

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR AERONÁUTICO

**CARRERA DE ELECTRÓNICA MENCIÓN INSTRUMENTACIÓN &
AVIÓNICA**

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE COMPROBACIÓN DE
LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MOTORES BRUSHLESS
UTILIZADOS EN LOS MINI UAV”**

POR:

CANTOS OLMEDO SANTIAGO GERARDO

**Trabajo de Graduación como requisito previo para la obtención
del Título de:**

**TECNÓLOGO EN ELECTRÓNICA MENCIÓN INSTRUMENTACIÓN
& AVIÓNICA**

2013

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente Trabajo de Graduación fue realizado en su totalidad por el Sr. **CANTOS OLMEDO SANTIAGO GERARDO**, como requerimiento parcial para la obtención del título de **TECNÓLOGO EN ELECTRÓNICA MENCIÓN INSTRUMENTACIÓN & AVIÓNICA**.

ING. LUCIA GUERRERO
DIRECTORA DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN

Latacunga, 30 de Agosto de 2013

DEDICATORIA

Este proyecto va dedicado principalmente a Dios que me ha brindado toda la capacidad para seguir en la lucha, a mis padres, que ellos fueron el mayor apoyo, me animaron a seguir y gracias a ellos conseguir cada uno de mis logros a través todo el camino de mi vida.

A mis hermanos que me han ayudado cuando se les necesitaba sin reprochar sin esperar nada a cambio.

Santiago Gerardo Cantos O.

AGRADECIMIENTO

A Dios por ser mi guía, darme la sabiduría y fortaleza para seguir adelante; un agradecimiento en especial a mis amados padres que son el pilar fundamental para haber cumplido, este uno de mis objetivos, por ser mi mejor respaldo en cada paso que doy, por confiar en mí y brindarme su amor y apoyo incondicional siempre.

A mis Tíos que ellos siempre estuvieron pendiente de mis pasos y avances en cada uno de mis proyectos que he emprendido, sin ellos este proyecto hubiera sido un total fracaso.

A mis profesores ya que con sus enseñanzas me permitieron llegar hasta estas estancias y en particular a las personas que brindaron su ayuda incondicionalmente en el transcurso del proyecto, Tglo. Ulises Cedillo, Ing. Lucía Guerrero y al Ing. Pablo Pilatasig.

A mis familiares, amigos y conocidos que de una u otra forma supieron apoyarme y alentarme a continuar sin rendirme.

Santiago Gerardo Cantos O.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDOS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS.....	xv
ÍNDICE DE TABLAS	xvii
ÍNDICE DE FÓRMULAS	xviii
ÍNDICE DE ANEXOS	xxii
RESUMEN	22
ABSTRACT	23

CAPÍTULO I

TEMA

1.1 Antecedentes	24
1.2 Justificación.....	25
1.3 Objetivos	26
1.3.1 General.....	26
1.3.2 Específicos.....	26
1.4 Alcance.....	27

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Motores Brushless.....	28
2.1.1 Concepto.....	28
2.1.2 Construcción	29

2.1.2.1 Estator	30
2.1.2.2 Rotor.....	31
2.1.3 Principio de Funcionamiento	32
2.1.4 Tipos de Motores Brushless	34
2.1.4.1 Inrunner	34
2.1.4.2 Outrunner	35
2.2 ESC	35
2.2.1 Programación de un ESC Brushless	36
2.2.2 BEC (Battery Eliminator Circuit)	37
2.3 Baterías.....	38
2.3.1 Funcionamiento	39
2.3.2 Baterías en los mini UAV y Aeromodelismo.....	40
2.3.2.1 Baterías de Niquel Cadmio (Ni-Cd)	41
2.3.2.1.1 Parámetros de las baterías Ni-Cd	42
2.3.2.1.2 Efecto Memoria	44
2.3.2.1.3 Pasivación	44
2.3.2.1.4 Vida útil	44
2.3.2.2 Baterías de Niquel Hidruro Metálico (Ni-Mh)	45
2.3.2.2.1 Exceso de Carga	46
2.3.2.2.2 Auto-Descarga.....	46
2.3.2.3 Baterías de Iones de Litio (Li-Ion)	46
2.3.2.3.1 Cuidados de las baterías de Iones de Litio.....	48
2.3.2.4 Baterías Lipo	49
2.3.2.4.1 Celdas	50
2.3.2.4.2 Velocidad de descarga	51
2.3.2.4.3 Duración de una batería	52

2.3.2.4.4 Carga.....	52
2.3.2.4.5 Descarga	53
2.3.2.4.6 Desequilibrio y equilibrio en las celdas.....	54
2.4 Sensor de efecto Hall	56
2.4.1 Aplicaciones de los sensores Hall	57
2.5 Arduino	57
2.5.1 Arduino Uno	58
2.6 LABVIEW	59
2.6.1 Introducción.....	59

CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL TEMA

3.1. Preliminares	61
3.2. Lista de componentes y software utilizado en el módulo de comprobación ..	62
3.3. Acondicionamiento de los componentes	62
3.3.1. Conexiones entre los motores brushless, controladores de velocidad y baterías.....	64
3.3.2 Terminales de los motores brushless.....	64
3.3.3 Ensamble entre el controlador de velocidad y el receptor	66
3.4. Programación de los ESC'S	67
3.4.1 Ingreso al modo de programación del ESC.....	67
3.4.2 Fase de programación.....	68
3.4.2.1. Programación para el controlador de velocidad ESC 60A Hobbyking	68

3.4.2.2. Programación para el controlador de velocidad ESC 30A	
UBEC Hobbyking.....	69
3.5. Hélices.....	70
3.5.1 Hélice utilizada en el motor Inrunner (3600kv Exceed-rc)	70
3.5.1.1 Factor de carga de la hélice 4,7 x 4,7 pulgadas	71
3.5.1.2 Máximo de revoluciones de giro de la hélice 4,7 x 4,7 pulgadas.	72
3.5.2 Hélice utilizada en el motor Outrunner (1500kv turnigy).....	73
3.5.2.1 Factor de carga de la hélice 10 x 4,5 pulgadas	74
3.5.2.2 Máximo de revoluciones de giro de la hélice 10 x 4,5 pulgadas..	75
3.6 Simulación de la señal del Rx	77
3.6.1. Programación en Bascom AVR.....	79
3.6.2. Prueba con el motor Brushless	84
3.7 Medidor de RPM	84
3.7.1. Sketch del contador de frecuencia	85
3.7.2. Envío de datos utilizando comunicación serial	92
3.7.3. Programación del medidor de RPM en LABVIEW.....	92
3.7.4. Disco para medición de RPM	94
3.7.4.1. Balanceamiento del disco.....	94
3.8 Medición de corriente	98
3.8.1. Sketch para la medición de corriente	103
3.8.2. Programación del medidor de corriente en LABVIEW.....	106
3.9 Programación Final	108
3.9.1. Sketch final en Arduino.....	108
3.9.2. VI final en LABVIEW.....	109
3.9.2.1. Escalamientos	112

3.9.2.1.1. Escalamientos para el motor Brushless Inrunner 3600	
KV Exceed-RC	112
3.9.2.1.2. Escalamientos para el motor Brushless Outrunner 1500	
KV Turnigy.....	115
3.10. Parámetros de los motores Brushless.....	119
3.11. Manejo del Módulo de comprobación de las características de los motores Brushless.....	122
3.12 Diseño de placas.....	126
3.13. Recarga de baterías	128
3.13.1. Parámetros iniciales	130
3.13.2. Programación para las baterías de Litio	134
3.13.3. Seguridad	136
3.14. Analisis de Resultados	137
3.14.1. Pruebas en el motor Inrunner 3600KV Exceed-Rc (Motor 1)	137
3.14.1.1. Prueba al vacío.....	137
3.14.1.2. Prueba con carga	138
3.14.2. Pruebas en el motor Outrunner 1500KV Turnigy (Motor 2)	145
3.14.1.2. Prueba al vacío.....	145
3.14.2.2. Prueba con carga	146
3.15 Gastos Realizados	153
3.15.1 Costos Primarios	153
3.15.2 Costos Secundarios	155
3.15.3 Costo Total.....	155

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones.....	157
4.2 Recomendaciones.....	159
GLOSARIO.....	160
WEB GRAFÍA.....	151
ANEXOS	163

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO II

Figura 2.1. Motor Brushless DC	28
Figura 2.2. Estator.....	30
Figura 2.3. Formas de onda FCEM, Trapezoidal y Sinusoidal	31
Figura 2.4. Rotor	32
Figura 2.5. Aspecto de un motor sin escobillas trifásico DC	33
Figura 2.6. Motor Brushless Inrunner	34
Figura 2.7. Motor Brushless Outrunner	35
Figura 2.8. Vista General de un ESC	36
Figura 2.9. Diferentes Tipos de Baterías	39
Figura 2.10. Configuración interna de una batería	40
Figura 2.11. Baterías de Niquel Cadmio	41
Figura 2.12. Baterías de Niquel Hidruro Metálico.....	45

Figura 2.13. Estructura interna de una batería de Iones de Litio.....	47
Figura 2. 14. Especificaciones de Carga.....	48
Figura 2. 15. Especificaciones de Descarga	49
Figura 2. 16. Diferentes Baterías Lipo.....	50
Figura 2. 17. Especificaciones de Carga.....	53
Figura 2. 18. Curva de Descarga	54
Figura 2. 19. Celdas de Lipo Desequilibradas.....	55
Figura 2. 20. Balanceador	55
Figura 2. 21. Sensor de Efecto Hall.....	56
Figura 2. 22. Vista frontal del Arduino Uno R3	58

CAPÍTULO III

Figura 3.1 Forma de conexión entre el motor brushless, Esc, batería y receptor	64
Figura 3.2 Parámetros de la fase de programación del ESC 60A Hobbyking	68
Figura 3.3. Pulsos emitidos por el RX	77
Figura 3.4 Selección del Atmega 8 y del oscilador interno en BASCOM AVR	79
Figura 3.5 Líneas para la activación y configuración de la LCD en BASCOM AVR.....	80
Figura 3.6 Activación y configuración de la función Servos en BASCOM AVR....	80
Figura 3.7 Creación de las variables en BASCOM AVR	80
Figura 3.8 Cuerpo del programa en BASCOM AVR.....	81

Figura 3.9 Programa final de la simulación de la señal del Rx en BASCOM AVR.....	82
Figura 3.10 Simulación de la programación en ISIS Proteus	82
Figura 3.11 Encabezado del Sketch de Contador de Frecuencia	85
Figura 3.12 VoidSetup del sketch Contador de Frecuencia	85
Figura 3.13 Sketch final Contador de Frecuencia	86
Figura 3.14 Compilación y verificación de la programación	87
Figura 3.15 Carga del Sketch a la tarjeta Arduino Uno	87
Figura 3.16 Circuito con el sensor UGN 3132.....	88
Figura 3.17 Vista general de la conexión a Arduino Uno con el sensor UGN 3132	90
Figura 3.18 Líneas de cálculo de RPM incluido el contador de frecuencia	91
Figura 3.19 Ubicación del nombre del puerto serial asignado por Arduino	91
Figura 3.20 Diagrama de bloques para la visualización de RPM en LABVIEW ...	92
Figura 3.21 Panel frontal para la visualización de RPM en LABVIEW	92
Figura 3.22 Sensor HASS 50-S.....	97
Figura 3.23 Circuito requerido para el sensor HASS 50-S	100
Figura 3.24 Encabezado del sketch Medidor de Corriente.....	103
Figura 3.25 “VoidSetup” del sketch Medidor de Corriente.....	103
Figura 3.26 Lectura de los voltajes de salida y referencia para la medición de corriente	104

Figura 3.27 Sketch final para el Medidor de Corriente	104
Figura 3.28 Vista general de la conexión a Arduino Uno con el sensor HASS 50-S	105
Figura 3.29 Escalamiento para conseguir el valor en Voltaje.....	105
Figura 3.30 Diagrama de bloques para la visualización de corriente en LABVIEW	107
Figura 3.31 Panel frontal para la visualización de corriente en LABVIEW	107
Figura 3.32 Sketch final para la medición de RPM y corriente simultáneamente	109
Figura 3.33 Parte del VI final para la medición de RPM y corriente simultáneamente (Frame 0)	110
Figura 3.34 Parte del VI final para la medición de RPM y corriente simultáneamente (Frame 1).....	111
Figura 3.35 Panel Frontal del VI medición de RPM y corriente simultáneamente	111
Figura 3.36 Escalamiento para la curva de corriente del motor inrunner	112
Figura 3.37 Escalamiento para la curva de voltaje del motor inrunner.....	113
Figura 3.38 Escalamiento para la curva de potencia de salida del motor inrunner	114
Figura 3.39 Escalamiento para la curva de corriente del motor outrunner	116
Figura 3.40 Escalamiento para la curva de voltaje del motor outrunner.....	117

Figura 3.41 Escalamiento para la curva de potencia de salida del motor outrunner	118
Figura 3.42 Configuración de las entras de dato para la placa Arduino	124
Figura 3.43 Diseño de la placa de control de velocidad de los motores en ARES.....	126
Figura 3.44 Diseño de la placa adicional para el funcionamiento del sensor UGN 3132	126
Figura 3.45 Diseño de la placa adicional para el funcionamiento del sensor HASS 50-S	127
Figura 3.46 Curva de respuesta del voltaje en el motor inrunner.....	139
Figura 3.47 Curva de la respuesta de la corriente del motor inrunner.....	140
Figura 3.48 Curva de respuesta de la potencia de entrada del motor inrunner..	141
Figura 3.49 Curva de respuesta de la potencia de salida del motor inrunner	142
Figura 3.50 Curva de respuesta del torque del motor inrunner	143
Figura 3.51 Curva de respuesta de las RPM del motor inrunner.....	144
Figura 3.52 Curva de respuesta de la eficiencia del motor inrunner	145
Figura 3.53 Curva de respuesta del voltaje en el motor outrunner.....	147
Figura 3.54 Curva de respuesta de la corriente del motor outrunner	148
Figura 3.55 Curva de respuesta de la potencia de entrada del motor outrunner	149
Figura 3.56 Curva de respuesta de la potencia de salida del motor outrunner ..	150

Figura 3.57 Curva de respuesta del torque del motor outrunner.....	151
Figura 3.58 Curva de respuesta de las RPM del motor outrunner	152
Figura 3.59 Curva de respuesta de la eficiencia del motor outrunner	153

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

CAPÍTULO III

Foto 3.1 Terminales Xt60	63
Foto 3.2 Conectores de oro de 3,5mm.....	63
Foto 3.3 Terminales de conexión del motor y del ESC	65
Foto 3.4 Conexión entre los terminales del motor y del ESC	66
Foto 3.5 Nominación de los conductores para conexión entre el ESC y el receptor	67
Foto 3.6 Ingreso a la fase de programación.....	69
Foto 3.7 Hélices utilizadas en el proyecto	70
Foto 3.8 Hélice de 4,7x4,7 pulgadas junto al motor 3600KV Exceed-Rc	71
Foto 3.9 Hélice de 10x4,5 pulgadas junto al motor 1500KV Turnigy.....	74
Foto 3.10 Receptor y radio control	77
Foto 3.11 Alimentación del receptor y conexión al osciloscopio.....	78
Foto 3.12 Canal 3 del receptor (Throttle)	78
Foto 3.13 Señal obtenida del Rx del radio control.....	79
Foto 3.14 Comprobación del funcionamiento de la señal del Rx.....	83
Foto 3.15 Prueba de funcionamiento del control de velocidad del motor	84

Foto 3.16 UGN 3132 junto al disco con imán.....	89
Foto 3.17 Señal obtenida del sensor UGN 3132.....	89
Foto 3.18 Vista general del circuito con el sensor UGN 3132.....	90
Foto 3.19 Posicionamiento del sensor UGN 3132 junto a la hélice.....	93
Foto 3.20 Balanceador de propelas.....	94
Foto 3.21 Vista general del disco para medición de RPM.....	95
Foto 3.22 Revisión del balance del disco.....	95
Foto 3.23 Revisión del balance del disco incluido el imán.....	96
Foto 3.24 Ubicación del sensor cerca de la hélice.....	97
Foto 3.25 Elaboración de la extensión para la medición de corriente.....	98
Foto 3.26 Vista general del sensor HASS 50-s previo a las pruebas.....	100
Foto 3.27 Voltaje obtenido a la salida del sensor al no detectar corriente.....	101
Foto 3.28 Variaciones de voltaje obtenidas a la salida del sensor.....	102
Foto 3.29 Cables de alimentación 5VDC para el módulo.....	123
Foto 3.30 Cables de salida de datos conectados en la placa Arduino Uno.....	124
Foto 3.31 Cables de entrada hacia el motor.....	125
Foto 3.32 Vista general del control de velocidad.....	125
Foto 3.33 Placas después del paso por cloruro férrico.....	127
Foto 3.34 Placas finalizadas.....	128
Foto 3.35 Cargador/balanceador Accuecell-8150.....	128
Foto 3.36 conexión entre la batería y la salida del cargador.....	129
Foto 3.37 Ranuras destinadas para los conectores de las celdas.....	129

Foto 3.38 Visualización de “User Set Program”	130
Foto 3.39 Elección del tipo de batería de Litio.....	131
Foto 3.40 Configuración del “Check Time”	131
Foto 3.41 Selección de la configuración “Waste Time”	132
Foto 3.42 Opción de “Safety Timer” mostrada en el display.....	133
Foto 3.43 Configuración de “CapacityCut Off”.....	133
Foto 3.44 Selección del programa “LipoBatt”	134
Foto 3.45 Pantalla para la configuración de corriente y voltaje de carga	135
Foto 3.46 Pantalla previa a la carga del pack de baterías.....	135
Foto 3.47 Pantalla de carga del pack de baterías	136
Foto 3.48 Módulo Terminado	137

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO II

Tabla 2.1. Influencia de la Temperatura en la Descarga	43
Tabla 2.2. Influencia de la Corriente de Descarga	43
Tabla 2.3. Características del Arduino Uno	59

CAPÍTULO III

Tabla 3.1 Corriente al vacío del motor Inrunner	137
Tabla 3.2 RMP al vacío del motor Inrunner	138
Tabla 3.3 Voltaje en el motor Inrunner con carga.....	138

Tabla 3.4 Corriente consumida por el motor Inrunner con carga	139
Tabla 3.5 Potencia de entrada con carga del motor Inrunner	140
Tabla 3.6 Potencia de salida con carga del motor Inrunner	141
Tabla 3.7 Torque producido por el motor Inrunner con carga	142
Tabla 3.8 RPM a que gira el motor Inrunner con carga.....	143
Tabla 3.9 Eficiencia del motor Inrunner con carga	144
Tabla 3.10 Corriente al vacío del motor Outrunner	145
Tabla 3.11 RMP al vacío del motor Outrunner	146
Tabla 3.12 Voltaje en el motor Outrunner con carga.....	146
Tabla 3.13 Corriente consumida por el motor Outrunner con carga.....	147
Tabla 3.14 Potencia de entrada con carga del motor Outrunner.....	148
Tabla 3.15 Potencia de salida con carga del motor Outrunner	149
Tabla 3.16 Torque producido por el motor Outrunner con carga.....	150
Tabla 3.17 RPM a que gira el motor Outrunner con carga.....	151
Tabla 3.18 Eficiencia del motor Outrunner con carga	152
Tabla 3.19 Costos Primarios	154
Tabla 3.20 Costos Secundarios	155
Tabla 3.21 Gasto Total.....	156

INDICE DE FÓRMULAS

CAPÍTULO II

Fórmula 2.1. Reacción química producida en una batería de Ni-Cd.....	41
--	----

Fórmula 2.2. Fórmula para el cálculo de la Intensidad Nominal de una batería de Ni-Cd	42
Fórmula 2.3.Fórmula para el cálculo del tiempo de duración de una batería.....	52

CAPÍTULO III

Fórmula 3.1. Fórmula para el cálculo del Factor de Carga de la hélice 4,7 x 4,7.	71
Fórmula 3.2. Fórmula para el cálculo de las revoluciones estimadas de giro del motor 3600kv Exceed-Rc.....	72
Fórmula 3.3 Conversión del diámetro de la hélice en pulgadas a milímetros	72
Fórmula 3.4. RPM de giro de la hélice 4,7 x 4,7 pulgadas	73
Fórmula 3.5. Fórmula para el cálculo del Factor de Carga de la hélice 10 x 4,5..	74
Fórmula 3.6. Fórmula para el cálculo de las revoluciones estimadas de giro del motor 1500kv Turnigy	75
Fórmula 3.7. Conversión del diámetro de la hélice en pulgadas a milímetros de la hélice de 10 x 4,5	76
Fórmula 3.8 Rpm de giro de la hélice 10 x 4,5 pulgadas.	76
Fórmula 3.9 Fórmula para conversión de Hz a RPM	86
Fórmula 3.10 Fórmula para la obtención de la variación de voltaje respecto a la corriente.....	98
Fórmula 3.11 Fórmula para la obtención de corriente conociendo el voltaje de salida del Sensor.....	99
Fórmula 3.12 Cálculo para la obtención de la corriente	101
Fórmula 3.13 Corriente obtenida del cálculo con 2,52V	102

Fórmula 3.14 Corriente obtenida del cálculo con 2,57V	102
Fórmula 3.15 Cálculo de la pendiente para convertir los datos de Arduino en valores de voltaje (equivalentes).....	106
Fórmula 3.16 Cálculo de la recta para escalamiento	106
Fórmula 3.17 Escalamiento de la corriente en función de las RPM	113
Fórmula 3.18 Escalamiento del voltaje en función de las RPM.....	114
Fórmula 3.19 Escalamiento de la potencia de salida en función de las RPM	115
Fórmula 3.20 Escalamiento de la corriente en función de las RPM	116
Fórmula 3.21 Escalamiento del voltaje en función de las RPM.....	117
Fórmula 3.22 Escalamiento de la potencia de salida en función de las RPM	118
Fórmula 3.23 Fórmula para calcular el voltaje en el motor.....	119
Fórmula 3.24 Fórmula para calcular la potencia de entrada	120
Fórmula 3.25 Fórmula para calcular la potencia de salida	120
Fórmula 3.26 Fórmula para calcular el torque.....	121
Fórmula 3.27 Fórmula para calcular revoluciones en vacío	121
Fórmula 3.28 Fórmula para calcular la eficiencia	122

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo A. Artículo publicado por el diario El Comercio acerca de la investigación de UAV'S en el Ecuador.	164
Anexo B. Datasheet del motor outrunner Turnigy D3632-1500.....	167
Anexo C. Datasheet del motor Inrunner Exceed-Rc 3600kv	168
Anexo D. Parámetros de programación para el controlador de velocidad ESC 60A Hobbyking	169
Anexo E. Parámetros de programación para el controlador de velocidad ESC 30A Hobbyking	171
Anexo F. Datasheet Del Sensor De Corriente HASS 50-S.....	172
Anexo G. Datasheet del sensor UGN 3132.....	175
Anexo H. Manual operacional del cargador/balanceador Accucell-8150 Turnigy	177
Anexo I. Vista del prototipo de módulo de comprobación realizada en AUTOCAD	179

RESUMEN

El proyecto tiene como fin la implementación de un módulo de comprobación de las características de los motores brushless utilizados en los mini UAV. Para su realización se utilizó dos tipos de motores brushless, inrunner y outrunner. Estos motores necesitaron adicionalmente de sus respectivos ESC (controlador electrónico de velocidad) y de baterías que los alimenten.

En la parte de control de la velocidad de los motores se recreó la señal que envía un receptor del radio control a los ESC para hacer girar a los motores, esta recreación estuvo realizada con el microcontrolador Atmega 8 con el cual se varía las velocidades de los motores. Cada motor posee un sensor de efecto Hall UGN 3132 que detecta el magnetismo de un pequeño imán colocado en un disco brindó la medición de RPM a que giran los motores con sus hélices como carga. La corriente de consumo de cada motor se lo hizo por medio de un sensor de corriente de nivel industrial, este sensor es el HASS 50-S.

Las señales enviadas por los sensores son adquiridas por la placa Arduino Uno procesando cada señal, luego de que Arduino se encargue de procesar los datos, los envía por medio de comunicación serial virtual hacia LABVIEW para su visualización y utilizarlos para cálculos adicionales de otros parámetros.

ABSTRACT

The project aims to implement a testing module of brushless motors features used in the mini UAV. During its creation two types of brushless motors were used, inrunner and outrunner. These engines additionally needed their ESC (electronic speed controller) and batteries that feed them.

At the speed control part of the motors, the signal sent from the radio receiver to the ESC to produce the rotation of the motors was recreated; this recreation was performed with the microcontroller Atmega 8 which varies the speed of the motors. Each motor has a Hall Effect sensor UGN 3132 that detects the magnetism of a small magnet placed in a disk measuring RPM provided to rotate with their propellers engines as cargo. The current consumption of each engine made it through a current sensor at industrial level; this sensor is the HASS 50-S.

The signals sent by the sensors are acquired by Arduino Uno board, each signal was processed, after Arduino process the data, it sends them through to LABVIEW using a virtual serial communication for display and use for further calculations of other parameters.

CAPÍTULO I

TEMA

1.1 Antecedentes

En Ecuador, los UAV son parte de un tema muy nuevo e ignorado, que hace poco, dos años atrás, el gobierno inició la inversión en el estudio y la creación de estos aviones no tripulados junto a nuevas Plataformas de gran altitud (dirigibles), ubicados en el CIDFAE, con sus instalaciones localizadas en la ciudad de Ambato. Anteriormente, el gobierno había adquirido 6 Aviones no tripulados de origen Israelí destinados para el resguardo de la frontera norte y la lucha contra el narcotráfico.

En aeromodelismo, especialmente en los mini UAV, actualmente existentes, utilizan motores livianos, que ayuda a la disminución de carga de peso extra, con características comparables a los Motores Glow operados con combustible. Últimamente los motores eléctricos están ganando muchos adeptos, de manera que la balanza se ha ido volcando hacia el lado de estos, gracias a la llegada de las nuevas tecnologías, como son los motores Brushless (motores trifásicos sin escobillas), teniendo ventajas notables a simple vista como: son más amigables con el planeta, no se gastan, son silenciosos, hay mayor seguridad al momento de arrancarlos, se pueden detener y arrancar en vuelo solo con el mando, las baterías cada vez se mejoran reduciendo aún más en peso y precios.

Dentro del Instituto Tecnológico Superior Aeronáutico, en el año 2011 se comenzó con un proyecto de innovación tecnológica, destinada a la construcción de un UAV detallado en sistemas de aviónica, el cual se lo tiene previsto presentarlo en el año 2013. En cuestión de motores brushless en el instituto, no han existido procedimientos ni relaciones con este tipo de motores, llegando hacer un ámbito muy desconocido.

En universidades como la Escuela Politécnica Nacional han empezado el estudio de UAV, pero no aun de los motores brushless. Países como Colombia y México, ya han comenzado a estudiar a estos motores buscando aplicaciones para su desarrollo. Algunos de los temas de estas investigaciones son: "Control de un

Motor Brushless para Aplicación a Vehículos Eléctricos¹” por Diego Langarica Córdoba, “Control de un Motor Brushless con aumento de la resolución mediante Oversampling²” elaborado por Gabriel Gross y por último el “Diseño de control robusto de velocidad de motores brushless para Robótica Aérea³” desarrollado por Jorge Mario Cotte Corredor y Andrés Felipe Moreno.

1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

La investigación sobre UAV es un excelente medio para que el alumno se integre a diferentes y nuevas tecnologías, ampliando su relación en el campo aeronáutico.

Una atrayente forma de contribuir al conocimiento sobre los UAV y elementos que los conforman, es proponer al estudiante, mejores oportunidades y facilitar el acercamiento a la construcción y desarrollo de los mismos, enfocándose en cuestiones específicas relacionados con lo técnico en transmisión, telemetría, control, etc.

Teniendo en cuenta que la aparición de los motores brushless en el campo de los UAV y aeromodelismo no va más allá de los 10 años, se considera necesario la construcción de un módulo de comprobación de características de dichos motores que justifiquen su funcionalidad y rentabilidad, para futuros mini UAV creados por el departamento de investigación del Instituto Tecnológico Superior Aeronáutico, y además brindar conocimientos a los alumnos sobre nuevos ámbitos que cada día van apareciendo.

Este módulo tiene previsto especificar y evidenciar el desenvolvimiento de motores que estén en uso de los UAV, verificando cualidades, tales como: a cuántas revoluciones por minuto gira el motor brushless, también ayudará al técnico, de forma gráfica, con la verificación y seguimiento en el consumo de voltaje y corriente de las baterías Lipo dedicadas en esta área.

¹ <http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis89.pdf>

² <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/2626/1/34499-1.pdf>

³ <http://www.bdigital.unal.edu.co/1896/1/jorgemariocottecorredor.2010.pdf>

Además permite tener un acercamiento a los motores brushless utilizados en los mini UAV, conociendo así más de cerca sus características y estructura de estas nuevas máquinas que de poco a poco van ganando terreno en la aeronáutica, siendo esencial para un Instituto predestinado para el estudio y perfeccionamiento en este ámbito.

Como un atributo adicional se puede mencionar que este módulo puede ser aprovechado en otras asignaturas de la malla de la Carrera de Electrónica Mención Instrumentación y Aviónica, que tengan relación con el estudio de motores eléctricos, prácticas y control de los mismos.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 GENERAL

Implementar un módulo de comprobación de las características de los motores brushless utilizados en los mini UAV, encaminado a la optimización del perfeccionamiento en la investigación y construcción de los mismos.

1.3.2 ESPECÍFICOS

- Indagar y especificar las características de los motores Brushless, ESC's y baterías a través del análisis y estudio de su funcionamiento, para determinar los elementos que intervienen en la construcción del módulo de comprobación.

- Desarrollar instrumentos virtuales de medición en LABVIEW para cada una de las características de los motores, relacionados con el consumo del voltaje, corriente y número revoluciones en el que se desenvuelven los motores.

- Efectuar pruebas en los motores variando sus velocidades, operando el módulo e interfaz con el fin de visualizar distintas reacciones y diferenciaciones en las propiedades de ellos para emitir las respectivas conclusiones y recomendaciones.

1.4 ALCANCE

La creación de un módulo de comprobación de motores brushless, permitirá que el Departamento de Investigaciones del Instituto Tecnológico Superior Aeronáutico vaya reforzándose en la exploración, construcción, y adquisición de los UAV desarrollados en el mismo.

Este módulo de comprobación se puede utilizar también para fortalecer, lo aprendido en las asignaturas de la malla de la Carrera de Electrónica Mención Instrumentación y Aviónica, como son: Máquinas Eléctricas, Microcontroladores, Sistemas Digitales y Paquetes Electrónicos. Para así conseguir familiarizarse con las nuevas tendencias.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 MOTORES BRUSHLESS

2.1.1. CONCEPTO

Un motor Brushless o motor sin escobillas es un motor eléctrico que no dispone de escobillas para realizar la excitación en el rotor necesitando un control electrónico externo para ese fin, los primeros motores sin escobillas fueron los motores de corriente alterna asíncronos.

Esta propiedad de los motores sin escobillas elimina los problemas que traía tener un colector de delgas o un par de anillos rasantes. Estos mecanismos de excitación al rotor disminuyen el rendimiento de los motores debido a varias razones, tales como: producen fricción, desprenden calor y partículas de carbón que se pueden impregnar en el motor pudiendo ser conductor, emanan ruido y necesitan mucho mantenimiento.



Figura 2. 1. Motor Brushless DC

Fuente: http://www.e-radiocontrol.com.ar/images/brushless_motor_hacker.jpg

Los motores brushless tienen muchas ventajas frente a los motores DC con escobillas y frente a los motores de inducción.

Algunas de estas ventajas son:

- Mejor relación velocidad-par motor
- Mayor respuesta dinámica
- Mayor eficiencia
- Mayor vida útil
- Menor ruido
- Mayor rango de velocidad.

Además, la relación par motor-tamaño es mucho mayor, lo que implica que se puedan emplear en aplicaciones donde se trabaje con un espacio reducido.⁴

2.1.2. CONSTRUCCIÓN

Los Motores Brushless son un tipo de motor síncrono. Esto significa que el campo magnético generado por el estator y el campo magnético generado por el rotor gira a la misma frecuencia. No experimentan el "deslizamiento" que se observa normalmente en los motores de inducción.

Los motores brushless pueden tener una configuración de una sola fase, dos fases o tres fases. Este número de fases indicará el número de devanados que tiene el estator del motor.

De estas tres configuraciones, los motores de 3 fases son los más populares y son ampliamente utilizados.

⁴ <http://www.tronic-controls.com/imag/MOTOR%20BRUSHLESS.pdf>

2.1.2.1. ESTATOR

El estator de un motor brushless DC está formado por láminas apiladas de acero y devanados colocados en ranuras a lo largo de la cara interna del estator

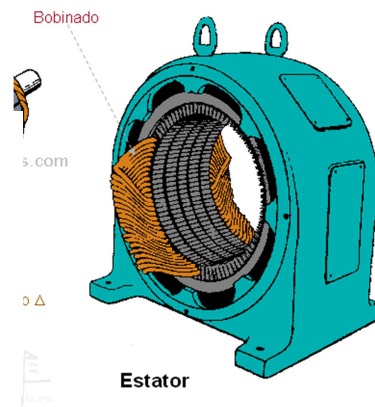


Figura 2. 2. Estator

Fuente: <http://electricidad-basica-transelectric.blogspot.com/>

El estator presenta ciertas similitudes con el de un motor de inducción, sin embargo los devanados se distribuyen de una manera diferente. La mayoría de los motores BLDC tienen tres devanados en el estator conectados en estrella. Cada uno de estos devanados se construye con numerosas bobinas que se interconectan para formar un devanado. Una o más bobinas se colocan en las ranuras y están interconectadas para formar ese devanado. Cada uno de estos devanados se distribuye en la periferia del estator para formar un número par de polos.

Existen dos tipos de motores brushless que se diferencian por la forma de alimentar a los devanados del estator. Estos dos tipos son los motores trapezoidales, también conocidos como brushless DC (BLDC), y los motores brushless sinusoidales, también llamados motores síncronos de imanes permanentes (PMSM).

En los motores BLDC cada fase se alimenta con pulsos rectangulares de tensión desfasados 120° . Estos suelen ser motores de pequeña potencia y de prestaciones dinámicas no muy exigentes. En cambio, los motores PMSM se alimentan con tensión alterna trifásica y son motores de altas prestaciones que se utilizan principalmente en servosistemas.

Como sus nombres indican, el primero da una forma trapezoidal para la fuerza contra electromotriz (FCEM) y el segundo una forma sinusoidal.

Además de la FCEM, la corriente de fase también tiene variaciones trapezoidal y sinusoidal en los respectivos tipos de motor. Esto hace que el par de salida de los motores sinusoidales sea más suave que la de un motor de forma trapezoidal. Sin embargo, este tiene mayor coste.

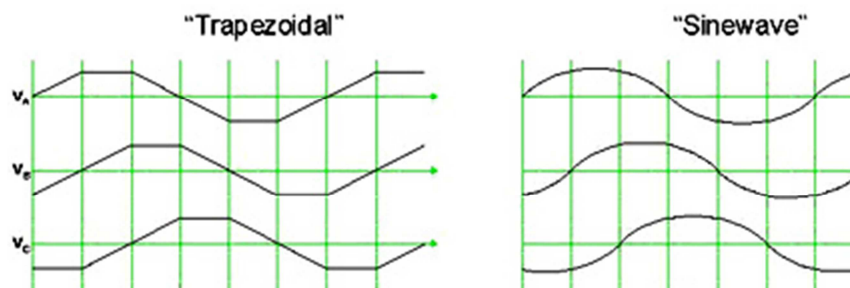


Figura 2. 3. Formas de onda FCEM, Trapezoidal y Sinusoidal

Fuente:

http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/14156/1/Memoria_PFC.pdf

2.1.2.2. ROTOR

Constituye la parte móvil del motor. El rotor es el elemento de transferencia mecánica, ya que de él depende la conversión de energía eléctrica a mecánica. El rotor está formado por imanes permanentes pueden variar de dos a ocho pares de polos que se alternan Norte (N) y sur (S).



Figura 2. 4. Rotor

Fuente: <http://img.tradeindia.com/fp/1/475/854.jpg>

Dependiendo de la densidad de campo magnético requerida en el rotor, se elige el material magnético adecuado para hacer el rotor. Los Imanes de ferrita son los más utilizados hasta ahora para hacer los imanes del rotor. A medida que avanza la tecnología, la aleación de tierras raras está ganando fuerza. Los imanes de ferrita son menos costosos, pero tienen la desventaja de tener una densidad de flujo baja para un volumen determinado. Por el contrario, el material de aleación tiene una alta densidad magnética por unidad de volumen y permite comprimir el rotor para el mismo par.

Además, estos imanes de aleación mejoran la relación de tamaño-peso y dan mayor par motor para un motor del mismo tamaño que usa imanes de ferrita.

Algunos ejemplos de estas aleaciones son el Neodimio (Nd), Samario Cobalto (SmCo) y la aleación de Neodimio de ferrita y el Boro (NdFeB).

2.1.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

En un motor de corriente continua con escobillas, se obtiene par motor gracias a la interacción del campo magnético inductor, estacionario, y la intensidad del arrollamiento inducido giratorio. Campo y corriente eléctrica se mantienen siempre en la misma posición relativa gracias al mecanismo de conmutación formado por

el colector de delgas y las escobillas. En motores de pequeña potencia suele obtenerse la excitación mediante imanes permanentes. En este caso, solo se dispone de dos terminales para el control y la alimentación del motor.

El hecho de tener control directo sobre el par mediante la intensidad de inducido, y sobre la velocidad a través de la tensión, convierte a este motor en el modelo de referencia para la regulación de velocidad. No obstante, la alimentación del inducido a través de las escobillas y el colector presenta muchos inconvenientes, hasta el punto que en algunos casos se hace inviable su utilización.

El motor brushless es similar al de corriente continua con escobillas, con las siguientes salvedades: a) la conmutación se realiza de forma electrónica en lugar de mecánica; b) los imanes permanentes van alojados en el rotor en lugar de en el estator y c) las bobinas van alojadas en el estator, constituyendo un devanado monofásico o polifásico.

Su funcionamiento se basa en la alimentación secuencial de cada una de las fases del estator de forma sincronizada con el movimiento del rotor. De esta forma, los imanes permanentes siguen el movimiento del campo magnético estático, cuyo desplazamiento depende a su vez del giro del rotor.⁵

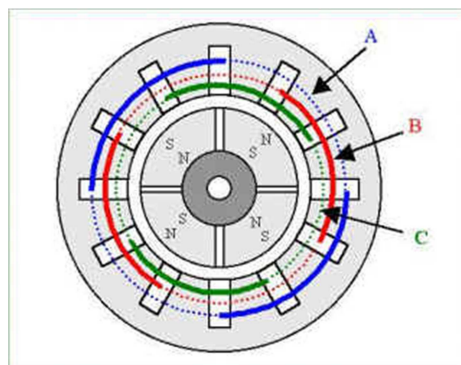


Figura 2. 5. Aspecto de un motor sin escobillas trifásico DC

Fuente: <http://www.brushless-rc.com.ar/Caracteristicas.html>

⁵ <http://www.brushless-rc.com.ar/Caracteristicas.html>

2.1.4 TIPOS DE MOTORES BRUSHLESS

Existen dos tipos de motores brushless según su construcción:

2.1.4.1 INRUNNER

La forma en la que están contruidos estos motores es disponiendo los imanes directamente en torno al eje, mientras que el bobinado es exterior y rodea el eje con los imanes, este tipo de motores tiene la ventaja de proporcionar un alto número de revoluciones por lo que su Kv (revoluciones por voltio) es muy alto, sin embargo esto tiene la desventaja de proporcionar un par muy bajo y si queremos utilizar una hélice grande no tendremos más remedio que emplear una reductora. Los motores inrunner son muy populares en alas Zagi, donde se requiere una hélice pequeña funcionando con un gran número de revoluciones. Aunque el empleo de la reductora se podría tomar como un inconveniente, ya que puede ser una fuente más de averías y requiere de un mantenimiento.⁶

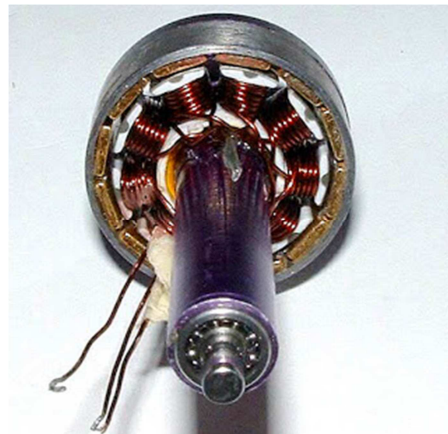


Figura 2. 6. Motor Brushless Inrunner

Fuente: <http://furia-aeroema.blogspot.com>

⁶ <http://furia-aeroema.blogspot.com/2008/03/motores-electricos-inrunner-outrunner.html>

2.1.4.2 OUTRUNNER

Los motores brushless outrunner, los bobinados de cobre se encuentran en la parte interior central, mientras que los imanes están situados en una campana exterior rodeando al bobinado y a la que se conecta el eje, cuando gira la campana, lo hace también el eje, estos motores producen un menor número de revoluciones, sin embargo la campana actúa como un volante de inercia, les dota de un mayor par por lo que dan más potencia sin necesidad del empleo de una reductora, haciéndolos más ligeros, silenciosos y económicos.

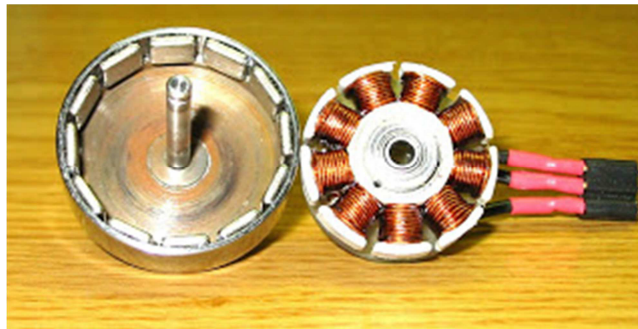


Figura 2. 7. Motor Brushless Outrunner

Fuente: <http://furia-aeroema.blogspot.com>

2.2 ESC (ELECTRONIC SPEED CONTROLLER)

Un ESC (por sus siglas en inglés, controlador electrónico de velocidad), es un circuito eléctrico con el propósito de variar y controlar la velocidad de un motor eléctrico, su dirección y algunos ESC's incluso se los puede utilizar como frenos dinámicos.

Los controladores son usados generalmente modelos de radio control, con mayor frecuencia usada para los motores brushless esencialmente brindando una fuente de tres fases de baja potencia para el motor.

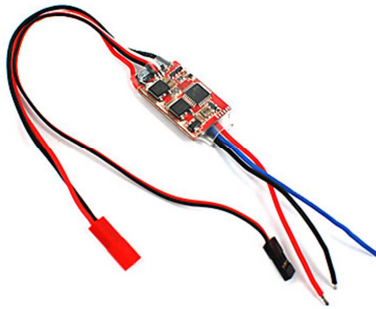


Figura 2. 8. Vista General de un ESC

Fuente: www.lightinthebox.com

2.2.1 PROGRAMACIÓN DE UN ESC BRUSHLESS

Los ESC tienen la capacidad de ser programados con varias opciones para el uso que se le vaya a dar, algunos de esos parámetros son los siguientes:

- **Modo de corte de corriente:** (Total o Progresivo) Cuando el voltaje de la batería alcanza un voltaje mínimo esto indica que está agotada, el regulador corta la corriente del motor eléctrico totalmente o progresivamente en unos segundos para que pueda aterrizar, no es un buen sistema para aprovechar la carga de las baterías puesto que puede provocar accidentes se debe de programar el cronómetro de la emisora para que avise un tiempo de vuelo predefinido.
- **Tipo de batería:** (LIPO o NIMH) suelen detectar el número de células que tiene y saben el voltaje de corte por lo que hay que especificar qué tipo de baterías se usa.
- **Freno motor:** consiste en bloquear en la medida de lo posible el giro del motor cuando cortamos la potencia, hay reguladores con varios niveles de freno. El freno máximo se utiliza en hélices plegables en veleros, otros niveles de frenado se pueden utilizar para hacer acrobacias.

- **Timing:** o frecuencia, está relacionado con las Kv del motor, hay motores grandes de 400 Kv y inrunner de 3000 Kv, suelen tener 3 o 4 posibilidades.
- **Modo potencia:** (Directo o Progresivo), dada la potencia de algunos motores si se aplica todo el voltaje instantáneamente estando parados puede romper reductoras, consumir demasiada corriente, en modo progresivo se le da un poco más de tiempo al motor al dar la máxima potencia.

2.2.2 BEC (BATTERY ELIMINATOR CIRCUIT)

Un Circuito Eliminador de Batería (BEC), es un circuito electrónico diseñado para repartir energía eléctrica a otro circuito sin la necesidad de otra batería adicional.

En un modelo a radiocontrol, el BEC es parte del Controlador Eléctrico de Velocidad (ESC). El BEC permite a tal modelo llevar solo una batería (Batería para el movimiento) evitando usar dos (movimiento y una batería separada para la operación del equipo de Radiocontrol). Un ESC equipado con BEC usualmente incorpora un *Corte de Bajo Voltaje* (LVC), circuito el cual sensa la caída de voltaje cuando la batería tiene una pequeña carga restante. Es cortada la energía al motor con el fin de proveer a los servos del control de dirección la suficiente energía para que sean capaces de llevar al modelo seguro de vuelta a su operador. Sin esta prestación, todo el control sobre el modelo estaría perdido cuando la batería se agote, probablemente resultando en destrucción del modelo. En algunos casos el BEC es parte del receptor del Radiocontrol, en vez de ser parte del ESC.

Los BEC pueden ser de dos tipos de presentaciones, de tipos interno o externo, se utiliza normalmente los BEC externos cuando el ESC es de un gran amperaje debido a que no lo traen incorporados, o por motivos operacionales es necesario tenerlos separados por motivos de baterías o interferencias. Mientras tanto, los BEC internos (BEC+ESC), son más habituales comercialmente, incluyendo en un solo dispositivo ambos circuitos.

Aparte de estos dos tipos de presentaciones existen dos tipos de BEC dependiendo de su forma de regulación de voltaje. Los BEC Lineales, son los más sencillos por su forma de reducción de voltaje, lo hacen disipando el voltaje sobrante en forma de calor. Utilizados para voltajes de entradas pequeños debido a su rendimiento. El otro tipo de BEC es el conmutado o switching su funcionamiento es igual a una fuente de alimentación de un computador, el desperdicio de energía es muy bajo logrando alcanzar rendimientos del 90%. Una desventaja de este tipo de BEC es que deben ser construidos con elementos de calidad ya que pueden provocar ruido al receptor, para esto es necesario colocar ferrita en el colector que va hacia el receptor.

Cuando las variaciones de corriente son importantes debido a servos potentes o en gran número, el filtrado del BEC puede ser insuficiente para aportar esa corriente de forma "instantánea", por lo que una medida "popular" es añadir un condensador a la alimentación conectado en la alimentación de un canal del receptor que quede libre (o en la alimentación del mismo directamente). El valor de este condensador no es crítico, son habituales valores de 1000 a 4700uF/10V (puede estimarse 1000uF por Amperio).⁷

2.3 BATERÍAS

Se denomina batería, batería eléctrica, acumulador eléctrico, al dispositivo que almacena energía eléctrica, El fundamento de las pilas y acumuladores es la transformación de la energía química en eléctrica, mediante reacciones de oxidación-reducción producidas en los electrodos, que generan una corriente de electrones.

⁷ <http://tallerdedalo.es/web/BEC>



Figura 2. 9. Diferentes tipos de baterías

Fuente: http://www.ceiarteunref.edu.ar/badarte/sites/default/files/bateria_00.jpg

2.3.1 FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de una pila es sencillo, consiste básicamente en introducir electrones en uno de los extremos de un alambre y extraerlos por el otro. La circulación de los electrones a lo largo del alambre constituye la corriente eléctrica. Para que se produzca, hay que conectar cada extremo del alambre a una placa o varilla metálica sumergida en un electrolito que suele ser una solución química de algún compuesto iónico.

Cuando ese compuesto se disuelve, las moléculas se dividen en iones positivos y negativos, que se mantienen separados entre sí por efecto de las moléculas del líquido. El electrolito que utilizó Volta era ácido sulfúrico; cada una de sus moléculas, al disolverse en agua, se descompone en dos protones H^+ (iones positivos) y un ion sulfato SO_4^- (ion negativo).

Las varillas metálicas de cobre y cinc constituyen los electrodos, que deben ser sumergidos en el electrolito sin que lleguen a entrar en contacto. La placa de cobre es el electrodo positivo o ánodo y la placa de cinc el electrodo negativo o cátodo.⁸

⁸ <http://www.portalplanetasedna.com.ar/pilas.htm>



Figura 2. 10. Configuración interna de una batería

Fuente:

http://www.ceiarteunref.edu.ar/badarte/sites/default/files/bateria_00.jpg

2.3.2 BATERÍAS EN LOS MINI UAV Y AEROMODELISMO

En el mundo de los mini UAV y aeromodelismo, especialmente en la parte eléctrica, las baterías han sido las promotoras en un auge por lo eléctrico, Antiguamente, un inconveniente de las baterías en este tipo de modelos eléctricos, era la corta duración de las baterías y por lo tanto una baja autonomía y desarrollo de los aviones, así como también la poca potencia que entregaban a los motores y su elevado peso. En la actualidad existen baterías capaces de entregar la potencia necesaria para poder mover aviones de varios kilos y con autonomías similares a los motores de combustión, reduciendo su peso.

En el mercado existen 4 tipos de baterías que se utilizan en los mini UAV y aeromodelismo:

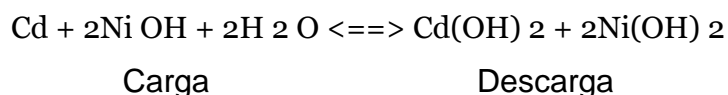
- Níquel Cadmio (Ni-Cd)
- Níquel Hidruro Metálico (Ni-Mh)
- Iones de litio (Li-ion)
- Polímero de Litio (Li-po)

Entre estos tipos de baterías de Ni-Mh y Li-po son las más utilizadas.

2.3.2.1 BATERÍAS DE NÍQUEL CADMIO (NI-CD)

Las baterías de Níquel Cadmio (abreviadas Ni-Cd), son baterías recargables que tiene uso doméstico e industrial. En su interior están formadas por un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de un compuesto de cadmio. El electrolito es de Hidróxido de Potasio, esta configuración es la que permite la recarga de la batería una vez agotada la batería, para su reutilización.

La reacción química que se produce es:



Fórmula 2.1. Reacción química producida en una batería de Ni-Cd

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_de_n%C3%ADquel_cadmio

Cada célula de Ni-Cd entrega voltaje de 1,2V y una capacidad que oscila entre los 0,5 y 2,3 Ah.



Figura 2. 11. Baterías de Níquel Cadmio

Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_de_n%C3%ADquel_cadmio

2.3.2.1.1 PARÁMETROS DE LAS BATERÍAS NI-CD

- **FUNCIONAMIENTO EN DESCARGA**

La capacidad real de una batería Ni-Cd (producto de intensidad consumida por el tiempo de descarga) sólo es la nominal si la descarga se realiza a 20°C y a la intensidad nominal que es el resultado de dividir por 10 la capacidad nominal.

$$I_{10} = \frac{C_{10}}{10}$$

Fórmula 2.2. Fórmula para el cálculo de la Intensidad Nominal de una batería de Ni-Cd

Fuente:

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/101a200/ntp_104.pdf

La capacidad efectiva aumenta con la temperatura y disminuye con la intensidad de la corriente de descarga.

- **INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA**

Según el tipo y fabricante las baterías de Ni-Cd pueden descargarse en un margen comprendido entre -40 / -20°C hasta 45°/ 60°C. La capacidad nominal se establece a 20°C; a temperaturas superiores hay un ligero aumento de la capacidad efectiva (no llega al 5% a 40°C), pero a temperaturas bajo cero hay una disminución importante.

Tabla 2. 1. Influencia de la temperatura en la descarga

T (°C)	0	-10	-20
Pérdida de capacidad (% sobre C_{10})	5%	12%	25%

Fuente:

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/101a200/ntp_104.pdf

Elaborado por: Santiago Cantos

- **INFLUENCIA DE LA CORRIENTE DE DESCARGA**

Si la intensidad es inferior a la nominal, apenas hay influencia en la capacidad. A intensidades de descarga superiores a la nominal, la capacidad disminuye.

Tabla 2. 2. Influencia de la corriente de descarga

Corriente de descarga	Capacidad Disponible (% sobre C_{10})
I_{10}	100
2 I_{10}	98
10 I_{10}	90
20 I_{10}	75
50 I_{10}	50

Fuente:

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/101a200/ntp_104.pdf

Elaborado por: Santiago Cantos

La intensidad continua máxima admisible está comprendida entre 40 y 100 veces I_{10} según modelo y fabricante.

2.3.2.1.2 EFECTO MEMORIA

El efecto memoria es un fenómeno que reduce la capacidad de las baterías con cargas incompletas. Se produce cuando se carga una batería sin haber sido descargada del todo: se crean unos cristales en el interior de estas baterías, a causa de una reacción química al calentarse la batería, bien por uso o por las malas cargas. Para prevenirlo no hace falta esperar a descargar totalmente la batería antes de realizar una carga; basta con que una de cada pocas cargas sea completa.

2.3.2.1.3 PASIVACIÓN

Es un fenómeno similar al efecto memoria que afecta a las baterías de [ión](#) de litio. La pasivación se produce cuando se deja la batería mucho tiempo sin usar o se hacen pequeñas cargas. La carga y descarga completa soluciona este efecto. La pasivación es una fina película de cloruro de litio (LiCl) en la superficie del ánodo (incluso es beneficiosa ya que evita su autodescarga). Va desapareciendo conforme la batería va siendo usada. Si la pasivación es excesiva, podría caer el voltaje por debajo del funcionamiento, si la energía requerida al principio de funcionamiento es muy grande (la pasivación se puede considerar como una resistencia interna de la batería), sólo entonces serían necesarias cargas y descargas.

2.3.2.1.4 VIDA ÚTIL

La repetición de ciclos de carga y descarga destruye progresivamente la estructura interna de la batería de forma que su vida útil queda limitada aproximadamente a 500 ciclos de carga y descarga completa. Se considera que una batería ha alcanzado el final de su vida útil cuando su capacidad real desciende al 80% de la nominal.

La vida útil puede alargarse si la batería no se descarga nunca por debajo del 50% y se evitan las sobre-descargas, pudiéndose alcanzar los 1500 ciclos en

estas condiciones. En cualquier caso la vida útil dependerá de las condiciones de uso.

2.3.2.2. BATERÍAS DE NIQUEL-HIDRURO METALICO (NI-MH)

La batería de Níquel-Hidruro metálico (Ni-MH) es un tipo de batería recargable que tiene en su interior un ánodo de hidróxido de níquel y su cátodo es de una aleación de hidruro metálico, eliminando el cadmio que es costoso y es un peligro para el medio ambiente. A la vez, posee una mayor capacidad de carga y un menor efecto memoria. Por el contrario, presentan una mayor tasa de auto-descarga que las de Ni-Cd (un 30% mensual frente a un 20%).



Figura 2. 12. Baterías de Níquel Hidruro Metálico

Fuente: <http://www.directindustry.es/prod/power-sonic/baterias-ni-mh-19906-438155.html>

Cada pila de Ni-MH puede proporcionar un voltaje de 1,2 voltios y una capacidad entre 0,8 y 2,9 amperio-hora. Este tipo de baterías se encuentran menos afectadas por el llamado efecto memoria, en el que en cada recarga se limita el voltaje o la capacidad (a causa de un tiempo largo, una alta temperatura, o una corriente elevada), imposibilitando el uso de toda su energía.

Los ciclos de carga de estas pilas oscilan entre las 500 y 700 cargas, algunos de sus inconvenientes son las "altas" temperaturas que alcanzan durante la carga o el uso.

2.3.2.2.1 EXCESO DE CARGA

La carga en exceso puede también ser perjudicial. Las baterías Ni-MH deben ser cargadas cuando sea necesario. Una carga de 24 horas cuando apenas algunas horas bastarían, puede perjudicar considerablemente la vida de una batería.

2.3.2.2.2. AUTO-DESCARGA

Las baterías sufren también de un efecto de auto-descarga, en otras palabras pierden alguna energía cuando no son utilizadas.

Por lo general, las baterías no consiguen mantener toda la energía que contienen. Una batería de Ni-MH tiene una tasa de auto-descarga mayor del 10% en 24 horas, debido a los átomos de Hidrógeno en fuga. Si la auto-descarga es muy alta la batería puede estar dañada. Uno de los problemas puede ser un separador dañado, lo que es irreparable. Normalmente, una batería con una tasa de auto-descarga superior a 30% al día deberá ser reciclada.

2.3.2.3. BATERÍA DE IONES DE LITIO (LI-ION)

La batería de iones de litio, también denominada batería Li-Ion, diseñadas internamente como electrolito, una sal de litio que procura los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo.

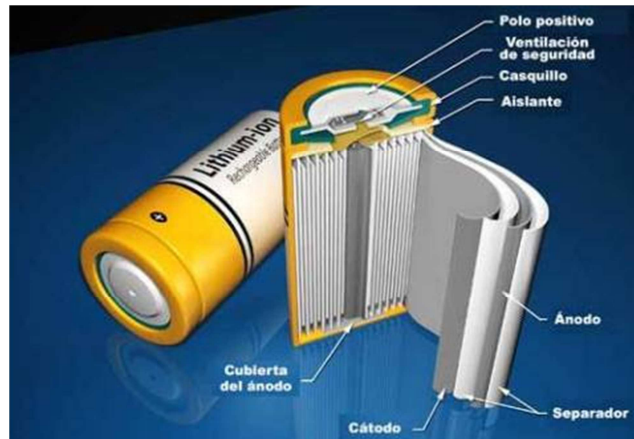


Figura 2. 13. Estructura interna de una batería de Iones de Litio

Fuente:

<http://www.taringa.net/posts/info/11154207/Mitos-y-verdades-sobres-las-baterias-Litio-Ion.html>

Las propiedades de las baterías de Li-ion, como la ligereza de sus componentes, su elevada capacidad energética y resistencia a la descarga, junto con la ausencia de efecto memoria o su capacidad para funcionar con un elevado número de ciclos de regeneración, han permitido el diseño de acumuladores livianos, de pequeño tamaño y variadas formas, con un alto rendimiento, especialmente adaptados a las aplicaciones de la industria electrónica de gran consumo. Desde la primera comercialización se ha popularizado en aparatos como teléfonos móviles, agendas electrónicas, ordenadores portátiles y lectores de música.

Sin embargo, su rápida degradación y sensibilidad a las elevadas temperaturas, que pueden resultar en su destrucción por inflamación o incluso explosión, ha limitado la extensión de su uso a otras aplicaciones.

2.3.2.3.1. CUIDADOS DE LAS BATERÍAS DE IONES DE LITIO

- **CARGA**

Es imprescindible un cargador que utilice la técnica CC/CV (Corriente Constante / Voltaje Constante. Se le aplica una intensidad constante hasta alcanzar un voltaje de 4,1V o 4,2V, nunca se debe de exceder de este voltaje, dependiendo de los modelos de batería. En cuanto a la temperatura, las baterías deben estar en un rango de 0C° a 45C°. Las baterías de iones de litio se cargaran a un 90% de su capacidad nominal con una corriente de carga máxima de 0,5C – 1,5C entre 70 y 120 minutos, en caso que el voltaje sea inferior a 3V se debe usar una intensidad de 0,1C o inferior.

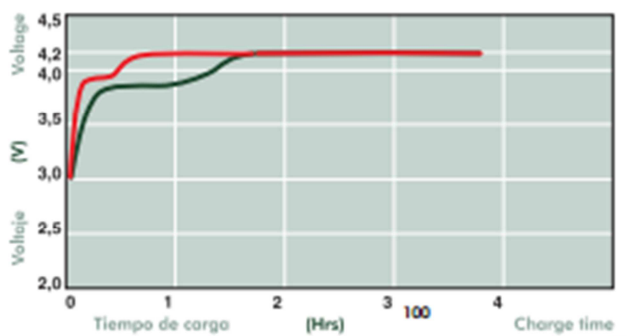


Figura 2. 14. Especificaciones de Carga

Fuente: <http://www.ukai.com/documentos/00068-LNK02056.pdf>

- **DESCARGA**

En este tipo de baterías se la considera descargada cuando su voltaje es inferior a los 2,75V, y la intensidad máxima de descarga continua debe ser inferior o igual a 1C. La temperatura a que se deben descargar es un rango de 20°C a 60°C. Se debe evitar que el voltaje de la batería descienda a 3V durante la descarga.

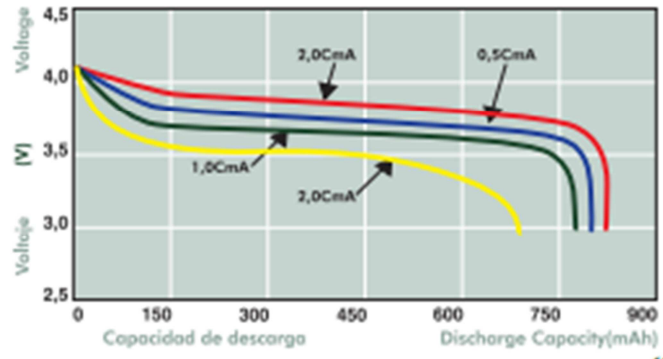


Figura 2. 15. Especificaciones de Descarga

Fuente: <http://www.ukai.com/documentos/00068-LNK02056.pdf>

2.3.2.4. BATERÍAS LIPO

Las baterías de Polímero de Litio (Lithium Polymer - 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.

En comparación con las Níquel-Cadmio (Ni-Cd) y Níquel Hidruro Metálico (Ni-Mh) las LiPo son muy superiores por su:

- Gran capacidad de carga
- Peso reducido
- Posibilidad de suministrar altos amperajes.



Figura 2. 16. Diferentes Baterías Lipo

Fuente: <http://www.aeropiélagos.es/ARCHIVOS/Descargas/LIPOS.pdf>

2.3.2.4.1. CELDAS

Las baterías LiPo están formadas por celdas (unidades elementales), dependiendo de cómo conectemos las celdas que componen la batería tendremos más o menos nivel de tensión. Las celdas se pueden conectar de dos formas, en serie o en paralelo.

Cada elemento o celda tiene un voltaje de 3.7V de valor nominal, agrupándoles de las distintas formas de conexión, el voltaje total de la batería cambia.

- **CONEXIÓN DE CELDAS EN SERIE**

Cuando se conecta en serie un número "N" de celdas, por todas ellas circula la misma intensidad. Como todas las celdas son además iguales, la caída en bornes del conjunto o pack será la suma de N tensiones iguales. De forma que se puede decir, que al conectar N celdas iguales en serie, es igual a multiplicar por N el valor de la tensión de una celda.

- **1S** = 1 celda = 3,7 voltios
- **2S** = 2 celdas = 7,4 voltios
- **3S** = 3 celdas = 11,1 voltios

- **CONEXIÓN DE CELDAS EN PARALELO**

Las celdas también se pueden conectar en paralelo. Lo que ocurre en la conexión en paralelo de varias celdas, es que los extremos de cada celda están conectados eléctricamente a un mismo punto eléctrico, es decir, todos los extremos positivos de las celdas son como un mismo punto eléctrico y los negativos también, por lo que la tensión entre ambos extremos del conjunto de celdas en paralelo, es la misma que la de una sola celda.

Por ejemplo, si se tiene tres celdas con conexión en paralelo, la tensión en bornes del pack será de 3.7V (lo mismo que si tenemos 1 celda).

Además, la corriente eléctrica que circula por cada elemento de las conexiones en paralelo no es la que circula por todos, sino que cada elemento es recorrido por una intensidad determinada. No obstante, en el caso de las baterías los elementos a conectar en paralelo deben ser iguales, y por lo tanto, en este caso las intensidades que recorren cada uno de los elementos tendrán además el mismo valor. Con esto se consigue duplicar su capacidad y lo que es más importante duplicar el amperaje que podemos obtener del conjunto.

2.3.2.4.2. VELOCIDAD DE DESCARGA

La velocidad de descarga se podría definir como la rapidez con la que la batería se puede descargar de forma segura, es decir, la cantidad de amperios que la batería puede suministrar durante una hora de forma continua, y que normalmente viene expresada en referencia a su capacidad, como 15C, 20C, etc. Por ejemplo si la batería es 1C y 2200mAh, quiere decir que es capaz de suministrar 2,2 amperios en una hora. Si a esta batería le pedimos el doble de intensidad (4,4 amperios), se descargaría en media hora, si le pedimos 8,8A se descargaría en 15 minutos y así sucesivamente. Otro ejemplo, si tenemos una Lipo de 7,4V, 5000mAh y 10C; sería capaz de darnos 10×5 amperios, es decir, 50 amperios; pero suministrando esta corriente de consumo nos duraría 6 minutos.

2.3.2.4.3. DURACIÓN DE UNA BATERÍA

Para saber el tiempo que dura una batería teóricamente, conocida su capacidad y su velocidad de descarga (y suponiendo que el consumo que se le va a exigir es este valor máximo de descarga de forma continua); se tiene la siguiente relación que nos da una aproximación:

$$Tiempo_{min} = \frac{Capacidad\ de\ la\ batería(Amp * Min)}{Velocidad\ de\ Descarga\ (Amp)}$$

Fórmula 2.3. Fórmula para el cálculo del tiempo de duración de una batería

Fuente: <https://sites.google.com/site/mikuadricoptero/home/5-generalidades/5-010-lypos>

Esta corriente máxima teórica que la batería es capaz de suministrar; luego está la corriente que realmente suministra la batería en cada momento en función de lo que solicitemos de ella, ya que la carga o el consumo no es constante todo el tiempo; y además sería inviable que la batería estuviera entregando de forma continua su corriente máxima en todo momento.

2.3.2.4.4. CARGA

Las baterías de LiPo necesitan unos cargadores especiales, en los que hay que seleccionar manualmente los siguientes parámetros:

- El número de celdas o su equivalente en voltaje.
- La intensidad de carga. Normalmente **1C** es de decir una LiPo de 1700 mAh debe cargarse a 1,7 amperios o menos.

El ciclo de carga tiene 2 zonas perfectamente diferenciadas:

- Durante la primera parte la carga se efectúa a “corriente constante”, hasta alcanzar 4,2 voltios por celda.
- A partir de este momento se mantiene la tensión de carga y va disminuyendo paulatinamente la intensidad, hasta que la intensidad llega a un 10% de la inicial, momento en que corta automáticamente.

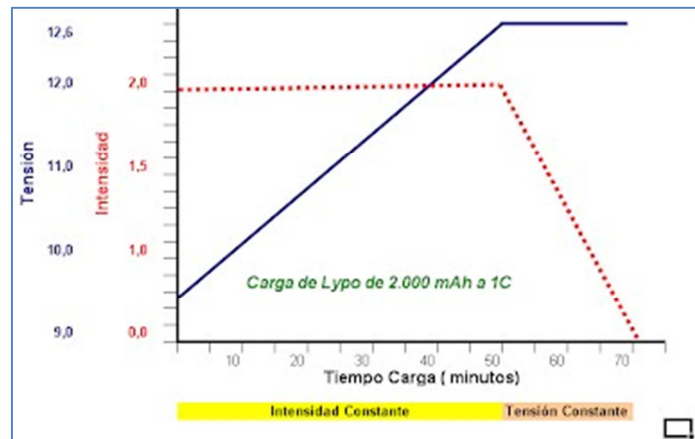


Figura 2. 17. Especificaciones de Carga

Fuente: <https://sites.google.com/site/mikuadricoptero/home/5-generalidades/5-010-lypos>

2.3.2.4.5. DESCARGA

Una de las diferencias principales de las baterías tipo LiPo frente a las baterías tradicionales es su Curva de Descarga.

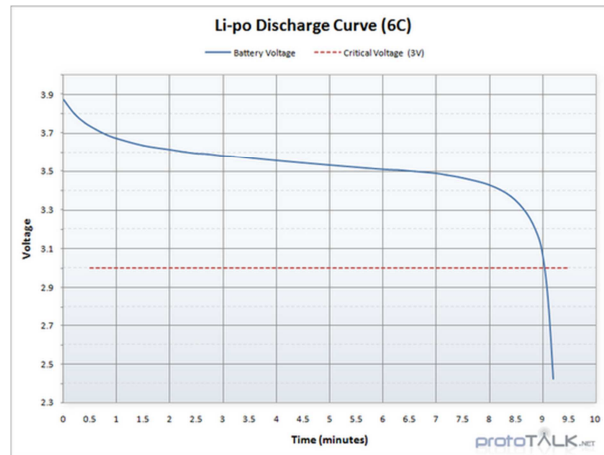


Figura 2. 18. Curva de Descarga

Fuente: <https://sites.google.com/site/mikuadricoptero/home/5-generalidades/5-010-lypos>

La figura 2.18 representa la tensión de una celda en condiciones de consumo constante. Una vez pasado los primeros segundos, la tensión baja muy lentamente, (Aproximadamente durante el 85% del tiempo total). A partir de este momento la tensión se “derrumba” entrando rápidamente en la Zona Crítica (menos de 3 voltios por celda).

2.3.2.4.6. DESEQUILIBRIO Y EQUILIBRIO EN LAS CELDAS

Por diferencias de fabricación o por algunas otras causas, normalmente, unas celdas se descargan antes que las otras.

Después de varias cargas y descargas las diferencias de tensión entre las celdas pueden ser importantes, por lo que conviene sistemáticamente comprobar el estado de cada celda

Para saber si un pack de baterías LiPo está desequilibrado basta con medir con un voltímetro, la tensión en bornes de cada elemento de ese pack, cuando el pack está cargado. Si existe una diferencia superior a 0,1V entre elementos entonces se considera que hay desequilibrio.

Paquete Desequilibrado

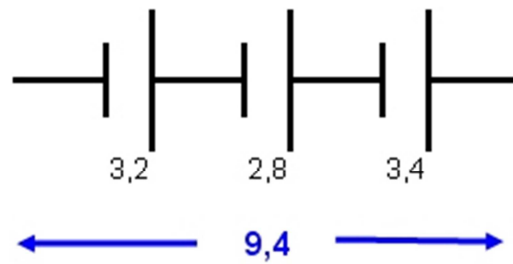


Figura 2. 19. Celdas de Lipo Desequilibradas

Fuente: <https://sites.google.com/site/mikuadricoptero/home/5-generalidades/5-011-lypos-2>



Figura 2. 20. Balanceador

Fuente: <https://sites.google.com/site/mikuadricoptero/home/5-generalidades/5-010-lypos>

El balanceador puede trabajar simultáneamente con el cargador o independientes. Se conectan al conector de equilibrado y su funcionamiento es muy sencillo.

Conectado con el cargador controlan el voltaje de cada celda y derivan una parte de la corriente de carga de las celdas con voltaje más alto. Cuando trabaja

de forma autónoma lo que hace es ir descargando las celdas de tensión más elevadas. En general las corrientes que puede derivar o descargar son pequeñas.

2.4. SENSOR DE EFECTO HALL⁹

El sensor de efecto Hall o simplemente sensor Hall o sonda Hall (denominado según Edwin Herbert Hall) se sirve del efecto Hall para la medición de campos magnéticos o corrientes o para la determinación de la posición.

Si fluye corriente por un sensor Hall y se aproxima a un campo magnético que fluye en dirección vertical al sensor, entonces el sensor crea un voltaje saliente proporcional al producto de la fuerza del campo magnético y de la corriente. Si se conoce el valor de la corriente, entonces se puede calcular la fuerza del campo magnético; si se crea el campo magnético por medio de corriente que circula por una bobina o un conductor, entonces se puede medir el valor de la corriente en el conductor o bobina.

Si tanto la fuerza del campo magnético como la corriente son conocidas, entonces se puede usar el sensor Hall como detector de metales.

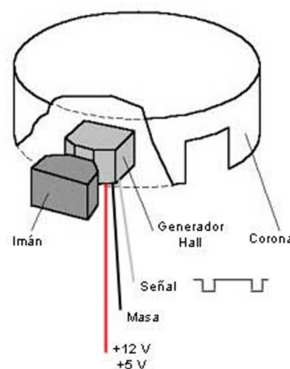


Figura 2. 21. Sensor de Efecto Hall

Fuente: <http://autocity.com/img/manuales/Sensorhall.jpg>

⁹ http://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_de_efecto_Hall

2.4.1. APLICACIONES DE LOS SENSORES HALL

- Mediciones de campos magnéticos (Densidad de flujo magnético).
- Mediciones de corriente sin potencial (Sensor de corriente).
- Emisor de señales sin contacto.
- Aparatos de medida del espesor de materiales.

Como sensor de posición o detector para componentes magnéticos los sensores Hall son especialmente ventajosos si la variación del campo magnético es comparativamente lenta o nula. En estos casos el inductor usado como sensor no provee un voltaje de inducción relevante.

2.5. ARDUINO¹⁰

Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios.

El hardware consiste en una placa con un microcontrolador Atmel AVR y puertos de entrada/salida. Los microcontroladores más usados son el Atmega168, Atmega328, Atmega1280, ATmega8 por su sencillez y bajo coste que permiten el desarrollo de múltiples diseños. Por otro lado el software consiste en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje de programación Processing/Wiring y el cargador de arranque (*boot loader*) que corre en la placa.

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.

¹⁰ <http://es.wikipedia.org/wiki/Arduino>

2.5.1. ARDUINO UNO¹¹

El Arduino Uno es una placa con un microcontrolador basado en el Atmega 328. Tiene 14 entradas/salidas digitales (de las cuales 6 pueden ser usadas como salidas de PWM), 6 entradas analógicas resonador cerámico de 16 MHz, una conexión USB, un Jack de poder, un cabezal ICSP y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para soportar al microcontrolador, simplemente conectándolo a un computador con un cable USB o energizándolo con un adaptador de AC a DC o batería para iniciarlo.

El Arduino Uno difiere de las placas anteriores en que no usa el chip driver FTDI USB a serial. En vez de eso, cuenta con un Atmega16U2 programado como un convertidor USB a serial.

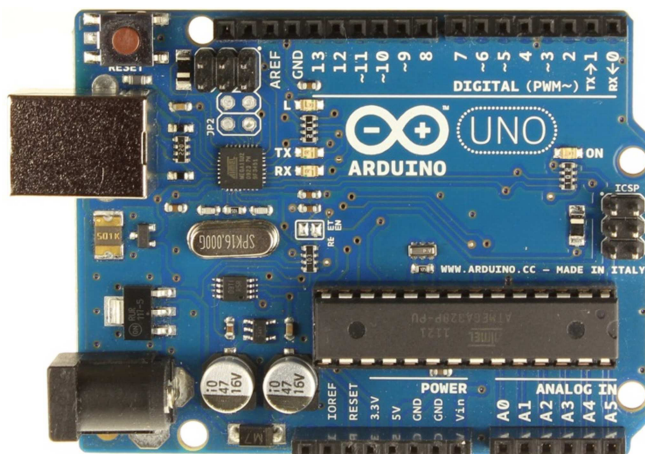


Figura 2. 22. Vista frontal del Arduino Uno R3
Fuente: <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>

“Uno” en italiano nombrado así para marcar el lanzamiento del Arduino 1.0. El Uno y la versión 1.0 serán las versiones de referencia de Arduino, adelantando. El

¹¹ <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>

Uno es lo último en las series de placas USB de Arduino, y el modelo de referencia para la plataforma Arduino.

Tabla 2. 3. Características del Arduino UNO

Microcontrolador:	ATmega328
Voltaje Operacional	5V
Voltaje de entrada (Recomendado)	7-12V
Entrada de Voltaje (Limite)	6-20V
E/S Digitales	14 (of which 6 provide PWM output)
Entradas Analógicas	6
Corriente DC por E/S	40 mA
Corriente DC para pines de 3.3V	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328) of which 0.5 KB
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Velocidad de Reloj	16 MHz

Fuente: <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>

Elaborado por: Santiago Cantos

2.6. LABVIEW

2.6.1. INTRODUCCIÓN

LABVIEW es acrónimo de Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench, es una plataforma desarrolla por National Instruments, basado en lenguaje de programación gráfica (Lenguaje G).

LABVIEW constituye un revolucionario sistema de programación gráfica para aplicaciones que involucren adquisición, control, análisis y presentación de datos. Las ventajas que proporciona el empleo de LABVIEW se resumen en las siguientes:

- Se reduce el tiempo de desarrollo de las aplicaciones al menos de 4 a 10 veces, ya que es muy intuitivo y fácil de aprender.
- Dota de gran flexibilidad al sistema, permitiendo cambios y actualizaciones tanto del hardware como del software.
- Da la posibilidad a los usuarios de crear soluciones completas y complejas.
- Con un único sistema de desarrollo se integran las funciones de adquisición, análisis y presentación de datos.
- El sistema está dotado de un compilador gráfico para lograr la máxima velocidad de ejecución posible.
- Tiene la posibilidad de incorporar aplicaciones escritas en otros lenguajes.

Recomendado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido, pues acelera la productividad.

LABVIEW posee extensas librerías de funciones y subrutinas. Además de las funciones básicas de todo lenguaje de programación, LABVIEW incluye librerías específicas para la adquisición de datos, control de instrumentación VXI, GPIB y comunicación serie, análisis presentación y guardado de datos.

LABVIEW posee una extensa biblioteca de funciones, entre ellas, aritméticas, comparaciones, conversiones, funciones de entrada/salida, de análisis, etc.

Las estructuras, similares a las declaraciones causales y a los bucles en lenguajes convencionales, ejecutan el código que contienen de forma condicional o repetitiva (bucle for, while, case, etc).

Los cables son las trayectorias que siguen los datos desde su origen hasta su destino, ya sea una función, una estructura, un terminal, etc. Cada cable tiene un color o un estilo diferente, lo que diferencia unos tipos de datos de otros.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DEL TEMA

3.1. PRELIMINARES

En este capítulo se explica de una manera clara y entendible paso a paso la implementación del módulo de comprobación de las características de los motores brushless utilizados en los mini UAV. El cual contiene dos motores brushless (Inrunner y Outrunner), cada uno conectado a su respectivo ESC (controlador de velocidad electrónico) y batería de alimentación. Los controladores de velocidad están gobernados por el microcontrolador Atmega 8 con el cual se varía las velocidades de los motores. Ambos motores poseen un sensor de efecto Hall UGN 3132 y un disco de muestras que sirve para la medición de RPM con carga, al igual un sensor de corriente basado en el efecto Hall HASS 50-S para la medición de la corriente consumida por parte de ellos.

Los pulsos obtenidos del sensor de efecto Hall UGN 3132 son adquiridos por la tarjeta Arduino Uno, en el cual se realiza un contador de frecuencia con su respectiva transformación de frecuencia a RPM. A su vez la señal de voltaje enviada por el sensor de corriente al igual que los pulsos del sensor UGN 3132 son receptados en la placa Arduino Uno. En el Sketch de Arduino se incluyó los cálculos de conversión de ese voltaje recibido a la corriente correspondiente.

Y finalmente, mediante el software LABVIEW, se crea una interfaz gráfica en la cual se mostró todos los valores obtenidos de los sensores y además se incluye cálculos para obtener más variables de los motores. El LABVIEW mantiene una comunicación serial interna con la tarjeta Arduino Uno para recibir estos valores en tiempo real.

3.2. LISTA DE COMPONENTES Y SOFTWARE UTILIZADOS EN EL MÓDULO DE COMPROBACIÓN.

Los componentes utilizados para la implementación del módulo de comprobación de las características de los motores brushless utilizados en los mini UAV, son los siguientes:

- Motor Brushless Inrunner 3600kv Exceed-Rc
- Motor Brushless Outrunner 1500kv Turnigy
- Controlador de Velocidad Esc 60A HobbyKing
- Controlador de Velocidad Esc 30A UBEC HobbyKing
- Batería Li-po 3S 11.1V 5000mAh 20C SkyLipo
- Cargador/Balanceador de Baterías Accucell-8150 Turnigy
- Tarjeta Arduino Uno
- Atmega 8
- Sensor UGN 3132
- Sensor HASS 50-S
- PC

Software utilizado:

- BASCOM AVR
- Arduino
- LABVIEW
- Proteus (Isis, Ares)

3.3 ACONDICIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES

Los todos los componentes que intervinieron en la construcción del módulo fueron importados. Al llegar los elementos, se debió acondicionarles para su funcionamiento; este acondicionamiento consistió en soldar los conectores necesarios que hacían falta en sus terminales.

Los terminales que se necesitaron fueron: los terminales Xt60 para las baterías y los conectores de oro de 3,5mm para los motores y controladores de velocidad.



Foto 3. 1. Terminales Xt60.

Elaborado por: Santiago Cantos

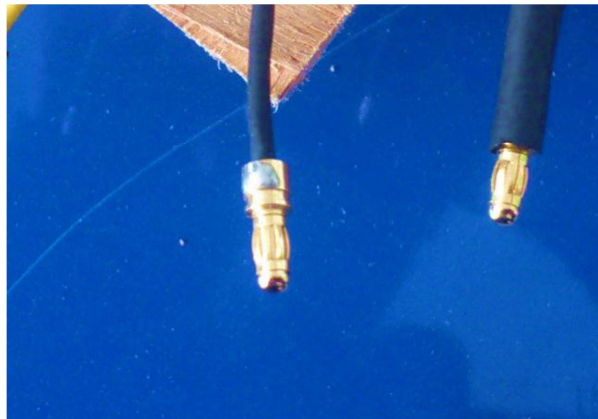


Foto 3. 2. Conectores de oro de 3,5mm.

Elaborado por: Santiago Cantos

3.3.1. CONEXIONES ENTRE LOS MOTORES BRUSHLESS, CONTROLADORES DE VELOCIDAD Y BATERÍAS

Los motores brushless necesitan elementos adicionales para su funcionamiento, la interacción entre todos estos elementos harán que el motor trabaje satisfactoriamente. El ESC, batería y receptor del radio control, son los principales componentes para que el motor pueda trabajar.

El orden en que se deben ser conectados estos elementos es de la siguiente manera: lo terminales del conector van conectados al controlador de velocidad y este a su vez a las batería. Además, del controlador de velocidad, existen los cables que son destinados para la conexión del receptor.

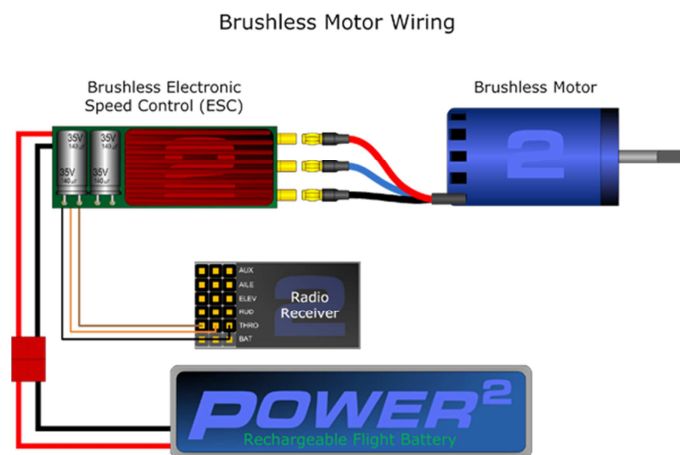


Figura 3. 1. Forma de conexión entre el motor brushless, Esc, batería y receptor

Fuente: <http://2bfly.com/knowledgebase/electronic-speed-controls/single-engine-esc-wiring/>

3.3.2 TERMINALES DE LOS MOTORES BRUSHLESS

Los motores brushless a diferencia de los motores con escobillas, tienen tres terminales de conexión destinados para ser acoplados con los terminales de salida de los controladores de velocidad.

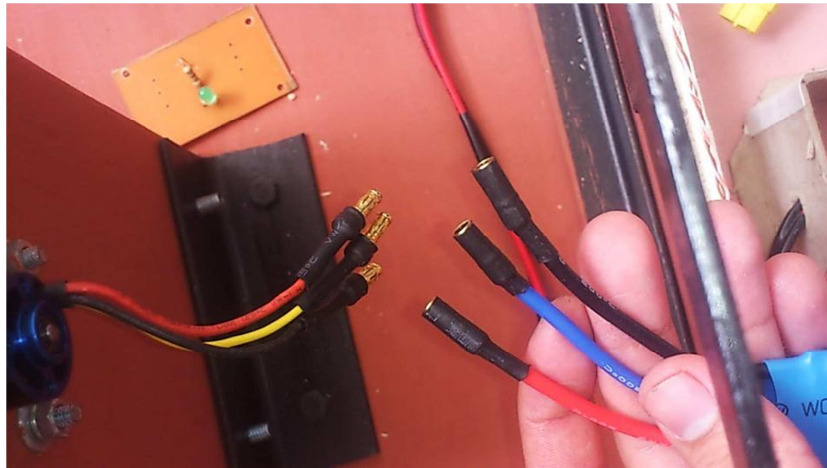


Foto 3. 3. Terminales de conexión del motor y del ESC

Elaborado por: Santiago Cantos

Usualmente los cables de estos motores viene cada uno de un color diferente al igual que los cables de los controladores de velocidad, pero en el caso que no coincidan lo que se debe hacer es, ligar los cables de la mitad del motor como del controlador y los cables de los extremos de cualquier forma, una vez realizado esto, se debe probar el motor y determinar hacia donde está girando el motor, si su giro es al lado opuesto de cómo está configurado el controlador, indica que los cables extremos están mal colocados.



Foto 3. 4. Conexión entre los terminales del motor y del ESC

Elaborado por: Santiago Cantos

3.3.3. ENSAMBLE ENTRE EL CONTROLADOR DE VELOCIDAD ELECTRÓNICO Y EL RECEPTOR

El receptor está comunicado al controlador de velocidad electrónico por medio de tres cables, siendo un cable el positivo, el negativo y otro conductor por donde circulan los pulsos de la señal PWM para variar la velocidad de los motores.

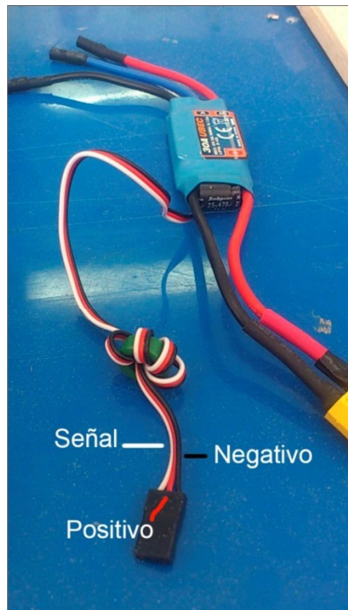


Foto 3. 5. Nominación de los conductores para conexión entre el ESC y el receptor.

Elaborado por: Santiago Cantos

El conductor del lado izquierdo (blanco), es por donde fluye la señal de datos, el cable de la mitad es el positivo (rojo) y el cable del izquierdo es el cable negativo (negro).

3.4. PROGRAMACIÓN DE LOS ESC'S

Antes de salir a volar hay factores que se deben ajustar en la configuración del ESC, para el proyecto también se debió realizar este proceso de calibración de los controladores de velocidad. La configuración de las formas de trabajo de cada controlador se realizó por medio de señales audibles emitidas por cada uno de ellos, similares a la clave morse.

3.4.1. INGRESO AL MODO DE PROGRAMACIÓN DEL ESC

Se conectó el ESC al receptor pero sin conectar la batería.

El transmisor fue encendido y el stick de potencia colocado en la posición de máximo.

Se añadió la batería, la posición de máxima potencia que el receptor envió al ESC, hizo que el ESC entrase al modo de programación emitiendo un tono musical.

3.4.2. FASE DE PROGRAMACIÓN

Una vez que se ingresó al modo de programación, el ESC emite códigos audibles que va indicando cada parámetro a configurar, se debió basar en los manuales de cada ESC para su correcta configuración y programación.

3.4.2.1. PROGRAMACIÓN PARA EL CONTROLADOR DE VELOCIDAD ESC 60A HOBBYKING

El controlador de velocidad ESC 60A Hobbyking en su fase de programación, se comunica con los usuarios por medio de mensajes audibles.

♪ —	Music Tone + 1 Beep	Options 1. Cell Type and No. of Cells
♪ — —	Music Tone + 2 Beeps	Options 2. Throttle Setting
♪ — — —	Music Tone + 3 Beeps	Options 3. Brake Setting
♪ — — — —	Music Tone + 4 Beeps	Options 4. Direction and Cutoff Type
♪ — — — — —	Music Tone + 5 Beeps	Options 5. Timing Mode
♪ — — — — — —	Music Tone + 6 Beeps	Option 6. PWM setting

Figura 3. 2. Parámetros de la fase de programación del ESC 60A Hobbyking

Fuente:

http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__7340__Hobbyking_SS_Series_60_70A_ESC.html

Después de que se reconoció que parámetro se va a configurar, se ingresó a la subrutina colocando el throttle stick a la posición media. El controlador comenzó a pitar códigos morse en secuencia de tiempos cortos y largos, representando las posibles opciones que se pueden escoger de cada parámetro. (Ver Anexo D.)



Foto 3. 6. Ingreso a la fase programación

Elaborado por: Santiago Cantos

Para seleccionar la opción a cambiar se movió el throttle stick a la posición de máxima potencia, el controlador indicó con sonidos la opción deseada. Luego regresó a la secuencia sonora de los parámetros principales continuando con la configuración.

Para salir del modo de programación se colocó el throttle stick en la posición más baja. Para indicar que el ESC estuvo listo para arrancar el motor, el ESC dio tres pitidos con un movimiento suave del motor.

3.4.2.2. PROGRAMACIÓN PARA EL CONTROLADOR DE VELOCIDAD ESC 30A UBEC HOBBYKING

De la misma forma que el anterior ESC, para ingresar al modo de programación del ESC 30A UBEC HOBBYKING, se debió colocar el throttle stick en la posición

de full, después de dos segundos el ESC dio un aviso sonoro indicando la fase de configuración. (Ver Anexo E.)

Una vez configurado el ESC, este proporcionó un aviso sonoro y movió un poco al motor, indicando que el motor estaba listo para arrancar.

3.5. HÉLICES

Las hélices son una parte primordial en los mini UAV, ya que son las encargadas de generar propulsión. En el proyecto se trabajó con dos motores de distintas características por ende se debieron utilizar hélices de distintas denominaciones.



Foto 3. 7. Hélices utilizadas en el proyecto

Elaborado por: Santiago Cantos

3.5.1. HÉLICE UTILIZADA EN EL MOTOR INRUNNER (3600kv Exceed-Rc)

Para el motor brushless Inrunner 3600kv Exceed-Rc se empleó una hélice de 4,7 pulgadas de diámetro por 4,7 pulgadas de paso.

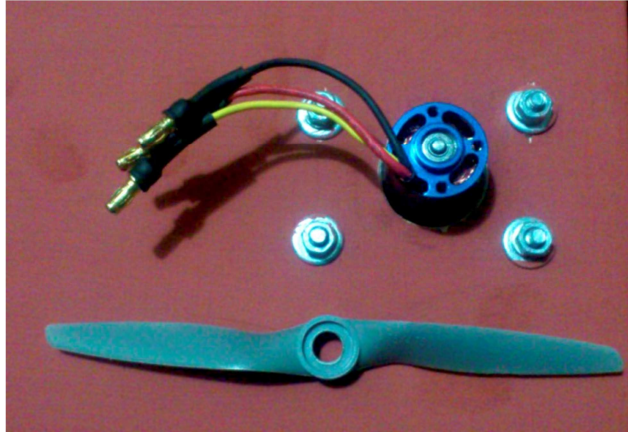


Foto 3.8. Hélice de 4,7 x 4,7 pulgadas junto al motor 3600KV Exceed-Rc

Elaborado por: Santiago Cantos

3.5.1.1. FACTOR DE CARGA DE LA HÉLICE 4,7 x 4,7 PULGADAS

El factor de carga de la hélice de 4,7 x 4,7 pulgadas fue la siguiente:

$$FC(\text{hélice}) = D^2 \times P$$

$$FC(\text{hélice}) = 4,7^2 \times 4,7$$

$$FC(\text{hélice}) = 103,82$$

Dónde:

D: Diámetro de la hélice en pulgadas

P: Paso de la hélice en pulgadas

Fc: Factor de Carga de la hélice

Fórmula 3.1. Fórmula para el cálculo del Factor de Carga de la hélice 4,7 x 4,7

Elaborado por: Santiago Cantos

3.5.1.2. MÁXIMO DE REVOLUCIONES DE GIRO DE LA HÉLICE 4,7 X 4,7 PULGADAS

Para conocer cuántas revoluciones puede ser sometida la hélice de 4,7 x 4,7 pulgadas se empleó los cálculos correspondientes.

Revoluciones estimadas que el motor girará:

$$RPM(estimadas) = KV \times Voltaje \text{ de la Batería}$$

$$RPM(estimadas) = 3600 \times 11,1$$

$$RPM(estimadas) = 39960 \text{ rpm}$$

Dónde:

KV: Revoluciones por voltio, dado por el fabricante del motor.

Voltaje de la batería en voltios.

Fórmula 3.2. Fórmula para el cálculo de las revoluciones estimadas de giro del motor 3600kv Exceed-Rc

Elaborado por: Santiago Cantos

- Máximas revoluciones que la hélice soportaría:

Se convirtió las pulgadas del diámetro del motor a milímetros:

$$Diámetro \text{ en mm} = Diámetro \times 25,4$$

$$Diámetro \text{ en mm} = 4,7 \times 25,4$$

$$Diámetro \text{ en mm} = 119,38$$

Fórmula 3.3. Conversión del diámetro de la hélice en pulgadas a milímetros

Elaborado por: Santiago Cantos

Conocido el valor del diámetro de la hélice en milímetros se aplica la fórmula para saber el número máximo de revoluciones que la hélice soportaría:

$$Rpm(hélice) = \frac{3438}{0, (diámetro en mm)}$$

$$Rpm(hélice) = \frac{3438}{0,199}$$

$$Rpm(hélice) = 17276,38 rpm$$

Fórmula 3.4. Rpm de giro de la hélice 4,7 x 4,7 pulgadas

Elaborado por: Santiago Cantos

Correspondiente al cálculo, el motor 3600kv Exceed-Rc giraría a un máximo de 39960 rpm al 100% de eficiencia, conocido los valores y también sabiendo que a mayor revoluciones se debería usar una hélice de diámetro más pequeño, el motor 3600kv Exceed-Rc, no girará a más del 60% de sus revoluciones, por cuestiones de seguridad.

3.5.2. HÉLICE UTILIZADA EN EL MOTOR OUTRUNNER (1500kv Turnigy)

Para el motor brushless outrunner (1500kv Turnigy) se empleó una hélice de 10 pulgadas de diámetro por 4,5 pulgadas de paso, sugerida por el fabricante (ver Anexo B.)

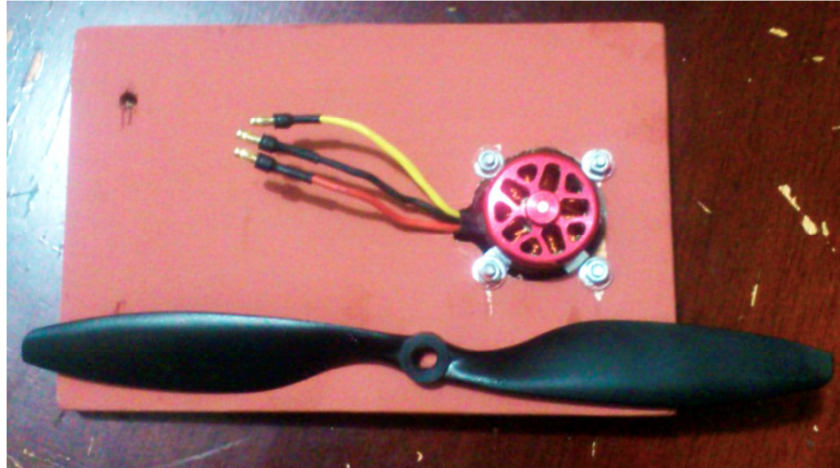


Foto 3.9. Hélice de 10 x 4.5 pulgadas junto al motor 1500KV Turnigy

Elaborado por: Santiago Cantos

3.5.2.1. FACTOR DE CARGA DE LA HÉLICE 10 x 4,5 PULGADAS

El factor de carga de la hélice de 10 x 4,5 pulgadas fue la siguiente:

$$FC(hélice) = D^2 \times P$$

$$FC(hélice) = 10^2 \times 4,5$$

$$FC(hélice) = 450$$

Dónde:

D: Diámetro de la hélice en pulgadas

P: Paso de la hélice en pulgadas

Fc: Factor de Carga de la hélice

Fórmula 3.5. Fórmula para el cálculo del Factor de Carga de la hélice 10 x 4,5

Elaborado por: Santiago Cantos

3.5.2.2. MÁXIMO DE REVOLUCIONES DE GIRO DE LA HÉLICE 10 X 4,5 PULGADAS

Para conocer cuántas revoluciones pudo ser sometida la hélice de 10 x 4,5 pulgadas se empleó los cálculos correspondientes.

Revoluciones estimadas que el motor girará:

$$RPM(estimadas) = KV \times Voltaje \text{ de la Batería}$$

$$RPM(estimadas) = 1500 \times 11,1$$

$$RPM(estimadas) = 16650 \text{ rpm}$$

Dónde:

KV: Revoluciones por voltio, dado por el fabricante del motor.

Voltaje de la batería en voltios.

Fórmula 3.6. Fórmula para el cálculo de las revoluciones estimadas de giro del motor 1500kv Turnigy

Elaborado por: Santiago Cantos

- Máximas revoluciones que la hélice soportaría:

Se convirtió las pulgadas del diámetro del motor a milímetros:

$$\mathbf{Diámetro\ en\ mm = Diámetro\ x\ 25.4}$$

$$Diámetro\ en\ mm = 10\ x\ 25.4$$

$$Diámetro\ en\ mm = 254$$

Fórmula 3.7. Conversión del diámetro de la hélice en pulgadas a milímetros de la hélice de 10 x 4,5

Elaborado por: Santiago Cantos

Conocido el valor del diámetro de la hélice en milímetros se aplica la fórmula para saber el número máximo de revoluciones que la hélice soportaría:

$$Rpm(hélice) = \frac{3438}{0, (diámetro\ en\ mm)}$$

$$Rpm(hélice) = \frac{3438}{0,254}$$

$$Rpm(hélice) = 13535,43\ rpm$$

Fórmula 3.8. Rpm de giro de la hélice 10 x 4,5 pulgadas

Elaborado por: Santiago Cantos

El motor 1500kv Turnigy giraría a un máximo de 16650 rpm al 100% de eficiencia (sin carga), mientras que la hélice soportaría un máximo de 13535 rpm, se debe tener mucho cuidado al pasar el 70% de revoluciones totales al utilizar este motor por cuestiones de seguridad.

3.6. SIMULACIÓN DE LA SEÑAL DEL RX

Para la simulación de la señal que envía el receptor del Radio control a la entrada del Controlador de velocidad, primero se conoció la señal proporcionada del Rx hacia el Controlador de Velocidad.



Foto 3.10. Receptor y Radio Control

Elaborado por: Santiago Cantos

Sabiendo que la señal enviada desde el Rx, es una serie de pulsos y que el controlador adaptará la salida de potencia hacia el motor según ese ancho de pulso. El ancho pulso varía entre 1 milisegundo y 2 milisegundos con una separación entre cada pulso de 20 milisegundos.

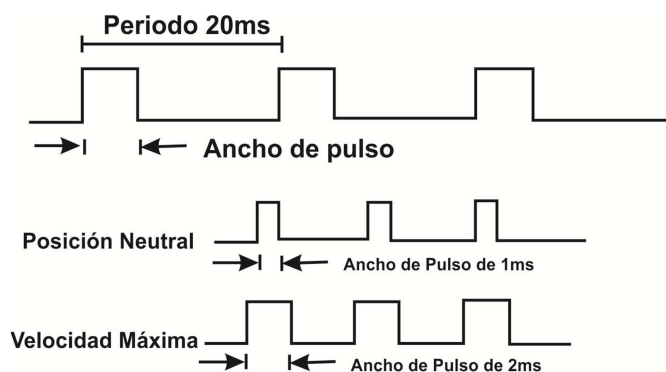


Figura 3.3. Pulsos emitidos por el RX

Fuente: Investigación de campo

La alimentación para el receptor se utilizó un pack de baterías de Ni-MH de 4.8V que se lo conectó en cualquier de los canales coincidiendo los pines de alimentación.

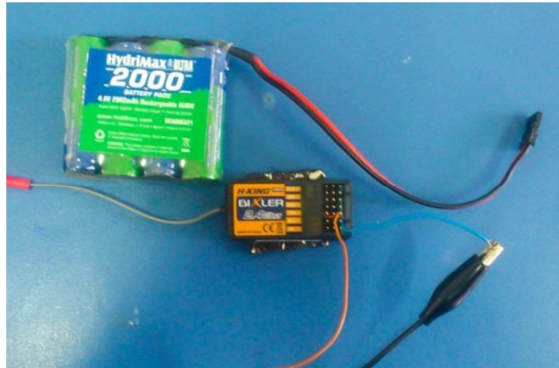


Foto 3. 11. Alimentación del receptor y conexión al osciloscopio

Elaborado por: Santiago Cantos

Con el osciloscopio se verificó estos pulsos en la salida de un receptor H-King Bixler. Para esta prueba se utilizó el canal 3 del receptor, siendo el canal de Throttle. El receptor posee tres pines en cada canal. Los pines son destinados para la alimentación y salida de la señal.



Foto 3. 12. Canal 3 del receptor (Throttle)

Elaborado por: Santiago Cantos

Teniendo la señal de salida del receptor, donde el ancho de pulso de 1 milisegundo sería el equivalente para la posición más baja y el ancho de pulso de 2 milisegundos sería el equivalente para la mayor potencia.

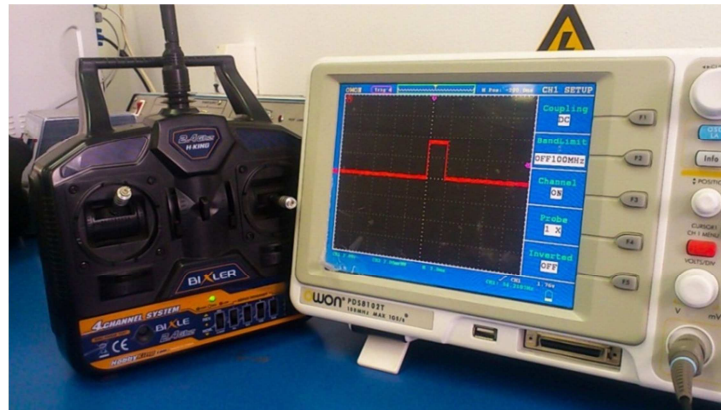


Foto 3. 13. Señal obtenida del Rx del Radio Control

Elaborado por: Santiago Cantos

3.6.1. PROGRAMACIÓN EN BASCOM AVR

Al recrear esa señal desde el computador, se procedió a realizar un nuevo archivo para BASCOM AVR. En este proyecto toda la programación lo realizó el ATMEGA 8, configurado con un oscilador interno de 8MHz, para que fuese capaz de generar los pulsos necesarios para simular la señal del receptor.

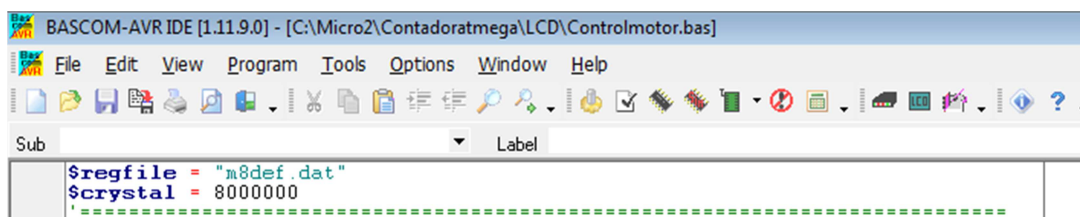


Figura 3. 4. Selección del Atmega 8, y del oscilador interno en BASCOM AVR

Fuente: Investigación de campo

El porcentaje del control de las velocidades de los motores fue hecho visible en una pantalla LCD, para facilitar el control de los motores. En BASCOM se creó las líneas necesarias para la configuración de la pantalla LCD.

```
Config Lcd = 16 * 2
Config Lcdbus = 4
Config Lcdpin = Pin , Db4 = PORTB.0 , Db5 = PORTB.1 , Db6 = PORTB.2 , Db7 = PORTB.3 , Rs = PORTB.4 , E = PORTB.5
Config Servos = 1 , Servo1 = PORTD.0 , Reload = 5
Config PORTD = Output
```

Figura 3. 5. Líneas para la activación y configuración de la LCD en BASCOM AVR

Fuente: Investigación de campo

La función que generó los pulsos desde el Atmega 8, fue la función Servos. Esta función generó el ancho de pulso y el periodo necesario equivalente de acuerdo al valor que se le otorgó.

```
Config Lcd = 16 * 2
Config Lcdbus = 4
Config Lcdpin = Pin , Db4 = PORTB.0 , Db5 = PORTB.1 , Db6 = PORTB.2 , Db7 = PORTB.3 , Rs = PORTB.4 , E = PORTB.5
Config Servos = 1 , Servo1 = PORTD.0 , Reload = 5
Config PORTD = Output
```

Figura 3. 6. Activación y configuración de la Función Servos en BASCOM AVR

Fuente: Investigación de campo

El siguiente paso en BASCOM se creó las variables donde el programa almacenó toda la información ya sea la lectura del potenciómetro de control, el escalamiento de la señal y la variable legible para la pantalla LCD.

```
Dim Volt As Single
Dim Volt1 As Single
Dim V As String * 4
Dim Aux1 As Word
Dim A As Word
Dim Led As Bit
```

Figura 3.7. Creación de las variables en BASCOM AVR

Fuente: Investigación de campo

En la parte principal del programa, se configuró para que el Atmega 8 adquiera la señal de un potenciómetro, el cual varía la velocidad.

Además, se hizo que ese valor adquirido del potenciómetro sea representado en forma de porcentaje de velocidad en la pantalla LCD. Y por último, se convirtió esa misma señal proveniente del potenciómetro en un valor equivalente para que la función servos creara las señales precisas con el ancho de pulso y periodo correcto.

El ESC recibe los mismos pulsos como si fuese un servo motor, para que la opción Servo envíe los pulsos por la salida del ancho necesario, los valores debieron estar contemplados entre 100 y 185.

```
Cls
Locate 1 , 1
Lcd " Velocidad Motor"
Aux1 = Getadc(0)
Volt = Aux1 * 85
Volt = Volt / 1023
Volt1 = Volt + 100
A = Volt1 - 100
A = A * 100
A = A / 85
V = Fusing(volt1 , "#.#")
Locate 2 , 1
Lcd " " ; A ; " %"
Servo(1) = Volt1
PORTD.1 = 0
If A => 60 Then
PORTD.1 = 1
End If
Waitms 100
```

Figura 3.8. Cuerpo del programa en BASCOM AVR

Fuente: Investigación de campo

Como parte final del programa en BASCOM AVR, se añadió en una de las salidas del Atmega un LED, que se utilizó como un indicador de advertencia de que se pasó el 60% de velocidad, como precaución.

```

$regfile = "a8def.dat"
$crystal = 8000000
-----
Config Lcd = 16 * 2
Config Lcdbus = 4
Config Lcdpin = Pin , Db4 = PORTB.0 , Db5 = PORTB.1 , Db6 = PORTB.2 , Db7 = PORTB.3 , Rs = PORTB.4 , E = PORTB.5
Config Servos = 1 , Servo1 = PORTD.0 , Reload = 5
Config PORTD = Output

Dim Volt As Single
Dim Volt1 As Single
Dim V As String * 4
Dim Aux1 As Word
Dim A As Word
Dim Led As Bit

Config ADC = Single , Prescaler = Auto , Reference = Avcc
Enable Interrupts
Start ADC
Cursor Off
Do

Cls
Locate 1 , 1
Lcd " Velocidad Motor"
Aux1 = Getadc(0)
Volt = Aux1 * 85
Volt1 = Volt / 1023
V = Volt1 + 100
A = A * 100
A = A / 85
V = Fusing(volt1 , "#.#")
Locate 2 , 1
Lcd " : A : %"
Servo(1) = Volt1
PORTD.1 = 0
If A >= 60 Then
PORTD.1 = 1
End If
Waitms 100 |

Loop

```

Figura 3.9. Programa final de la simulación de la señal del Rx en BASCOM AVR

Elaborado por: Santiago Cantos

Antes de realizar las conexiones en la protoboard, primero se simuló la programación en ISIS Proteus para tener una idea más clara de cómo funcionaría la programación en la vida real.

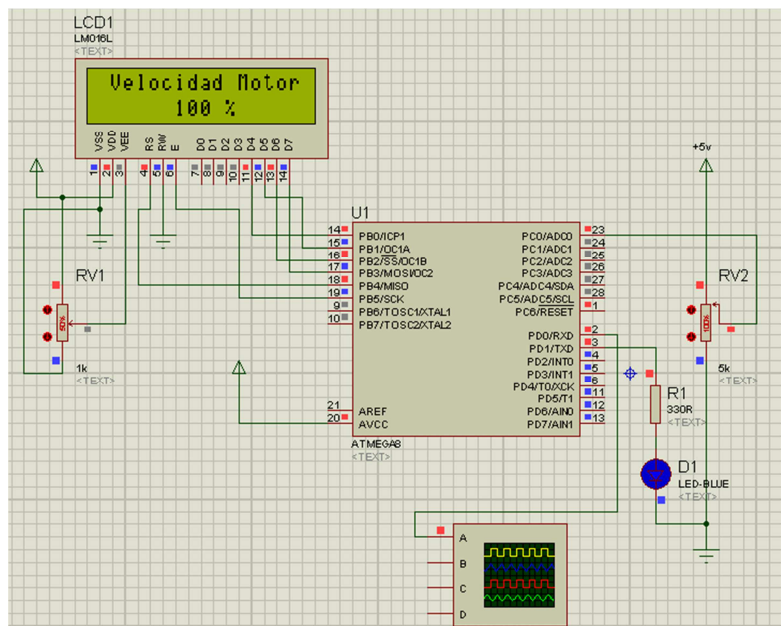


Figura 3.10. Simulación de la programación en ISIS Proteus

Elaborado por: Santiago Cantos

Una vez que se concluyó la simulación en ISIS Proteus, obteniendo resultados favorables, se procedió a armar el circuito, y a comprobar que la señal de salida del Atmega 8 fuese correcta, esta comprobación se realizó con el osciloscopio.

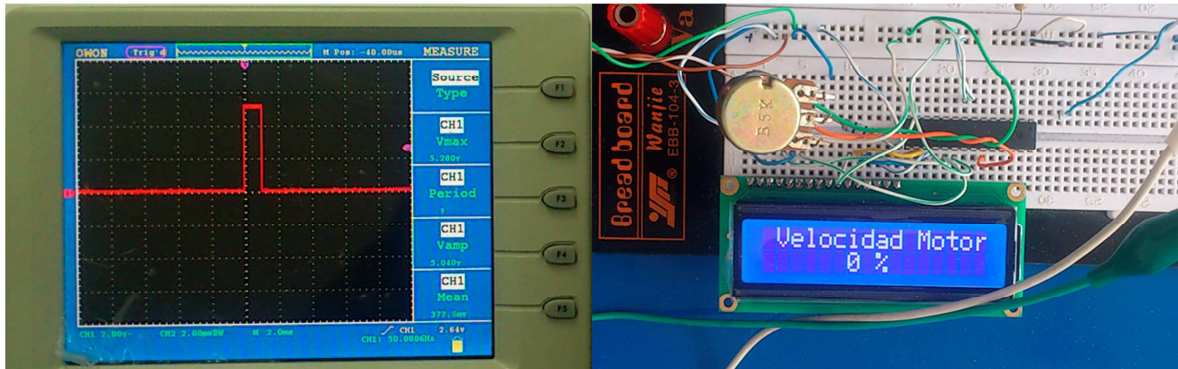


Foto 3.14. Comprobación del funcionamiento de la simulación de la señal del RX

Elaborado por: Santiago Cantos

3.6.2. PRUEBA CON EL MOTOR BRUSHLESS

Después de haber ya comprobado con el osciloscopio la señal simulada en BASCOM AVR y construida utilizando un Atmega 8, se pasó a realizar la prueba con el motor brushless para confirmar su correcto funcionamiento.

La señal de pulso que se obtuvo del puerto D.0 del Atmega 8 fue conectada a la entrada de ESC y se unieron las conexiones de GND. Se debió tener en cuenta que del Rx vienen tres señales (VCC, GND y datos), para este caso la señal de VCC ya no fue utilizada, evitando cualquier conexión de señal en el terminal medio del ESC.

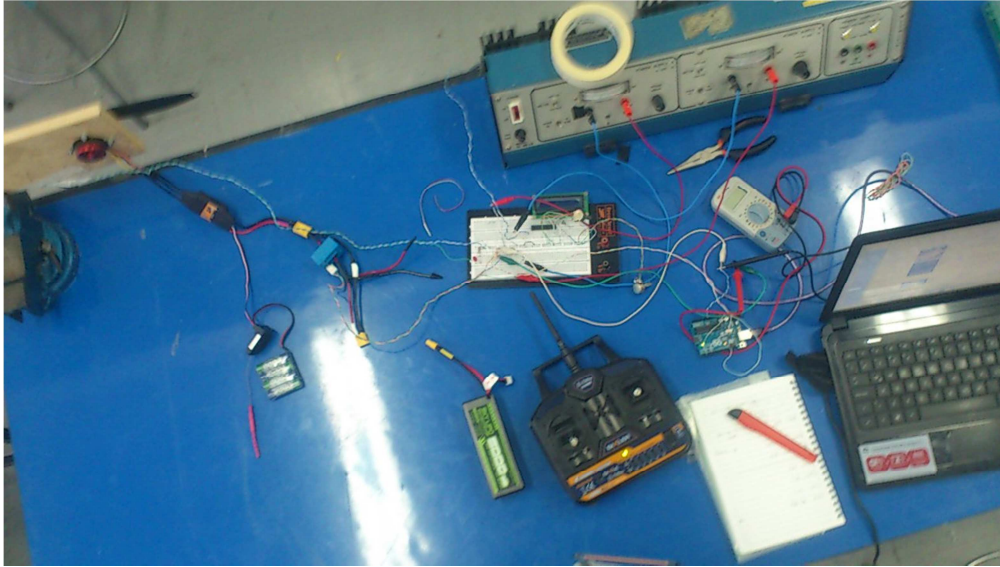


Foto 3.15. Prueba de funcionamiento del control de velocidad del motor

Elaborado por: Santiago Cantos

La prueba utilizando los motores fue todo un éxito, teniendo un control de velocidad entre el ESC y el Atmega.

3.7. MEDIDOR DE RPM

Para la medición de RPM se utilizó el sensor de Efecto Hall UGN 3132, cuyo propósito es ser un interruptor controlado por el campo magnético de un imán colocado en la punta de la hélice o de un disco, esto provocó que se genere un tren de pulsos cuya frecuencia variaba de acuerdo a la velocidad a que gira la hélice del motor.

3.7.1. SKETCH DEL CONTADOR DE FRECUENCIA

El Arduino Uno adquirió la señal proveniente del sensor de Efecto Hall. En el sketch del Arduino se elaboró un contador de frecuencia para luego ser enviada a LABVIEW.

Previamente se debió conseguir la librería para Arduino donde contenga los nuevos comandos para elaborar el contador de frecuencia. Se lo descargó de la página: <http://interface.khm.de/index.php/lab/experiments/arduino-frequency-counter-library/>

Para iniciar el Sketch primero se ingresó la librería del Contador de Frecuencia, y además dos variables que la una guardó los datos obtenidos del contador de frecuencia y la otra los datos obtenidos del cálculo de frecuencia a RPM.

```
#include <FreqCounter.h>

word frq; // Guarda Datos del Contador de Frecuencia
long int revol; // Guarda datos de la conversion de Frecuencia a RPM
```

Figura 3.11. Encabezado del Sketch Contador de Frecuencia

Elaborado por: Santiago Cantos

En el enunciado “*void setup*” se incluyó el inicio de la comunicación serial para la conexión con LABVIEW a una velocidad de baudaje de 9600.

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Inicia comunicación serial
}
```

Figura 3. 12. Void Setup del Sketch Contador de Frecuencia

Elaborado por: Santiago Cantos

Las líneas del contador de frecuencia fueron incluidos en “*void loop*” al igual para el cálculo de conversión a RPM.

$$RPM = \frac{60Hz}{\text{Número de muestras}}$$

$$RPM = \frac{60Hz}{1}$$

Fórmula 3.9. Fórmula para conversión de Hz a RPM

Elaborado por: Santiago Cantos

```

#include <FreqCounter.h>

word frq; // Guarda Datos del Contador de Frecuencia
long int revol; // Guarda datos de la conversion de Frecuencia a RPM

void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Inicia comunicación serial
}

void loop()
{
  FreqCounter::f_comp= 8; // Se establece la compencacion a 12
  FreqCounter::start(1000); // Comienza el conteo con un tiempo de compuerta de 100ms
  while (FreqCounter::f_ready == 0) // Esperar hasta que el contador este listo

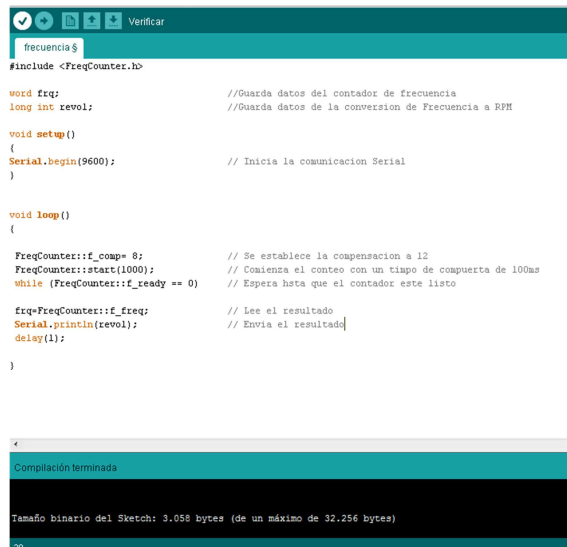
  frq=FreqCounter::f_freq; // Lee el resultado
  Serial.println(frq); // Envia el resultado
  delay(1);
}

```

Figura 3.13. Sketch Final Contador de Frecuencia

Elaborado por: Santiago Cantos

Una vez concluido el programa, se pulsa verificar, esta opción compiló y buscó algún error en el sketch.



```
Verificar
frecuencia$
#include <FreqCounter.h>

word frq; //Guarda datos del contador de frecuencia
long int revol; //Guarda datos de la conversión de Frecuencia a RPM

void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Inicia la comunicacion Serial
}

void loop()
{
  FreqCounter::f_comp= 8; // Se establece la compensacion a 12
  FreqCounter::start(1000); // Comienza el conteo con un tiempo de compuerta de 100ms
  while (FreqCounter::f_ready == 0) // Espera hasta que el contador este listo

  frq=FreqCounter::f_freq; // Lee el resultado
  Serial.println(revol); // Envia el resultado
  delay(1);
}

}

Compilación terminada

Tamaño binario del Sketch: 3.058 bytes (de un máximo de 32.256 bytes)
20
```

Figura 3.14. Compilación y verificación de la programación.

Fuente: Investigación de campo

Al terminar la compilación se aseguró que el sketch no tenga algún error en cualquiera de las líneas de programación y se procedió a cargar los datos a la tarjeta Arduino Uno.



```
Cargar
frecuencia$
#include <FreqCounter.h>

word frq; //Guarda datos del contador de frecuencia
long int revol; //Guarda datos de la conversión de Frecuencia a RPM

void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Inicia la comunicacion Serial
}

void loop()
{
  FreqCounter::f_comp= 8; // Se establece la compensacion a 12
  FreqCounter::start(1000); // Comienza el conteo con un tiempo de compuerta de 100ms
  while (FreqCounter::f_ready == 0) // Espera hasta que el contador este listo

  frq=FreqCounter::f_freq; // Lee el resultado
  Serial.println(revol); // Envia el resultado
  delay(1);
}

}

Carga terminada

Tamaño binario del Sketch: 3.058 bytes (de un máximo de 32.256 bytes)
20
```

Figura 3.15. Carga del sketch a la tarjeta Arduino Uno

Fuente: Investigación de campo

El sensor UGN 3132 consta de 3 pines (ver Anexo G.) identificándolos desde la cara que contenía la marca de su constructor, los pines quedaron con la siguiente distribución: pin 1 VCC, pin 2 GND y pin 3 OUT. Posteriormente después de haber identificado los pines del sensor se soldaron los cables a los pines.

El circuito que se empleó para el funcionamiento del sensor UGN 3132 fue el siguiente:

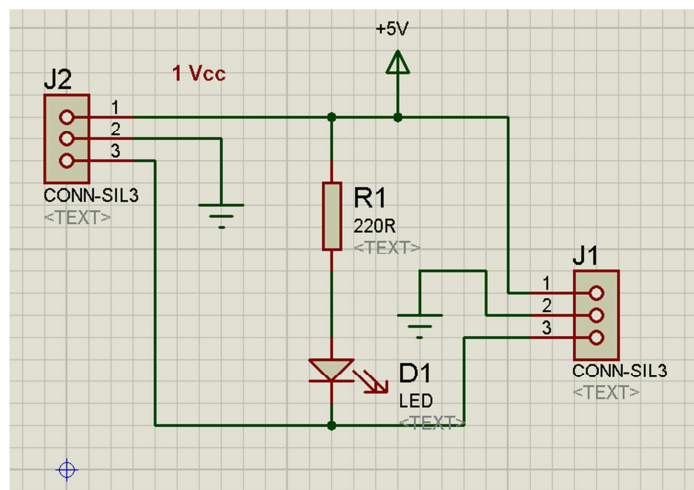


Figura 3.16 Circuito con el sensor UNG 3132

Elaborado por: Santiago Cantos

La primera prueba se realizó con el módulo de Efecto Hall utilizando su motor con su disco, incluyendo en él un imán. En la parte trasera del sensor adicionalmente se debió incluir otro imán, este tuvo la función de resetear el estado del sensor.

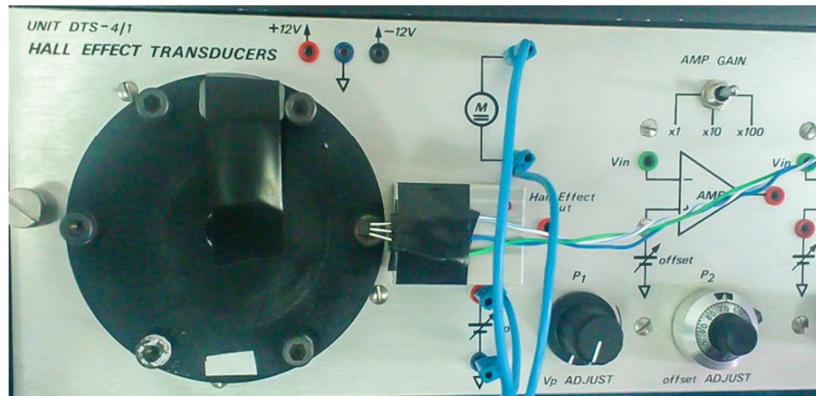


Foto 3.16. UGN 3132 junto al disco con imán

Elaborado por: Santiago Cantos

Mientras el motor fue variando de velocidad en el osciloscopio se pudo apreciar la frecuencia que generaba el motor del módulo con los datos de frecuencia obtenidos por medio de Arduino.

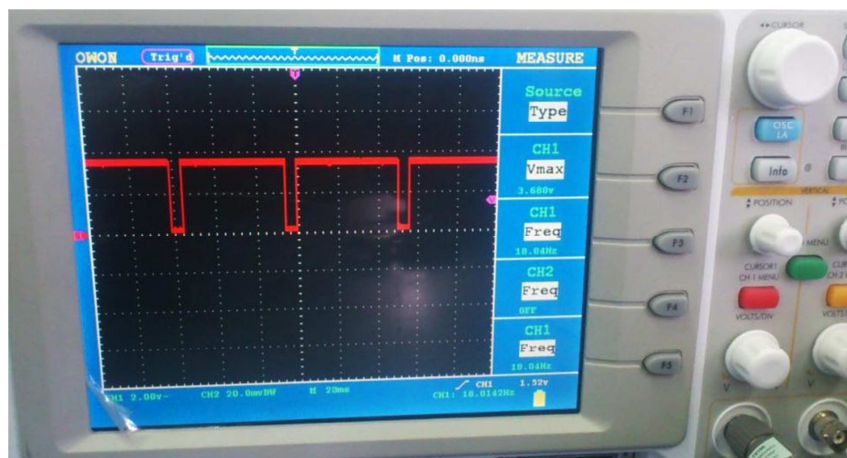


Foto 3. 17. Señal obtenida del Sensor UGN 3132

Elaborado por: Santiago Cantos

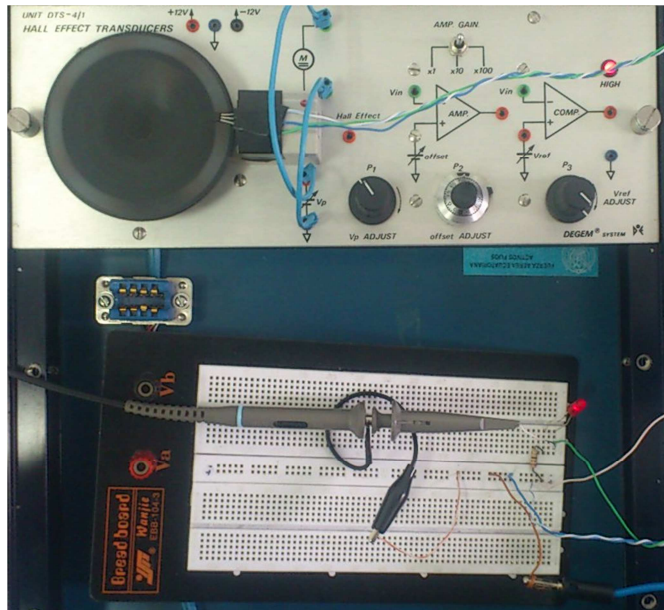


Foto 3. 18. Vista general del circuito con el sensor UGN 3132

Elaborado por: Santiago Cantos

Las señales que se obtuvo del sensor UNG 3132 debieron ser conectados a la entrada digital 5, debido a que la librería <FreqCounter.h> trabaja con ese pin en particular.

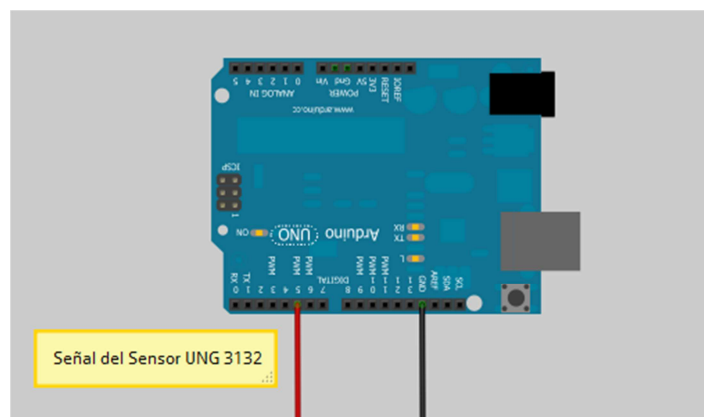


Figura 3. 17 Vista general de la conexión a Arduino Uno con el sensor UGN 3132

Elaborado por: Santiago Cantos

Después de haber comprobado la similitud de frecuencias brindadas por el osciloscopio y el Arduino, en el sketch se incluyó la línea que contenía la transformación de frecuencia a RPM.

```
void loop()
{
  FreqCounter::f_comp= 8;           // Se establece la compensacion a 12
  FreqCounter::start(1000);        // Comienza el conteo con un tiempo de compuerta de 100ms
  while (FreqCounter::f_ready == 0) // Esperar hasta que el contador este listo

  frq=FreqCounter::f_freq;         // Lee el resultado
  revol=frq*60;                    // Conversión de Frecuencia a RPM
  Serial.println(revol);           // Envía el resultado
  delay(1);
}
```

Figura 3. 18. Línea del cálculo de RPM incluido en el Contador de Frecuencia

Elaborado por: Santiago Cantos

3.7.2. ENVÍO DE DATOS UTILIZANDO COMUNICACIÓN SERIAL

La tarjeta Arduino Uno tiene la posibilidad de comunicarse con LABVIEW por medio de una comunicación serial virtual. Una vez instalado el Arduino este especifica el nombre con el cual se llama su puerto serial virtual. Para este caso el puerto fue el “Com14”.

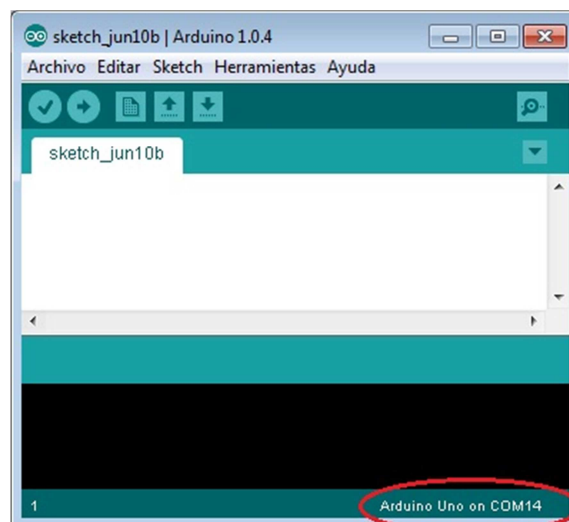


Figura 3. 19. Ubicación del nombre del puerto Serial asignado por Arduino

Elaborado por: Santiago Cantos

3.7.3. PROGRAMACIÓN DEL MEDIDOR DE RPM EN LABVIEW

Después de haber concluido con la prueba de lectura de RPM en Arduino, se creó un VI en LABVIEW para que la visualización sea de forma virtual.

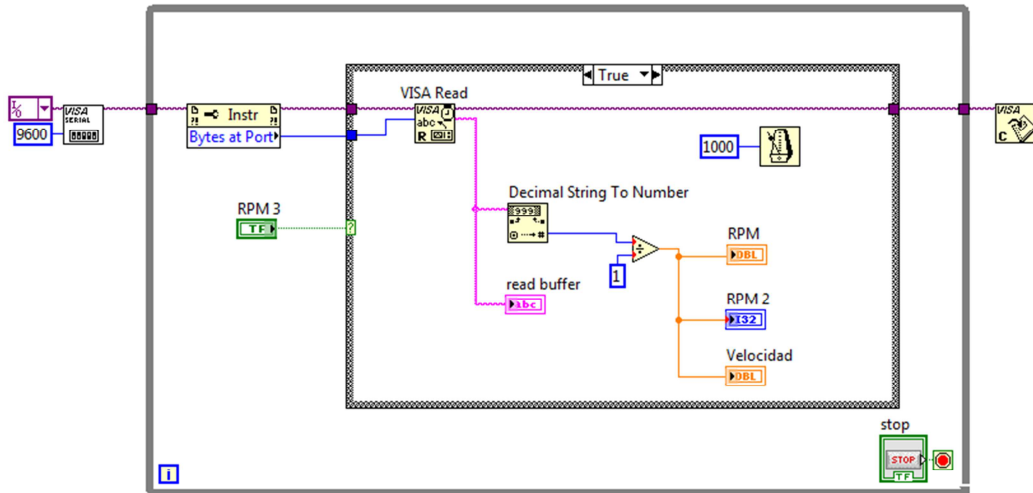


Figura 3. 20. Diagrama de bloques para la visualización de RPM en LABVIEW

Elaborado por: Santiago Cantos

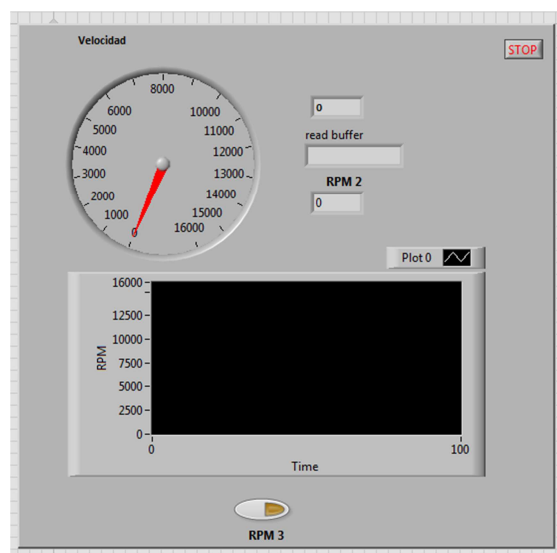


Figura 3. 21. Panel Frontal para la visualización de RPM en LABVIEW

Elaborado por: Santiago Cantos

Comprobado a una escala pequeña se continuó con la prueba en el motor brushless.

A la hélice se le agregó en una de sus puntas el imán que sirvió de muestreo para que el sensor UGN 3132 produzca los pulsos de acuerdo a la velocidad a que gira la hélice. En el soporte y sujeción del motor se le añadió el sensor UGN 3132.

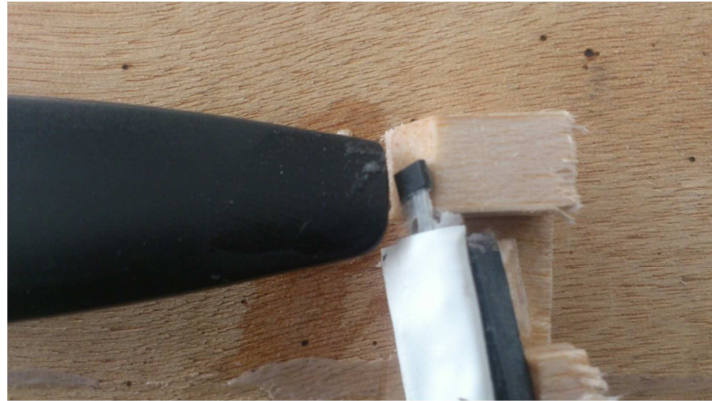


Foto 3.19. Posicionamiento del sensor UGN 3132 junto a la hélice

Elaborado por: Santiago Cantos

3.7.4. DISCO PARA MEDICIÓN DE RPM

Debido a que poner un imán en la punta de la hélice para el muestreo en la medición de RPM fue un asunto delicado, ya que el peso adicional en la punta de la hélice junto con la velocidad centrífuga provocada en ésta, pudieron haber provocado que la hélice se trizara o se rompiera, haciendo que los pedazos salieran disparados, siendo un peligro potencial para el operador del módulo. Se decidió optar por un disco que portara los imanes para el muestreo, que se lo incluiría en el eje junto a la hélice.

3.7.4.1. BALANCEO DEL DISCO

Cualquier cosa que fuese a ser incluida en el eje de la hélice debe ser perfectamente balanceada para evitar vibraciones durante el funcionamiento del motor. Para esto se utilizó un balanceador de propelas.



Foto 3.20. Balanceador de Propelas

Elaborado por: Santiago Cantos

El disco fue elaborado con madera tratando que sea lo más liviano y resistente para que no fuese una carga adicional para el motor. La medida del disco fue de 8 cm de diámetro.

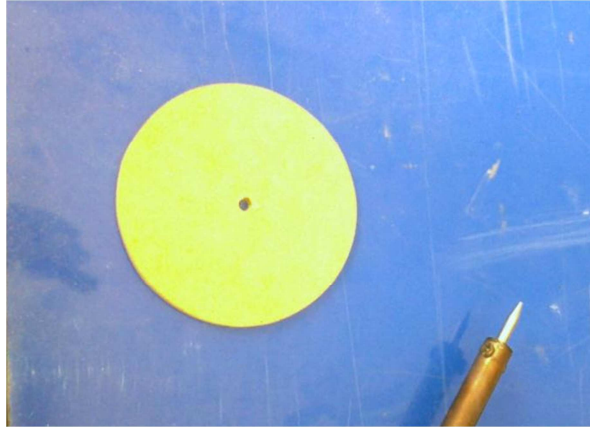


Foto 3.21. Vista General del disco para la medición de RPM

Elaborado por: Santiago Cantos

Se procedió a revisar si los discos estaban balanceados. Se obtuvo que uno de ellos estuvo desbalanceado hacia uno de sus lados teniendo que compensar su peso.



Foto 3.22. Revisión del balance del disco

Elaborado por: Santiago Cantos

Se colocó un imán sobre cada disco, en el disco desbalanceado el imán fue colocado en el lado opuesto al que mostraba el desbalance para compensarlo.

Colocado los imanes se volvió a revisar si los discos estaban balanceados. En el caso en que los discos no estuvieran balanceados se debió compensar el lado opuesto del imán.

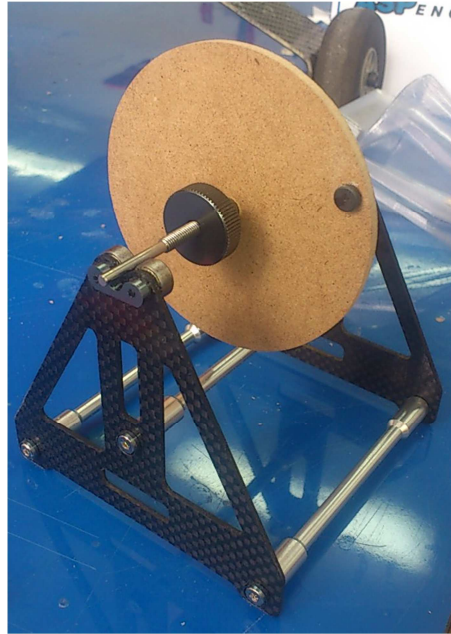


Foto 3.23. Revisión del balance del disco incluido el imán

Elaborado por: Santiago Cantos

Ambos disco fueron colocados en el eje de cada motor para así obtener la velocidad en RPM de cada uno. El Sensor UGN 3132 necesitaba que el imán del disco esté a una distancia aproximada de 5mm para que pueda detectar su campo magnético.

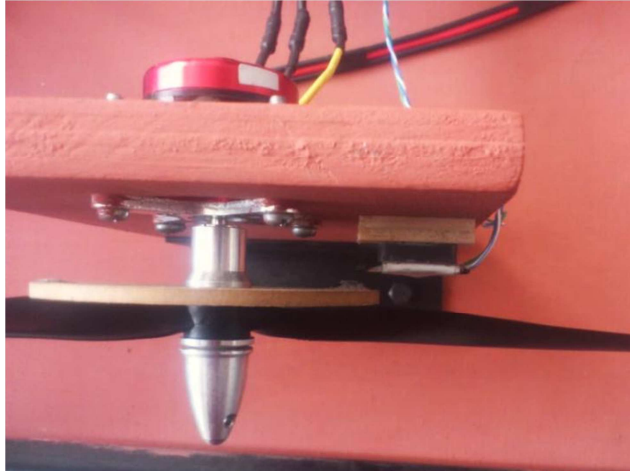


Foto 3.24. Ubicación del sensor cerca de la hélice

Elaborado por: Santiago Cantos

3.8. MEDICIÓN DE CORRIENTE

Debido a que los motores brushless que se utilizó en este proyecto consumen una alta corriente, fue indispensable el uso de un sensor de corriente de nivel industrial, este sensor fue el “HASS 50-S” (ver Anexo F.).

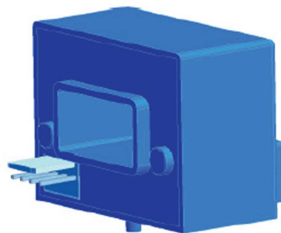


Figura 3.22. Sensor HASS 50-S

Fuente: Investigación de Campo

Para poder utilizar el sensor de corriente se debía pasar el cable positivo por medio del mismo por la ranura destinado por la medición, se elaboró una extensión entre la batería y el controlador de velocidad.



Foto 3.25. Elaboración de la extensión para la medición de corriente

Elaborado por: Santiago Cantos

El sensor de corriente HASS 50-S se basa para su trabajo en el principio del efecto Hall, detectando el magnetismo generado por la corriente a través del conductor, generando un voltaje equivalente a su salida.

De acuerdo al manual del sensor HASS 50-S, al tener conectado en su pin de Voltaje de referencia (V_{Ref}), un voltaje sugerido de 2,5V a su salida se obtuvo un voltaje de 2,5V a 0A. Después se conectó el conductor al motor apareciendo ya un consumo de corriente que el sensor detectó, se obtuvo a la salida del sensor una variación de voltaje que dependía de la variación de corriente. Para conocer qué variación de voltaje representaba al aumento de corriente, se fundamentó al manual del mismo, donde decía que:

$$V_{OUT} = V_{OE} \pm (0.625 * I_P / I_{PN}) V$$

Fórmula 3.10. Fórmula para la obtención de la variación de voltaje respecto a la corriente

Elaborado por: Santiago Cantos

Dónde:

VOE = Voltaje del offset eléctrico

$$VOE = VREF \pm 0.025$$

IP = Corriente principal (Medida)

IPN = Corriente principal nominal

$$IPN = 50A$$

Con la fórmula 3.10, se determinó el cálculo para conocer el valor de la corriente.

$$IP = (VOUT - VREF) * (IPN / 0,625)$$

Dónde:

IP = Corriente principal (Medida)

IPN = Corriente principal nominal

VOUT = voltaje de salida del sensor

VREF = Voltaje de referencia

Fórmula 3.11. Fórmula para la obtención de corriente conociendo el voltaje de salida del Sensor

Elaborado por: Santiago Cantos

Determinada la fórmula con la cual se iba a determinar el equivalente en voltaje que el sensor emitiría, se comenzó a realizar pruebas con el mismo.

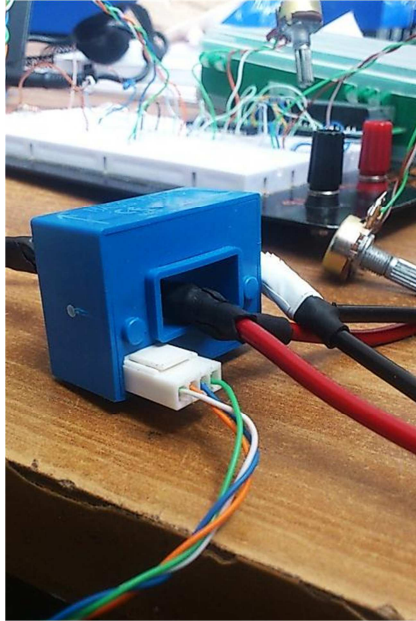


Foto 3.26. Vista del Sensor HASS 50-S previo a las pruebas

Elaborado por: Santiago Cantos

Para que el sensor HASS 50-S trabaje con normalidad, el datasheet del mismo indica las conexiones necesarias y la configuración de pines para su perfecto desenvolvimiento.

Required Connection Circuit

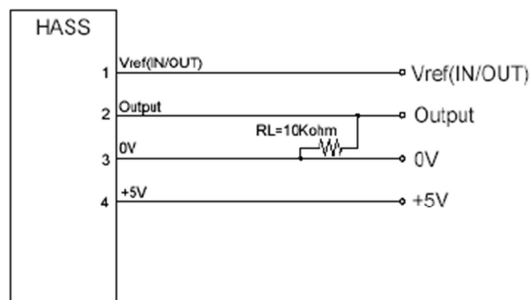


Figura 3.23. Circuito requerido para el sensor HASS 50-S

Fuente: Investigación de Campo

Al conectar al sensor de la forma que indicaba el datasheet, se procedió a energizarlo. Adicionalmente se agregó un multímetro para medir la salida del Sensor (Pin 2). Al no pasar corriente para que sensara el HASS 50-S, el voltaje que se obtuvo fue de 2,5V, siendo el valor del voltaje de referencia que ingresa por el pin 1.

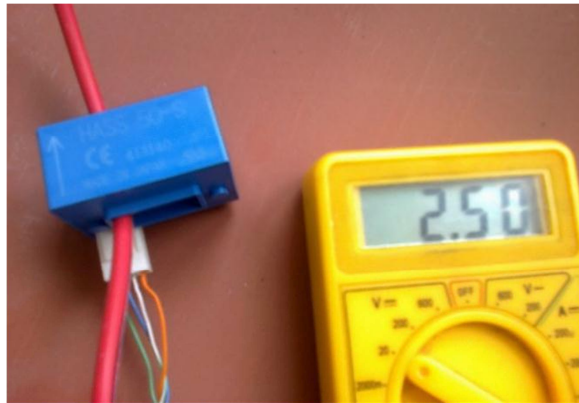


Foto 3.27. Voltaje obtenido a la salida del sensor al no detectar corriente

Elaborado por: Santiago Cantos

Los 2,5V resultantes en la salida del sensor se los aplicó en la fórmula 3.11. Comprobando que I_P es igual a 0 amperios.

$$I_P = (V_{OUT} - V_{REF}) * (I_{PN}/0,625)$$

$$I_P = (2,5 - 2,5) * (50/0,625)$$

$$I_P = 0 A$$

Fórmula 3.12. Cálculo para la obtención de la corriente

Elaborado por: Santiago Cantos

Comprobado que el sensor brindaba 2,5V a 0 amperes, se comenzó a alimentar con corriente el cable que pasaba por el sensor. Mientras se iba aumentando la

corriente por el cable, el multímetro mostraba incrementos en el voltaje de salida del sensor.

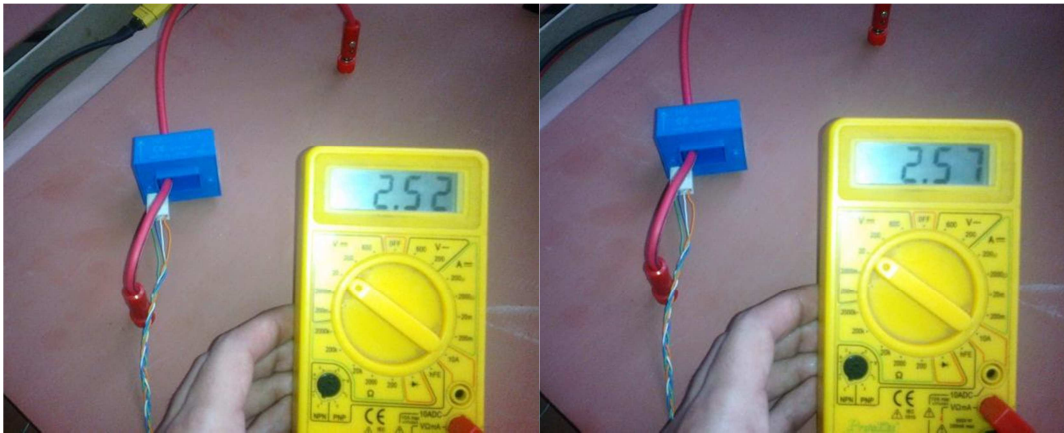


Foto 3.28. Variaciones de voltaje obtenido a la salida del sensor

Elaborado por: Santiago Cantos

Así mismo, a los nuevos valores medidos por el multímetro se les utilizó para ser convertidos en corriente equivalente. Aplicando la fórmula 3.11 se pudo apreciar un incremento apreciable en la corriente.

$$IP = (VOUT - VREF) * (IPN/0,625)$$

$$IP = (2,52 - 2,5) * (50/0,625)$$

$$IP = 1,6 A$$

Fórmula 3.13. Corriente obtenida del cálculo con 2,52V

Elaborado por: Santiago Cantos

$$IP = (VOUT - VREF) * (IPN/0,625)$$

$$IP = (2,57 - 2,5) * (50/0,625)$$

$$IP = 5,6 A$$

Fórmula 3.14. Corriente obtenida del cálculo con 2,57V

Elaborado por: Santiago Cantos

3.8.1. SKETCH PARA LA MEDICIÓN DE CORRIENTE

Para la parte de adquisición del voltaje de salida del Sensor HASS 50-S se procedió a realizar un sketch en Arduino. El sketch contuvo las líneas de programación para la adquisición de datos y la comunicación con LABVIEW.

Se comenzó creando las variables donde se guardaría los datos provenientes de la salida del sensor HASS 50-S, voltaje de referencia y la resta entre ambos.

```
int hall;           // Guardará datos de Vout del Sensor
int ref;           // Guardará datos de Vref
int volt;          // Guardará datos de la diferencia entre Vout-Vref
```

Figura 3.24. Encabezado del Sketch Medidor de Corriente

Elaborado por: Santiago Cantos

En la parte de “*void setup*” el inicio de la comunicación serial fue incluido para la conexión con LABVIEW a una velocidad de baudaje de 9600.

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600);           //Comunicación Serial
}
```

Figura 3.25. “*Void Setup*” del Sketch Medidor de Corriente

Elaborado por: Santiago Cantos

En la parte principal del sketch se apuntó las lecturas analógicas del voltaje de salida del sensor al igual que el voltaje de referencia. La lectura analógica para el voltaje de salida del sensor fue adquirida por la entrada analógica (A0), y para el Voltaje de referencia por la entrada analógica (A1). Con los datos adquiridos por las entradas analógicas se realizó la resta entre ambos voltajes y se enviaron por comunicación serial para su previa lectura en LABVIEW.

```

void loop ()
{
hall = analogRead(A0);           //Lectura de Vout-Sensor Hass 50-S
ref = analogRead(A1);           //Lectura del Vref
volt=hall2-ref;
Serial.print(volt);             // print result

delay(1);
}

```

Figura 3.26. Lectura de los voltajes de salida y referencia para la medición de corriente

Elaborado por: Santiago Cantos

```

int hall;                       // Guardará datos de Vout del Sensor
int ref;                         // Guardará datos de Vref
int volt;                        //Guardará datos de la diferencia entre Vout-Vref

void setup()
{
Serial.begin(9600);             //Comunicación Serial
}

void loop ()
{

hall = analogRead(A0);         //Lectura de Vout-Sensor Hass 50-S
ref = analogRead(A1);         //Lectura del Vref
volt=hall2-ref;
Serial.print(volt);           // print result

delay(1);
}

```

Figura 3.27. Sketch final para el Medidor de Corriente

Elaborado por: Santiago Cantos

En Arduino Uno, las conexiones provenientes del sensor y del voltaje de referencia fueron localizadas en cada uno de sus entradas correspondientes, Voltaje de salida del sensor en la entrada analógica (A0) y Voltaje de referencia en (A1).

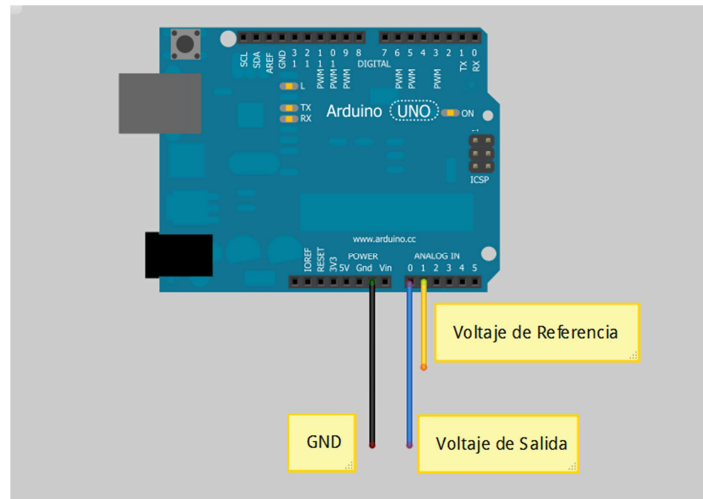


Figura 3. 28. Vista general de la conexión a Arduino Uno con el sensor HASS 50-S

Elaborado por: Santiago Cantos

3.8.3. PROGRAMACIÓN DEL MEDIDOR DE CORRIENTE EN LABVIEW

En LABVIEW los datos enviados desde Arduino fueron convertidos a un valor en voltaje (equivalente) para ser utilizado en la fórmula para obtener la corriente medida por el sensor.

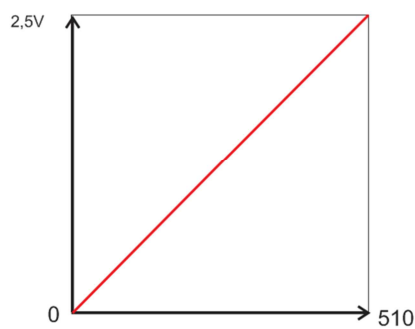


Figura 3. 29. Escalamiento para conseguir el valor en Voltaje

Elaborado por: Santiago Cantos

$$m = \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1}$$

$$m = \frac{2,5 - 0}{510 - 0}$$

$$m = \frac{2,5}{510}$$

Fórmula 3.15. Cálculo de la pendiente para convertir los datos de Arduino en valores de voltaje (equivalentes)

Elaborado por: Santiago Cantos

$$Y2 - Y1 = m(X2 - X1)$$

$$Y2 - 0 = \frac{2,5}{510}(X2 - 0)$$

$$Y2 = \frac{2,5}{510}X2$$

Fórmula 3.16. Cálculo de la recta para escalamiento

Elaborado por: Santiago Cantos

Conocido el valor equivalente del voltaje se aplicó la fórmula para transformar a corriente y desarrollar toda la programación en LABVIEW.

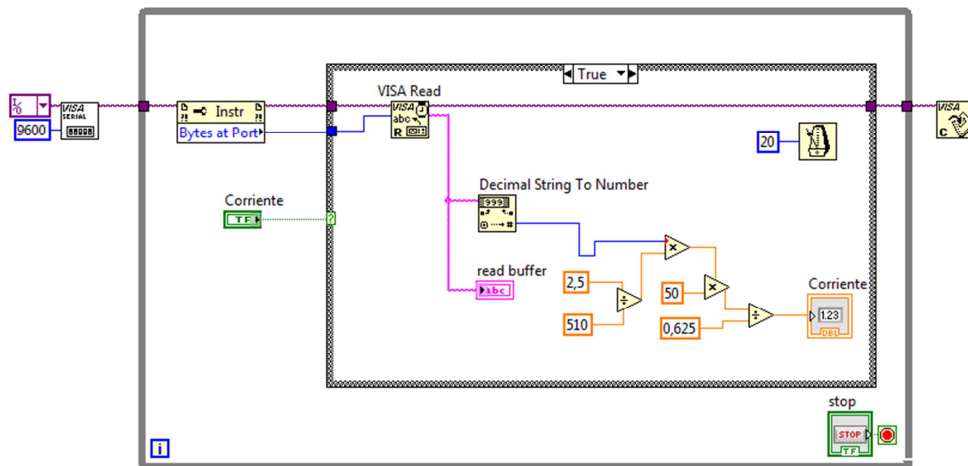


Figura 3. 30. Diagrama de bloques para la visualización de corriente en LABVIEW

Elaborado por: Santiago Cantos



Figura 3. 31. Panel Frontal para la visualización de corriente en LABVIEW

Elaborado por: Santiago Cantos

Para comprobar si el valor obtenido por medio de LABVIEW era el correcto, se lo comprobó poniendo en marcha el motor 1500kv Turnigy al vacío, El manual de este motor indica que el consumo de corriente al vacío de este motor es de 2,2A, obteniendo un valor de 2,35A en LABVIEW, el cual se aproxima.

3.9. PROGRAMACIÓN FINAL

Para mostrar los datos medidos y calculados en un solo programa fue necesario unir ambos programas en uno solo para lo cual hubo que añadir algunas variaciones en Arduino y LABVIEW.

Debido a que fue necesario que Arduino envié ambos datos, RPM y corriente por una sola vía; LABVIEW se encargaría de pedir en secuencia a Arduino cada uno de los datos para que en el VI sean procesados independientemente.

3.9.1. SKETCH FINAL EN ARDUINO

Lo primero que se hizo fue unir los sketches de la medición de RPM y de corriente. Ya que LABVIEW va a enviar por comunicación serial la petición de cual dato recibir por parte de Arduino, al sketch se le debió crear una nueva variable que guarda el dato enviado de LABVIEW. LABVIEW envía dos datos, “a” para el dato de RPM y “b” para el dato de corriente. Adicionalmente se añadió la función “Switch Case” para especificar que función se va a utilizar dependiendo de la letra que se recepte de LABVIEW.


```

#include <FreqCounter.h>

long int revol;
word frq;
int hall;
int ref;
byte a;
int ref2;

void setup()

{
  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  if (Serial.available())
  {

a=Serial.read();

FreqCounter::f_comp= 8;
FreqCounter::start(1000);
while (FreqCounter::f_ready == 0)
frq=FreqCounter::f_freq;
revol=frq*60;
hall = analogRead(A0);
ref = analogRead(A1);
ref2=hall-ref;

switch (a)
{
  case 'a':
Serial.print("a");
Serial.println(revol);

break;
  case 'b':
Serial.print("b");
Serial.println(ref2);

break;
}
delay(500);
}
}

```

Figura 3. 32. Sketch Final para la medición de RPM y corriente simultáneamente

Elaborado por: Santiago Cantos

3.9.2. VI FINAL EN LABVIEW

LABVIEW necesita enviar hacia Arduino el dato “a” y “b” para luego recibir el valor correspondiente a su petición.

Para lograr esto se utilizó el comando “*Stacked Sequence Structure*”, el cual permite realizar varias actividades en secuencia. En el “*frame 0*” se incluyó todo lo necesario para enviar la letra “a” y procesar los datos de RPM a la misma manera las operaciones para indicar gráficamente los valores.

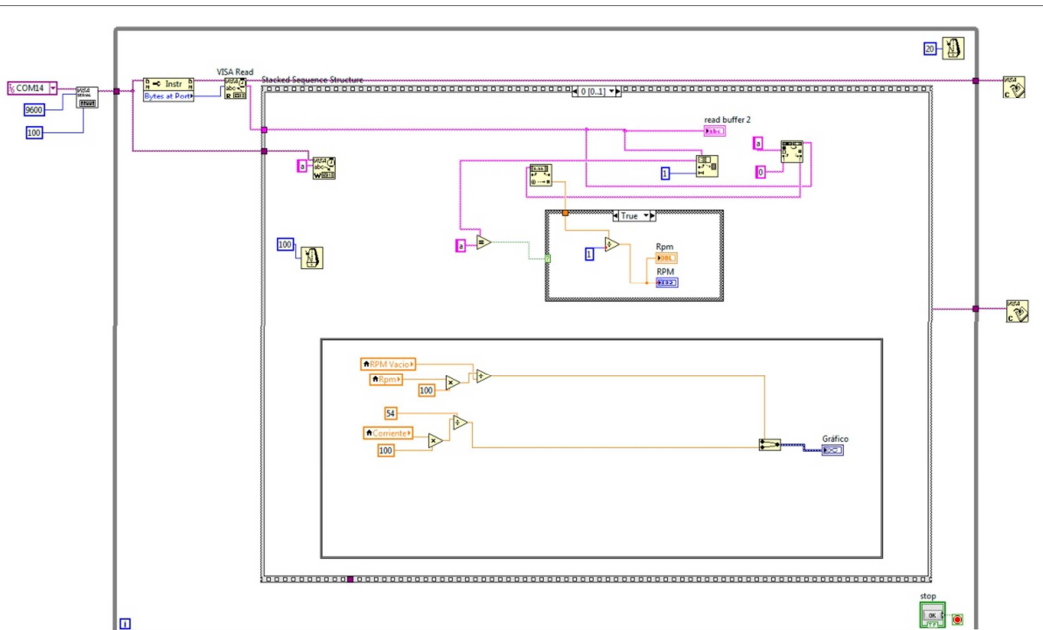


Figura 3. 33 Parte del VI final para la medición de RPM y corriente simultáneamente (Frame 0)

Elaborado por: Santiago Cantos

El valor enviado desde Arduino le precedía la letra solicitada por LABVIEW, se manejó el comando “*String Subset*” para tomar el primer dato y poderlo diferenciar entre el dato de RPM y corriente. Ya que al mismo dato string recibido de la comunicación serial con Arduino era obligatorio para poder operar con ese dato, había la necesidad de quitar a la letra para quedarse con el número de la rama enviada. Para conseguir eso, se usó el comando “*Search and Replace String*”, lo que hacía era buscar al string “a” ó “b” y reemplazarlo con un 0.

En el “*frame 1*”, del comando “*Stacked Sequence Structure*” estará contemplado todo lo pertinente con la lectura de la corriente, además de cálculos adicionales que ayuden a entender a los motores brushless.

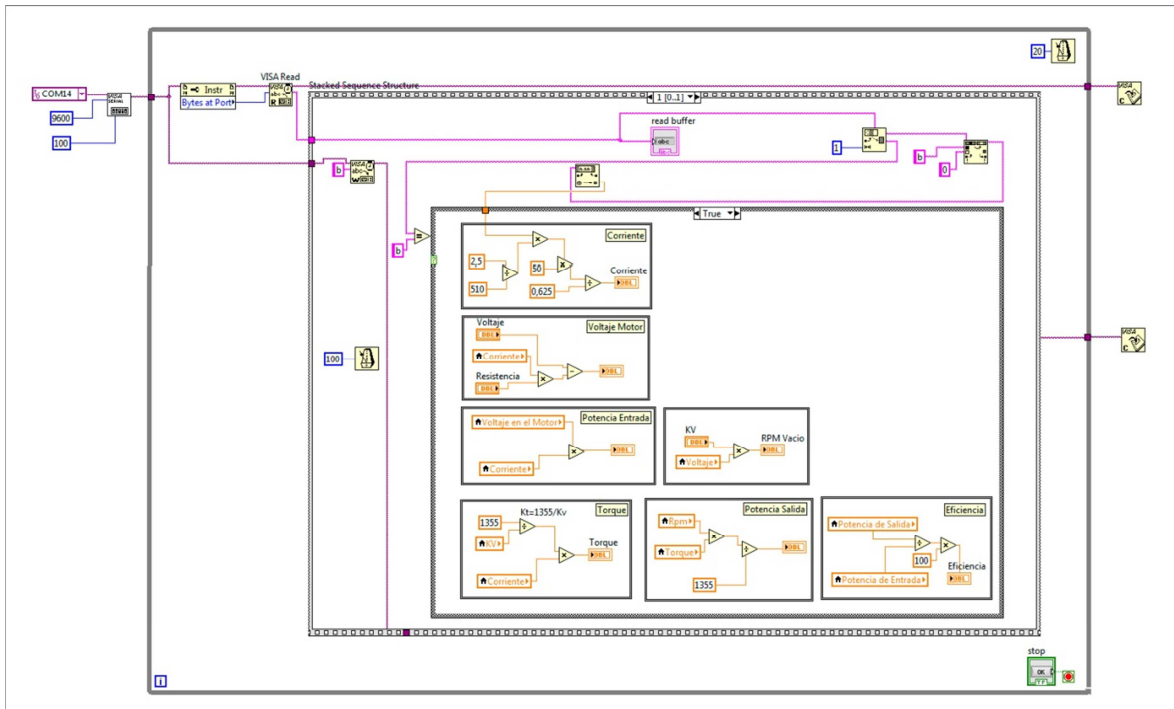


Figura 3. 34. Parte del VI final para la medición de RPM y corriente simultáneamente (Frame 1)

Elaborado por: Santiago Cantos



Figura 3. 35. Panel Frontal del VI medición de RPM y corriente simultáneamente

Elaborado por: Santiago Cantos

3.9.2.1. ESCALAMIENTOS

En la programación de LABVIEW se incluyó un “*Waveform Chart*” para visualizar en forma gráfica la relación entre las RPM, corriente, voltaje en el motor y potencia de salida.

Cada uno de estos datos se debió escalar con respecto a una variable en especial para que todos tengan una proporcionalidad en común. Los escalamientos fueron distintos para cada motor.

3.9.2.1.1. ESCALAMIENTOS PARA EL MOTOR BRUSHLESS INRUNNER 3600KV EXCEED-RC

- **Escalamiento Corriente**

Los valores que se tomaron en cuenta para realizar el escalamiento de corriente fueron: Velocidad máxima alcanzada por el motor inrunner: 13000 RPM y la máxima corriente: 13 A.

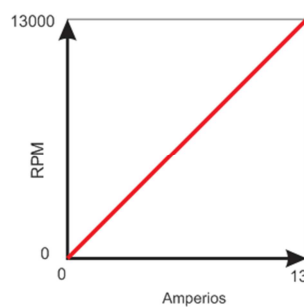


Figura 3. 36. Escalamiento para la corriente del motor Inrunner

Elaborado por: Santiago Cantos

$$m = \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1}$$

$$m = \frac{13000 - 0}{13 - 0}$$

$$m = 1000$$

$$Y2 - Y1 = m(X2 - X1)$$

$$Y2 - 0 = 1000(X2 - 0)$$

$$Y2 = 100X2$$

Fórmula 3.17. Escalamiento de la corriente en función de las RPM

Elaborado por: Santiago Cantos

- **Escalamiento Voltaje**

Para el escalamiento del voltaje se usó el valor máximo de velocidad, 13000 RPM y el valor mínimo de voltaje de 7 V.

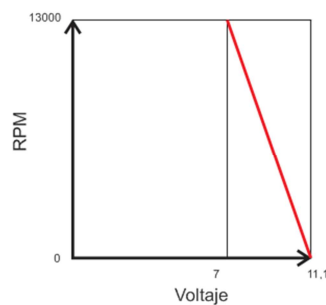


Figura 3. 37. Escalamiento para el voltaje del motor Inrunner

Elaborado por: Santiago Cantos

$$m = \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1}$$

$$m = \frac{13000 - 0}{11,1 - 7}$$

$$m = \frac{13000}{4,1}$$

$$Y2 - Y1 = m(X2 - X1)$$

$$Y2 - 0 = \frac{13000}{4,1}(X2 - 7)$$

$$Y2 = \frac{13000}{4,1}X2 - \frac{91000}{4,1}$$

Fórmula 3.18. Escalamiento del voltaje en función de las RPM

Elaborado por: Santiago Cantos

- **Escalamiento Potencia de Salida**

Los valores utilizados en la potencia máxima fueron los valores de 13000 RPM como velocidad máxima y de 43 W como potencia de salida máxima.



Figura 3. 38. Escalamiento para la potencia de salida del motor Inrunner

Elaborado por: Santiago Cantos

$$m = \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1}$$

$$m = \frac{13000 - 0}{43 - 0}$$

$$m = \frac{13000}{43}$$

$$Y2 - Y1 = m(X2 - X1)$$

$$Y2 - 0 = \frac{13000}{43}(X2 - 0)$$

$$Y2 = \frac{13000}{43}X2$$

Fórmula 3.19. Escalamiento de la Potencia de salida en función de las RPM

Elaborado por: Santiago Cantos

3.9.2.1.2. ESCALAMIENTOS PARA EL MOTOR BRUSHLESS OUTRUNNER 1500KV TURNIGY

- **Escalamiento Corriente**

Los valores que se tomaron en cuenta para realizar el escalamiento de corriente fueron: Velocidad máxima alcanzada por el motor outrunner: 9000 RPM y la máxima corriente: 25 A.

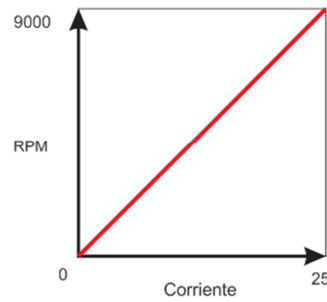


Figura 3. 39. Escalamiento para la corriente del motor Outrunner

Elaborado por: Santiago Cantos

$$m = \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1}$$

$$m = \frac{9000 - 0}{25 - 0}$$

$$m = \frac{9000}{25}$$

$$Y2 - Y1 = m(X2 - X1)$$

$$Y2 - 0 = \frac{9000}{25}(X2 - 0)$$

$$Y2 = \frac{9000}{25}X2$$

Fórmula 3.20. Escalamiento de la corriente en función de las RPM

Elaborado por: Santiago Cantos

- **Escalamiento Voltaje**

Para el escalamiento del voltaje se usó el valor máximo de velocidad, 9000 RPM y el valor mínimo de voltaje de 10,4 V.

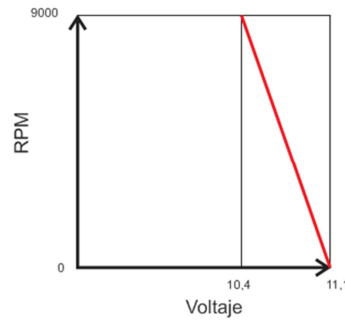


Figura 3. 40. Escalamiento para el voltaje del motor Outrunner

Elaborado por: Santiago Cantos

$$m = \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1}$$

$$m = \frac{9000}{11,1 - 10,4}$$

$$m = \frac{9000}{0,7}$$

$$Y2 - Y1 = m(X2 - X1)$$

$$Y2 = \frac{9000}{0,7}(X2 - 10,4)$$

$$Y2 = \frac{9000}{0,7}X2 - \frac{93600}{0,7}$$

Fórmula 3.21. Escalamiento del voltaje en función de las RPM

Elaborado por: Santiago Cantos

- **Escalamiento Potencia de Salida**

Los valores utilizados en la potencia máxima fueron los valores de 13000 RPM como velocidad máxima y de 144 W como potencia de salida máxima.



Figura 3. 41. Escalamiento para la potencia de salida del motor Outrunner

Elaborado por: Santiago Cantos

$$m = \frac{Y2 - Y1}{X2 - X1}$$

$$m = \frac{9000 - 0}{144 - 0}$$

$$m = \frac{9000}{144}$$

$$Y2 - Y1 = m(X2 - X1)$$

$$Y2 - 0 = \frac{9000}{144}(X2 - 0)$$

$$Y2 = \frac{9000}{144}X2$$

Fórmula 3.22. Escalamiento de la potencia de salida en función de las RPM

Elaborado por: Santiago Cantos

3.10. PARÁMETROS DE LOS MOTORES BRUSHLESS

A continuación se enlista los parámetros que contienen el módulo de comprobación de motores brushless:

Voltaje en el motor: Es el voltaje que circula por los devanados del motor.

$$V_m = V_{in} - (I * R_m)$$

Dónde:

V_m : Voltaje en el motor en Voltios

V_{in} : Voltaje de la batería en Voltios

I : Corriente en Amperios

R_m : Resistencia en el motor en Ohm

Fórmula 3.23. Fórmula para calcular el voltaje en el motor

Elaborado por: Santiago Cantos

Corriente: es la corriente de línea o de la corriente de entrada que es brindada por la batería.

Resistencia del motor: es la oposición eléctrica que presentan los bobinados del motor a la corriente.

Potencia de Entrada: Es la potencia que desarrollaría el motor si no existiese ningún tipo de pérdidas.

$$P_{in} = V_{in} * I$$

Dónde:

P_{in} : Potencia de entrada en Vatios

V_{in} : Voltaje de la batería en Voltios

I : Corriente en Amperios

Fórmula 3.24. Fórmula para calcular la potencia de entrada

Elaborado por: Santiago Cantos

Potencia de Salida: Es la potencia disponible para realizar trabajo. Es trabajo mecánico.

$$P_{out} = \frac{\text{Torque} * \text{RPM}}{1355}$$

Dónde:

P_{out} : Potencia de salida en Vatios.

Torque: en oz-in

RPM: Revoluciones por minuto.

Fórmula 3.25. Fórmula para calcular la potencia de salida

Elaborado por: Santiago Cantos

Torque: o par es un conjunto de dos fuerzas de magnitudes iguales pero de sentido contrario.

$$KV * Kt = 1355$$

$$\text{Torque} = Kt * I$$

Dónde:

KV: Revoluciones por minuto

Kt: Constante de torque en oz-in/Amperios

I: Corriente en Amperios

Torque: Torque generado en oz-in

Fórmula 3.26. Fórmula para calcular el torque

Elaborado por: Santiago Cantos

KV: Es el valor que define la calidad de un motor debida a sus imanes, al número de vueltas de su bobinado y a su geometría.

Revoluciones: Se define como la cantidad de vueltas completas que da el rotor en el lapso de un minuto.

Revoluciones al vacío: la cantidad de vueltas a que gira el motor sin tener ningún tipo de carga en su eje.

$$RPM_{vacío} = KV * V_{in}$$

Dónde:

KV: Revoluciones por voltio

V: Voltaje de entrada en Voltios

Fórmula 3.27. Fórmula para calcular revoluciones al vacío

Elaborado por: Santiago Cantos

Eficiencia: La eficiencia de un motor mide la conversión de la energía eléctrica en trabajo útil.

$$Eficiencia = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

Dónde:

Eficiencia: en porcentaje

P_{out}: Potencia de salida en vatios

P_{in}: Potencia de entrada en vatios

Fórmula 3.28. Fórmula para calcular la eficiencia

Elaborado por: Santiago Cantos

3.11. MANEJO DEL MÓDULO DE COMPROBACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS MOTORES BRUSHLESS

Para poder utilizar el módulo de comprobación de los motores brushless se debe conocer las respectivas conexiones que se deben hacer antes de arrancar los motores.

El módulo posee un cable de alimentación para conexión de 5VDC, esto alimentará a los circuitos de control de los motores, al sensor UGN 3132 y al sensor HASS 50-S. Esta conexión se la debe realizar procurando que las baterías de los motores estén desconectadas.

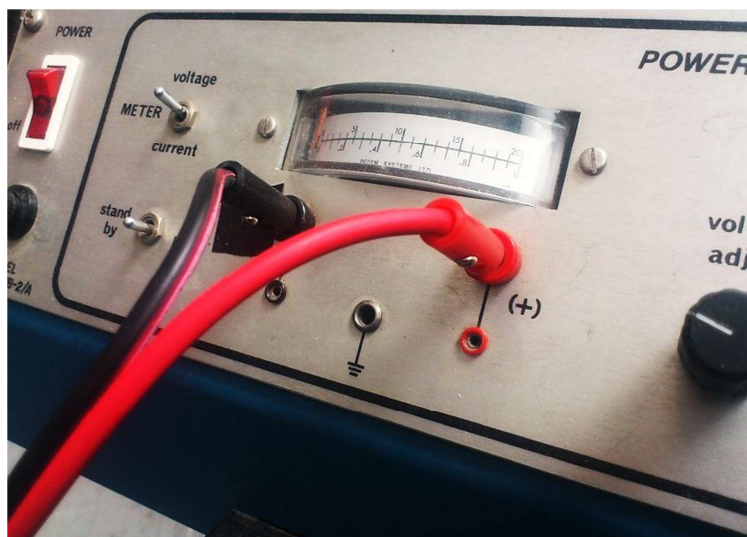


Foto 3.29. Cables de alimentación 5VDC para el módulo

Elaborado por: Santiago Cantos

Junto a los cables de alimentación también se encuentra el cable de la salida de datos que serán enviados al computador para su previa visualización en LABVIEW. Estos cables tienen una nominación distinta y color exclusivo para cada uno, para evitar la confusión en la placa Arduino en el momento de conectar

- Señal proveniente del sensor UGN 3132 (RPM): Cable de color verde
- Señal de Salida del sensor HASS 50-S (Corriente): Cable de color azul
- Señal de referencia para el sensor HASS 50-S: Cable color naranja
- Terminal de GND: Cable color blanco

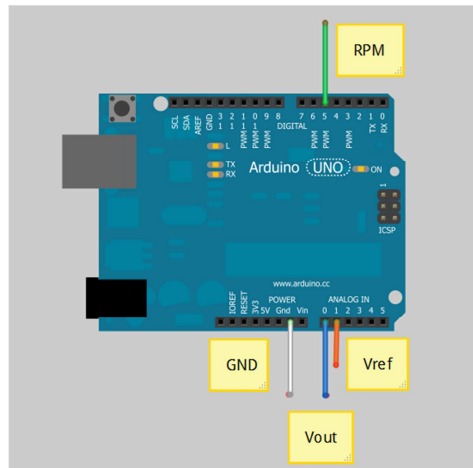


Figura 3. 42. Configuración de las entradas de datos para la placa Arduino

Elaborado por: Santiago Cantos

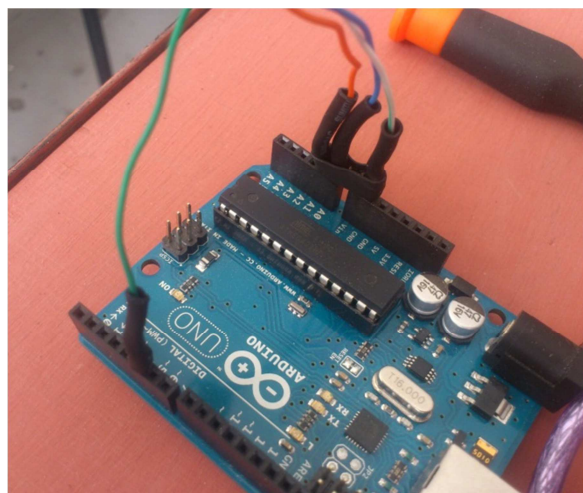


Foto 3.30. Cables de salidas de datos conectados en la placa Arduino Uno

Elaborado por: Santiago Cantos

Al tener ya listas las conexiones en Arduino y la fuente alimentación, se debe revisar que los cables en lo motores estén bien conectados con los cables que se dirigen a cada uno de sus ESC's, esto es importante para que los motores giren al sentido en que están configurado previamente. Cada uno de los cables está nombrado con letras (A, B, C) con el propósito de que coincidan entre ellos.

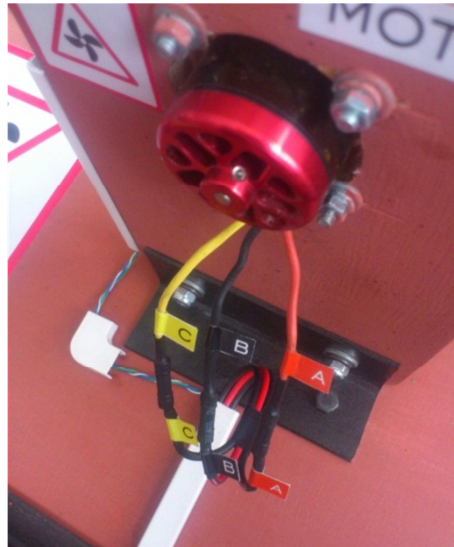


Foto 3.31. Cables de entrada hacia el motor.

Elaborado por: Santiago Cantos

La conexión de las baterías se las debe realizar siempre y cuando esté encendido el control de velocidad y se visualice “Velocidad del motor: 0%”. En los switches de “RPM” y “Selector” se elige el motor en que se va a realizar las pruebas. Además que el cable de medición de corriente se lo debe colocar en los jacks del motor a analizar. Esto es para evitar cualquier señal parasita o ruido provoquen que el motor gire inesperadamente.



Foto 3.32. Vista general del control de velocidad

Elaborado por: Santiago Cantos

Después de conectar la batería de alimentación al motor se debe esperar que los motores den el aviso audible que indiquen que están listos para ser operados. Una vez que se tuvo todas estas medidas en cuenta, se puede arrancar los motores con mucho cuidado y precaución colocándose siempre detrás de ellos

3.13. DISEÑO DE LAS PLACAS

Una vez concluido la simulación y las pruebas de los circuitos adicionales para cada uno de los sensores y el circuito para el control de los motores brushless se pasó al diseño en el software “Ares” para la creación de las pistas a ser impresas en las placas.

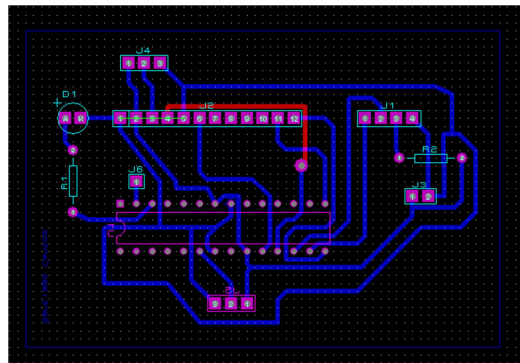


Figura 3. 43. Diseño de la placa del control de velocidad de los motores en ARES

Elaborado por: Santiago Cantos

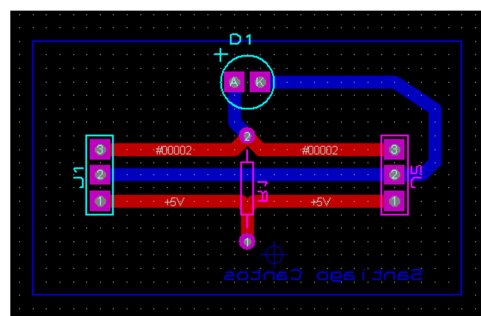


Figura 3. 44. Diseño de la placa adicional para el funcionamiento del sensor UGN 3132

Elaborado por: Santiago Cantos

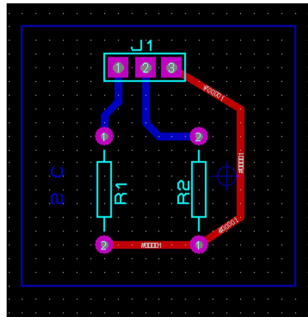


Figura 3. 45. Diseño de la placa adicional para el funcionamiento del sensor HASS 50-S

Elaborado por: Santiago Cantos

Luego del diseño de las placas en ARES se continuó con el traspaso del diseño a la placa para ser puesta en cloruro férrico para la creación de las pistas.



Foto 3.33. Placas después del paso por cloruro férrico.

Elaborado por: Santiago Cantos

Se soldó todos los elementos para dejar las placas listas para ser implementadas en el módulo.

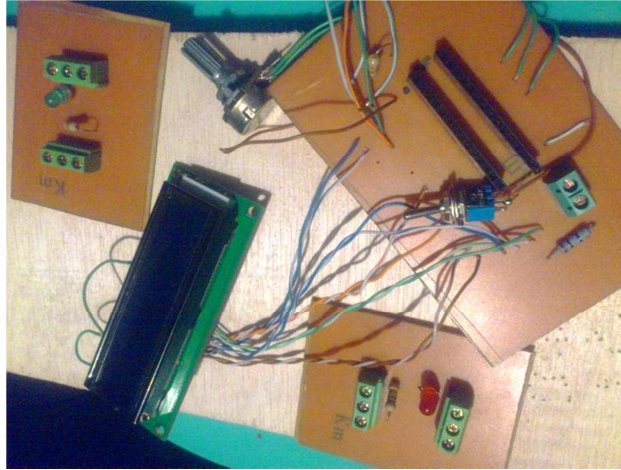


Foto 3.34. Placas finalizadas.

Elaborado por: Santiago Cantos

3.12. RECARGA DE BATERÍAS

Para recargar las baterías utilizadas en el proyecto, se escogió al cargador /balanceador **TURNIGY Accucell-8150** (ver Anexo H.).



Foto 3.35. Cargador/Balanceador Accucell-8150

Elaborado por: Santiago Cantos

Las conexiones que se hicieron para cargar las baterías fueron: conectar el cable de batería en la salida del cargador, y cable de las celdas se conectó en la ranura destinada para el tipo de conector.

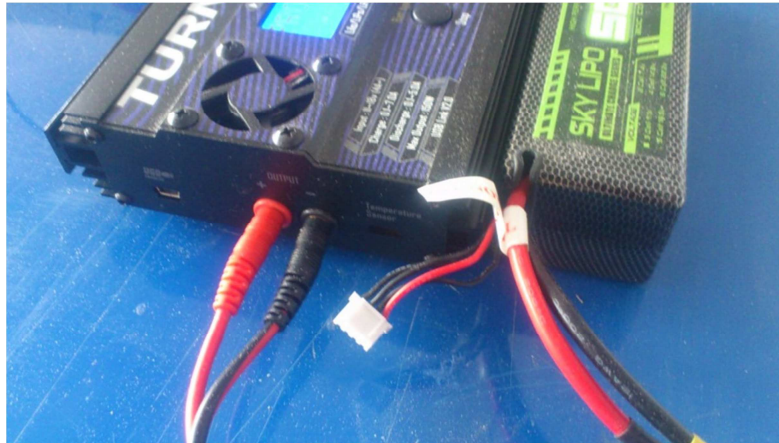


Foto 3.36. Conexión entre la batería y la salida del cargador

Elaborado por: Santiago Cantos



Foto 3.37. Ranuras destinadas para los conectores de las celdas

Elaborado por: Santiago Cantos

Durante la carga, una cantidad específica de energía eléctrica es alimentada hacia la batería, la cantidad de la carga es determinada por producto de la corriente de carga por el tiempo de carga. El máximo permisible varía de acuerdo al tipo de batería, estos parámetros fueron configurados previamente en el programa de usuario para luego proceder a la programación de carga.

3.12.1. PARÁMETROS INICIALES

Al encender el cargador, en el display principal apareció las palabras “*User Set Program*”, esto informa la designación.



Foto 3.38. Visualización de “*User Set Program*”

Elaborado por: Santiago Cantos

Para continuar con las configuraciones iniciales, presionando el botón “*Inc*”, cambia a la selección del tipo de batería de litio, existen tres tipos de baterías de litio: LiFe (3.3V), Lilo (3.6V) o LiPo (3.7V). Esto es muy importante, se debe revisar la batería cuidadosamente y establecer el tipo correctamente, en caso de existir un error la batería puede explotar durante la carga.



Foto 3.39. Elección del tipo de batería de Lito

Elaborado por: Santiago Cantos

Se vuelve a presionar “*Inc*”, la siguiente configuración que aparece es el tiempo de chequeo “*Check Time*”, esta función reconoce al contador de celda al inicio de la carga para evitar errores en la configuración de usuario. Este tiempo verifica paulatinamente el contador de la celda. Normalmente 10 minutos son suficientes para percibir correctamente al contador de celda.



Foto 3.40. Configuración del “*Check Time*”

Elaborado por: Santiago Cantos

Entre cada carga y descarga a la cual la batería es sometida la batería se calienta, el parámetro “*Waste Time*” es el tiempo que permite a que la batería tenga un momento para enfriarse.



Foto 3.41. Selección de la configuración “*Waste Time*”

Elaborado por: Santiago Cantos

La opción “*Safety Timer*”, ayuda a que la batería no sea sobre cargada, este tiempo comienza a correr al inicio del programa, que al llegar a su límite cortará la carga asegurando la vida de la batería. Este tiempo debe ser lo suficientemente largo para que la batería cargue normalmente sin problemas.



Foto 3. 42. Opción de “Safety Timer” mostrada en el display

Elaborado por: Santiago Cantos

“Capacity Cut-Off”, este programa establece el máximo valor de carga que será entregado a la batería, esta función detendrá el proceso una vez alcanzado el valor de carga máximo, aunque el “Safety Timer” aún no sea activado.



Foto 3.43. Configuración de “Capacity Cut Off” en el display del Accucell-8150

Elaborado por: Santiago Cantos

3.12.2. PROGRAMACIÓN PARA LAS BATERÍAS DE LITIO

Cumplido la configuración de usuario, antes de iniciar la carga se elige el programa principal dependiendo del tipo de batería, en este caso “*Program Select – Lipo Batt*”



Foto 3.44. Selección del programa “Lipo Batt”

Elaborado por: Santiago Cantos

El lado izquierdo de la primera línea muestra el tipo de batería de litio que se seleccionó en la configuración de usuario. El valor del lado izquierdo establece la corriente de carga y el valor de la derecha de la segunda línea establece el voltaje del pack de batería.



Foto 3.45. Pantalla para la configuración de corriente y voltaje de carga.

Elaborado por: Santiago Cantos

Después de implantar la corriente y el voltaje presionar el botón “Start/Enter” por más de 3 segundos para empezar el proceso. Antes de iniciar el proceso de carga otra pantalla muestra el número de celdas a las que se configuró y las que el procesador detectó. “R” demuestra el número de celdas encontradas por el cargador y “S” es el número de celdas seleccionadas por el usuario en la pantalla previa. Si ambos números coinciden se puede iniciar la carga presionando el botón “Start/Enter”. En el caso que estos valores no coinciden se debe presionar el botón “Batt Type/Stop” para volver a la pantalla anterior y configurar el número correcto de celdas del pack de baterías.



Foto 3.46. Pantalla previa a la carga del pack de baterías.

Elaborado por: Santiago Cantos

Comprobado que los dos números tanto de “R” y “S” coinciden, el cargador muestra la pantalla mostrada en la foto 3.47 durante el proceso de carga. Para detener la carga se presiona “Batt Type/Stop”.



Foto 3.47. Pantalla de Carga del pack de baterías.

Elaborado por: Santiago Cantos

3.12.3. SEGURIDAD

Las baterías de LiPo deben ser tratadas con cuidado, debido a que son propensas a incendiarse o explotar. Los principales casos que esto ocurre, son:

- Cuando sufren un cortocircuito
- Al momento que es sometida a un fuerte golpe
- Si es cargada en forma excesiva (al realizar una carga rápida, debe instruirse muy bien acerca de los límites de carga aconsejados por el fabricante de la batería).
- Si es descargada en forma excesiva (Conocer el consumo de los motores eléctricos y equipos es fundamental a la hora de elegir una adecuada batería para que trabaje en forma cómoda).¹²

¹² <http://www.pergaminovirtual.com.ar/blogs/aeromodelismo/Seguridad/>

3.14. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Terminado una vez el módulo de comprobación de las características de los motores brushless se implementó pruebas de los motores poniéndoles a distintas velocidades para observar su comportamiento.



Foto 3.48. Módulo Terminado.

Elaborado por: Santiago Cantos

3.14.1. PRUEBAS EN EL MOTOR INRUNNER 3600KV EXCEED-RC (MOTOR 1)

3.14.1.1. PRUEBA AL VACÍO

Para la prueba del motor en vacío los datos se tomaron del 100 % estimado.

➤ **Corriente**

Tabla 3. 1. Corriente al vacío del motor Inrunner

Velocidad estimada	Corriente medida	Corriente según el manual
100%	1,18 A	0,8 A

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

Se pudo comprobar que la corriente consumida al vacío es baja ya que el motor gira libremente sin necesidad de ejercer esfuerzo adicional.

➤ **RPM**

Tabla 3. 2. RPM al vacío del motor Inrunner

Velocidad estimada	RPM medidos	RPM según el manual
100%	42095	39960

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

El no tener carga el motor que le frene, el motor puede desarrollar con facilidad todas revoluciones que viene especificado en el manual.

3.14.1.2. PRUEBA CON CARGA

Para la prueba con carga se utilizó la hélice 4,7 x 4,7 pulgadas a diferentes velocidades estimadas, debido a los cálculos anteriores sobre la máxima velocidad de la hélice, por precaución y cuidado al motor solo se debe trabajar hasta el 60% estimado como máximo.

➤ **Voltaje en el motor**

Tabla 3. 3. Voltaje en el motor Inrunner con carga

Velocidad (%)	10	20	30	40	50	60
Voltaje en Motor (V)	10,87	10,65	10,3	9,51	8,83	7,57

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

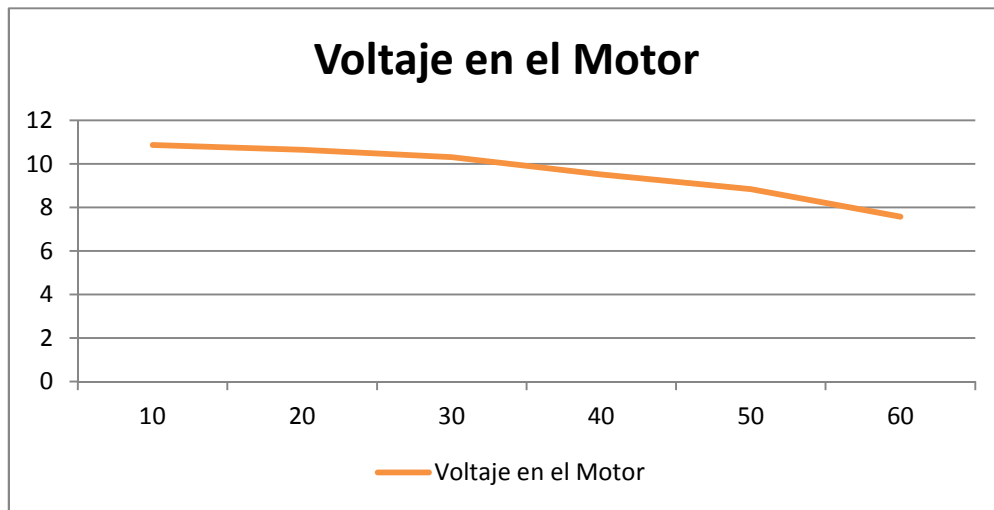


Figura 3. 46 Curva de respuesta del Voltaje en el motor Inrunner

Elaborado por: Santiago Cantos

Se puede notar que la curva de respuesta en el voltaje en el motor es casi lineal, existe una reducción de voltaje mientras más velocidad gire el motor, esta reducción es provocada por la fuerza contra electromotriz y la corriente que consume. Notándose que pasado el 40% existe una mayor caída de voltaje debido al esfuerzo adicional del motor.

➤ **Corriente**

Tabla 3. 4. Corriente consumida por el motor Inrunner con carga

Velocidad (%)	10	20	30	40	50	60
Corriente (A)	0,78	1,57	2,75	5,49	7,84	12,2

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

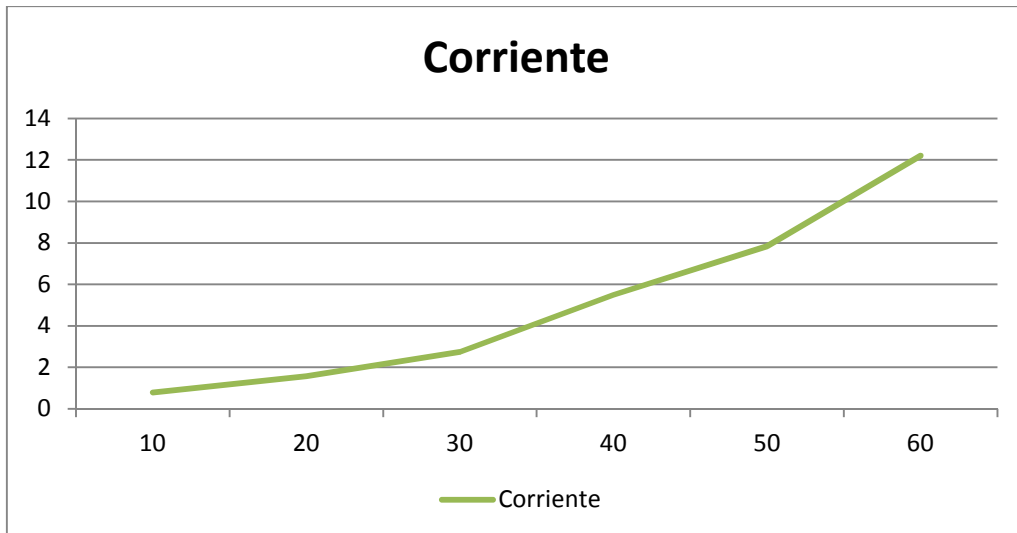


Figura 3. 47. Curva de respuesta de la corriente del motor Inrunner

Elaborado por: Santiago Cantos

Se puede notar que la corriente comienza a incrementar significativamente desde el 40% debido a que la hélice le exige un mayor trabajo al motor para poder girarla. Al 60% ya se excedió de la corriente máxima especificada en el manual provocando que el motor se esfuerce demasiado y comience a calentarse.

➤ **Potencia de Entrada**

Tabla 3. 5. Potencia de entrada con carga del motor Inrunner

Velocidad (%)	10	20	30	40	50	60
Potencia Entrada (W)	8,53	16,7	28,29	52,2	69,22	92,08

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

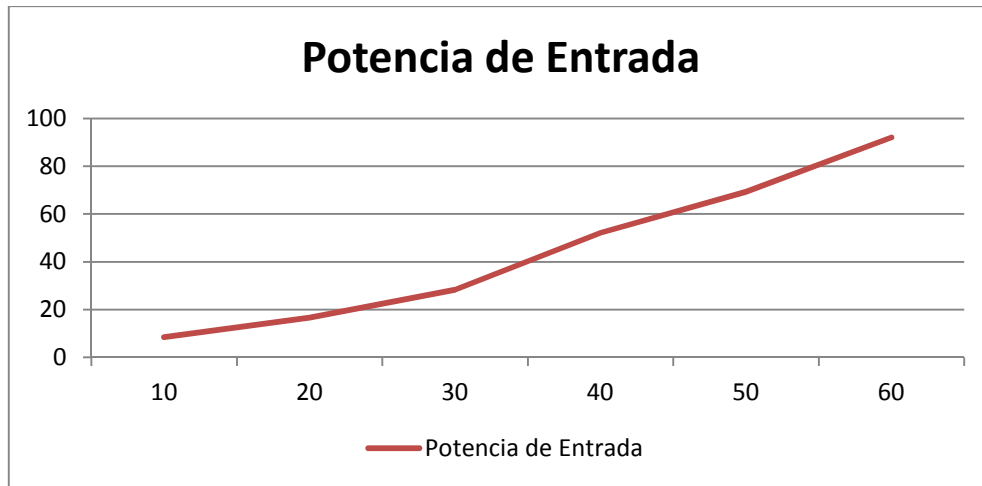


Figura 3. 48. Curva de respuesta de la potencia de entrada del motor Inrunner

Elaborado por: Santiago Cantos

Se puede notar que la potencia de entrada es casi parecida a la curva de respuesta de la corriente, debido a que la sobrecarga de la hélice provoca mayor potencia para poder hacerle girar

➤ **Potencia de Salida**

Tabla 3.6. Potencia de salida con carga del motor Inrunner

Velocidad (%)	10	20	30	40	50	60
Potencia Salida (W)	1,15	3,29	7,14	16,38	26,01	42,95

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

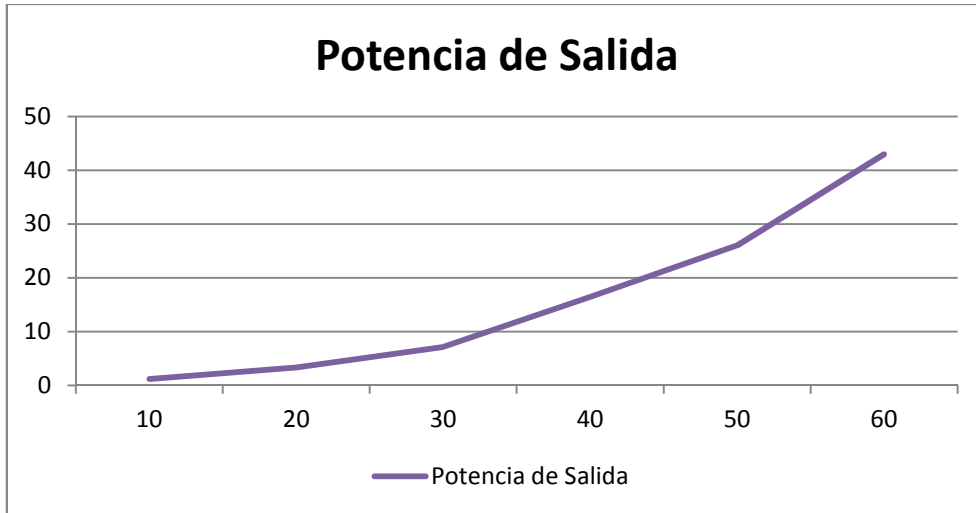


Figura 3. 49. Curva de respuesta de la potencia de salida del motor Inrunner

Elaborado por: Santiago Cantos

La potencia de salida se puede apreciar que tiene un incremento significativo desde el 40% debido a las grandes revoluciones que el motor está girando.

➤ **Torque**

Tabla 3. 7. Torque producido por el motor Inrunner con carga

Velocidad (%)	10	20	30	40	50	60
Torque (oz-in)	0,3	0,59	1,03	2,07	2,95	4,58

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

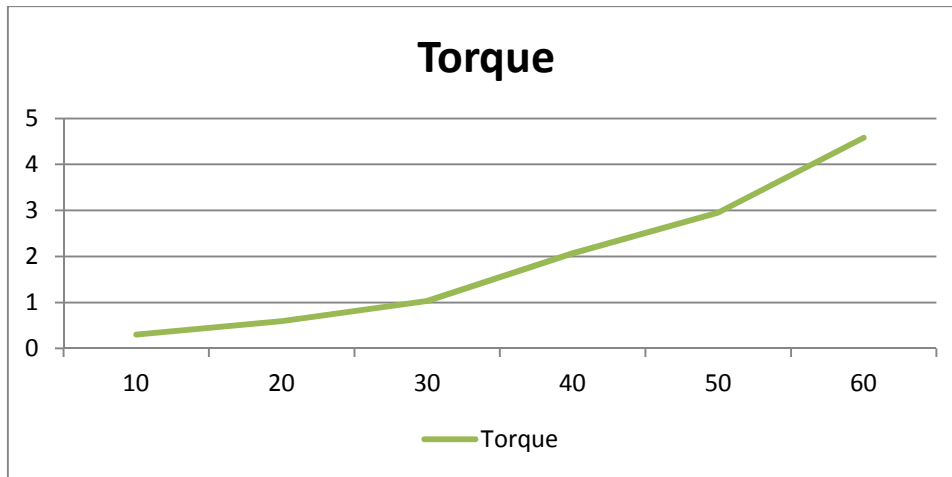


Figura 3. 50. Curva de respuesta del Torque del motor Inrunner

Elaborado por: Santiago Cantos

En la curva del torque se puede ver que este motor tiene una gran capacidad en revoluciones pero no en torque, se nota un incremento pequeño en el torque comparado a sus revoluciones.

➤ **RPM**

Tabla 3. 8. RPM a que gira el motor Inrunner con carga

Velocidad (%)	10	20	30	40	50	60
RPM	5340	7560	9420	10740	11880	12720

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

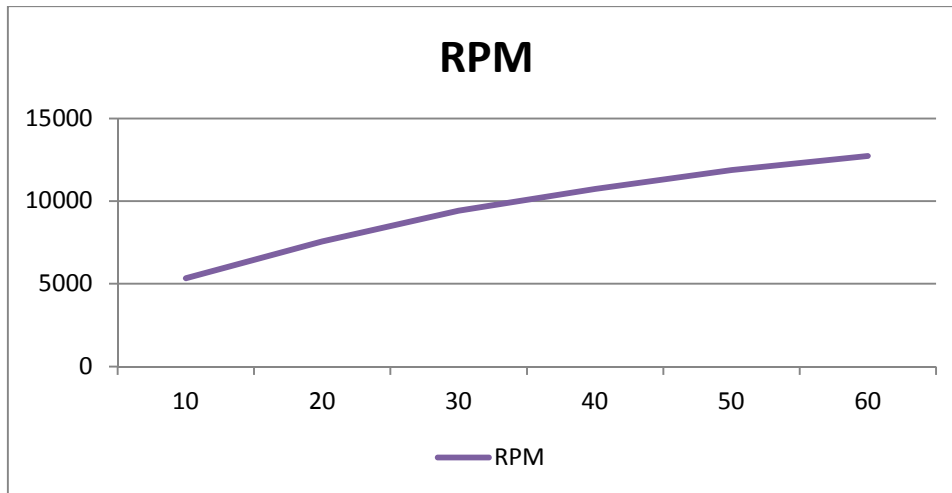


Figura 3. 51. Curva de respuesta de las RPM del motor Inrunner

Elaborado por: Santiago Cantos

Sabiendo que el motor gira en vacío cerca de las 4000 RPM se puede notar que con una carga mayor a lo que se debería acoplar al motor, existe una reducción notable en las revoluciones.

➤ **Eficiencia**

Tabla 3.9. Eficiencia del motor Inrunner con carga

Velocidad (%)	10	20	30	40	50	60
Eficiencia (%)	13	19,9	25,4	30,6	38,7	40,8

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

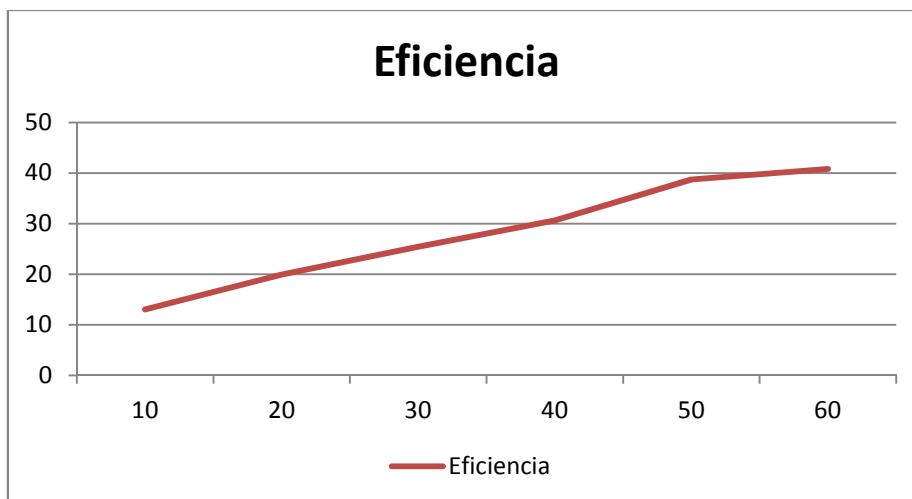


Figura 3. 52. Curva de respuesta de la Eficiencia del motor Inrunner

Elaborado por: Santiago Cantos

La eficiencia comienza a decaer aproximadamente en el 40% debido a que el torque no aumenta a la par con las RPM, reduciendo en un 20% sus características.

3.14.2. PRUEBAS EN EL MOTOR OUTRUNNER 1500KV TURNIGY (MOTOR 2)

3.14.2.1. PRUEBA AL VACÍO

Para la prueba del motor en vacío los datos se tomaron del 100 % estimado.

➤ Corriente

Tabla 3. 10. Corriente al vacío del motor Outrunner

Velocidad estimada	Corriente medida	Corriente según el manual
100%	2,35 A	2,2 A

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

Al no poseer ningún tipo de carga el motor gira libremente, ese movimiento no implica mucho esfuerzo por ende la corriente de entrada es baja.

➤ **RPM**

Tabla 3. 11. Corriente al vacío del motor Outrunner

Velocidad estimada	RPM medidos	RPM según el manual
100%	15683	16650

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

El motor si tener ninguna hélice alcanza fácilmente las revoluciones máximas especificadas por el fabricante.

3.14.2.2. PRUEBA CON CARGA

Para la prueba con carga se utilizó la hélice 10" x 4,5" a diferentes porcentajes de velocidades estimadas.

➤ **Voltaje en el motor**

Tabla 3. 12. Voltaje en el motor Outrunner con carga

Velocidad (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Voltaje en Motor (V)	11,08	11,05	10,98	10,93	10,88	10,83	10,71	10,53	10,42	10,41

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

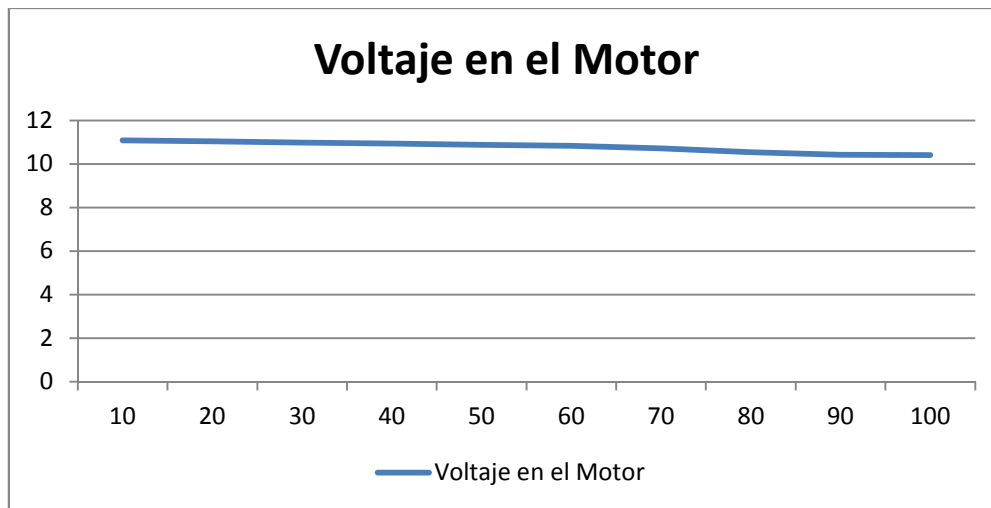


Figura 3. 53. Curva de respuesta del Voltaje en el motor Outrunner

Elaborado por: Santiago Cantos

El consumo de voltaje en este motor es muy bajo, se puede apreciar que el voltaje en el motor casi es el mismo que el de entrada, variando muy poco.

➤ **Corriente**

Tabla 3.13. Corriente consumida por el motor Outrunner con carga

Velocidad (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Corriente (A)	0,784	1,96	4,31	5,88	7,8	9,41	13,7	20	23,9	24.3

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

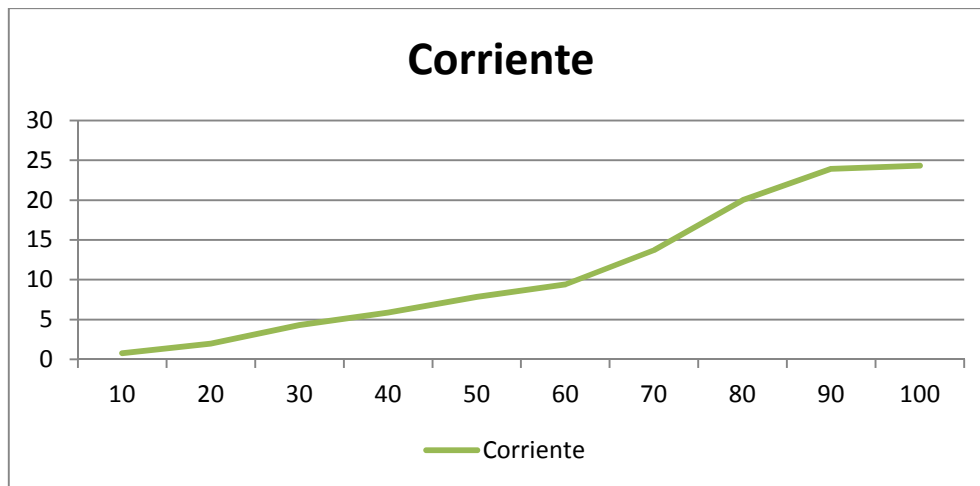


Figura 3. 54. Curva de respuesta de la corriente del motor Outrunner

Elaborado por: Santiago Cantos

El consumo de corriente al máximo se acerca significativamente con lo que especifica el manual del motor, entre 27A – 35A. En la curva también se puede ver un mayor consumo de corriente pasado el 60% del motor por el esfuerzo sometido al mover la hélice. También se puede ver que el motor entra en saturación cerca del 90% casi no existiendo diferencia con el 100%.

➤ **Potencia de Entrada**

Tabla 3. 14. Potencia de Entrada con carga del motor Outrunner

Velocidad (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Potencia Entrada (W)	8,69	21,66	47,36	64,31	85,32	102	147	210,7	249,3	253

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

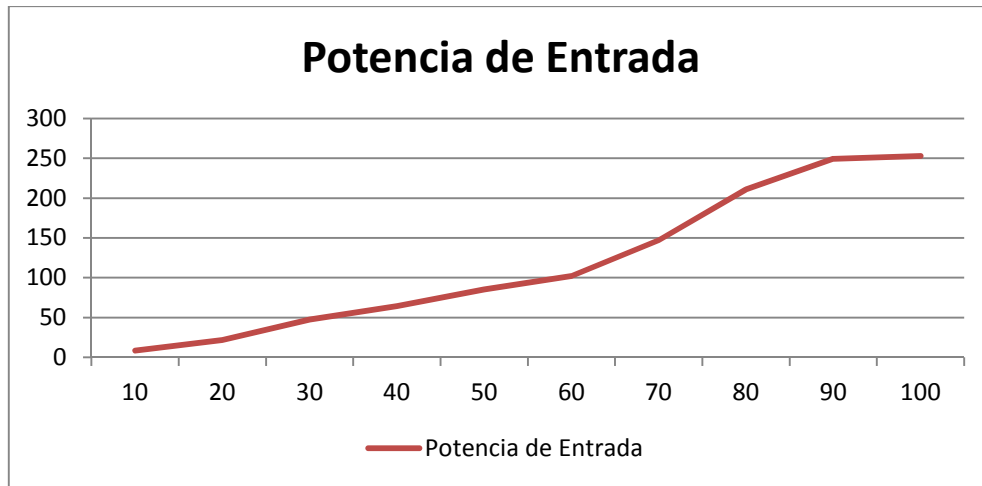


Figura 3. 55. Curva de respuesta de la potencia de entrada del motor Outrunner

Elaborado por: Santiago Cantos

De igual forma para la curva de la potencia de entrada se puede notar un incremento mayor desde el 60% y la saturación en el 90%.

➤ **Potencia de Salida**

Tabla 3. 15. Potencia de Salida con carga con carga del motor Outrunner

Velocidad (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Potencia Salida (W)	0,47	3,84	13,11	21,88	33,25	44,05	71,92	112	142,6	143,9

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

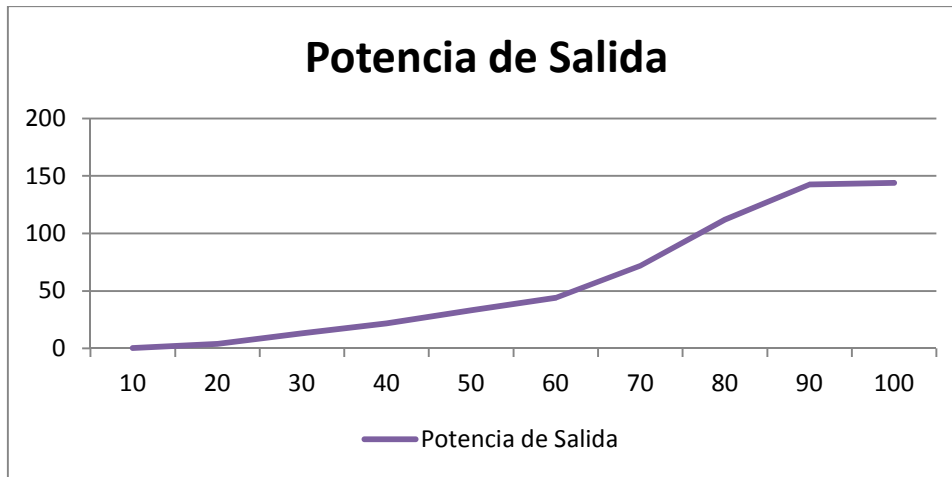


Figura 3. 56. Curva de respuesta de la potencia de salida del motor Outrunner

Elaborado por: Santiago Cantos

La potencia de salida se puede apreciar que tiene un incremento significativo pasado el 60% debido a la corriente que el motor consume.

➤ **Torque**

Tabla 3. 16. Torque producido por el motor Outrunner con carga.

Velocidad (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Torque (oz-in)	0,708	1,77	3,9	5,31	7,08	8,5	12,4	18,1	21,6	22

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

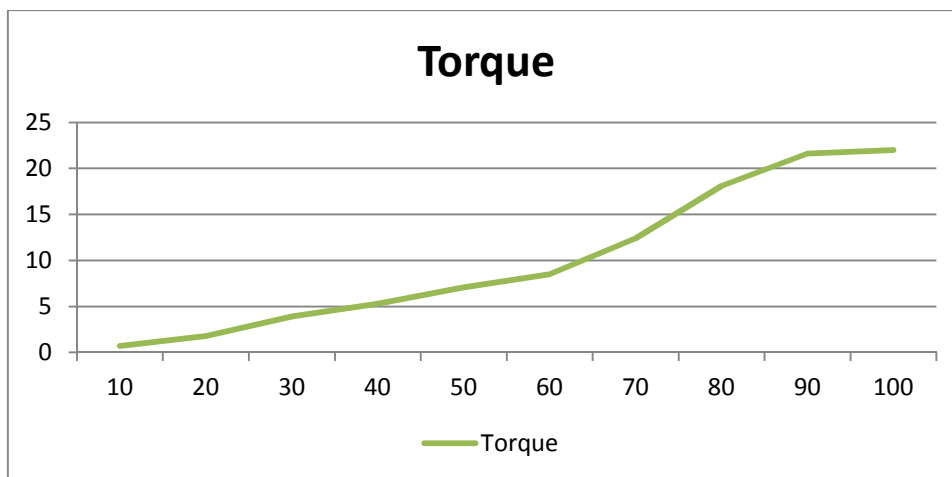


Figura 3. 57. Curva de respuesta del Torque del motor Outrunner

Elaborado por: Santiago Cantos

En la curva del torque se puede ver que este motor tiene una gran capacidad en torque, se nota un incremento en el torque de acuerdo al incremento de la corriente que consume el motor.

➤ **RPM**

Tabla 3. 17. RPM a que gira el motor Outrunner con carga.

Velocidad (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
RPM	900	2940	4620	5580	6360	7020	7860	8340	8770	8820

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

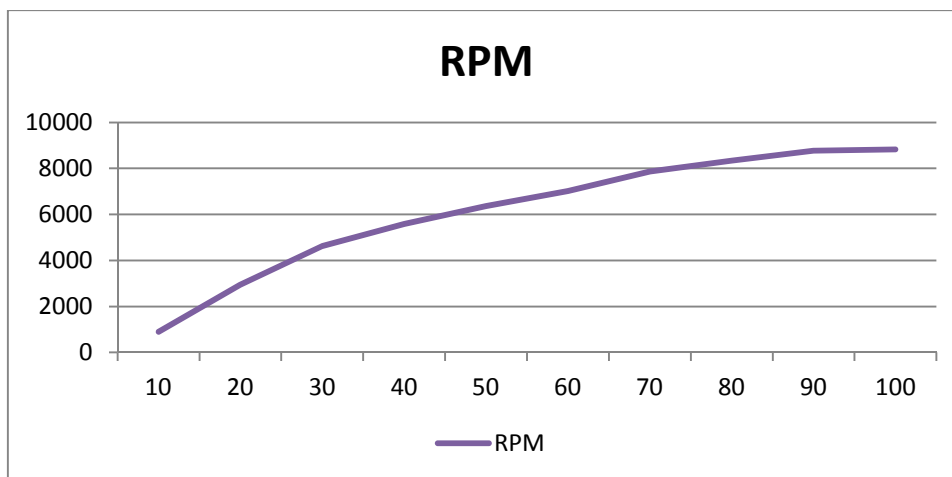


Figura 3. 58. Curva de respuesta de las RPM del motor Outrunner

Elaborado por: Santiago Cantos

En las curva de las RPM se puede apreciar de mejor manera la forma en que el motor entra en saturación y por mas corriente que le esté alimentando, el motor no entrega un incremento notable en las RPM

➤ **Eficiencia**

Tabla 3. 18. Eficiencia del motor Outrunner con carga.

Velocidad (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Eficiencia (%)	5,42	17,7	36,5	34	39,2	43,6	50	52,9	56,6	56,9

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

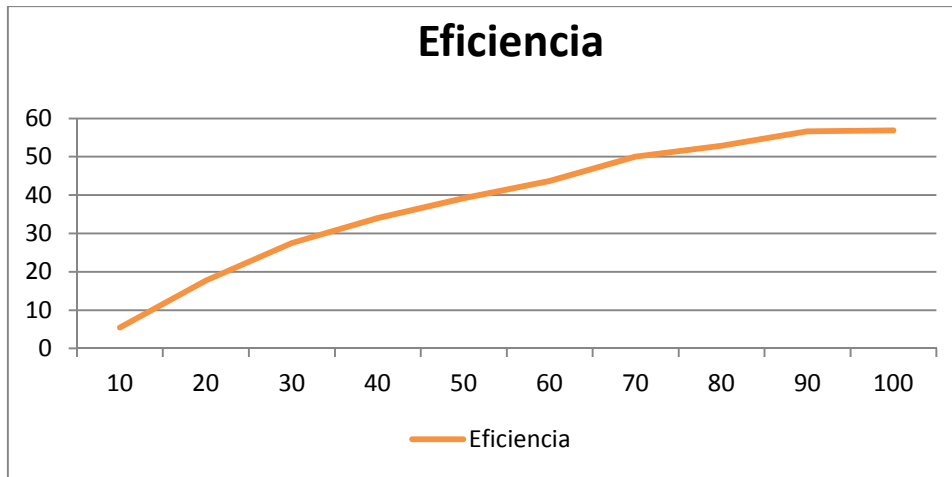


Figura 3. 59. Curva de respuesta de la eficiencia del motor Outrunner

Elaborado por: Santiago Cantos

La eficiencia no coincide con lo establecido en el manual ya que se debe tener en consideración la densidad del aire, la cercanía de la punta de la hélice a la superficie de la mesa y factores mecánicos.

3.15. Gastos Realizados

Para el desarrollo de este proyecto se incurrió en los siguientes costos:

3.15.1. Costos Primarios

A continuación se detallan todos los dispositivos electrónicos y materiales usados para la realización del proyecto, y se los sintetiza en la tabla 3.19:

Tabla 3.19. Costos Primarios

ÍTEM	CANT	DESCRIPCIÓN	VALOR UNT.	TOTAL
1	1	Elaboración del Módulo	\$120.00	\$120.00
2	1	Motor Brushless Inrunner 3600kv	\$19.62	\$19.62
3	1	Motor Brushless Outrunner 1500kv	\$19.71	\$19.71
4	1	Controlador de Velocidad Esc 60A	\$25.50	\$25.50
5	1	Controlador de Velocidad Esc 30A	\$19.00	\$19.00
6	2	Batería Li-po 3S 11.1V 5000mAh 20C	\$ 72.11	\$144.22
7	1	Pack de propelas 10"x 4.5"	\$25,45	\$25,45
8	1	Hélice 4,7" x 4,7"	\$6,00	\$6,00
9	1	ATMEGA 8	\$5.00	\$5.00
10	1	Cargador/Balanceador Accucell-8150	\$42.44	\$42.44
11	2	Sensor UGN3132	\$4.80	\$9.60
12	1	Sensor HASS 50 – S	\$50.00	\$50.00
13	3	Par de Conectores Xt60	\$8,00	\$24.00
14	3	Elaboración Impresión De Placas	\$5,00	\$12.00
15	2	Spinner para propela	\$10.00	\$20.00
TOTAL				\$542.54

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

3.15.2. Costos Secundarios

En la tabla 3.20 se encuentran los gastos secundarios que están relacionados indirectamente con la realización del proyecto.

Tabla 3. 20. Costos Secundarios

ÍTEM	CANT	DESCRIPCIÓN	VALOR UNT.	TOTAL
1	1	Importación	\$123.88	\$123.88
2	1	Transporte Movilización Módulo	\$20.00	\$20.00
3		USO DE INTERNET		\$25.00
4		IMPRESIONES, MATERIALES DE PAPELERÍA, VARIOS		\$35.00
TOTAL				\$203.88

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

3.15.3. Costo Total

El costo total se indica en la Tabla 3.21 que es la suma de los costos primarios y secundarios como se muestra a continuación.

Tabla 3. 21. Gasto Total

ITEM	DESCRIPCIÓN	TOTAL
1	Total Costo Primario	\$542.54
2	Total Costo Secundario	\$203.88
<i>TOTAL DEL PROYECTO</i>		<i>\$746.42</i>

Fuente: Investigación de campo

Elaborado por: Santiago Cantos

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Con la implementación de este módulo se pudo apreciar la forma en que trabaja cada uno de los tipos de motores Brushless, inrunner y outrunner, y las diferencias que hay entre ellos. Los motores inrunner aparte de ser más pequeños generan un gran número de revoluciones (KV muy alto) pero generan un torque más bajo habiendo la necesidad de usar hélices de tamaños muy pequeños o la posibilidad de usar hélices reductoras. Mientras tanto, los motores Brushless outrunner generan un número más bajo de revoluciones (KV bajo) pero a su vez su forma de construcción le ayuda a que generen un torque alto brindándoles más potencia.
- Se pudo presenciar que los motores al no tener algún objeto o resistencia externa que le obligue a absorber energía mecánica, generan su máximo de revoluciones sin problema y tienen un bajo consumo de corriente, sin la necesidad de producir un torque alto ya que no necesita esfuerzo adicional para ello; coincidiendo con las especificaciones que se detallan en sus diferentes manuales.
- Al incluir una carga a los motores se observó que existía una reducción del 20% en su rendimiento, las revoluciones con carga redujeron en un 50% las revoluciones especificadas al vacío de cada motor. También se notó que el consumo de corriente se elevó considerablemente comparando al consumo de corriente en las pruebas al vacío. Al aumentar el tamaño de la hélice (carga) iba aumentando el consumo de corriente aún más, exigiendo a los motores llegar a sus límites provocando su recalentamiento al poco tiempo de estar trabajando.

- Las revoluciones de ambos motores se veía controlada por el voltaje, entre más voltaje, más revoluciones alcanzaría el motor; mientras que el torque, variaba en función de la corriente, entre más corriente consume, el motor generará más torque.
- En cuanto a la eficiencia en ambos motores, alcanzaron un poco más de la mitad, 40,8% en el motor inrunner (con respecto del 60% estimado como máximo) y 57% en el motor outrunner, teniendo en cuenta que existen factores que afectan que los motores no trabajen a su mayor eficiencia, estos factores son: la carga que estén llevando, la fuente de alimentación a que estén conectados, rozamiento, corriente disipada en forma de calor ya sea en el motor o los conductores, flujo de aire que intervenga en las hélices, turbulencias generadas en la punta de hélice e incluso la densidad del aire puede afectar el trabajo de las hélices afectando al rendimiento de los motores.
- El sensor UGN 3132 tuvo una excelente respuesta para la medición de RPM, permitió realizar una medición muy confiable comparándose con un tacómetro digital, pero a diferencia de utilizar el sensor UGN3132 que con el tacómetro, fue que la medición brindada por el sensor de Efecto Hall se lo pudo adquirir a la computadora y presentarlo virtualmente.
- El sensor de corriente HASS 50-S resulto de mucha ayuda al momento de medir las altas corrientes consumidas por los motores brushless, como mayores ventajas que se aprovecharon de este sensor fueron: que al ser un sensor de nivel industrial no tuvo problemas al medir las altas corrientes en comparación de utilizar un multímetro en función de amperímetro. No hubo un contacto directo con la corriente gracias a su principio de funcionamiento por Efecto Hall. Y de igual forma que con el sensor UGN 3132, la señal de salida del sensor HASS 50-S pudo ser utilizada y manejada en el computador.

- La placa Arduino Uno resultó ser una herramienta muy útil al momento de enlazar los datos de los sensores con la parte virtual de LABVIEW, gracias a su fácil y sencilla interfaz de programación.

4.2 Recomendaciones

- Conocer claramente las características de cada motor, ESC y batería para su perfecto acople entre ellos para sacar provecho de los mismos.
- Tener en cuenta el riesgo de utilizar hélices que giraran a altas revoluciones para evitar, daños y lesiones.
- Asegurarse que los motores estén desenergizados antes de acercarse a ellos o manipularlos.
- Advertir los riesgos que pueden existir al trabajar con baterías de Lipo, procurando evitar sobrecargas, corto circuitos o golpes que pueden causar daños a las baterías, causar fugas y/o explosiones.
- Leer y entender antes los manuales y datasheets de los elementos utilizados para un mejor control y manejo de los mismos para evitar daños a los equipos o lesiones.
- Realizar las pruebas con las baterías cargadas al 100% para obtener mejores resultados, ya que la descarga de la batería puede variar los datos entre prueba y prueba.
- Antes de desconectar la fuente de alimentación del módulo asegúrese que las baterías que alimentan a los motores están desconectadas.

GLOSARIO

ATMEGA: microcontroladores AVR grandes con de 4 a 256 kB de memoria flash programable, encapsulados de 28 a 100 pines, conjunto de instrucciones extendido (multiplicación y direccionamiento de programas mayores) y amplio conjunto de periféricos.

AVR: son una familia de microcontroladores RISC del fabricante estadounidense Atmel.

BEC: Un Circuito Eliminador de Batería (BEC), es un circuito electrónico diseñado para repartir energía eléctrica a otro circuito sin la necesidad de otra batería adicional.

BLDC: Siglas para referirse a Motor Brushless de Corriente Continua

Bound Rate: La *tasa de baudios* (en inglés *Baud Rate*), también conocida como baudaje, es el número de unidades de señal por segundo. Un *baudio* puede contener varios bits.

Datasheet: es un documento que resume el funcionamiento y otras características de un componente o subsistema, con el suficiente detalle para ser utilizado por un ingeniero de diseño y diseñar el componente en un sistema.

ESC: Un controlador electrónico de velocidad por sus siglas en inglés, es un circuito eléctrico con el propósito de variar y controlar la velocidad de un motor eléctrico, su dirección y algunos ESC's incluso se los puede utilizar como frenos dinámicos.

FCEM: Siglas para referirse a Fuerza Contra Electromotriz

Inrunner: Una de las formas en la que están contruidos los motores brushless, disponiendo los imanes directamente en torno al eje, mientras que el bobinado es exterior y rodea el eje con los imanes.

KV: (Revoluciones por voltio), es el valor que define la calidad de un motor debida a sus imanes, al número de vueltas de su bobinado y a su geometría.

Outrunner: Los motores brushless outrunner, los bobinados de cobre se encuentran en la parte interior central, mientras que los imanes están situados en una campana exterior rodeando al bobinado y a la que se conecta el eje, cuando gira la campana, lo hace también el eje.

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 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.

Sketch: Un *sketch* es el nombre que usa Arduino para un programa. Es la unidad de código que se sube y ejecuta en la placa Arduino.

Spinner: Parte aerodinámica, encargada de dirigir el paso del aire hacia las palas de la hélice.

Switch Case: Como las sentencias if, switch-case controla el flujo de programas permitiendo a los programadores especificar diferentes códigos que deberían ser ejecutados en función de varias condiciones.

Throttle Stick: del inglés, palanca de aceleración.

WEB GRAFÍA

- http://www.elcomercio.com/tecnologia/aeropuerto-Chachoan-despegan-naves-inteligentes_0_761923878.html.
- http://www.elcomercio.com/negocios/Ecuador-invierte-produccion-aviones-tripulados_0_810519061.html
- <http://es.wikipedia.org/wiki/LabVIEW>
- http://en.wikipedia.org/wiki/Battery_eliminator_circuit

- <http://www.portalplanetasedna.com.ar/pilas.htm>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_de_n%C3%ADquel_cadmio
- http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/101a200/ntp_104.pdf
- http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_de_n%C3%ADquel_e_hidruro_met%C3%A1lico
- http://www.gte.us.es/ASIGN/IE_4T/Tutorial%20de%20Labview.pdf
- http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/14156/1/Memoria_PFC.pdf
- <http://www.gratiszona.com/aerodelismo/componentes/bec-battery-eliminator-circuit.htm>
- http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_memoria
- http://www.ecured.cu/index.php/Bater%C3%ADas_de_Ni-MH
- <http://www.ukai.com/documentos/00068-LNK02056.pdf>
- <http://www.tronic-controls.com/imag/MOTOR%20BRUSHLESS.pdf>
- <http://www.cochesrc.com/content/122-articulos-y-guias/2627-conceptos-basicos-baterias-lipo-tension-capacidad-descarga-y-conexion-de-elementos.html>
- <https://sites.google.com/site/mikuadricoptero/home/5-generalidades>
- <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-218/lang/es>
- <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>
- <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo212/docs/Encoders-jvr-v01.pdf>
- <http://www.aerodelismocampoo.com/contehelices.php>
- <http://altosvuelos.blogspot.com/2007/01/calculo-de-helices-para-motores.html>