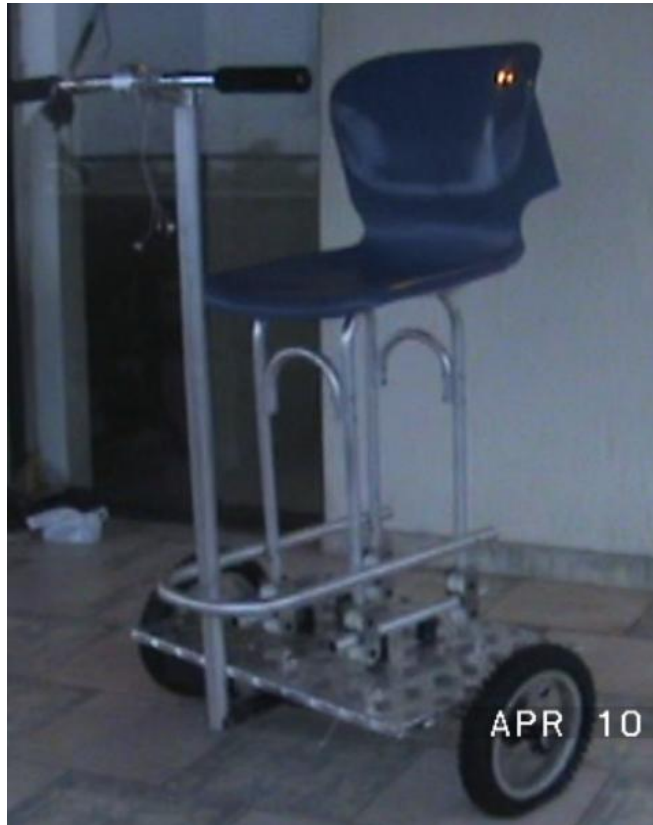


Figura 124. Ensamble del prototipo de vehículo autobalanceado VEAU

7 SISTEMA DE CONTROL

Este capítulo explica cómo se implementó el sistema de control embebido para el VEAU, que encierra, características, funciones de la tarjeta y sus fundamentos operativos, además se detalla cómo se realizó la organización del código fuente del controlador, una descripción breve de cómo se integran el hardware y software es decir, el controlador con los sensores y actuadores por medio del software, se explica la sintaxis del lenguaje de programación de alto nivel Arduino y que funciones se utilizaron.

7.1 SISTEMA DE CONTROL EMBEBIDO

Se conoce como sistema embebido a un circuito electrónico computarizado que está diseñado para cumplir una función específica en un producto.

La inteligencia artificial, secuencias y algoritmos de un sistema embebido, están residentes en la memoria de una pequeña computadora denominada microcontrolador¹⁰.

7.1.1 CARACTERÍSTICAS

- Los sistemas embebidos son diseñados para una aplicación específica, es decir, estos sistemas realizan un grupo de funciones previamente definidas y una vez el sistema es diseñado, no se puede cambiar su funcionalidad. Por ejemplo, el control de un ascensor siempre realizará las mismas acciones durante su vida útil.

¹⁰ GALEANO, Gustavo. Programación de sistemas embebidos en C. Colombia. 2009, pág. 3.

- Debido a su interacción con el entorno los ES deben cumplir estrictamente restricciones temporales. El término Sistemas de Tiempo Real es utilizado para enfatizar este aspecto.
- Los Sistemas Embebidos son heterogéneos, es decir, están compuestos por componentes Hardware y Software. Los componentes Hardware, como ASICs y Dispositivos Lógicos Programables (PLD) proporcionan la velocidad de ejecución y el consumo de potencia necesarios en algunas aplicaciones.
- Los Sistemas Embebidos tienen grandes requerimientos en términos de confiabilidad. Errores en aplicaciones como la aviación y el automovilismo, pueden tener consecuencias desastrosas.

En el presente proyecto se trabajó con sistemas embebidos digitales, utilizando microcontroladores programados en C++, la función de este sistema embebido es la de estabilizar el VEAU un sistema dinámico de naturaleza inestable, los sistemas embebidos son sistemas que permiten obtener datos por medio de digitalización de señales análogas, realizan operaciones y realizan conversiones de digitales análogas para interactuar con el ambiente.

7.2 MICROCONTROLADOR

Un microcontrolador es un circuito integrado o chip que incluye en su interior las tres unidades funcionales de una computadora: unidad central de procesamiento, memoria y unidades de E/S (entrada/salida), la mayoría de microcontroladores poseen la estructura básica que se observa en la figura().

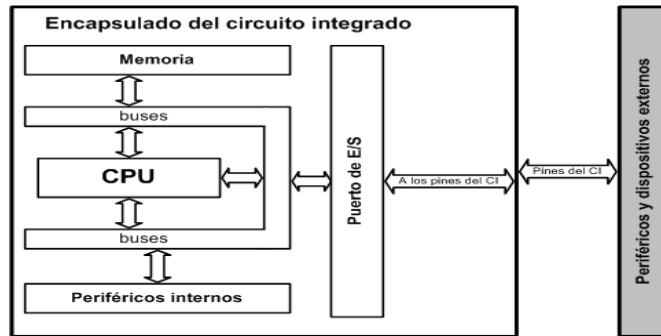


Figura 125. Estructura básica de los microcontroladores.
Fuente: www.ucontrol.com.ar/wiki

Son diseñados para reducir el costo económico y el consumo de energía de un sistema en particular. Por eso el tamaño de la unidad central de procesamiento, la cantidad de memoria y los periféricos incluidos dependerán de la aplicación.

Un microcontrolador típico tendrá un generador de reloj integrado y una pequeña cantidad de memoria RAM y ROM/EPROM/EEPROM/FLASH, significando que para hacerlo funcionar, todo lo que se necesita son unos pocos programas de control. Los microcontroladores disponen generalmente de una gran variedad de dispositivos de entrada/salida, como convertidores de analógico a digital(ADC), temporizadores, UARTs (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) y buses de interfaz serie especializados, como I²C (Circuitos Inter-Integrados), CAN (Controller Area Network) y SPI(serial peripheral interface). Frecuentemente, estos dispositivos integrados pueden ser controlados por instrucciones de procesadores especializados. Los modernos microcontroladores frecuentemente disponen de una interfaz de programación integrada IDE (Integrated Drive Electronics), como el BASIC, C, C++ o java que se utilizan bastante con este propósito¹¹.

¹¹ <http://es.wikipedia.org/wiki/Microcontrolador>

7.2.1 MICROCONTROLADOR ATMEGA 1280 DE ATMEL

Como se definió en un principio en los objetivos del proyecto de grado la utilización de una tarjeta de desarrollo basada en microcontroladores Atmega, Se decidió utilizar la tarjeta de desarrollo Arduino mega que integra un microcontrolador Atmega 1280 de la familia Atmel. Los cuales tienen las siguientes características técnicas de operación:

Memoria 128 KB (flash)

Memoria 8 KB (SRAM)

4096 bytes de EEPROM.

16 pines (A/D) con un convertidor de 10 bits.

4 canales de PWM de 8 bits.

6 a 12 canales PWM programables a una resolución entre 2 a 16 bits.

2 a 4 puertos programables de comunicación USART.

Comunicación serial SPI.

Rango de temperatura de funcionamiento de -40°C a +105°C.

Ciclos de borrado y escritura 10.000 flash y 100.000 EEPROM.

Voltaje de alimentación 2.7 a 5.5 Voltios.

Encapsulado de 100 pines CBGA.

En el Anexo B, se presenta el datasheet (hoja de datos) de el microcontrolador utilizado, en este podemos ver la asignación de pines para los encapsulados, así como las características térmicas, eléctricas y planos del microcontrolador Atmega 1280.

En el presente proyecto se utilizó la tarjeta de desarrollo Arduino mega que integra el microcontrolador Atmega 1280, con los dispositivos necesarios para su operación, haciendo más fácil la aplicación del microcontrolador en el proyecto, dado que esta tarjeta fue diseñada y construida junto con su software

en el cual se incluyeron gran cantidad de librerías que permiten la utilizar el microcontrolador Atmega 1280 con una programación de alto nivel basado en C++, pero mucho más sencilla que la programación de bajo nivel que debe manejarse para poder utilizar las prestaciones del microcontrolador Atmega 1280.

Tarjeta de desarrollo Arduino mega.

También llamada placa de desarrollo, creada por el instituto de diseño interactivo de Ivrea en Italia, integrando los conocimientos de un grupo de diseñadores, ingenieros y artistas, con la idea de aportar un microcontrolador con plataforma de software y hardware abierto.

Esta placa permite crear objetos físico interactivos utilizando un microcontrolador de bajo costo, con una programación de alto nivel.

En nuestro caso la placa de desarrollo Arduino mega integra nuestro microcontrolador Atmega 1280, para el diseño del sistema embebido de control del VEAU, el Arduino permite observar las siguientes características generales tiene 54 entradas/salidas digitales de las cuales 14 proporcionan salida PWM, 16 entradas analógicas, 4 UARTS (puertos serie por hardware), un cristal oscilador de 16MHz, conexión USB, entrada de corriente, conector ICSP y botón de reset.

Contiene todo lo necesario para hacer funcionar el microcontrolador; simplemente conectándolo al ordenador con el cable USB o alimentándolo con una batería.

La figura 124, permite observar la placa Arduino en vista superior donde se pueden observar todos los circuitos y dispositivos que integra esta placa para el correcto funcionamiento del microcontrolador.



Figura 126. Placa de desarrollo Arduino mega.
Fuente: www.arduino.cc/es/Main/ArduinoBoardMega

7.2.2 Características del Arduino

7.2.2.1 Alimentación de la placa Arduino MEGA

El Arduino Mega puede ser alimentado por medio de la conexión USB, también permite alimentarse con una fuente externa, esto para cuando se requiere dejar el Arduino independiente del computador en alguna aplicación, luego de programar el microcontrolador. El Arduino mega selecciona automáticamente el origen de la alimentación.

Las fuentes de alimentación externas pueden ser, transformador o batería. El transformador se puede conectar usando un conector macho de 2.1 mm con centro positivo en el conector hembra de la placa. La figura 125 muestra este conector. Los cables de la batería pueden conectarse a los pines Gnd y Vin en los conectores de alimentación (POWER), que se encuentran en la parte inferior izquierda de la placa.



Figura 127. Transformador y batería con conectores machos de 2.1 mm, alimentación externa del Arduino.
Fuente: www.tucamon.es/contenido/tus-proyectos-6

La placa trabaja con alimentación externa de 6 a 20 voltios. Si el voltaje suministrado es inferior a 7V, el pin de 5V del Arduino que se utiliza para suministrar voltaje a otros circuitos conectados a la placa, puede suministrar menos de 5 Voltios y la placa puede volverse inestable en cuanto a funcionamiento, si se usan mas de 12V los reguladores de voltaje se pueden sobrecalentar y dañar la placa. Se recomienda que la placa este alimentada entre 7 y 12 V.

En la placa encontraremos los siguientes pines de alimentación:

- VIN. La entrada de voltaje a la placa Arduino cuando se está usando una fuente externa de alimentación
- 5V. pin de alimentación desde el Arduino a otros dispositivos, este pin posee un regulador de 5 voltios que permite la entrega de este voltaje independiente de la alimentación externa que tenga el Arduino.
- 3V3. Pin de alimentación desde el Arduino para dispositivos que requieran de alimentación de 3.3 volts, la mayoría de sensores se alimentan con 3.3 volts por lo que este voltaje es muy necesario, estos 3.3 V son generados en el chip FTDI de comunicación de la placa. La corriente máxima que puede extraerse es de 50mA.
- GND. Pines tierra.

7.2.2.2 Memoria de la placa

El ATmega1280 tiene 128KB de memoria flash para almacenar código en la placa Arduino ,4KB son usados para el arranque del sistema o para la IDE del Arduino. Tiene 8 KB de memoria SRAM y 4KB de EEPROM.

7.2.2.3 Entradas y salidas

El Arduino mega dispone de 54 pines digitales que pueden utilizarse como entradas o como salidas. Las E/S operan entre 0 y 5 voltios. Cada pin puede proporcionar o recibir una corriente máxima de 40mA.

7.2.2.4 Pines especializados

Algunos pines son utilizados para recibir (RX) y transmitir (TX) datos a través del puerto serie TTL, estos se conectan a los pines del FTDI-USB, un dispositivo usado para realizar la comunicación con el PC, de esta forma se pueden cargar los programas y se podrán visualizar datos que sean enviados por el Arduino.

- Serie: 0 (RX0) y 1 (TX0).
- Serie 1: 19 (RX1) y 18 (TX1);
- Serie 2: 17 (RX2) y 16 (TX2)
- Serie 3: 15 (RX3) y 14 (TX3).

Interrupciones Externas. La placa Arduino mega dispone de 4 pines para realizar interrupciones externas, estas interrupciones se disparan cuando en algún pin para este fin llega una señal disparadora de la interrupción, el programa que se estaría ejecutando se detendría e iría a una función que indica la interrupción para realizar otra actividad, apenas termine de hacer esta actividad el programa sigue su curso normal, se deben utilizar algunas librerías que permite utilizar la función `attachInterrupt()` para el uso de la interrupciones externas.

- Pin 18 (interrupción 5).
- Pin 19 (interrupción 4).
- Pin 20 (interrupción 3).
- Pin 21 (interrupción 2).

Pines PWM: de 2 a 13. Proporciona una salida PWM (modulación ancho de pulsos) de 8 bits de resolución (valores de 0 a 255) a través de la función `analogWrite ()`. Las señales de pwm del Arduino simulan una señal analógica de salida de baja resolución.

Pines de comunicación SPI. Estos pines permiten realizar comunicación serial SPI, un protocolo de comunicación serial muy usado entre Arduino y otros dispositivos electrónicos como sensores, memorias EEPROM, microcontroladores, potenciómetros, etc. Los pines que dispone el Arduino mega son:

- Pin 50 (SS Slave Select).
- Pin 51 (MOSI master output-slave input).
- Pin 52 (MISO master input-Slave output).
- Pin 53 (SCK Select clock).

Arduino dispone de hardware para esta comunicación, pero inicialmente no disponía de software ni de funciones para realizar fácilmente este tipo de comunicación, debido al amplio grupo de aficionados al Arduino y a su comunidad colectiva, actualmente se cuenta con una librería para este tipo de comunicación (SPI) en la que se activan cada uno de los pines de comunicación, se pide transferencia de datos, permite disparar el clock y seleccionar el dispositivo esclavo a utilizar siendo el Arduino el máster.

7.2.2.5 Entradas analógicas

El Arduino Mega cuenta con 16 entradas analógicas, y cada una de ellas proporciona una resolución de 10bits (1024 valores). Por defecto se mide de

tierra a 5 voltios, aunque es posible cambiar la cota superior de este rango usando el pin AREF y la función `analogReference()`.

Comunicación I²C. Soporte del protocolo de comunicaciones I²C (TWI) usando la librería Wire.

- Pines 20 (SDA).
- Pines 21 (SCL).

AREF. Voltaje de referencia para las entradas analógicas. Usado para disminuir el rango de voltaje de lectura de las entradas analógicas eso permite tener mayor resolución en la lectura de manera que podamos optimizar el ADC, del Arduino, este cambio de voltaje de referencia lo hacemos utilizando una función de Arduino llamada `analogReference (type)`.

Reset. Suministrar un valor LOW (0V) para reiniciar el microcontrolador.

7.2.2.6 Comunicaciones

EL Arduino Mega facilita en varios aspectos la comunicación con el computador. El ATmega1280 proporciona cuatro puertos de comunicación vía serie UART TTL (5V). Un chip FTDI FT232RL integrado en la placa permite esta comunicación serie a través del puerto USB.

El software Arduino incluye un monitor de puerto serie, que permite enviar y recibir información textual de la placa Arduino, esta es una característica muy importante ya que permite visualizar los datos que leemos de algún sensor además podemos enviar datos al Arduino, esta función del Arduino permite llevar procesos de monitoreo de los sensores y de las variables en un programa para la realizar sistemas de control más interactivos.

7.2.2.7 Esquemático del controlador

La tarjeta Arduino dispone de un microcontrolador Atmega 1280, el cual integra todos los dispositivos necesarios para su correcto funcionamiento, por tanto con respecto a los micro controladores convencionales la tarjeta Arduino se ahorra la tarea de realizar las conexiones de los dispositivos para el funcionamiento del microcontrolador, una característica importante es que la tarjeta incluye un módulo crucial en este tipo de sistemas embebidos y es la programación o que en el lenguaje ordinario se le llama quemar el controlador, la tarjeta cuenta con el integrado que comunica el microcontrolador con el PC para realizar el envío del programa ,envío de datos y recepción de datos desde y hacia el microcontrolador respectivamente.

Además la tarjeta cuenta con conectores de 2 mm, para la fácil conexión a sus pines de salidas pwm y entradas analógicas, pines de entrada y salida digitales, alimentación 3.3 y 5 Voltios, pines de comunicación y pines para realizar interrupciones externas, etc. La figura () permite observar un diagrama esquemático de la tarjeta Arduino mega donde se visualiza la totalidad de conexiones al microcontrolador y permite visualizar las conexiones que se ignoraron en la tarjeta de esta manera se puede manejar a bajo nivel el microcontrolador y ver la disposición de los diferentes elementos que constituyen el Arduino Mega.

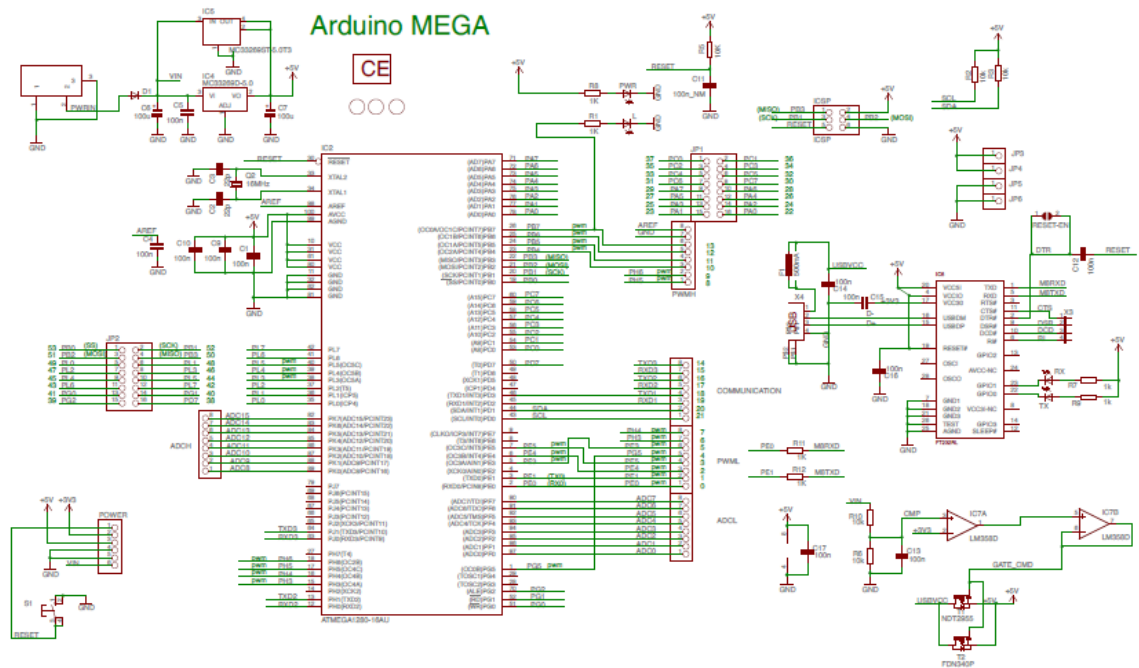


Figura 128. Esquemático y asignación de pines de la tarjeta Arduino.
Fuente: www.arduino.cc/es/Main/ArduinoBoardMega

7.3 PROGRAMACIÓN DEL MICROCONTROLADOR

El Arduino Mega se puede programar con el software Arduino, creado especialmente para usuarios no expertos en programación de microcontroladores, la programación es de alto nivel, por lo que permite interactuar fácilmente con el entorno.

El ATmega1280 en el Arduino Mega viene precargado con un gestor de arranque (bootloader) que permite quemar el microcontrolador sin necesidad de un programador por hardware externo, en cambio la programación se hace por medio del cable USB utilizando un protocolo de comunicación con la placa llamado STK500 creado por la comunidad Arduino.

7.3.1 Software ARDUINO

Arduino es llamado al software de alto nivel, en donde se programa el microcontrolador de la placa, este software es una aplicación hecha en JAVA, que se basa en el software Processing ,Wiring y AVR-GCC, y otros programas de código abierto. En la figura 127 se observa el entorno de Arduino.



Figura 129. Entorno del software Arduino. Fuente: los autores

PROCESSING es un lenguaje de programación de código abierto es una excelente herramienta para las personas que desean crear imágenes,

animaciones e interacciones. Inicialmente desarrollado para servir como un cuaderno de bocetos de software y para enseñar los fundamentos de la programación dentro de un contexto visual, En la actualidad, hay decenas de miles de estudiantes, artistas, diseñadores, investigadores y aficionados que utilizan Processing como herramienta para el aprendizaje, creación de prototipos y producción.¹²

AVR-GCC es un lenguaje de programación que cuenta con librerías elaboradas para el manejo de toda la familia de microcontroladores de la casa ATMEL, estos son programas de código abierto que permiten una programación de alto nivel, mucha más sencilla que la utilizada normalmente en la programación de microcontroladores.

Según lo que se trabajó, el software Arduino es un entorno de programación muy sencillo, permite utilización de funciones y librerías ya escritas por los creadores de Arduino, además la comunidad Arduino actualiza librerías y amplía la potencialidad del microcontrolador que dispone la tarjeta.

Arduino cuenta con funciones preestablecidas que permiten leer señales analógicas, señales digitales, además poder generar señales PWM que simulan señales analógicas de incremento máximo 0.019 volts (resolución 8 bits) entre 0 y 5 volts, las señales digitales que manejan son entre 0 o 5 Volts, además permite realizar interrupciones, realizar comunicación SPI, entre otras funciones, un ejemplo de estas se muestran en la tabla 33.

¹² <http://www.processing.org/>.

Función	Sintaxis	Descripción
Configurar pines utilizados.	<code>pinMode(pin_a_configurar, (INPUT o OUTPUT))</code>	Ajusta el pin en salida (input) o en entrada (output).
Generar una señal digital	<code>digitalWrite(pin_a_escribir,(HIGH o LOW))</code>	Ajusta el pin digital en encendido/apagado (high/low).(5 o 0 Volts respectivamente).
Leer señal digital	<code>digitalRead(pin_a_leer)</code>	Lee el estado del pin digital.
Leer una señal analógica	<code>analogRead(pin_a_leer)</code>	Lee el estado del pin analógico, por medio de un ADC de 10 bits Esta lectura está entre 0 y 5 volts.

Tabla 34. Funciones básica de alto nivel del software Arduino.

Programación del controlador.

Debido a que se tiene una planta dinámicamente inestable, se requiere implementar un sistema de control, que pueda volver estable el sistema, se implemento es un control de lazo cerrado muy conocido, llamado regulador PD, observando la figura 128, se observa un diagrama básico del un sistema de control de lazo cerrado utilizando un regulador PD. Para la realizar este control debemos programar el microcontrolador aplicando la teoría estudiada sobre el control de un sistema autobalanceado; en el actual capítulo se explica el proceso de programación controlador.

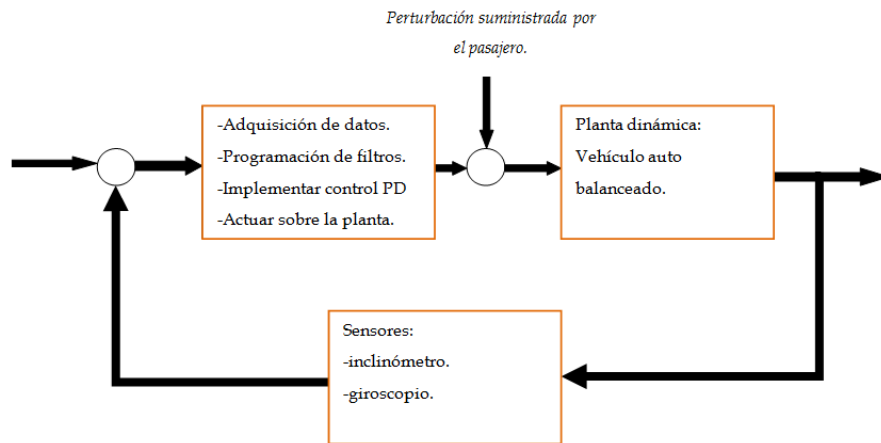


Figura 130. Sistema de control de lazo cerrado básico, con las funciones de cada bloque que lo compone.

Para realizar el control del sistema, se debió realizar un proceso ordenado en el cual se llamen funciones de usuario consecutivamente, de esta forma se puede llevar una programación mas legible, realizando un excelente sistema de control embebido.

7.3.2 Funciones implicadas en el control

Antes de poder definir cada una de las funciones que se utilizaron en el diseño del controlador, Se describen las partes principales del código fuente de programación del microcontrolador; Debido a que Arduino es basado en C++ debe respetarse la sintaxis básica de este lenguaje de programación.

7.3.2.1. Declarar librerías

Para la programación de la tarjeta y el respectivo desarrollo algoritmo de control, se declararon las librerías necesarias para realizar el programa y utilizar las respectivas funciones que estas permiten, aunque Arduino dispone infinidad de librerías para funciones propias del lenguaje arduino, que no son

necesarias declarar, ya que a bajo nivel estas ya están incluidas, para aplicaciones más avanzadas debemos incluir la librería respectiva para trabajar.

Librería Spi.h: Debido a que se realizó comunicación SPI (serial peripheral interface) para la comunicación con el sensor de inclinación utilizado (ADIS16203) [1] debemos incluir esta librería en el programa principal, esta es una librería realizada por la comunidad Arduino, que configura los pines del controlador ATMEGA 1280, para realizar la comunicación, definiendo los pines MISO, MOSI, CS, SCLK que son los pines necesarios para realizar este tipo de comunicación.

7.3.2.2. Declaración de variables: en C++

La declaración de variables es una parte importante de este lenguaje de programación, ya que en esta declaración se permite definir el tipo de dato que define el espacio de memoria que le corresponde a cada variable.

En el programa se declaran diferentes tipos de datos, entre estos datos utilizados en el programa se encuentran:

- Registros: Tipos de datos utilizados para realizar comunicación con otros dispositivos, se escriben en base hexadecimal.
- Constantes: Tipos de datos que permanecerán invariantes en el programa, ejemplo, constantes de conversión, constantes de sintonización, constantes físicas como la gravedad, constantes matemáticas, etc.
- Variables: las variables son tipos de datos que estarán operando dentro del programa, esta cambiarán por medio de las operaciones que estas realicen, la declaración de estas variables es crítica ya que el procesador

numérico realizara operaciones tan rápido como lo permita el tipo de dato, es decir a mayor precisión en el dato a operar, mayor tiempo de procesamiento del ordenador, o en este caso el microcontrolador.

- Pines: La tarjeta Arduino tiene una numeración de pines para cada uno de los módulos con los que cuenta (modulo de entradas analógicas, modulo de entradas/salidas digitales y modulo de salidas PWM) en la figura 129 podemos ver la numeración en los respectivos módulos. Los pines deben declararse dentro del programa para poder ser utilizados, además permite asignarle un nombre a cada pin de manera que pueda identificarse que dispositivo se encuentra conectado allí, de esta forma se puede llevar un programa más organizado y se descarta la posibilidad de cometer errores de declaración, que pueden ocasionar malas lecturas o en otro caso más crítico pueden producir daños en la electrónica del vehículo.

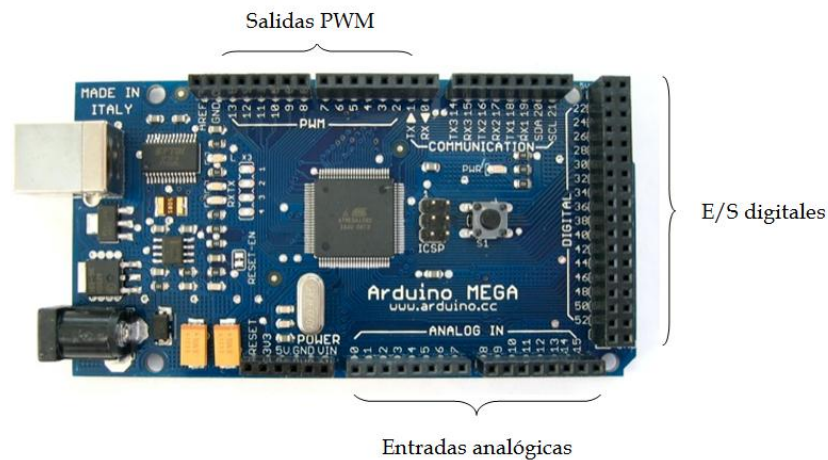


Figura 131. Caracterización de pines del Arduino Mega.

7.3.2.3. Modo de pin

El modo del pin me define el estado del pin a utilizar, además de poder numerar el pin e identificarlo, se debe colocar su modo de utilización, es decir como entrada o salida.

Los pines de Arduino (Atmega 1280) por defecto son de entrada, por lo que es necesario configurarlos explícitamente como entradas con la función `pinMode()`. Se dice que los pines configurados como entradas están en estado de alta impedancia. Una forma de explicar esto es que los terminales de entrada hacen demandas extremadamente pequeñas en el circuito que están muestreando, se dice que equivale a una resistencia en serie de 100 megaohmio frente al pin.

Los pines configurados como salida (OUTPUT) con `pinMode ()` se dice que están en un estado de baja impedancia. Esto significa que puede proporcionar una cantidad sustancial de corriente a otros circuitos. Los pines del Atmega pueden proporcionar corriente positiva o proporcionar corriente negativa de hasta 40 mA (miliamperios) a otros dispositivos o circuitos¹³.

7.3.2.4. Inicializar la comunicación serial

Cuando se requieren ver datos en el PC desde el Arduino, como ejemplo datos de algún sensor que se lee, necesitamos realizar comunicación serial con el Arduino, esta comunicación se inicializa con la función `Serial.begin` (baudios de transmisión), la velocidad de transmisión de datos se configura junto con el puerto del USB del computador al cual esté conectado el Arduino, normalmente se configura a 9600 bits/segundo.

7.3.2.5. Estructura del programa

La programación del microcontrolador, se realizó utilizando funciones de usuario llamadas dentro del programa principal de manera secuencial y ordenada, se describen las funciones utilizadas en el algoritmo de control implementado para la estabilización del vehículo autobalanceado VEAU.

¹³ <http://www.arduino.cc/en/Reference/PinMode>.

7.3.2.6. Función (VOID) SETUP

Esta función es una de las dos funciones principales que componen todos los programas en Arduino, aquí se configura todo lo relacionado con el programa:

- Configurar el modo de los pines (input, output).
- Configurar e inicializar la comunicación serial.
- Configurar e inicializar la comunicación SPI.
- Configurar los registros de los TIMERS para la realización de las interrupciones internas.
- Inicializar estados de pines (HIGH o LOW).

7.3.2.7. Función P_VA

Esta función significa, variable de proceso acelerómetro, obtiene el valor entregado por el inclinómetro, realiza un filtro digital por medio del llamado de la función readRegister (registro) función utilizada para la comunicación SPI, además realiza un filtro digital para la eliminación de ruido y devuelve el valor de inclinación filtrado y real.

7.3.2.8. Función READREGISTER

Debido a que el inclinómetro ADIS16203 [1] es un sensor con interfaz digital, debe ser comunicado utilizando comunicación serial (SPI) (ver anexo A donde se describe detalladamente este inclinómetro), se escribió la función readRegister() que permite leer una palabra de 13 bits, que luego es convertida a decimal en coma flotante y es multiplicada por la constante de conversión, obteniendo el ángulo en grados, esta función se desarrollo de acuerdo con el datasheet del ADIS16203 que se encuentra en el Anexo A.

La comunicación SPI se encuentra en el anexo D, donde se explica con más detalle su configuración, cada función y el respectivo código.

7.3.2.9. Función WRITEREGISTER

Esta función tiene el objetivo de enviar los comandos al inclinómetro para realizar la configuración de la comunicación SPI, como su nombre lo dice escribe los registros de manera sincronizada, para poder decirle al inclinómetro que nos envíe datos.

7.3.2.10. Función P_VG

Esta función significa variable de proceso giroscopio, lee el valor de la entrada analógica donde se encuentra conectado el giroscopio IDG 500 de invensense, devuelve un valor float de velocidad angular en grados por segundo.

7.3.2.11. Función CAL_ANGLE

Esta función realiza el cálculo del ángulo aplicando una técnica llamada filtro de balanceo, este filtro integra los dos sensores utilizados para el cálculo del ángulo, en este caso el inclinómetro y el giroscopio, primero se deben hallar las variables en las unidades correspondientes, esta función requiere como argumentos de entrada las dos variables calculadas en las funciones P_Va y P_Vg que son los valores actuales de ángulo y velocidad angular, la figura() muestra como se integran estos dos sensores para realizar el cálculo del filtro del ángulo, y devolviendo el ángulo exacto de la plataforma del vehículo.

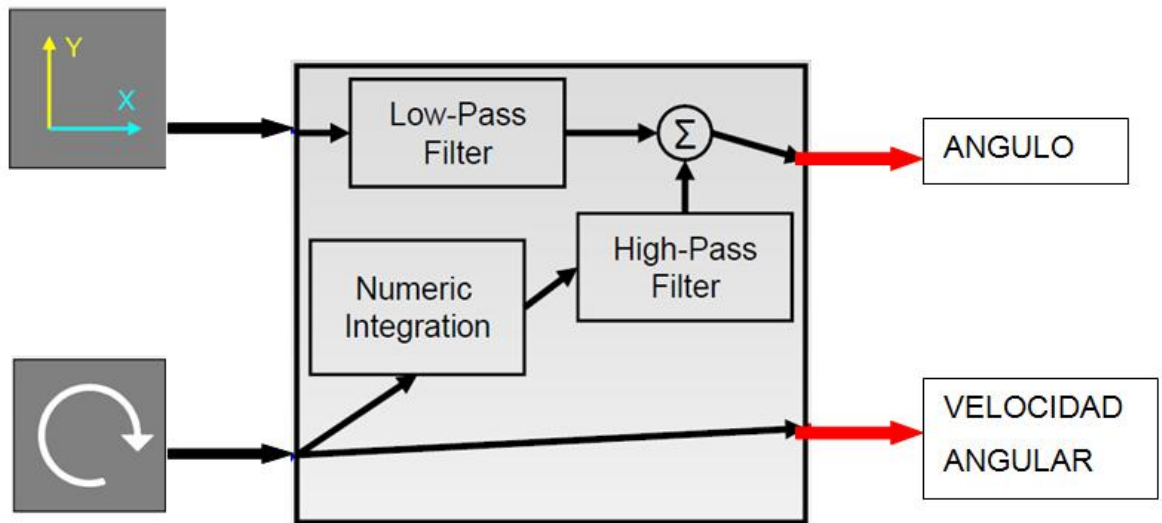


Figura 132. Filtro implementado para la obtención del ángulo real.

La ecuación que se implemento en el cálculo del filtro, se divide en tres partes:

- Integración: se integra la velocidad angular suministrada por el giroscopio, como se sabe la integración numérica acumula errores debido a un valor no nulo de velocidad angular en reposo, dando una lectura de ángulo errónea, este fenómeno se llama drift. El drift ocurre para periodos cortos de tiempo, es decir el drift no se presenta a largo plazo, para cambios de movimiento rápidos o a frecuencias altas, el giroscopio permite obtener un valor de ángulo muy preciso y el drift no se presenta, es por eso que se dice que el giroscopio permite el cálculo del ángulo para cuando el vehículo esta en movimiento.
- Filtro pasa baja: El filtro se aplico a la lectura del acelerómetro, como se sabe este sensor incluye mucho ruido, debido a que este censa aceleraciones es fácilmente perturbado por aceleraciones externas lineales que no nos permiten obtener un valor de ángulo preciso, debido a que se cuenta con un inclinómetro digital para la lectura de ángulo este proceso se hará, debido a que se quiso filtrar cambios de inclinación muy bruscos a altas frecuencias, este filtro atenúa frecuencias altas y permite obtener un valor de ángulo a largo plazo que puede ser

necesario cuando el vehículo se encuentra en el estado estático, donde no hay mucho movimiento.

- Complementación de los filtros: ya que se utilizó un filtro pasa alta y pasa baja, se complementa información de nuestra variable y por lo tanto no se pierde información, aunque lo anterior es una aproximación, esto puede ser muy cercano a la realidad debido a que el tiempo de muestreo es mucho menor que la constante de tiempo del sistema.

La ecuación que permitió obtener la integración y el cálculo de los filtros es:

$$\text{angulo} = a \text{ angulo} + \underbrace{\text{Vel}_{\text{angular}} * dt}_{\text{Integración}} + \underbrace{1 - a}_{\text{Filtro pasa bajas}} (\text{inclinación})$$

Filtro pasa altas

Luego de haber hallado el ángulo preciso, se realizó la acción de control PD que se muestra siguiente ecuación:

$$\text{Out}_{\text{motor}} = K_p * \text{angulo} + K_d(\text{velocidad angular})$$

Este valor es suministrado a cada motor derecho e izquierdo respectivamente, además la función Calc_angle (float, float) permite realizar la operación de giro llamado normalmente steering del vehículo, por medio de una variable dada por un potenciómetro que comanda la rotación. La función permite evitar la saturación de acción de control, cuando llegue al valor máximo esta se acota, y

por tanto no deja que continúe creciendo, esto permite decirle al controlador que se ha llegado al máximo valor de salida y limita el valor de salida.

7.3.2.12. Funciones de interrupción

Normalmente se le llama ISR (rutina de servicio a la interrupción), esta función es llamada 110 veces por segundo o según el tiempo que se ha programado el TIMER de la interrupción, esta función llama las funciones P_Va(), P_Vg() y Cal_angle().

En el anexo C se encuentra la totalidad del código implementado con los comentarios que especifican cada una de las líneas de código.

En figura 131 se observa el diagrama de flujo se puede observar la secuencia del algoritmo de control implementado.

En la tabla 35 se resumen las funciones usadas para el desarrollo del programa y se mencionan sus principales características.

NOMBRE	SINTAXIS	DESCRIPCIÓN	PARÁMETRO DE ENTRADA	RETORNA
setup	Void setup ()	Función básica de programa principal, es también llamada en C++ como el <code>int main()</code> , aquí se definen e inicializan variables y modo de pines.	Ninguno	Ninguno
loop	Void loop ()	Función básica en la programación, de microcontroladores, realiza la función de un bucle <code>while</code> infinito, que permite actualizar valores de las variables de los sensores, y variables de control.	Ninguno	Ninguno

Incli	Float Incli()	función de usuario creada para la lectura del inclinómetro, Incli significa <i>inclinación</i> , el valor del ángulo entregado por el inclinómetro, se obtiene por medio de las funciones creadas para realizar la comunicación SPI que se explican en el anexo D.	Ninguno	El ángulo de inclinación entre 0 y 180°, tipo float.
P_Va	float P_Va()	Su nombre P_Va significa <i>variable del proceso acelerómetro</i> , esta función permite realizar un filtrado digital al valor entregado por el inclinómetro, debido, a que este sensor presenta un ruido considerable en su lectura.	Ninguno	El ángulo de inclinación filtrado entre -90 y 90° de tipo float.
P_Vg	float P_Vg(int pinyro)	Su nombre P_Vg significa <i>variable de proceso giroscopio</i> , esta función permite leer el valor analógico de velocidad angular y realiza un filtrado digital para la eliminación de ruido, que suministra el giroscopio conectado a una entrada analógica del microcontrolador.	Nombre de la variable a la cual se le ha asignado el número del pin donde está conectado el giroscopio.	La velocidad angular entre 0 y +- 100 %/s.
Cal_angle	void Cal_angle(float pva, float pvg)	Su nombre Calc_angle significa <i>cálculo del ángulo</i> , esta función permite tomar el valor de ángulo y velocidad angular, los integra creando una unidad de medición inercial, por medio de un filtro pasa alta y pasa baja digital (ver capítulo 7.3.3.5), el resultado de esta función es el cálculo exacto de ángulo, además implementa un regulador PD que entrega la señal de control a los motores, por medio de la función <code>analogWrite</code> esta función entrega un señal de PWM al puente H que maneja los motores.	Necesita dos parámetros de entrada, ángulo entregado por el inclinómetro ya filtrado (Pva), y el valor de velocidad angular (Pvg) entregado por el giroscopio.	Esta función no devuelve ningún valor numérico, solo actúa sobre los pines H, ya que integra la función <code>analogWrite</code> .
ISR	ISR(TIMER2_OVF_vect)	Función llamada ISR(rutina de servicio a la interrupción), es una función que siempre está presente, cuando se utilicen interrupciones internas en cualquier microcontrolador, es llamada periódicamente según se defina algunos registros de TIMERS, este periodo que se configura se mantiene constante(ver capítulo 7.4.1). Dentro de esta función se llaman las funciones P_Va, P_Vg y Calc_angle, la idea de cualquier control digital es mantener el tiempo de muestreo constante, eso es lo que se produce cuando se hacen interrupciones, se esta manera para nuestra interrupción actuamos 110 veces por segundo sobre los motores.	Ninguno	Ninguno

Tabla 35 Resumen de funciones.

7.4. CONTROL POR INTERRUPCIONES

Para el desarrollo del sistema de control implementado en el vehículo, se aplicó la técnica de control por interrupciones, esto es aplicable para sistemas en los que la constante de tiempo es muy baja, o en otras palabras para sistemas que cambian su estado dinámico a alta velocidad, o sistemas dinámicamente inestables.

Además en el control por interrupciones se tiene la certeza de realizar actividades de control, en tiempos establecidos fijos, sin importar que pueda pasar dentro del ciclo infinito donde corre el programa, un ejemplo de lo que puede pasar si no se realiza un control por interrupciones es debido a una operación muy compleja dentro del programa principal, este consume más tiempo y capacidad de procesamiento, dejando al programa atendiendo esta operación, abandonando la actualización de datos y dejando de actuar sobre el sistema, esto se traduce en dejar el sistema sin control.

La figura 132 muestra un esquema de un control sin interrupciones, se observa el algoritmo de control, pueden aparecer operaciones que consuman mucho tiempo, interrumpiendo el flujo normal de datos, en este caso como no termina esta operación, la actualización de datos de salida o acciones de control sobre el sistema son interrumpidos y el sistema queda sin control, si se tiene la certeza de que el programa jamás tendrá retardos, el sistema podría correr y funcionar correctamente, actualizando datos a la salida.

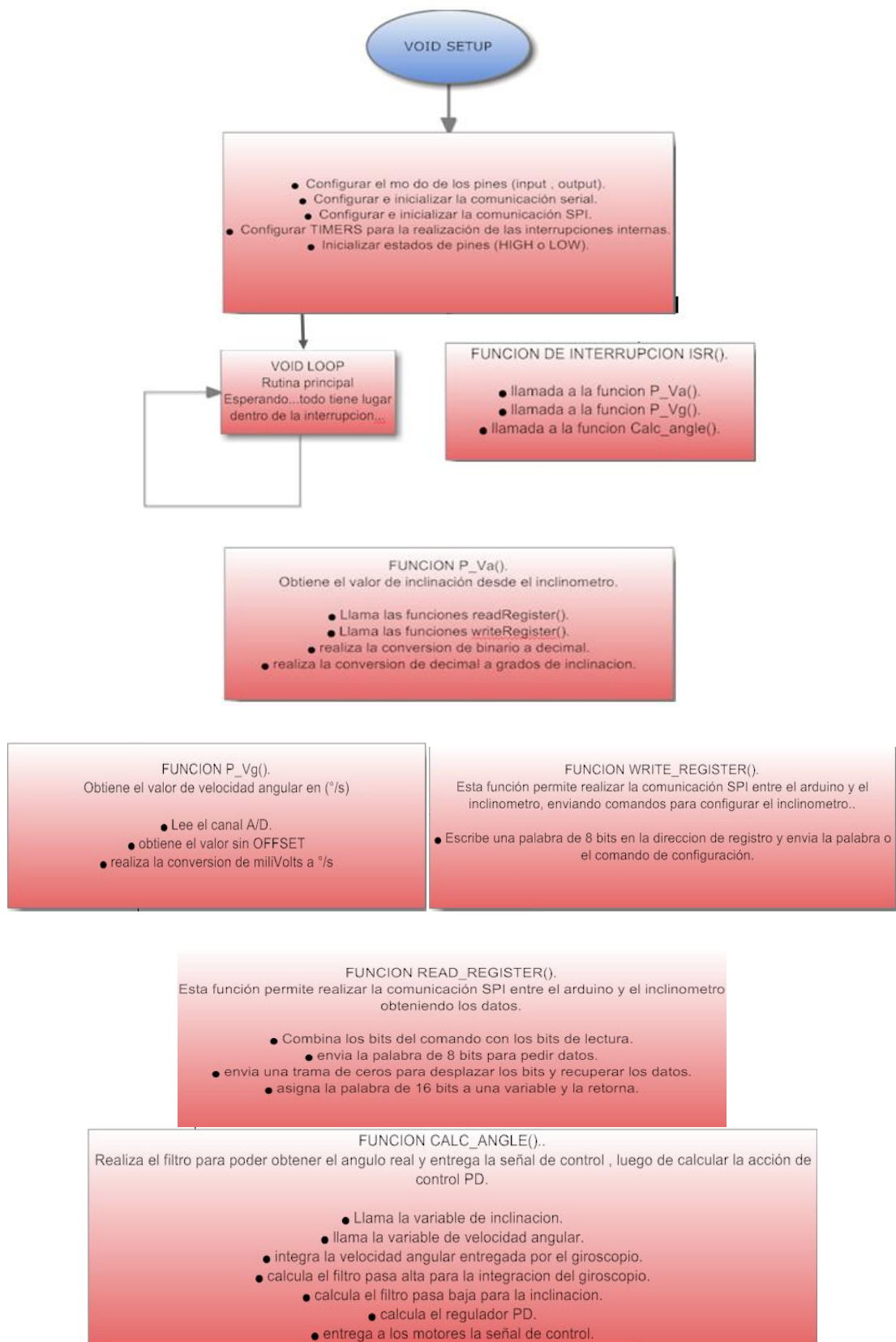


Figura 133. Diagrama de bloques de la estructura del algoritmo de control implementado

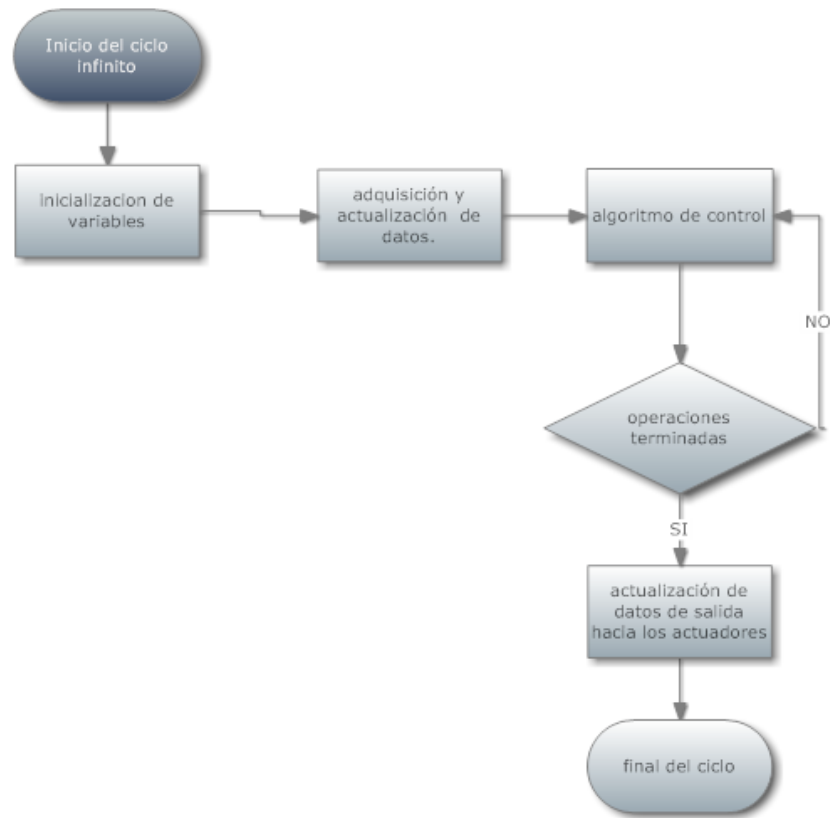


Figura 134. Control sin interrupciones.

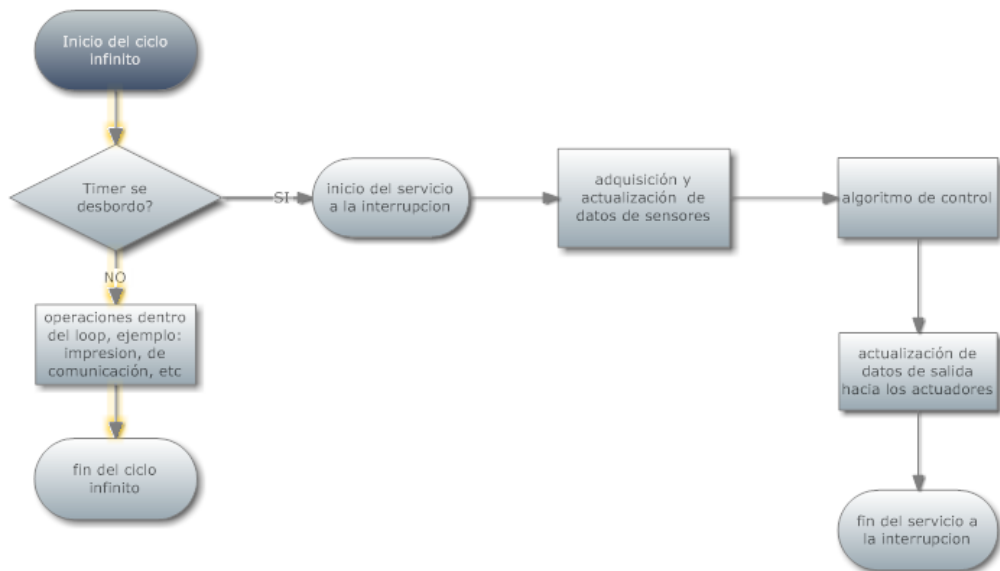


Figura 135. Control con interrupciones

Lo contrario pasa con el control por interrupciones, en la figura 133 se ve cómo funciona este proceso, el programa corre normalmente, entra en el ciclo infinito,

realizando las operaciones correspondiente y estando pendiente del desbordamiento del TIMER de interrupción, apenas se desborde el timer que normalmente se configura en un tiempo base o fijo, este llama a una función llamada ISR (routine service of interrupt), en esta función se encuentran todas las actividades que se necesitan para realizar el control, actualización de variables de los sensores, algoritmo de control, y actualización de datos a la salida a los actuadores, apenas termine esto, salta a la línea de código dentro del ciclo infinito donde inicialmente estaba, esperando de nuevo el desbordamiento del timer.

De esta forma a pesar de que una operación pueda durar mucho tiempo se mantiene el sistema actualizado, y el control no es interrumpido.

Este tipo de control permite, tener un tiempo de muestreo constante, necesario para realizar control PID mucho más preciso, ya que el tiempo de integración y el derivativo son constantes.

7.4.2. Programación de la interrupción

Para realizar la interrupción debe primero seleccionarse el tipo de interrupción ya que existen diferentes tipos de interrupciones en nuestro caso realizaremos interrupciones por desbordamiento del timer.

Los temporizadores en Arduino son de 8 bits o algunos de 16 bits que se incrementan a intervalos de tiempo específicos. Cuando el contador está en su valor máximo (255 para el temporizador de 8 bits y 65535 para el temporizador de 16 bits) y se incrementa de nuevo, se dice que se ha desbordado el TIMER, ahora al desbordarse de da la interrupción, llevando el programa a una función llamada ISR que atiende la interrupción.

Arduino tiene un reloj que funciona a una velocidad de 16Mhz, es decir, hay un pulso de reloj de 16 millones de veces por segundo. En cada pulso de reloj, el contador del temporizador se incrementa, lo que significa que cada 256

impulsos de reloj del contador de 8 bits se desborda, se genera una interrupción y el controlador de interrupción se ejecuta.

El equipo responsable de los temporizadores en el Arduino contiene un módulo ingenioso llamado preescaler: Este preescaler divide la señal del reloj disponible en un 8, 64, 256 o 1024. Con el preescaler fijo en 8, el temporizador no se aumentó 16 millones de veces por segundo, ahora se aumentara $16.000.000 / 8 = 2$ millones de veces por segundo. , por lo tanto ya el temporizador no se desbordara tan pronto. Lo que se hace es bajar la frecuencia del clock ahora con un preescaler de 8 no es de 16MHz sino de 2 MHz, el desbordamiento sólo ocurren con una frecuencia de $2 \text{ MHz} / 256 = 7.8\text{KHz}$.

Usando el temporizador de 16 bits (Timer1), sólo se desborda cada 65.536 impulsos de reloj y con el preescaler establecido en 1024, la frecuencia más baja posible para el contador de tiempo de interrupción es:

$$f = \frac{\text{Velocidad reloj}}{\text{preescaler} * \text{capacidad del temporizador.}}$$

Para un temporizador de 16 bits, y un preescaler de 1024, tenemos:

$$f = \frac{16.000.000}{1024 * 2^{16}}.$$

$$f = \frac{16.000.000}{1024 * 65536} = 0.24 \text{ Hz}$$

Para la programación e la interrupción nos referimos al datasheet del microcontrolador, en el anexo B se encuentra el datasheet del microcontrolador

que dispone la tarjeta, primero buscamos los vectores de interrupción, en el capítulo correspondiente a esta parte, luego de seleccionar el timer contador , nos referimos a los registros para configurar solo características básicas, tales como:

- Bits de habilitación de interrupciones por desbordamiento.
- Bits para configurar el modo de operación del timer contador.
- Bits para configurar el valor inicial del contador.
- Bits para configuración del preescaler.

Estos bits se colocan en hexadecimal, podemos con esto poder configurar el TIMER de manera que se pueda realizar interrupciones en el tiempo que es requerido.

En el anexo C se encuentra el código donde se encuentra la configuración de los registros del Timer contador 2, para realizar interrupciones 100 veces por segundo.

7.5. COMUNICACIÓN SPI

Es un bus de tres líneas, sobre el cual se transmiten paquetes de información de 8 bits. Cada una de estas tres líneas porta la información entre los diferentes dispositivos conectados al bus. Cada dispositivo conectado al bus puede actuar como transmisor y receptor al mismo tiempo, por lo que este tipo de comunicación serial es full dúplex. Dos de estas líneas transfieren los datos (una en cada dirección) y la tercer línea es la del reloj. Algunos dispositivos solo pueden ser transmisores y otros solo receptores, generalmente un dispositivo que tramite datos también puede recibir.

Los dispositivos conectados al bus son definidos como maestros y esclavos. Un maestro es aquel que inicia la transferencia de información sobre el bus y genera las señales de reloj y control.

7.5.2. Especificaciones del BUS

Todas las líneas del bus transmiten la información sobre una sola dirección. La señal sobre la línea de reloj (SCLK) es generada por el maestro y sincroniza la transferencia de datos.

La línea MOSI (Master Out Slave In) transporta los datos del maestro hacia el esclavo, entregando comandos y direcciones de registros para acceder a la memoria del esclavo en el caso que se quiera leer un sensor.

La línea MISO (Master In Slave Out) transporta los datos del esclavo hacia el maestro, estos datos son la información que entrega el sensor, presión, aceleración, inclinación etc.

En la figura 134, se muestra como pueden conectar al maestro múltiples dispositivos, en nuestro caso solo la comunicación se hará entre el Arduino y el inclinómetro ADIS16203, el anexo D explica detalladamente este proceso.

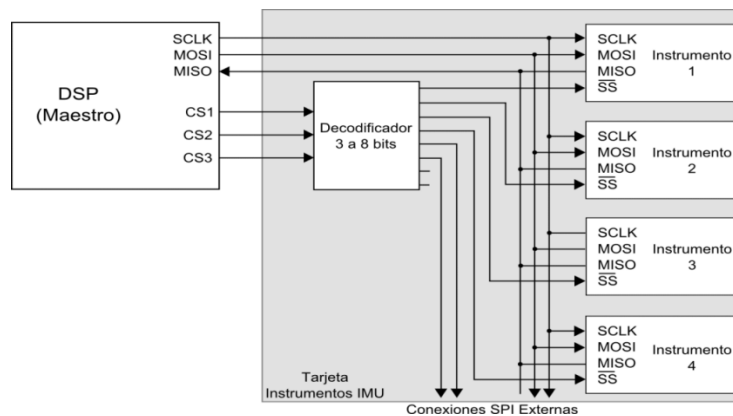


Figura 136. Esquema de comunicación SPI múltiple.

En nuestro caso la comunicación se hizo entre el microcontrolador y el inclinómetro digital, la secuencia de la comunicación es:

Enviar la dirección de registro con el comando de lectura o escritura (R o W), si es para Write el comando es 0-0, si es para Read es 1-0, el registro es una

palabra de 6 bits, este registro me indica la dirección de memoria del inclinómetro donde se encuentra los datos.

Según la figura 135 podemos ver el orden de envío de los bits, primero 1 ó 0 sin quiere escribir o leer respectivamente, luego un tren de 6 bits A5, A4, A3, A2, A1, A0, los dos primeros bits y los otros 6 bits completan un byte.

Cuando se envían los bits como escritura, por el mismo serial el inclinómetro envía los datos de inclinación correspondiente, en trenes de 8 bits, los cuales debemos esperar los primeros 8 bits LSB y luego los 8 bits MSB, de esta forma se realiza la comunicación SPI, algo que es vital en la comunicación es el serial clock es una referencia para sincronizar los dos dispositivos como se ve en la figura 135 por cada flanco de subida se envía un bit, también el Chip select es una referencia para empezar la comunicación SPI cuando este pasa de alto a bajo.

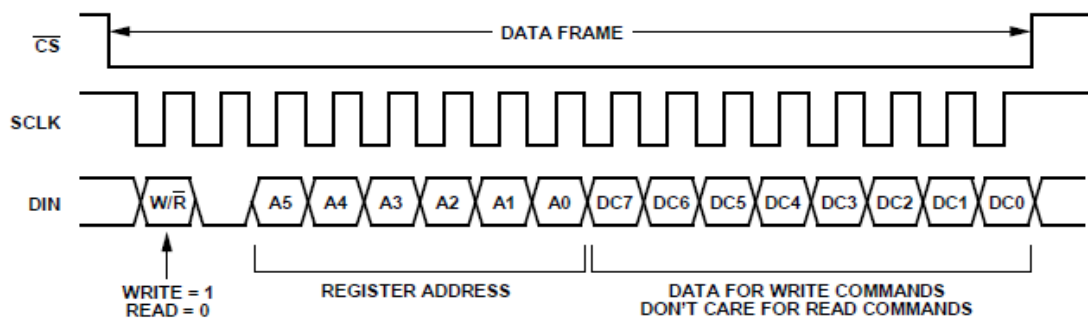


Figura 137, envío de datos del microcontrolador al inclinómetro

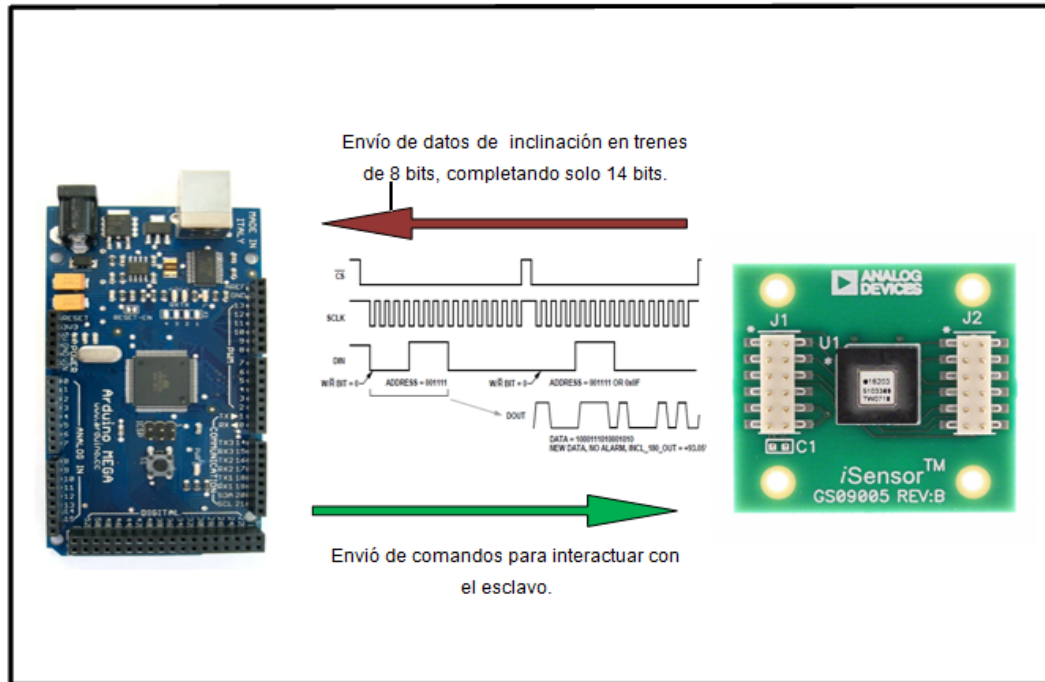


Figura 138. Esquema de comunicación entre Arduino y inclinómetro. En el anexo C, se encuentra el código programado para la lectura del inclinómetro digital ADIS16203, los comentarios de cómo funciona son muy explícitos.

8. PRUEBAS

A lo largo de la etapa de aprendizaje del manejo del Arduino, etapa de potencia sensores y demás componentes de este proyecto, se realizaron diferentes pruebas con varios dispositivos que funcionan de forma similar al VEAU, los cuales se describirán a continuación.

8.3. MODELO DE PRUEBAS 1

Carrito de balsa: Por medio de este vehículo se realizó el primer intento de control. Se implementó un control ON OFF y un proporcional. La prueba consistió en mantener vertical un listón de madera, el cual pivotaba en un potenciómetro corriente, el cual a su vez hacía el papel de sensor de inclinación, a través del movimiento en línea recta del carrito de balsa. Este se propulsaba gracias a un par de motores pequeños los cuales venían acoplados a un juego de reductores planetarios plásticos. Controlador, Arduino MEGA.

Etapa de potencia, Puente H, integrado L298N montado en Protoboard. Alimentación, fuente de computador.

En la figura 137 se observa la estructura del vehículo con el potenciómetro en la parte superior.

La figura 138 se observa el ensamble total del modelo de pruebas 1, el vehículo con el listón de madera, este indicaba cuando el vehículo debía avanzar o retroceder, de manera que sostuviera el listón en su posición vertical.

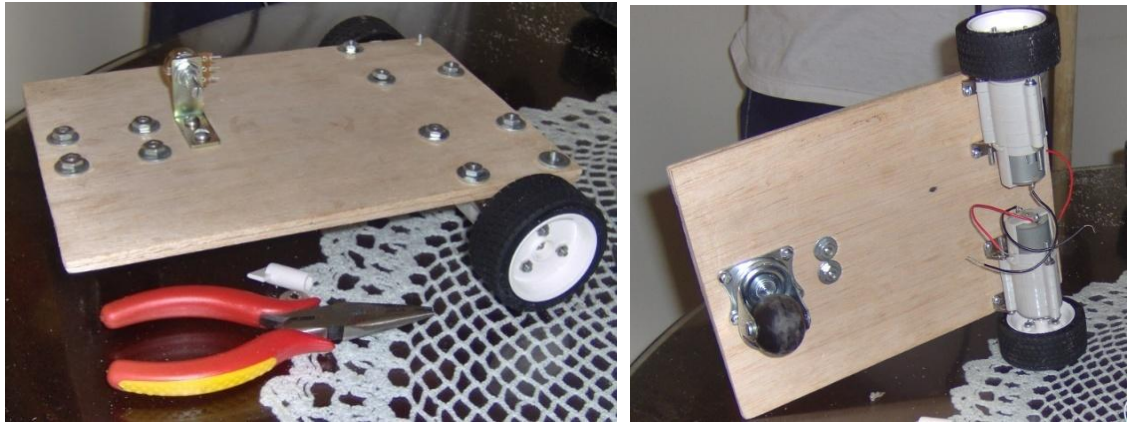


Figura 139. Modelo de pruebas 1, carrito de balsa.

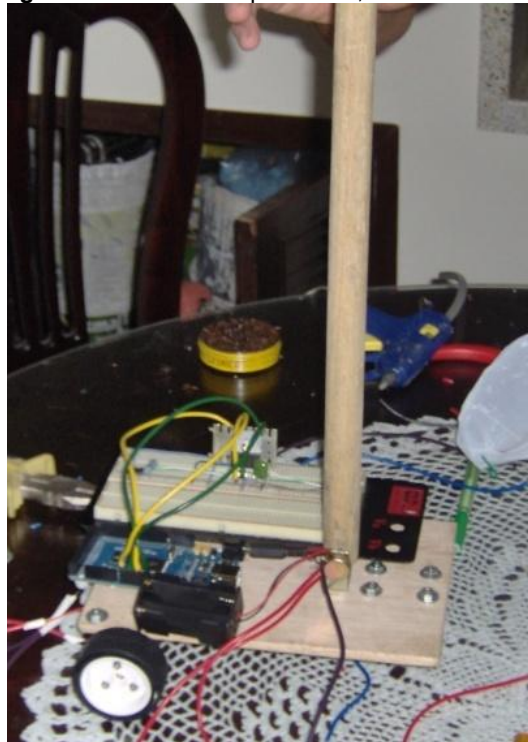


Figura 140. Fotografías del modelo de pruebas 1, ensamble total.

Comentarios y resultados de la prueba:

- Motores muy pequeños.
- Método de control muy básico ON –OFF y proporcional.
- No se obtuvo control, más si se observó un movimiento alrededor del Setpoint mientras se sostenía el listón con la mano.
- Se obtuvieron las primeras experiencias con el controlador respecto software de programación y manejo de hardware, se observó la buena

velocidad de actuación del microcontrolador. Se adquirieron nuevos conocimientos en cuanto a la ingeniería de control aplicada.

8.4. MODELO DE PRUEBAS 2

Carrito de juguete: Se realizó un montaje similar al anterior (los mismos componentes electrónicos) usando un carrito de juguete como estructura, se puede observar en la figura 139. A diferencia del anterior, este cuenta con motores un poco más grandes lo que permite una mejor respuesta. Se implemento un control PD.



Figura 141. Fotografía del modelo de pruebas 2.

Comentarios y resultados de la prueba:

Al tener motores más grandes la respuesta dinámica del sistema fue mejor aunque estos presentaban mayor juego (o backlash) en sus engranajes.

Se implemento un algoritmo de control PD más elaborado que en el caso anterior logrando una estabilización por algunos segundos.

Al utilizar como sensor un potenciómetro, también introduce menos precisión en el control del sistema dinámico, ya que este oscilaba alrededor del setpoint ángulos muy pequeños.

8.5. MODELO DE PRUEBAS 3

Péndulo invertido: Se usó la estructura de un plotter, siendo el carro de cartuchos la base en la que se fijo el potenciómetro, que se usó como sensor de inclinación. Los elementos electrónicos fueron los mismos que se usaron en las pruebas anteriores (ver figura 140). Se implementó un algoritmo de control PID.



Figura 142. Fotografías del modelo de pruebas 3, péndulo invertido.

Comentarios y resultados de la prueba:

Este montaje cuenta con un motor de alta respuesta dinámica y cero backlash.

A pesar de ser muy económico, el potenciómetro entrega una señal poco ruidosa, la cual mejoraría si se utilizara un encoder incremental, que no se implemento debido al tiempo de máquina que consume hacer la codificación de las señales que entrega el encoder.

Se implementó un lazo de control de verticalidad más no de posición en el riel. Se logro el control del sistema.

Para realizar el control de posición se debe leer el encoder lineal con el que cuenta el plotter.

8.6. MODELO DE PRUEBAS 4

Vehículo Vertical 1: La estructura y distribución de peso de este vehículo se asemeja más al objetivo final del proyecto. Se basó en la disposición de vertical de peldaños de madera en los cuales se ubicaron cada una de las partes electrónica y mecánicas que lo componen, como son: (de abajo hacia arriba) Ruedas, eje con engranaje para transmisión por correa dentada, moto-reductor con engranaje acoplado en el eje de salida, etapa de potencia (puente H basado en el integrado L298N), Arduino, filtros analógicos y en la parte superior se ubican los sensores, acelerómetro y giroscopio, además de unas pesas que concentran el centro de gravedad en la parte superior del vehículo.

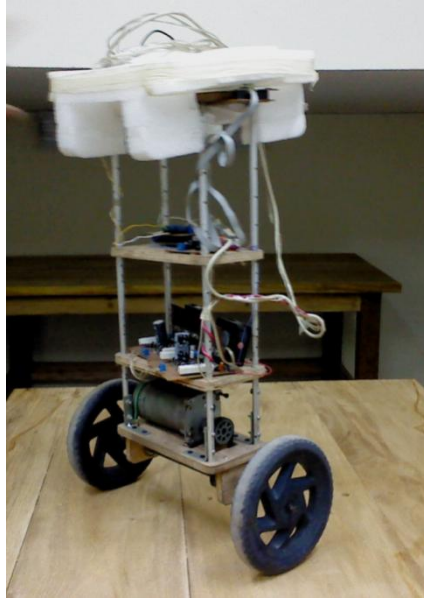


Figura 143. Fotografías del modelo de pruebas 4.

Comentarios y resultados de la prueba:

Se implemento un arreglo de 6 integrados L298N en paralelo para el manejo de potencia del motor. Por la naturaleza de este integrado, el cual no es óptimo para trabajar en paralelo, hubo problemas con el mismo, y ocasionalmente se quemaba alguno de estos. Esto debido a que cuando estos integrados se calientan aumenta el flujo de corriente a través de ellos, por lo tanto si se calienta un integrado más que los otros por este va a pasar más corriente, logrando que éste caliente aun más, hasta quemarse.

A pesar de que se implementó un control PID más elaborado que en los casos anteriores, no se logró un control total de sistema debido a que los sensores (acelerómetro y giroscopio) presentaban ruido en su señal de salida, y en ese momento no se contaba aun con un algoritmo tal que lo disminuyera hasta valores aceptables para en control. Por lo tanto en la región central el vehículo mostró un comportamiento semiestable con algunos picos de corriente en los motores que desequilibraban el sistema. Luego de que el vehículo salía de la zona central y este empezaba a desplazarse (inclinado), mostró un comportamiento mucho más estable.

El suministro de energía de este modelo fue una fuente de 24v, por lo tanto no se tuvo total libertad de movimiento pues dependía de la longitud de los cables de poder y de alimentación del arduino (USB).

8.7. MODELO DE PRUEBAS 5

C 2: Este vehículo está montado sobre la estructura del VEAU. Compuesto por dos motores y baterías para darle independencia de movimiento además de la electrónica. En la parte superior se ubicó una silla de madera y sobre esta las baterías, este peso simula el cuerpo de una persona.

Con este montaje se realizaron dos pruebas, En la primera se dejó fija una de las ruedas y se realizó el control de equilibrio con la otra. En la segunda se realizó el control con ambas ruedas en movimiento, además se implementó un algoritmo que le permitió girar al sistema, el giro del vehículo era comandado por un potenciómetro que enviaba al algoritmo de control un valor, que era restado y sumado a la señal de control de cada uno de los motores, dando como resultado que estas giren a diferentes velocidades, permitiendo girar. En la figura se ve el montaje que se realizó.

La etapa de potencia usada en este modelo se basó en un arreglo de transistores IRF4905 (PNP) [10] e IRFZ48N (NPN) [11] independientes formando un puente H. Ver figura 142.



Figura 144. Fotografías del modelo de pruebas 5

Comentarios y resultados de la prueba:

Se implemento un algoritmo de control mucho más elaborado que en los casos anteriores en el cual se hizo un filtro compuesto, este toma las salidas del acelerómetro y giroscopio y obtiene una sola salida con un nivel de ruido mínimo con el que calcula los términos del PD.

En la primera prueba se logró un control aceptable en donde el vehículo se mantiene vertical sin caerse. La prueba duró hasta que se acabo la carga de las baterías, momento en el cual el controlador empezó a fallar pues en los picos de corriente del motor se cortaba el suministro hacia el arduino, razón por la cual se opto para las siguientes pruebas por alimentar todos los dispositivos electrónicos con una batería independiente.

En la segunda prueba se obtuvo un comportamiento mejor, se mantuvo vertical y pudo rotar como se esperaba. El vehículo requería de un pequeño empuje hacia adelante o hacia atrás para inicial el movimiento en el cual se mantenía casi a velocidad constante.

8.8. MODELO DE PRUEBAS 6

En esta etapa se quiso hacer un montaje similar al Segway, las baterías se ubicaron en la parte baja del vehículo, junto con la electrónica, además se instaló una barra vertical y un manubrio ver figura 143.

Se usaron los mismos componentes que en el modelo anterior, se realizó un cambio en los motores, por unos de mayor potencia, estos nuevos motores contaban con la caja reductora metálica dándonos más confianza para poder realizar pruebas más avanzadas. En este modelo de pruebas se programó una prueba mucho más seria y compleja, en la que se pensaba subir una persona de 75 Kg, el vehículo debía estructuralmente poder soportar la carga y respecto al control poder controlar el vehículo y además realizar movimientos de traslación y rotación.



Figura 145. Fotografías del modelo de pruebas 6.

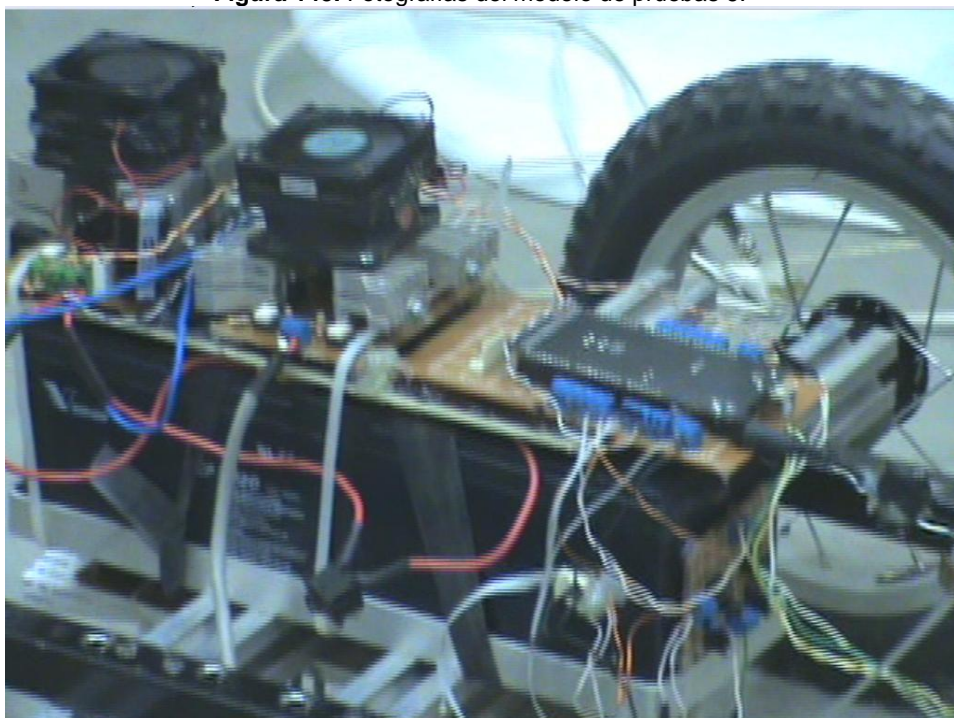


Figura 146. Fotografías del modelo de pruebas 6, modulo de electrónica.

Comentarios y resultados de la prueba:

Inicialmente se verificó que el vehículo, se mantuviera en equilibrio, puesto que al tener el centro de gravedad más bajo se dificulta el control. Una vez logrado este objetivo, se realizó la prueba con una persona sobre él, prueba que resultó exitosa Ver Figuras 145.

En la prueba se obtuvo estabilización del sistema sin pasajero, estabilización del sistema con el pasajero y movimientos controlados de translación y rotación, este último movimiento se controlaba por medio de un potenciómetro de palanca que al girarlo hacia adelante y hacia atrás producía el movimiento de rotación en sentido horario o anti horario respectivamente.



Figura 147. . Fotografías de los autores del proyecto, como pasajeros en el modelo de pruebas 6

8.9. MODELO FINAL

En este vehículo se implementaron unos motores de mayor potencia que en los casos anteriores. De 12 Volt, estos motores requirieron la implementación de una etapa de potencia más elaborada usando los mismos transistores MOSFET tipo NPN y PNP que en los casos anteriores, pero montados en paralelo para aumentar su capacidad de manejo de corriente. Esto debido a que, como la potencia es

$$Pot = I * V$$

Y estos motores entregan una mayor potencia pero un menor voltaje, entonces el consumo de corriente es muy superior que en los casos anteriores, pudiendo llegar a picos de casi 100 A.



Figura 148. Fotografía del modelo final.

8.10. REUMEN DE LAS PRUEBAS

Prueba	Descripción	Componentes	Observaciones
Modelo de Pruebas 1	Modelo de balso. Intentar mantener vertical un listón de madera que pivota en un potenciómetro corriente	Arduino, Integrado L298, dos motores pequeños con reducción, potenciómetro, Algoritmo On-Off y proporcional	Implementos bastante básicos y algoritmo de control pobre. No se obtuvo control
Modelo de Pruebas 2	Montaje similar al anterior sobre un carrito de juguete al que se le fijo el potenciómetro como sensor de inclinación del listón.	Arduino, Integrado L298, dos motores, potenciómetro, Algoritmo PD.	Backlash en las ruedas, mejor Algoritmo, se obtuvo control por pocos segundos.
Modelo de Pruebas 3	Péndulo invertido lineal. Mantener vertical la varilla, no se realizó control de posición del carro.	Arduino, Arreglo en paralelo Integrado L298, motor de mayor potencia de 12 V sin reducción, potenciómetro, Algoritmo PID.	Cero Backlash en el motor, mejor algoritmo de control. Se obtuvo control a pesar de no tener un segundo lazo de control de posición
Modelo de Pruebas 4	Vehículo vertical con peldaños de madera y parales de aluminio. Planta de funcionamiento similar al del objetivo de este proyecto.	Arduino, Arreglo en paralelo Integrado L298, motor de mayor potencia de 24 V con reducción, acelerómetro y giroscopio, Filtro analógico, Algoritmo PID.	No se logró un control total del sistema. No se contaba en ese momento con un algoritmo de control con un filtro digital adecuado para los sensores.
Modelo de Pruebas 5	Vehículo vertical montado sobre la estructura del VEAU.	Arduino, Puente H con MOSFET dos motores de mayor potencia de 24 V con reducción, inclinómetro y giroscopio, Filtro analógico, Algoritmo PID con filtro para los sensores.	Se obtuvo un control aceptable en las dos pruebas que se hicieron con este modelo.
Modelo de Pruebas 6	Vehículo vertical se montaje similar al Segway.	Arduino, Puente H con MOSFET, dos motores de 24 V con reducción, acelerómetro y giroscopio, Filtro	Se obtuvo un control suficiente como para soportar una persona de 80Kg sobre el vehículo. Por medio de un potenciómetro

		analógico, Algoritmo PID con filtro para los sensores.	se daba la orden para girar.
Modelo Final	Vehículo vertical de dos disposiciones, una de un montaje similar al Segway y la otra es la respectiva del VEAU con sus respectivos sistemas, Sobre una placa de aluminio.	Arduino, Puente H en arreglo en paralelo de MOSFET, dos motores de 12 V con reducción planetaria, acelerómetro y giroscopio, Filtro analógico, Algoritmo PID con filtro para los sensores.	Se obtuvo una respuesta similar al caso anterior con la diferencia de que este vehículo tiene una mayor respuesta dinámica debido a la mayor potencia de sus motores.

Tabla 36. Resumen de las pruebas

9. CONCLUSIONES

- Se seleccionaron cada uno de los componentes del sistema, como son, sensores, motores, ruedas, controlador y baterías entre otros, por medio de tablas de selección en los casos que lo ameritó.
- Se diseñó y construyó la estructura, mecanismo de deslizamiento, acople motor-rueda y barra de dirección utilizando SolidWorks y ANSYS Workbench como herramienta CAD y CAE respectivamente.
- El vehículo desarrollado puede ser utilizado con los mecanismos implementados para personas que no puedan mantenerse en pie o estos mecanismos pueden desmontarse fácilmente para utilizarlo de forma similar al vehículo autobalanceado comercial “Segway”.
- Se desarrolló un análisis para seleccionar una tarjeta basada en el microcontrolador Atmega 1280, en el cual se tuvo en cuenta sus características principales tales como velocidad de reloj, resolución en convertidor analógico-digital y modulo PWM, manejo de diferentes protocolos de comunicación, cantidad de entradas y salidas, facilidad de programación, disponibilidad y precio, entre otros .
- Se diseñaron varios algoritmos de control para el sistema, teniendo en cuenta los sensores usados, pues cada uno de ellos requirió una programación especial, ya sea en cuanto a filtrado de las señales obtenidas o protocolos de comunicación.
- Se diseñó un algoritmo embebido de control, donde se aplicaron técnicas de programación avanzadas, para la optimización del algoritmo de control, se implementó un control PID como técnica de control, utilizando interrupciones internas para mantener el tiempo de muestreo constante siguiendo las teorías que nos enseña la ingeniería de control y se hizo uso de funciones de usuario para poder construir un código más estructurado y ordenado.
- Se realizó un estudio detallado de los sensores utilizados en el control del sistema dinámico, este estudio tuvo como base , principios de funcionamiento de los sensores, variables relativas de los sensores en

cuanto a desempeño y eficiencia, costo, disponibilidad , rango de medición y una característica de suma importancia, la sensibilidad, que permite optimizar el convertidor análogo digital del microcontrolador, estos parámetros se tuvieron en cuenta en la selección, los sensores seleccionados como mejor opción permitió realizar un control preciso sobre el vehículo.

- Dentro de las posibles alternativas de sensores de inclinación se seleccionaron un acelerómetro MMA7260 y un inclinómetro ADIS16203 por medio de un estudio detallado de sus características. Con ambos se obtuvieron resultados satisfactorios de control.
- Se implemento un algoritmo que compensa las aceleraciones indeseadas obtenidas por el acelerómetro, debidas a movimientos del sistema, con un giroscopio el cual no se afecta por este tipo de movimientos.
- Se desarrollo el modelo matemático del sistema dinámico, aplicando herramientas computacionales como Matlab y simulink, se construyo un modelo de simulación para analizar aspectos relacionados con el control del vehículo, implementando un controlador PD, y obteniendo las constantes de sintonización teóricas del sistema, por medio del poderosa herramienta de Matlab llamada auto tuning que dispone su librería PID, además se realizo el análisis de estabilidad utilizando el método del ROOTLOCUS, se obtuvo la función de transferencia del sistema, y las matrices de estado para el modelo linealizado.
- Se obtuvieron, los requerimientos técnicos necesarios para el control del vehículo, por medio de el análisis de los resultados arrojados por el modelo matemático.
- Se diseñó y construyó un puente H para regular la potencia enviada a los motores usando como elementos de “switchero” transistores MOSFET de hasta 74 A, tipo NPN y PNP montados en un arreglo en paralelo para lograr el manejo de una mayor potencia. Las entradas de control de este sistema se aislaron ópticamente para evitar daños en el microcontrolador en caso de alguna falla en la etapa de potencia.

- Se diseñó e implementó un sistema lógico a través de compuertas que evita que ambas ramas del puente H queden abiertas, descartando la posibilidad de daño en los transistores por corto. Además este sistema facilita la activación del puente H puesto que para que el motor gire en un sentido o en otro solo requiere del envío de un UNO o CERO lógicos independientes de la señal de PWM.
- A lo largo del proyecto se utilizaron diferentes tipos de motores para realizar cada una de las pruebas. Para el prototipo final se seleccionaron los motores de 12 Volt con reducción planetaria 16:1 BANEBOOTS de 200 W aproximados en pico.
- Se realizó el proceso de selección, compra e importación de los diferentes elementos especiales que este proyecto requirió tales como motores, sensores y demás elementos electrónicos.
- Se verificó la alta capacidad de la tarjeta Arduino MEGA, a pesar de su bajo costo y sencillez en su programación, para realizar tareas de control en un sistema altamente inestable, el cual requirió de una alta velocidad en, la adquisición de datos, cálculos matemáticos y precisión en los mismos.

10. RECOMENDACIONES

- En el presente trabajo de grado se presentó un prototipo de una alternativa de transporte para distancias medianas o cortas para personas con capacidades disminuidas calificadas, el cual a pesar de que en principio físico funcionó, aun no se puede presentar como un producto terminado para el uso de tal población, puesto que se trata de un vehículo altamente inestable y los sistemas de control no son redundantes, por lo que cualquier falla en la lectura de los sensores o salida del controlador puede generar una caída.
- Se recomienda para futuros proyectos el estudio e implementación de métodos de control más sofisticados tales como Lógica Fuzzy, Redes Neuronales o Algoritmos Genéticos, para el control de vehículos de este tipo.
- Para el desarrollo de un vehículo de este tipo completamente funcional y seguro, se recomienda el trabajo en equipo de ingenieros mecánicos, electrónicos, biomédicos, diseñadores industriales y personal especializado en el manejo de pacientes con capacidades motoras disminuidas, tales como médicos o fisioterapeutas.
- A pesar de que a la salida de las baterías se ubicó un fusible de 40 A se recomienda la implementación de un sensor de corriente capaz de detectar picos altos de corriente en pequeños intervalos de tiempo de tal forma que se proteja adecuadamente la etapa de potencia.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Segway Inc, [en línea], <http://www.segway.com>
- [2] Grasser, F., D'Arrigo, A., Colombi, S. y Rufer, A. C, “*JOE: a mobile, Inverted Pendulum*”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No 1, 2002.
- [3] MIT, “*The DIY Segway*” [en línea] <http://web.mit.edu/first/segway>
- [4] Dudash, P., Eakins, G., Geier, E. y Gries, J, “*The Two Wheel Deal*” [en línea], <http://cobweb.ecn.purdue.edu/~477grp12/index.html>
- [5] Toyota, “*Toyota Develops Personal Transport Assistance Robot Winglet*” [en línea], http://www.toyota.co.jp/en/news/08/0801_1
- [6] MORENO BUSTAMANTE Leonardo Felipe, Vehículo Autobalanceado sobre dos Ruedas, Universidad de Chile, junio 2009.
- [7] MALVINO Albert Paul, Principios de electrónica, sexta edición, McGrawHill 1999.
- [8] YEVENES Cristian Guajardo, Control de un péndulo invertido, Universidad Técnica Federico Santa María, mayo 2004.
- [9] Analog Devices, “Analog Devices: Programmable 360° Inclinator - ADIS1603”, http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/ADIS16203.pdf
- [10] International rectifier. “*IRFZ4905 Datasheet Version 2.01*” [en línea], http://www.redrok.com/MOSFET_IRF4905_-55V_-74A_20mO_Vth-4.0_TO-220.pdf [consulta: 5 de febrero del 2010].
- [11] International rectifier. “*IRF48N Datasheet Version 2.0*” [en línea], <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irfz48n.pdf> [consulta:5 de febrero de 2011].

[12] ST electronics “*L298N datasheet Version 2.0*” [en línea], <http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/1773.pdf>. [consulta:1 de febrero de 2010].

[13] FAIRCHILD semiconductor “*4N25 datasheet Version 1.0*” [en línea], http://www.datasheetcatalog.net/es/datasheets_pdf/4/N/2/5/4N25.shtml. [consulta:20 de noviembre de 2010].

[14] MOTT Robert L Diseño de elementos de máquinas, cuarta edición. Prentice Hall.

ANEXOS

ANEXO A. DATASHEET INCLINOMETRO ADIS16203 DE ANALOG DEVICES.



Programmable 360° Inclinometer

ADIS16203

FEATURES

0° to 360° Inclinometer
±180 output format option
14-bit digital inclination outputs
Linear output, 0.025° resolution
12-bit digital temperature sensor output
Digitally controlled bias calibration
Digitally controlled sample rate
Digitally controlled filtering
Digitally controlled direction/orientation
Dual alarm settings with rate/threshold limits
Auxiliary digital I/O
Digitally activated self-test
Digitally activated low power mode
SPI-compatible serial interface
Auxiliary 12-bit ADC input and DAC output
Single-supply operation: 3.0 V to 3.6 V
3500 g powered shock survivability

APPLICATIONS

Tilt sensing, inclinometers
Platform control, stabilization, and leveling
Motion/position measurement
Monitor/alarm devices (security, medical, safety)
Robotics

GENERAL DESCRIPTION

The ADIS16203 is a complete incline-angle measurement system in a single compact package enabled by the Analog Devices, Inc., iSensor™ integration. By enhancing the Analog Devices iMEMS® sensor technology with an embedded signal processing solution, the ADIS16203 provides factory-calibrated, sensor-to-digital incline-

angle data in a convenient format that can be accessed using a serial peripheral interface (SPI). The SPI interface provides access to multiple measurements: 360° linear inclination angles, ±180° linear incline angles, temperature, power supply, and one auxiliary analog input. Easy access to calibrated digital sensor data provides developers with a system-ready device, reducing development time, cost, and program risk.

Unique characteristics of the end system are accommodated easily through several built-in features, such as a single-command offset calibration, along with convenient sample rate and bandwidth control.

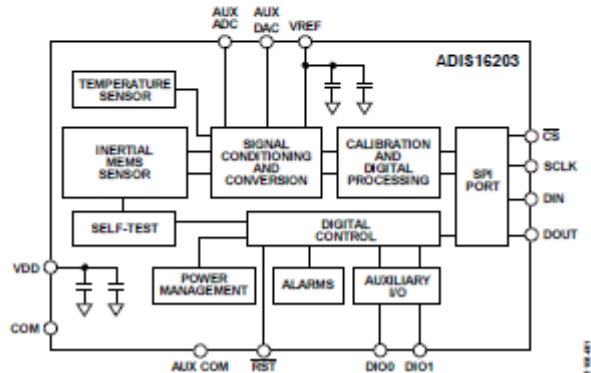
The ADIS16203 offers the following embedded features that eliminate the need for external circuitry and provide a simplified system interface:

- Configurable alarm function
- Auxiliary 12-bit analog-to-digital converter (ADC)
- Auxiliary 12-bit digital-to-analog converter (DAC)
- Configurable digital I/O port
- Digital self-test function

The ADIS16203 offers two power management features for managing system-level power dissipation: low power mode and a configurable shutdown feature.

The ADIS16203 is available in a 9.2 mm × 9.2 mm × 3.9 mm laminate-based land grid array (LGA) package with a temperature range of -40°C to +125°C.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM



SPECIFICATIONS

$T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to $+125^{\circ}\text{C}$, $V_{DD} = 3.3\text{ V}$, tilt = 0° , unless otherwise noted.

Table 1.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
INCLINOMETER¹					
Input Range			360		Degrees
Relative Accuracy	25°C, maximum filter setting		±0.6		Degrees
Sensitivity	25°C		0.025		Degrees/LSB
Accuracy Temperature Coefficient			±0.0167		Degrees/°C
NOISE PERFORMANCE					
Output Noise	At 25°C, no averaging		1.0		Degrees rms
	At 25°C, maximum averaging		0.1		Degrees rms
Noise Density	At 25°C, no averaging		0.037		Degrees/√Hz rms
FREQUENCY RESPONSE					
Sensor Bandwidth			2250		Hz
Sensor Resonant Frequency			5.5		kHz
SELF-TEST STATE					
Output Change When Active	At 25°C		34		Degrees
TEMPERATURE SENSOR					
Output at 25°C			1278		LSB
Scale Factor			-2.13		LSB/°C
ADC INPUT					
Resolution			12		Bits
Integral Nonlinearity			±2		LSB
Differential Nonlinearity			±1		LSB
Offset Error			±4		LSB
Gain Error			±2		LSB
Input Range		0		2.5	V
Input Capacitance	During acquisition		20		pF
ON-CHIP VOLTAGE REFERENCE					
Accuracy	At 25°C	-10	2.5	+10	V
Reference Temperature Coefficient			±40		ppm/°C
Output Impedance			70		Ω
DAC OUTPUT					
Resolution	5 kΩ/100 pF to GND		12		Bits
Relative Accuracy	For Code 101 to Code 4095		4		LSB
Differential Nonlinearity			1		LSB
Offset Error			±5		mV
Gain Error			±0.5		%
Output Range			0 to 2.5		V
Output Impedance			2		Ω
Output Settling Time			10		μs
LOGIC INPUTS					
Input High Voltage, V_{IH}		2.0			V
Input Low Voltage, V_{IL}				0.8	V
Logic 1 Input Current, I_{IH}	$V_{IH} = V_{DD}$		±0.2	±1	μA
Logic 0 Input Current, I_{IL}	$V_{IL} = 0\text{ V}$		-40	-60	μA
Input Capacitance, C_{IN}			10		pF

TIMING DIAGRAMS

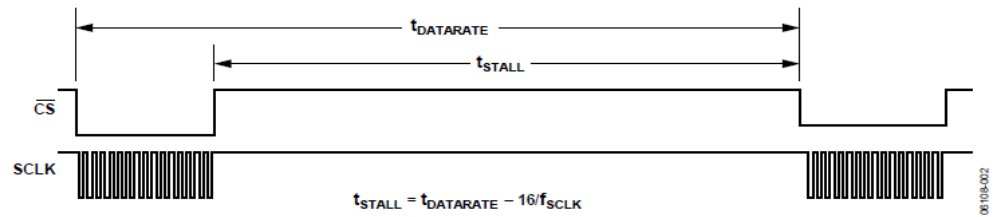


Figure 2. SPI Chip Select Timing

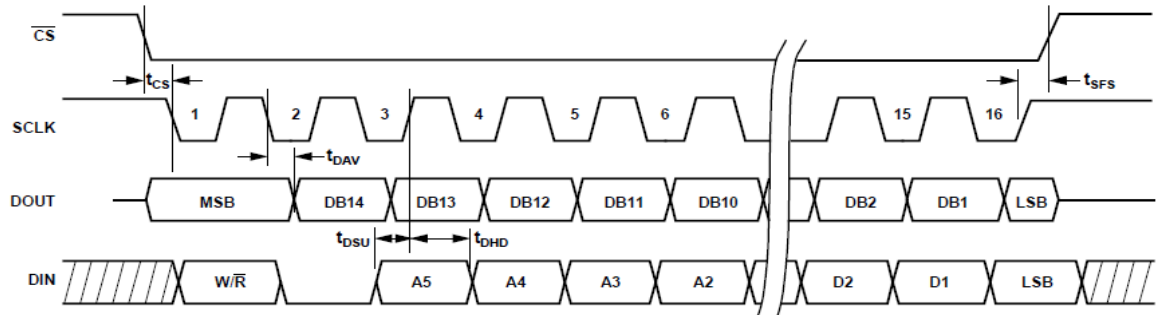


Figure 3. SPI Timing, Utilizing SPI Settings Typically Identified as Phase = 1, Polarity = 1

PIN CONFIGURATION AND FUNCTION DESCRIPTIONS

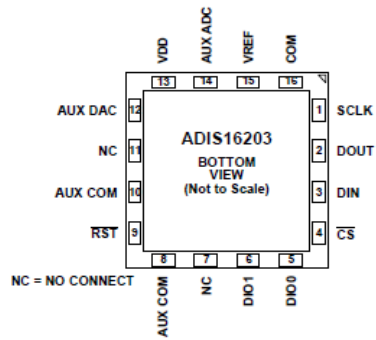


Figure 4. Pin Configuration

Table 5. Pin Function Descriptions

Pin No.	Mnemonic	Type ¹	Description
1	SCLK	I	SPI Serial Clock.
2	DOUT	O	SPI Data Out.
3	DIN	I	SPI Data In.
4	\overline{CS}	I	SPI Chip Select, Active Low. This input frames the serial data transfer.
5, 6	DIO0, DIO1	I/O	Multifunction Digital I/O Pin.
7, 11	NC	–	No Connect.
8, 10	AUX COM	S	Auxiliary Grounds. Connect to GND for proper operation.
9	RST	I	Reset, Active Low. This input resets the embedded microcontroller to a known state.
12	AUX DAC	O	Auxiliary DAC Analog Voltage Output.
13	VDD	S	+3.3 V Power Supply.
14	AUX ADC	I	Auxiliary ADC Analog Input Voltage.
15	VREF	O	Precision Reference Output.
16	COM	S	Common. Reference point for all circuitry in the ADIS16203.

THEORY OF OPERATION

The ADIS16203 is a calibrated digital inclinometer that provides a full 360° of measurement range in any rotational plane that is parallel to the earth's gravity. A dual-axis accelerometer provides the base-sensing function, which resolves the earth's gravity into two orthogonal vectors, as displayed in Figure 23. A power-efficient approach to a common trigonometric identity converts these orthogonal vectors into an incline-angle measurement.

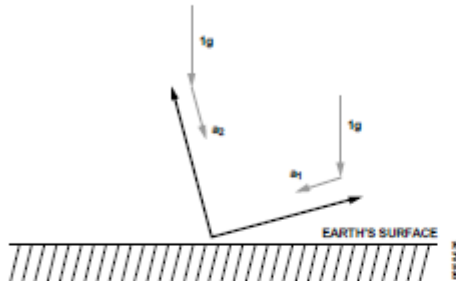
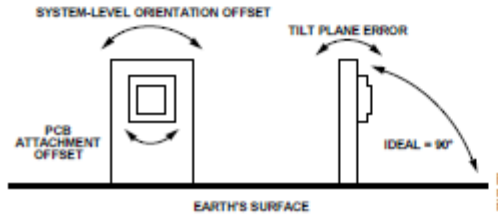


Figure 23. Sensor Measurement Diagram

The digital postprocessing circuit digitizes the sensor outputs and applies sensitivity/offset calibration coefficients prior to angle calculations. A factory calibration produces these coefficients using a full 360° mechanical rotational apparatus. This eliminates the need for system-level calibration in many cases. In addition to calibrating the sensor elements, the ADIS16203 corrects for power-supply-dependent parameters, providing a more robust calibration.

The accuracy of the incline-angle measurements relies on three important factors: the absence of external (aside from gravity) acceleration, managing offset errors introduced during system-level configuration, and maintaining a proper axis of rotation (rotation plane parallel with earth's gravity). All of these factors can influence the acceleration measurements and introduce error. The ADIS16203 provides a simple method for calibrating configuration errors by providing the INCL_NULL register function. See the Calibration section for more details. In addition, a 10° tilt plane error can introduce as much as $\pm 1^\circ$ of error in the incline-angle outputs.



OUTPUT RESPONSE

The incline-angle measurements are linear with respect to degrees, and the sensor's orientation produces the output response displayed in Figure 25. This figure is helpful in understanding the basic orientation of the inertial sensor measurement axes.

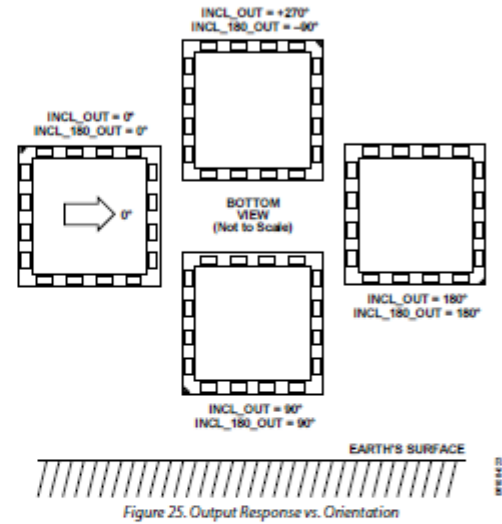


Figure 25. Output Response vs. Orientation

TEMPERATURE SENSOR

An internal temperature sensor monitors the accelerometer's junction temperature. The TEMP_OUT data register provides a digital representation of this measurement. This sensor provides a convenient temperature measurement for system-level characterization and calibration feedback.

BASIC OPERATION

The ADIS16203 is designed for simple integration into industrial system designs, requiring only a 3.3 V power supply and a 4-wire, industry standard SPI. The SPI port facilitates all data transfers with the ADIS16203's registers. Each ADIS16203 function (output data and programming control) has its own register that contains two bytes of data, and each byte of data has its own unique bit map. These two bytes are referred to as *upper* and *lower* bytes, and each has its own 6-bit address.

SERIAL PERIPHERAL INTERFACE (SPI)

The ADIS16203's SPI port provides a common interface that is supported by a wide variety of digital platforms, including MCUs, DSPs, and FPGAs. Even when a dedicated port is not available, the SPI can be implemented using manual bit manipulation, which is more commonly known as *bit banging*. The purpose of this section is to provide a basic description of SPI operation in the ADIS16203. Please refer to Table 2, Figure 2, and Figure 3 for detailed timing and operation of this port.

The ADIS16203's SPI port includes four signals: chip select (\overline{CS}), serial clock (SCLK), data input (DIN), and data output (DOUT). The \overline{CS} line enables the ADIS16203's SPI port and, in effect, frames each SPI event. When this signal is high, the DOUT lines are in a high impedance state and the signals on DIN and

SCLK have no impact on operation. A complete data frame contains 16 clock cycles. Because the SPI port operates in full duplex mode, it supports simultaneous, 16-bit receive (DIN) and transmit (DOUT) functions during the same data frame.

Figure 26 displays a typical data frame for writing a command to a control register. In this case, the first bit of the DIN sequence is a 1, followed by a 0, then the 6-bit address and 8-bit data command. Because each write command covers a single byte of data, two data frames are required when writing the entire 16-bit space of a register.

Reading the contents of a register requires a modification to the sequence in Figure 26. In this case, the first two bits in the DIN sequence are 0, followed by the address of the register. Each register has two addresses, but either one can be used to access its entire 16 bits of data. The final eight bits of the DIN sequence are irrelevant and can be counted as *don't cares* during a read command. Then, during the next data frame, the DOUT sequence will contain the register's 16-bit data, as shown in Figure 27. Even though a single read command requires two separate data frames, the full duplex mode minimizes this overhead, requiring only one extra data frame when continuously sampling.

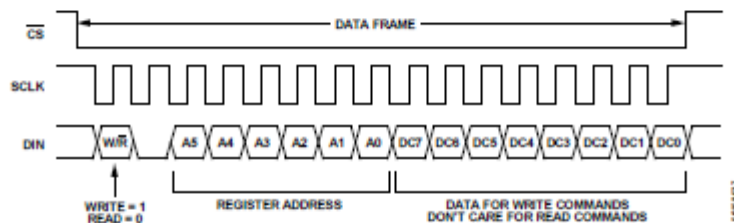


Figure 26. DIN Bit Sequence

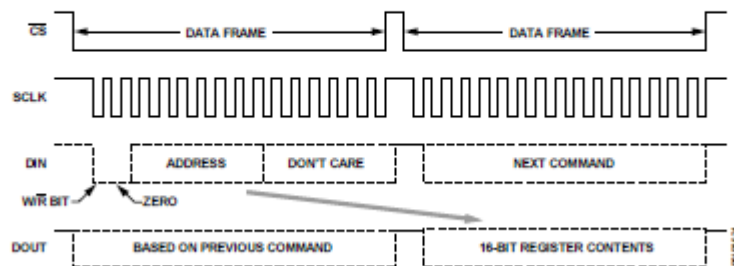


Figure 27. SPI Sequence for Read Commands

ANEXO B. DATASHEET DEL MICROCONTROLADOR ATMEGA 1280.

Features

- High Performance, Low Power Atmel® AVR® 8-Bit Microcontroller
- Advanced RISC Architecture
 - 135 Powerful Instructions – Most Single Clock Cycle Execution
 - 32 × 8 General Purpose Working Registers
 - Fully Static Operation
 - Up to 16 MIPS Throughput at 16 MHz
 - On-Chip 2-cycle Multiplier
- High Endurance Non-volatile Memory Segments
 - 64K/128K/256K Bytes of In-System Self-Programmable Flash
 - 4 Kbytes EEPROM
 - 8 Kbytes Internal SRAM
 - Write/Erase Cycles:10,000 Flash/100,000 EEPROM
 - Data retention: 20 years at 85°C/ 100 years at 25°C
 - Optional Boot Code Section with Independent Lock Bits
 - In-System Programming by On-chip Boot Program
 - True Read-While-Write Operation
 - Programming Lock for Software Security
 - Endurance: Up to 64 Kbytes Optional External Memory Space
- JTAG (IEEE std. 1149.1 compliant) Interface
 - Boundary-scan Capabilities According to the JTAG Standard
 - Extensive On-chip Debug Support
 - Programming of Flash, EEPROM, Fuses, and Lock Bits through the JTAG Interface
- Peripheral Features
 - Two 8-bit Timer/Counters with Separate Prescaler and Compare Mode
 - Four 16-bit Timer/Counter with Separate Prescaler, Compare- and Capture Mode
 - Real Time Counter with Separate Oscillator
 - Four 8-bit PWM Channels
 - Six/Twelve PWM Channels with Programmable Resolution from 2 to 16 Bits (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - Output Compare Modulator
 - 8/16-channel, 10-bit ADC (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - Two/Four Programmable Serial USART (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - Master/Slave SPI Serial Interface
 - Byte Oriented 2-wire Serial Interface
 - Programmable Watchdog Timer with Separate On-chip Oscillator
 - On-chip Analog Comparator
 - Interrupt and Wake-up on Pin Change
- Special Microcontroller Features
 - Power-on Reset and Programmable Brown-out Detection
 - Internal Calibrated Oscillator
 - External and Internal Interrupt Sources
 - Six Sleep Modes: Idle, ADC Noise Reduction, Power-save, Power-down, Standby, and Extended Standby
- I/O and Packages
 - 54/86 Programmable I/O Lines (ATmega1281/2561, ATmega640/1280/2560)
 - 64-pad QFN/MLF, 64-lead TQFP (ATmega1281/2561)
 - 100-lead TQFP, 100-ball CBGA (ATmega640/1280/2560)
 - RoHS/Fully Green
- Temperature Range:
 - -40°C to 85°C Industrial
- Ultra-Low Power Consumption
 - Active Mode: 1 MHz, 1.8V: 500 µA
 - Power-down Mode: 0.1 µA at 1.8V
- Speed Grade:
 - ATmega640V/ATmega1280V/ATmega1281V:
 - 0 - 4 MHz @ 1.8V - 5.5V, 0 - 8 MHz @ 2.7V - 5.5V
 - ATmega2560V/ATmega2561V:
 - 0 - 2 MHz @ 1.8V - 5.5V, 0 - 8 MHz @ 2.7V - 5.5V
 - ATmega640/ATmega1280/ATmega1281:
 - 0 - 8 MHz @ 2.7V - 5.5V, 0 - 16 MHz @ 4.5V - 5.5V
 - ATmega2560/ATmega2561:
 - 0 - 16 MHz @ 4.5V - 5.5V



8-bit **AVR**[®]
Microcontroller
with
64K/128K/256K
Bytes In-System
Programmable
Flash

ATmega640/V
ATmega1280/V
ATmega1281/V
ATmega2560/V
ATmega2561/V

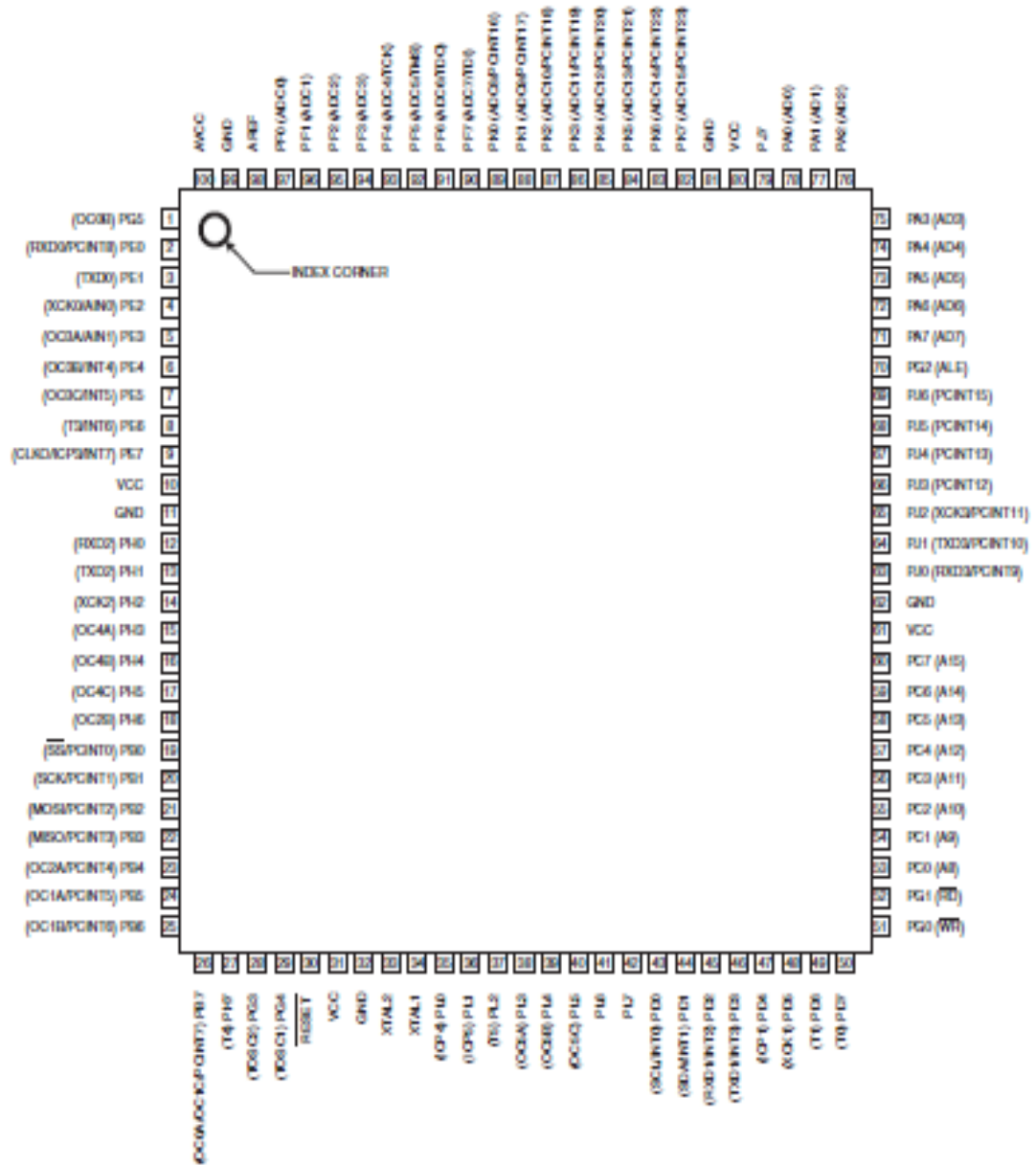
Preliminary

2549M-AVR-09/10



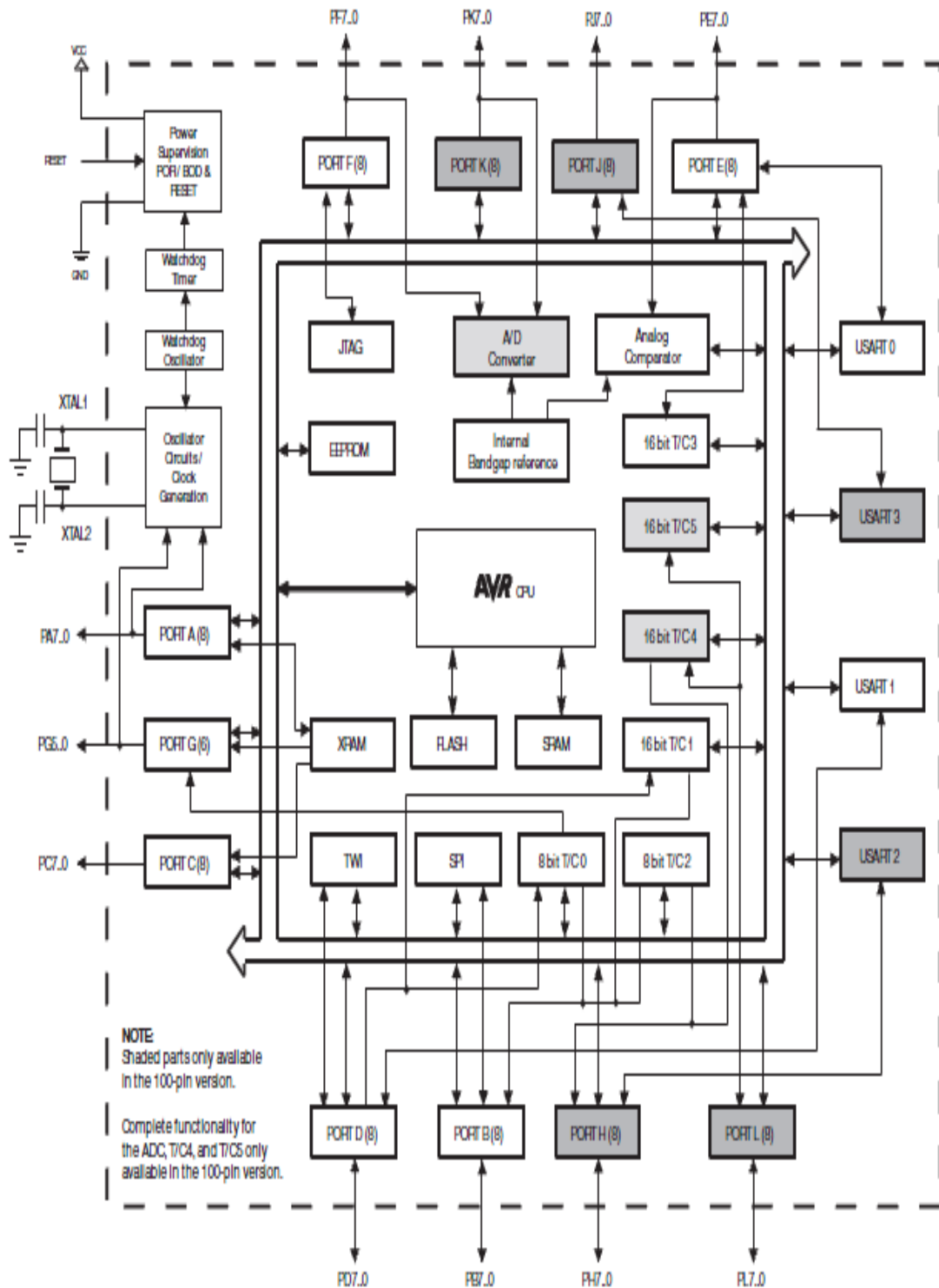
1. Pin Configurations

Figure 1-1. TQFP-pinout ATmega640/1280/2560



2.1 Block Diagram

Figure 2-1. Block Diagram



Interrupt Vectors in ATmega640/1280/1281/2560/2561

Table 13-1. Reset and Interrupt Vectors

Vector No.	Program Address ⁽²⁾	Source	Interrupt Definition
1	\$0000 ⁽¹⁾	RESET	External Pin, Power-on Reset, Brown-out Reset, Watchdog Reset, and JTAG AVR Reset
2	\$0002	INT0	External Interrupt Request 0
3	\$0004	INT1	External Interrupt Request 1
4	\$0006	INT2	External Interrupt Request 2
5	\$0008	INT3	External Interrupt Request 3
6	\$000A	INT4	External Interrupt Request 4
7	\$000C	INT5	External Interrupt Request 5
8	\$000E	INT6	External Interrupt Request 6
9	\$0010	INT7	External Interrupt Request 7
10	\$0012	PCINT0	Pin Change Interrupt Request 0
11	\$0014	PCINT1	Pin Change Interrupt Request 1
12	\$0016 ⁽³⁾	PCINT2	Pin Change Interrupt Request 2
13	\$0018	WDT	Watchdog Time-out Interrupt
14	\$001A	TIMER2 COMPA	Timer/Counter2 Compare Match A
15	\$001C	TIMER2 COMPB	Timer/Counter2 Compare Match B
16	\$001E	TIMER2 OVF	Timer/Counter2 Overflow
17	\$0020	TIMER1 CAPT	Timer/Counter1 Capture Event
18	\$0022	TIMER1 COMPA	Timer/Counter1 Compare Match A
19	\$0024	TIMER1 COMPB	Timer/Counter1 Compare Match B
20	\$0026	TIMER1 COMPC	Timer/Counter1 Compare Match C
21	\$0028	TIMER1 OVF	Timer/Counter1 Overflow
22	\$002A	TIMER0 COMPA	Timer/Counter0 Compare Match A
23	\$002C	TIMER0 COMPB	Timer/Counter0 Compare match B
24	\$002E	TIMER0 OVF	Timer/Counter0 Overflow
25	\$0030	SPI, STC	SPI Serial Transfer Complete
26	\$0032	USART0 RX	USART0 Rx Complete
27	\$0034	USART0 UDRE	USART0 Data Register Empty
28	\$0036	USART0 TX	USART0 Tx Complete
29	\$0038	ANALOG COMP	Analog Comparator

Table 13-1. Reset and Interrupt Vectors (Continued)

Vector No.	Program Address ⁽²⁾	Source	Interrupt Definition
30	\$003A	ADC	ADC Conversion Complete
31	\$003C	EE READY	EEPROM Ready
32	\$003E	TIMER3 CAPT	Timer/Counter3 Capture Event
33	\$0040	TIMER3 COMPA	Timer/Counter3 Compare Match A
34	\$0042	TIMER3 COMPB	Timer/Counter3 Compare Match B
35	\$0044	TIMER3 COMPC	Timer/Counter3 Compare Match C
36	\$0046	TIMER3 OVF	Timer/Counter3 Overflow
37	\$0048	USART1 RX	USART1 Rx Complete
38	\$004A	USART1 UDRE	USART1 Data Register Empty
39	\$004C	USART1 TX	USART1 Tx Complete
40	\$004E	TWI	2-wire Serial Interface
41	\$0050	SPM READY	Store Program Memory Ready
42	\$0052 ⁽³⁾	TIMER4 CAPT	Timer/Counter4 Capture Event
43	\$0054	TIMER4 COMPA	Timer/Counter4 Compare Match A
44	\$0056	TIMER4 COMPB	Timer/Counter4 Compare Match B
45	\$0058	TIMER4 COMPC	Timer/Counter4 Compare Match C
46	\$005A	TIMER4 OVF	Timer/Counter4 Overflow
47	\$005C ⁽³⁾	TIMER5 CAPT	Timer/Counter5 Capture Event
48	\$005E	TIMER5 COMPA	Timer/Counter5 Compare Match A
49	\$0060	TIMER5 COMPB	Timer/Counter5 Compare Match B
50	\$0062	TIMER5 COMPC	Timer/Counter5 Compare Match C
51	\$0064	TIMER5 OVF	Timer/Counter5 Overflow
52	\$0066 ⁽³⁾	USART2 RX	USART2 Rx Complete
53	\$0068 ⁽³⁾	USART2 UDRE	USART2 Data Register Empty
54	\$006A ⁽³⁾	USART2 TX	USART2 Tx Complete
55	\$006C ⁽³⁾	USART3 RX	USART3 Rx Complete
56	\$006E ⁽³⁾	USART3 UDRE	USART3 Data Register Empty
57	\$0070 ⁽³⁾	USART3 TX	USART3 Tx Complete

- Notes:
1. When the BOOTRST Fuse is programmed, the device will jump to the Boot Loader address at reset, see [“Memory Programming” on page 335](#).
 2. When the IVSEL bit in MCUCR is set, Interrupt Vectors will be moved to the start of the Boot Flash Section. The address of each Interrupt Vector will then be the address in this table added to the start address of the Boot Flash Section.
 3. Only available in ATmega640/1280/2560.

15. 8-bit Timer/Counter0 with PWM

15.1 Features

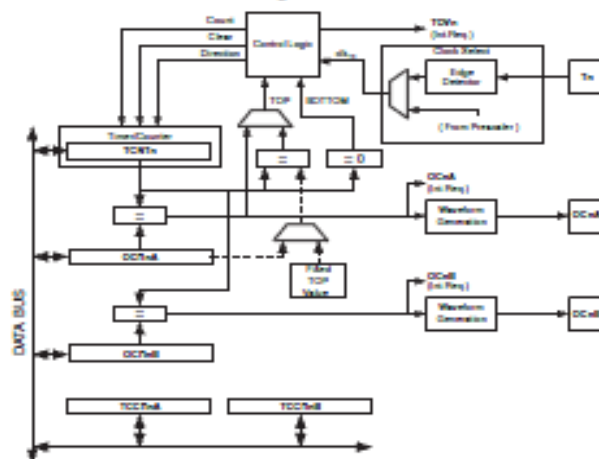
- Two Independent Output Compare Units
- Double Buffered Output Compare Registers
- Clear Timer on Compare Match (Auto Reload)
- Glitch Free, Phase Correct Pulse Width Modulator (PWM)
- Variable PWM Period
- Frequency Generator
- Three Independent Interrupt Sources (TOV0, OCF0A, and OCF0B)

15.2 Overview

Timer/Counter0 is a general purpose 8-bit Timer/Counter module, with two independent Output Compare Units, and with PWM support. It allows accurate program execution timing (event management) and wave generation.

A simplified block diagram of the 8-bit Timer/Counter is shown in Figure 15-1. For the actual placement of I/O pins, refer to “TC0FP-pinout ATmega640/1280/2560” on page 2. CPU accessible I/O Registers, including I/O bits and I/O pins, are shown in bold. The device-specific I/O Register and bit locations are listed in the “Register Description” on page 129.

Figure 15-1. 8-bit Timer/Counter Block Diagram



15.2.1 Registers

The Timer/Counter (TCNT0) and Output Compare Registers (OCR0A and OCR0B) are 8-bit registers. Interrupt request (abbreviated to Int.Req. in the figure) signals are all visible in the Timer Interrupt Flag Register (TIFR0). All interrupts are individually masked with the Timer Interrupt Mask Register (TIMSK0). TIFR0 and TIMSK0 are not shown in the figure.

The Timer/Counter can be clocked internally, via the prescaler, or by an external clock source on the T0 pin. The Clock Select logic block controls which clock source and edge the Timer/Counter

ANEXO C. CODIGO FUENTE DEL CONTROLADOR EN ARDUINO.

```
#include <avr/interrupt.h>

#include <avr/io.h>

#include <Spi.h>

#define G_OFFSET 285 //offset del gyro
#define scale_GX 289 //factor de escala para el gyro
#define CONS_INCL 0.05

/***** inicializacion filtros
*****/

/**/ Acelerometro ***/

int k=30;

float numa[30];

/**/ Giroscopio ***/

int u=5;

float numg[5];

/***** inicializacion de registros para
comunicacion SPI *****/

//Direccion de registro del sensor ADIS16203 segun la tabla 6
pag 13.

const byte READ = 0b00111111; //Comando de lectura de datos,
se envia una palabra de 8 bits, 6 bits LSB con la direccion de
registro, 2 bits MSB, 0 read, 0 obligatorio

const byte WRITE = 0b10000000; //Comando de escritura de datos,
se envia una palabra de 8 bits, 6 bits LSB con la direccion de
registro, 2 bits MSB 1 write, 0 obligatorio

/**/ constantes de conversion ***/

float p=2.56/1.023;

/***** parametros basicos de referencia para el control de
inclinacion *****/
```

```

signed int pwmmax=250; //maximo PWM que se podra sacar a los
motores, define la corriente maxima q suministramos a los
motores

/** constantes del PID **/

float Kp=6.5;

float Kd=0;

float Kg=0;

float Kst=0;

/***** inicilaizacion de variables de las banderas(flags)
*****/

volatile int un,diez,bal,ADCs=0;

/***** Variables del PID *****/

volatile float angle,turn,Pvg,Pva,motor,rmotor,lmotor,omega=0;

/** Variables incializadas a 0 **/

unsigned int counter=0;

/*****
*****/

float dt=0.010;//averiguar el tiempo de interrupcion real en
segundos.

float a=0.97;

/*****inicializacion var
SPI*****/

//Pines a conectar el arduino con el sensor el chip select que
es que da la orden de arrancar la comunicacion SPI , llamada CS.

const int reset=49;

const int chipSelectPin = 53;//el pin 53 es el pin utilizado
para enviar la senal de inicio del SPI

```

```

static unsigned int data_high;

/** Declaracion y asignacion de pines para los sensores */
const int pingyro=0;//gyro 14
const int pin_pot=2;

/** Declaracion y asignacion de pines para el manejo del puente
H */
const int pin4=4;
const int pin5=5;
const int pin6=6;
const int pin7=7;

/** Declaracion y asignacion de pines para los LEDS de
indicacion */
const int LED_verde=10;
const int LED_ama=11;

/***** SERVICE ROUTINE INTERRUPT
*****/
ISR(TIMER2_OVF_vect){
    //reseteamos el timer 2.

    //la variable count la aumentamos cada vez que se genere una
    interrupcion. 16000000/256/64 hara 976 desbordamientos por
    segundo casi 1000

    //cada vez que cuente 1000 desbordamientos el aumentara la
    variable second. en uno.

    un=1;

    diez++;

    if(un==1){
        ADCs =1;

        un=0;}

```

```

if (diez == 10){
    //Checks if 10 ms passed
    bal = 1;
    diez = 0;}
}

void setup() {
    Serial.begin(9600);

    //registro del timer count 2, para setear el preescaler este
    para el 1280 se setea en el TCCR2B en los tres primeros bits
    menos significativos en 1-0-0 para 64.

    TCCR2B=0x04;

    // Use normal mode el registro se encuentra en el TCCRB para el
    1280 en los bits del wave generation mode(WGM), para modo normal
    los bits son 0-0-0

    //este registro se encuentra en la pagina 186 data.
    //TCCR2 |= (0<<WGM21) | (0<<WGM20);

    TCCR2A=0x00;

    // TCCR2B |= (0<<WGM22);

    //usar el reloj interno no el del arduino.

    // Use internal clock - external clock not used in Arduino

    ASSR=0x00;

    //registro de mascara de timers para interrupcion me activa la
    interrupcion por desbordamiento poniendo en 1 el bit del

    //interrupcion por desbordamiento del timer 2 activado(TOIE2) y
    colocando en 0 el bit de salida comparada de la interrupcion
    activada del timer 2 (OCIE2A)

    TIMSK2=0x01; //Timer2 Overflow Interrupt Enable

    TCNT1=0x00;// la esta haciendo 125 veces por segundo

    sei();
}

```

```

/** Inicializar el vector a ceros para el filtro digital */
float numa[k];
for (int n = 0 ; n<=k-1; n++ ){
numa[n] = 0;}

float numg[u];
for (int n = 0 ; n<=u-1; n++ ){
numg[n] = 0;}

//Inicilaizamos la libreria SPI
Spi.mode((2<<SPR0));           // set SPI clock to system
clock / 16

/** Definimos el modo de los pines-entradas o salidas */

//modo del pin CS como salida inicia la comunicacion
pinMode(chipSelectPin, OUTPUT);

pinMode(reset, OUTPUT);
pinMode(pingyro, INPUT);
pinMode(pin_pot, INPUT);

pinMode(pin4, OUTPUT);
pinMode(pin5, OUTPUT);
pinMode(pin6, OUTPUT);
pinMode(pin7, OUTPUT);

pinMode(LED_verde, OUTPUT);

```

```

pinMode(LED_ama,OUTPUT);

digitalWrite(pin4,LOW);
digitalWrite(pin5,LOW);
digitalWrite(pin6,LOW);
digitalWrite(pin7,LOW);

digitalWrite(reset,LOW);
digitalWrite(reset,HIGH);
delay(1000);// tiempo de configuracion
};

void loop () {
if (ADCs == 1){
Pva=P_Va();
Pvg=P_Vg(pingyro);
ADCs = 0;}

if(bal == 1){
Cal_angle(Pva,Pvg);
bal = 0;}

}

/**** FUNCIONES DE USUARIO ****/

float P_Va(){
  numa[k-1]=Incli();
  for(int i=0;i<=k-2;i++){
  numa[i]=numa[i+1];}

float s=0;
int n=0;
while(n<=k-1){
s=s+numa[n];
n++;}

```

```

float pro=(s/k)*0.05;
float theta=90-pro;
return theta;}

/**/ funcion de usuario para obtener el angulo ***/
float InclI(){

data_high = readRegister(0x06);

//realizamos una operacion & para poder utilizar solo 13 bits
del los 14 bits que envia el incliometer. 0b11111111111111

data_high = (data_high & 0x1FFF);

float tilt=data_high;
return tilt;}

/***** Filtro del GYROSCOPE, calcula el vel angular
*****/

float P_Vg(int pingyro){
numg[u-1]=analogRead(pingyro);
for(int i=0;i<=u-2;i++){
numg[i]=numg[i+1];}

int s=0;
int n=0;
while(n<=u-1){
s=s+numg[n];
n++;}

int pro=s/u;
int g=pro-G_OFFSET;
float gyro=g*p/scale_GX ;//velocidad angular
return pro;}

/***** Funcion de calculo de balance *****/

```

```

void Cal_angle(float pva,float pvg){
int lbyas=0;
int rbyas=0;
angle = a * (angle + pvg*dt); //integracion, filtro pasa altas
angle += (1-a)*(pva);          //filtro pasa bajas

motor += (Kp * angle) + (Kd *pvg);
if(motor>=0){
    lbyas=lbyas;
    rbyas=rbyas;}
else{
    lbyas=-lbyas;
    rbyas=-rbyas;}

lmotor=lbyas+motor;
rmotor=rbyas+motor;

/* saturacion! */
if (lmotor >=pwmmax) { lmotor = pwmmax; }
else if (lmotor < -pwmmax) { lmotor =-pwmmax; }

if (rmotor >= pwmmax) { rmotor = pwmmax; }
else if (rmotor < -pwmmax) { rmotor = -pwmmax; }

/** PWM de control para los motores **/
/***** DIRECCION DE LOS MOTORES *****/
/** transistores de motor izquierdo T6 y T7 ***/
/** transistores de motor izquierdo T4 y T5 ***/

```

```

// saturacion motor izquierdo //
if (lmotor >= 0){
    digitalWrite(pin4,LOW);
    analogWrite(pin5,lmotor);}

else if(lmotor<0){
    digitalWrite(pin5,LOW);
    analogWrite(pin4,-lmotor);}

// saturacion motor derecho //
if(rmotor >=0) {
digitalWrite(pin6,LOW);
analogWrite(pin7,rmotor);}

else if (rmotor <0){
digitalWrite(pin7,LOW);
analogWrite(pin6,-rmotor);}
}

/*****
*****/
SPI

/** funciones para comunicacion SPI **/

//funcion readRegister(registro, cuantos bytes), esta funcion
me permite leer el registro del inclinometro.

unsigned int readRegister(byte thisRegister) {
byte inByte = 0; // inicializar byte
leido por SPI

unsigned int result = 0; // retornamos esta
variable

```

```

// combinamos la direccion y el comando en un solo byte para
enviar por el serial.

byte dataToSend = thisRegister & READ;

// chip select debe estar abajo para iniciar la comunicacion.

digitalWrite(chipSelectPin, LOW);

//enviamos la direccion de registro y a la vez recibimos los
bits menos significativos LSB del inclinometro.

result=Spi.transfer(dataToSend);

//enviamos un byte de ceros para poder desplazar los bits MSB
que aun quedan por enviar.

inByte=Spi.transfer(0x00);

//despazamos el result 8 unidades a la izq para combinarlos con
los MSB

result = result << 8;

// combinamos los dos BYTES que se obtuvieron.

result = result | inByte;

digitalWrite(chipSelectPin, HIGH);
digitalWrite(chipSelectPin, LOW);
Spi.transfer(0x00);
    Spi.transfer(0x00);
digitalWrite(chipSelectPin, HIGH);
    return(result);}

//enviamos los comandos al ADIS16203

void writeRegister(byte thisRegister, byte thisValue) {
byte dataToSend = thisRegister & READ;
    //combinamos los bits para enviar el byte.
dataToSend = dataToSend | WRITE;

```

```
//inicializamos la comunicacion.  
digitalWrite(chipSelectPin, LOW);  
//enviamos la direccion de registro.  
Spi.transfer(dataToSend,10);  
  //enviamos el valor que escribiremos  
Spi.transfer(thisValue,10);  
digitalWrite(chipSelectPin, HIGH);  
}
```

ANEXO D. COMUNICACIÓN SPI CON INCLINOMETRO ADIS16203.

La comunicación SPI es un protocolo de comunicación serial estándar, utilizado entre dispositivos electrónicos para su utilización conjunta, pero debe tenerse un respectivo cuidado cuando se comunican estos dispositivos ya que existen breves variaciones en el protocolo para algunos dispositivos, por tanto la lectura y el conocimiento del datasheet del sensor ADIS16203 es primordial.

En la comunicación SPI se tiene un máster y un Slave, cada uno cumple una función de emisor y receptor, el master sincroniza la comunicación por medio el serial clock (SCLK), en nuestro caso el máster es el microcontrolador y el Slave es el sensor de inclinación, la figura 146 ilustra cómo es la comunicación SPI entre estos dos dispositivos.

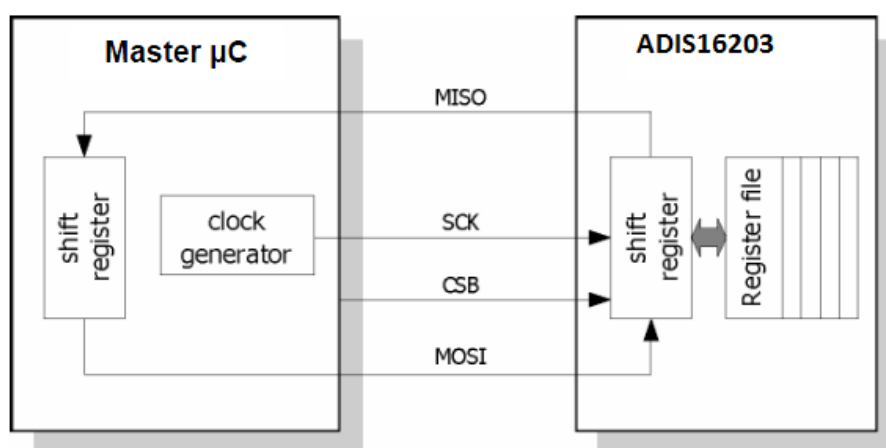


Figura 149. Configuración maestro esclavo en la comunicación SPI.

Debido a que utilizaremos la librería para SPI de Arduino, Primero se debe conocer la librería de la que disponemos y analizar que realiza la función miembro de la librería Spi.h.

`Spi.transfer (0x2A)`

Esta función miembro permite enviar y recibir un byte del bus SPI, es decir permite enviar un byte desde el máster, con la dirección del registro que desea

leer del dispositivo, y a su vez recibe un byte con la información que le entrega el dispositivo Slave.

La figura 147, muestra el modo de comunicación SPI, para el envío de datos hacia el ADIS16203.

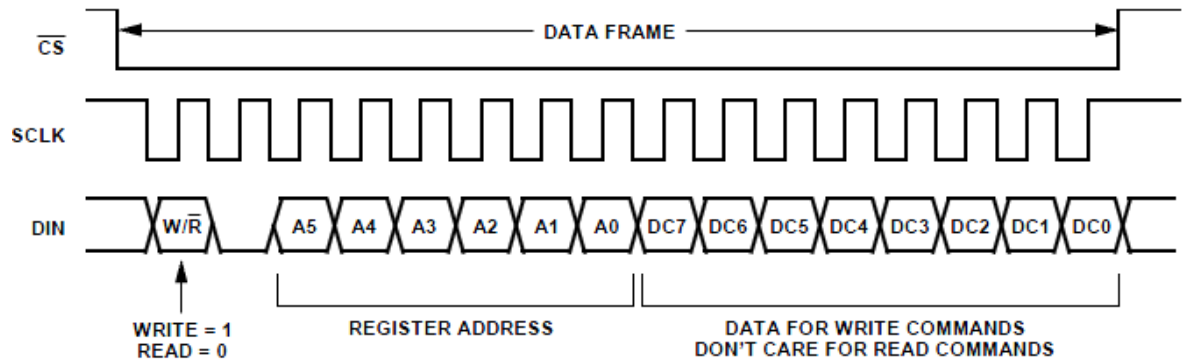


Figura 150. Secuencia de bits para el envío de datos para obtener la inclinación.

Como se observa en la figura 147, antes de iniciar cualquier envío de datos, el chip select (CS), debe estar en bajo, aquí el serial clock SCLK coordina el envío de datos en el flanco de bajada del pulso; para el envío de datos se tienen:

- 2 bits, el primero con la información de si es escritura o lectura (Read (0) o Write(1)), como estamos escribiendo o enviando el valor de este primer bit es 1, el siguiente bit es siempre 0.
- Los otros 6 bits del byte (A5-A0), contienen la dirección de registro, según lo que se desea leer (inclinación entre 180° y -180°, inclinación 0° a 360°, temperatura C°, etc.), las direcciones de registro de salida del inclinómetro ADIS16203, se muestran en la tabla 34. Debido a que solo requerimos leer inclinación entre 0 y 360° solo necesitamos la dirección de registro con nombre INCL_OUT registro 0x0D o 0x0C.

Name	Function	Address	Resolution (Bits)	Data Format	Scale Factor (per LSB)
SUPPLY_OUT	Power supply data	0x03, 0x02	12	Binary	1.22 mV
AUX_ADC	Auxiliary analog input data	0x09, 0x08	12	Binary	0.61 mV
TEMP_OUT	Sensor temperature data	0x0B, 0x0A	12	Binary	-0.47°C
INCL_OUT	Inclination data	0x0D, 0x0C	14	Binary	0.025°
INCL_180_OUT	±180° inclination data	0x0F, 0x0E	14	Twos complement	0.025°

Tabla 37. Direcciones de registros de datos de salida del inclinómetro.

Debido a problemas con los registros de salida del sensor, encontramos que el único registro que permite realizar la lectura de inclinación es uno que no se encuentra en el datasheet del sensor, aunque pedimos soporte a *analog devices* sobre esto no dieron respuesta, el registro donde se encuentra la información real es el 0x06.

La recepción del byte se da cuando haya llegado la dirección de registro, según la figura 148, podemos ver este envío y recepción de datos.

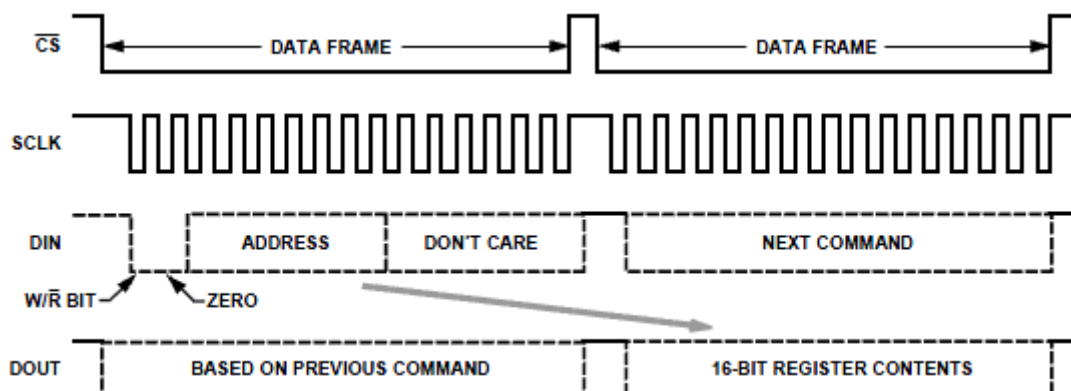


Figura 151. Secuencia de datos para la lectura.

El contenido de la información desde el sensor es entregada luego de recibir la dirección del registro, se debe notar que ocurre, con el chip Select (CS) cuando enviamos el byte del registro, y quedan un byte que dice don't care luego el chip select pasa a alto y luego a bajo para recibir la información desde el sensor, esta información son 16 bits de los cuales 14 son de la información real de inclinación.

Por tanto se debe enviar la dirección de registro utilizando la función:

LSB=Spi.transfer (0x06);

Esto enviara la dirección el byte y a su vez guardara los bits LSB de la información desde el inclinómetro en la variable *return*, inmediatamente se envían 8 bits con ceros para que el sensor envíe los 8 bits MSB restantes.

MSB=Spi.transfer (0x00);

Estos dos bytes darán los 14 bits del dato de inclinación.

Luego pasar el CS de bajo a alto y luego de alto a bajo para la recepción de dato de inclinación. Como el spi envía solo un byte en cada llamada de la función Spi.transfer, debemos llamar la función dos veces y combinar cada paquete de 8 bits en uno de 16 bits y luego con algún operador lógico &, para poder transformar estos 16 bits a una palabra de 14 bits que nos entregara el ángulo.

Este proceso se hace dentro de una función de usuario llamada readRegister (registro a leer) que se encuentra en el código fuente del controlador, ver anexo C.

La figura 149, muestra el proceso que debe hacerse continuamente, explicado anteriormente.

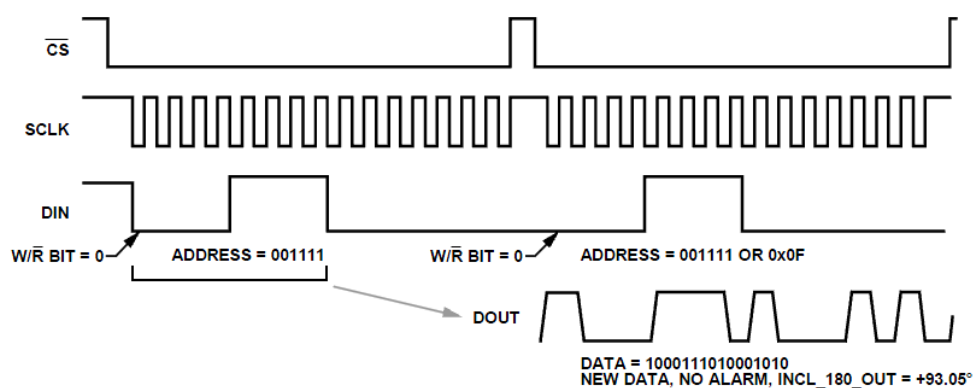



Figura 151. Secuencia de lectura SPI del inclinómetro.

ANEXO E. RESUMEN DEL DATASHEET GIROSCOPIO IDG 500.

	IDG-500 Dual-Axis Gyroscope Product Specification	PS-IDG-0500B-00-06 Release Date: 07/28/09
---	--	--

2. Purpose

The purpose of this document is to provide a detailed product description and design-related information regarding the IDG-500 dual-axis gyroscope.

3. Product Overview

The IDG-500 is a state-of-the-art dual-axis gyroscope designed specifically for complex motion sensing in 3D-input devices and gaming controllers. The IDG-500 gyroscope utilizes state-of-the-art MEMS fabrication with wafer-scale integration technology. This technology combines completed MEMS wafers and completed CMOS electronic wafers together using a patented and proprietary wafer-scale bonding process that simultaneously provides electrical connections and hermetically sealed enclosures. This unique and novel fabrication technique is the key enabling technology that allows for the design and manufacture of high performance, multi-axis, integrated MEMS gyroscopes in a very small and economical package. Integration at the wafer-level minimizes parasitic capacitances, allowing for improved signal-to-noise over a discrete solution. With the addition of the new patented Auto Zero feature for minimizing bias drift over temperature, the IDG-500 offers unparalleled gyroscope performance in 3D-input and gaming applications.

4. Features

By integrating the control electronics with the sensor elements at the wafer level, the IDG-500 gyroscope supports a rich feature set including:

- Integrated X- and Y-axis gyros on a single chip
- Two separate outputs per axis for higher-speed and higher-sensitivity applications:
 - X-/Y-Out Pins: 500°/s full scale range
2.0mV/°/s sensitivity
 - X/Z4.5Out Pins: 110°/s full scale range
9.1mV/°/s sensitivity
- Integrated amplifiers and low-pass filters
- Auto-Zero function
- On-chip temperature sensor
- High vibration rejection over a wide frequency range
- High cross-axis isolation by proprietary MEMS design
- 3V single-supply operation
- Hermetically sealed for temp and humidity resistance
- 10,000 g shock tolerant
- Smallest dual axis gyro package at 4 x 5 x 1.2mm
- RoHS and Green Compliant

5. Functional Block Diagram

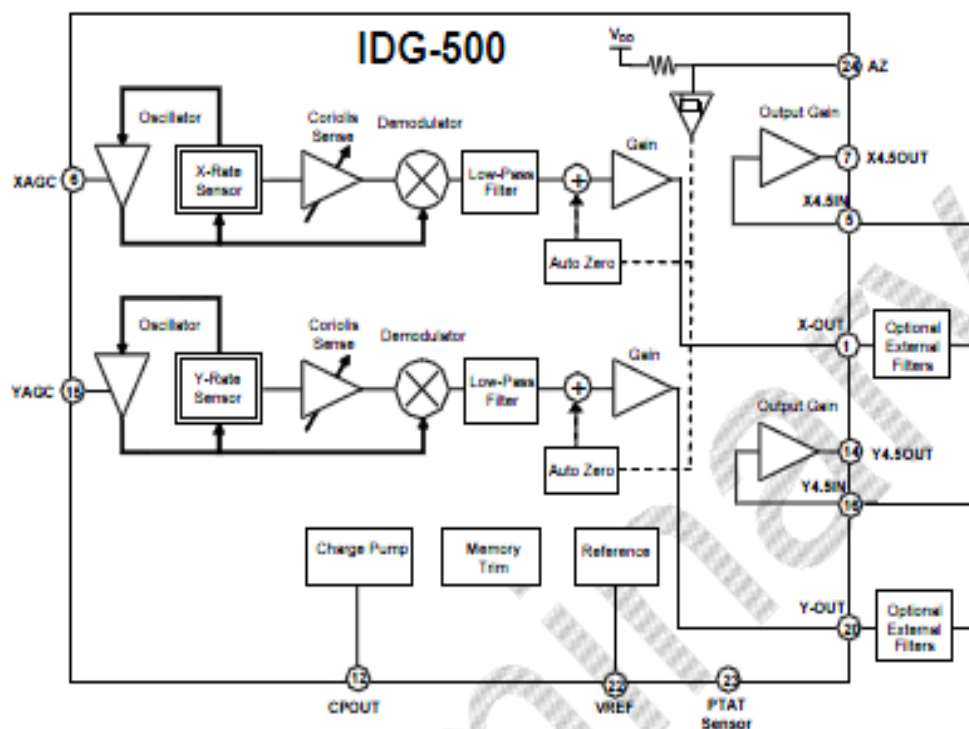


Figure 1

6. Functional Description

6.1 Overview

The IDG-500 gyroscope consists of two independent vibratory MEMS gyroscopes. One detects rotation about the X-axis; the other detects rotation about the Y-axis.

The gyroscope's proof-masses are electrostatically oscillated at resonance. An internal automatic gain control circuit precisely controls the oscillation of the proof masses. When the sensor is rotated about the X- or Y-axis, the Coriolis Effect causes a vibration that can be detected by a capacitive pickoff. The resulting signal is amplified, demodulated, and filtered to produce an analog voltage that is proportional to the angular rate.

6.2 Rate Sensors

The mechanical structures for detecting angular rate about the X- and Y-axes are fabricated using InvenSense's proprietary bulk silicon technology. The structures are covered and hermetically sealed at the wafer level. The cover shields the gyro from electromagnetic and radio frequency interferences (EMI/RFI). The dual-mass design inherently rejects any signal caused by linear acceleration. The X-gyro and the Y-gyro have different resonant frequencies to prevent undesired coupling.

6.3 Oscillator Circuit

The oscillator circuit generates electrostatic forces to vibrate the structure at resonance. The circuit detects the vibration by measuring the capacitance between the oscillating structure and a fixed electrode. The oscillator circuit switches in quadrature phase with the capacitance measurement in order to vibrate at resonance.

6.4 Amplitude Control

The scale factor of the gyroscope depends on the amplitude of the mechanical motion and the trim setting of the internal programmable gain stages. The oscillation circuit precisely controls the amplitude to maintain constant sensitivity over the temperature range. The capacitors ($0.22\mu\text{F} \pm 10\%$) connected to Pin 8 (XAGC) and Pin 15 (YAGC) are compensation capacitors for the amplitude control loops.

6.5 Coriolis Sense

Rotating the sensor about the X- or Y-axis results in a Coriolis force on the corresponding X- or Y-rate sensor. The Coriolis force causes the mechanical structure to vibrate in-plane. The resulting vibration is detected by measuring the capacitance change between the mechanical structure and fixed electrodes. This signal is converted to a voltage waveform by means of low-noise charge integrating amplifier and amplification stages.

6.6 Demodulator

The output of the Coriolis sense is an amplitude modulated waveform. The amplitude corresponds to the rotation rate, and the carrier frequency is the mechanical drive frequency. The synchronous demodulator converts the Coriolis sense waveform to the low-frequency, angular rate signal.

6.7 Low-Pass Filter

After the demodulation stage, there is a low-pass filter. This filter attenuates noise and high frequency artifacts before final amplification.

6.8 Auto Zero

The Auto Zero function is used to reduce DC offset caused by bias drift. The use of this function will vary by application requirement. Pin 24 (AZ) is used to set the Auto Zero function, resetting the bias to approximately VREF.

6.9 Temperature Sensor

A built-in Proportional-To-Absolute-Temperature (PTAT) sensor provides temperature information on Pin 23.

6.10 Charge Pump

The on-chip charge pump generates the voltage required to oscillate the mechanical structure.

6.11 Memory Trim

The on-chip memory is used to select the gyro's sensitivity, calibrate the sensitivity, null DC offsets and select the low-pass filter option.

6.12 Scale Factor

The Rate-Out of the gyros is not ratiometric to the supply voltage. The scale factor is calibrated at the factory and is nominally independent of supply voltage.

6.13 Reference Voltage

The gyro includes a bandgap reference circuit. The output voltage is typically 1.35V and is nominally independent of temperature. The zero-rate signal is nominally equal to the reference value.

6.14 Analog Outputs

The IDG-500 gyro has two X-outputs (X-OUT and X4.5OUT), and two Y-outputs (Y-OUT and Y4.5OUT), with scale factors and full-scale sensitivities that vary by a factor of 4.5, as detailed in Section 8.2.7.

Having two sensitivities and two full-scale ranges per axis allows the end user to have one output that can be used for faster motions (over a full scale range of $\pm 500^\circ/\text{sec}$), and a second output that can be used for slower motions (over a full scale range of $\pm 110^\circ/\text{sec}$). Thus a lower-resolution analog-to-digital converter (ADC) may be used to digitize the motion, with the gain of 4.5 in the X4.5OUT and Y4.5OUT outputs effectively giving the user an additional two-plus bit of resolution.

7.1 Specified Parameters

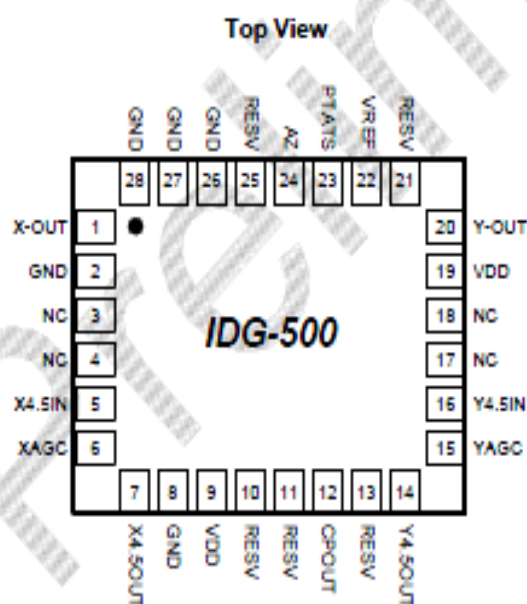
All parameters specified are @ VDD = 3.0 V and T_A = 25°C. External LPF @ 2kHz. All specifications apply to both axes.

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
SENSITIVITY					
Full-Scale Range	At X-OUT and Y-OUT At X4.5OUT and Y4.5OUT		±500 ±110		°/s °/s
Sensitivity	At X-OUT and Y-OUT At X4.5OUT and Y4.5OUT		2.0 9.1		mV/°/s mV/°/s
Initial Calibration Tolerance	At X-OUT and Y-OUT		±6		%
Calibration Drift Over Specified Temperature	At X-OUT and Y-OUT At X-OUT and Y-OUT, Best Fit Straight Line		±10		%
Nonlinearity			<1		% of FS
Cross-axis Sensitivity			±1		%
REFERENCE					
Voltage (VREF)			1.35		V
Tolerance			±50		mV
Load Drive			100		µA
Capacitive Load Drive	Load directly connected to VREF		100		pF
Power Supply Rejection	VDD= 2.7V to 3.3V		1		mV/V
Reference Drift Over Specified Temperature			±5		mV
ZERO-RATE OUTPUT (ZRO)					
Static Output (Bias)	Factory Set		1.35		V
Initial Calibration Tolerance	Relative to VREF				
	With Auto Zero		±20		mV
	Without Auto Zero		±250		mV
ZRO Drift Over Specified Temperature			±50		mV
Power Supply Sensitivity	@ 50 Hz		10		°/sec/V
FREQUENCY RESPONSE					
High Frequency Cutoff	Internal LPF -90°		140		Hz
LPF Phase Delay	10Hz		-4.5		°
MECHANICAL FREQUENCIES					
X-Axis Resonant Frequency		20	24	28	kHz
Y-Axis Resonant Frequency		23	27	31	kHz
Frequency Separation	X and Y Gyroscopes		3		kHz
NOISE PERFORMANCE					
Total RMS Noise	Bandwidth 1Hz to 1kHz, At X-OUT and Y-OUT		0.8		mV rms
OUTPUT DRIVE CAPABILITY					
Output Voltage Swing	Load = 100kΩ to Vdd/2	0.05		Vdd-0.05	V
Capacitive Load Drive			100		pF
Output Impedance			100		Ω
POWER ON-TIME					
Zero-rate Output	Settling to ±3°/s		50	200	ms
AUTO ZERO CONTROL					
Auto Zero Logic High	Rising Input		1.9		V
Auto Zero Logic Low	Falling Input		0.9		V
Auto Zero Pulse Duration		2		1500	µsec
Offset Settle Time After Auto Zero			7		msec

8. Application Information

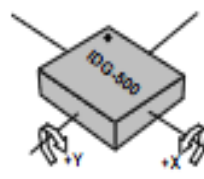
8.1 Pin Out and Signal Description

Number	Pin	Description
2, 8, 26, 27, 28	GND	Ground
9, 19	VDD	Positive supply voltage
1	X-OUT	Rate output for rotation about the X-axis
5	X4.5IN	X-axis input to the 4.5X amplifier
6	XAGC	Amplitude control capacitor connection
7	X4.5OUT	X-axis output of the 4.5X amplifier
12	CPOUT	Charge pump capacitor connection
14	Y4.5OUT	Y-axis output of the 4.5X amplifier
15	YAGC	Amplitude control capacitor connection
16	Y4.5IN	Y-axis input to the 4.5X amplifier
20	Y-OUT	Rate output for rotation about the Y-axis
22	VREF	Precision reference output
23	PTATS	Temperature Sensor Output
24	AZ	X & Y Auto Zero control pin
10, 11, 13, 21, 25	RESV	Reserved. Do not connect.
3, 4, 17, 18	NC	Not internally connected. May be used for PCB trace routing.



28-pin, 4mm x 5mm x 1.2mm
QFN Package

This is a dual-axis rotational-rate sensing device. It produces a positive output voltage for rotation about the X- or Y-axis, as shown in the figure below.



Orientation of Axes of
Sensitivity and Polarity
of Rotation

ANEXO F. RESUMEN DATASHEET GIROSCOPIO LISY300AL.



LISY300AL

MEMS inertial sensor:
single-axis $\pm 300^\circ/\text{s}$ analog output yaw rate gyroscope

Features

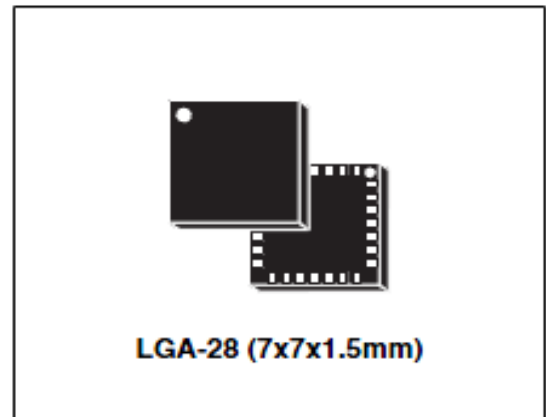
- 2.7 V to 3.6 V single supply operation
- Low power consumption
- Embedded power-down
- $\pm 300^\circ/\text{s}$ full scale
- Absolute analog rate output
- Integrated low-pass filters
- Embedded self-test
- High shock survivability
- ECOPACK[®] RoHS and "Green" compliant (see [Section 4](#))

Description

The LISY300AL is a low-power single-axis yaw rate sensor. It includes a sensing element and an IC interface able to provide the measured angular rate to the external world through an analog output voltage.

The sensing element, capable of detecting the yaw rate, is manufactured using a dedicated micromachining process developed by ST to produce inertial sensors and actuators on silicon wafers.

The IC interface is manufactured using a CMOS process that allows a high level of integration to design a dedicated circuit which is trimmed to better match the sensing element characteristics.



The LISY300AL has a full scale of $\pm 300^\circ/\text{s}$ and is capable of measuring rates with a -3 dB bandwidth up to 88 Hz.

The LISY300AL is available in a plastic land grid array (LGA) package and can operate within a temperature range from -40°C to $+85^\circ\text{C}$.

The LISY300AL belongs to a family of products suitable for a variety of applications, including:

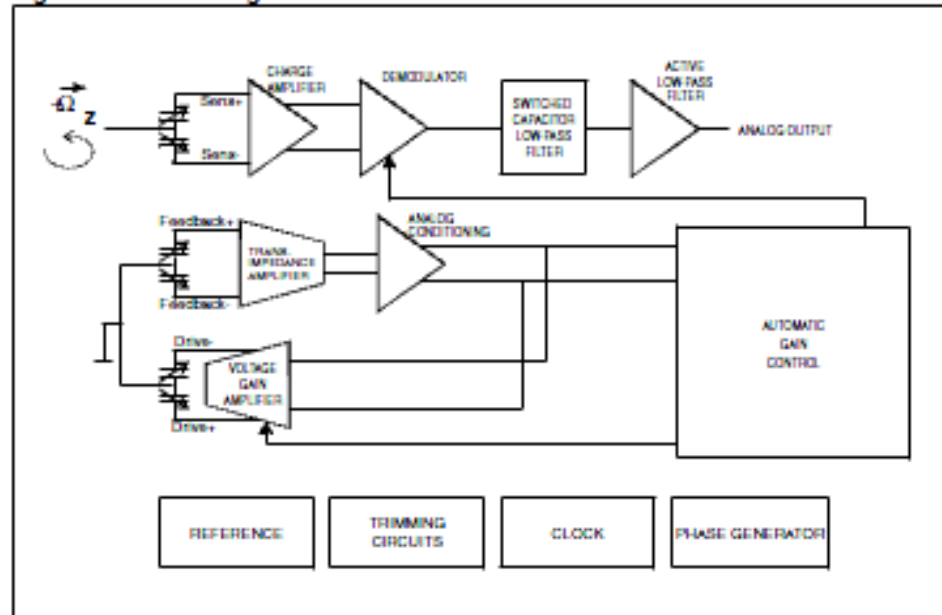
- Gaming and virtual reality input devices
- Motion control with MMI (man-machine interface)
- Image stabilization for digital video and digital still cameras
- GPS navigation systems
- Appliances and robotics

Table 1. Device summary

Order code	Temperature range ($^\circ\text{C}$)	Package	Packing
LISY300AL	-40 to +85	LGA-28 (7x7x1.5)	Tray
LISY300ALTR	-40 to +85	LGA-28 (7x7x1.5)	Tape and reel

1 Block diagram and pin description

Figure 1. Block diagram



The vibration of the structure is maintained by a drive circuitry in a feedback loop. The sensing signal is filtered and appears as an analog signal at the output.

1.1 Pin description

Figure 2. Pin connection

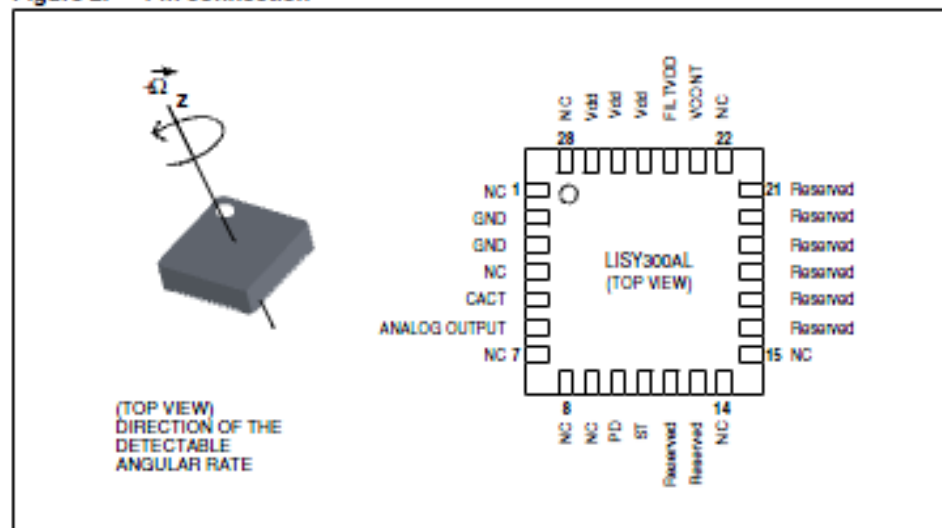


Table 2. Pin description

Pin #	Pin Name	Function
1	NC	Internally not connected
2	GND	0V supply
3	GND	0V supply
4	NC	Internally not connected
5	CACT	Active filter capacitor
6	ANALOG OUTPUT	Rate signal output voltage
7-9	NC	Internally not connected
10	PD	Power-down (logic 0: normal mode; logic 1: power-down mode)
11	ST	Self-test (logic 0: normal mode; logic 1: self-test)
12-13	Reserved	Leave unconnected
14-15	NC	Internally not connected
16-21	Reserved	Leave unconnected
22	NC	Internally not connected
23	VCONT	PLL filter connection pad #1
24	FILTVDD	PLL filter connection pad #2
25	Vdd	Power supply
26	Vdd	Power supply
27	Vdd	Power supply
28	NC	Internally not connected

2.2 Electrical characteristics

Table 4. Electrical characteristics @ Vdd =3.3 V, T=25 °C unless otherwise noted⁽¹⁾

Symbol	Parameter	Test condition	Min.	Typ. ⁽²⁾	Max.	Unit
Vdd	Supply voltage		2.7	3.3	3.6	V
Idd	Supply current	PD pin connected to GND		4.8		mA
IddPdn	Supply current in power-down mode	PD pin connected to Vdd		1		μA
V _{ST}	Self-test input	Logic 0 level	0		0.2*Vdd	V
		Logic 1 level	0.8*Vdd		Vdd	
V _{PD}	Power-down input	Logic 0 level	0		0.2*Vdd	V
		Logic 1 level	0.8*Vdd		Vdd	
C _{ACT}	Active low-pass filter capacitor		10			nF
OVS	Output voltage swing ⁽³⁾	I _{out} = ±100μA	0.4		V _{dd} -0.4	V
C _{LOAD}	Capacitive load drive ⁽³⁾		0.4		10	nF
T _{op}	Operating temperature range		-40		+85	°C

1. The product is factory calibrated at 3.3 V
2. Typical specifications are not guaranteed
3. Referred to ANALOG OUTPUT pin #6