



REPÚBLICA DEL ECUADOR

Escuela Politécnica Nacional

" E SCIENTIA HOMINIS SALUS "

La versión digital de esta tesis está protegida por la Ley de Derechos de Autor del Ecuador.

Los derechos de autor han sido entregados a la "ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL" bajo el libre consentimiento del (los) autor(es).

Al consultar esta tesis deberá acatar con las disposiciones de la Ley y las siguientes condiciones de uso:

- Cualquier uso que haga de estos documentos o imágenes deben ser sólo para efectos de investigación o estudio académico, y usted no puede ponerlos a disposición de otra persona.
- Usted deberá reconocer el derecho del autor a ser identificado y citado como el autor de esta tesis.
- No se podrá obtener ningún beneficio comercial y las obras derivadas tienen que estar bajo los mismos términos de licencia que el trabajo original.

El Libre Acceso a la información, promueve el reconocimiento de la originalidad de las ideas de los demás, respetando las normas de presentación y de citación de autores con el fin de no incurrir en actos ilegítimos de copiar y hacer pasar como propias las creaciones de terceras personas.

Respeto hacia sí mismo y hacia los demás.

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CONSTRUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE UN SISTEMA DE APUNTAMIENTO DE ANTENAS PARA RADIO ENLACE MÓVIL PUNTO - PUNTO DESTINADO PARA EL PROYECTO “PLATAFORMA DE GRAN ALTITUD” DE LA FUERZA AÉREA ECUATORIANA (F.A.E.)

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y CONTROL**

ROMERO MEJÍA LUIS GEOVANNY

geov_elec@hotmail.com

MESÍAS OLMEDO RAFAEL ALBERTO

rafaelmesiasolmedo@hotmail.com

DIRECTOR: DR. ROBIN ÁLVAREZ RUEDA

arobin7es@yahoo.es, robin.alvarez@epn.edu.ec

Quito, diciembre 2011

DECLARACIÓN

Nosotros, Romero Mejía Luis Geovanny y Mesías Olmedo Rafael Alberto, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Romero Mejía Luis Geovanny

Mesías Olmedo Rafael Alberto

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Romero Mejía y Mesías Olmedo Rafael Alberto Luis Geovanny, bajo mi supervisión.

Dr. Robin Álvarez Rueda
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A mi director Dr. Robin Álvarez por toda la amistad y confianza brindada durante el desarrollo del proyecto, un excelente amigo.

A mis padres Gonzalo y Marta por ser el pilar fundamental en mi vida y brindarme la oportunidad de superarme y salir adelante.

A mis hermanos Blanca y Fernando por todo ese apoyo brindado, a Gustavo y Alexandra por pertenecer a mi linda familia.

A Orlando Torres por todo ese apoyo incondicional y por ser más que un amigo un hermano, gracias por tus consejos.

A Rafael por sacar adelante la realización de este proyecto, y por ser más que compañero un gran amigo.

Siempre el mejor de mis deseos para todos ustedes

AGRADECIMIENTOS

A mi madrecita Selesteste por ser mi vida y la fuerza para salir adelante, por acompañarme ya sea de cerca o de lejos en los momentos de estudio.

A mi tíos Meche, Carmina, Oscar, Ramón, Orley e Iván, por ayudarme cuando más lo necesité, y que me dieron ánimos para conseguir lo que uno más desea en la vida.

A mis hermanos Santiago, Carmina, Rodolfo y Dayar por siempre haber confiado en la realización de esta meta.

A mi director de tesis Dr. Robin Álvarez por todo, no solo por el apoyo profesional, si no por lo principal, su gran amistad.

A mi otro hermano Geovanny que siempre me ha ayudado y aconsejado en todo momento, gracias amigo.

A toda mi familia y amigos, que confiaron en mis capacidades.

Rafael Mesías

DEDICATORIA

Esta tesis va dedicada a dos personas muy especiales en mi vida. Mi madre quien pese a todas las dificultades de su vida siempre me apoyo incondicionalmente en las buenas y en las malas durante mi vida como hijo y estudiante. Madre no sé qué hubiese sucedido de mí si tú no estuvieses conmigo.

De igual manera dedico esta tesis como un ejemplo de superación para Gheraldo y que se dé cuenta que en la vida hay como realizar todo cuando uno se propone, y que te sirva como una pauta para que tú también seas un gran profesional en el transcurso de tu vida.

Geovanny Romero

DEDICATORIA

A una persona que dio todo de sí para que yo salga adelante, por sacrificar muchas cosas con tal de ver lo mejor a sus hijos, por hacer la doble tarea de padre y madre, esto y mucho mas se lo dedico a mi mamita Seleste.

Rafael Mesías

CONTENIDO

<u>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN AL DIRECCIONAMIENTO AUTOMÁTICO ENTRE</u>	
<u>ANTENAS</u>	<u>17</u>
1.1 INTRODUCCIÓN	18
1.1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
1.1.2 ESTADO DEL ARTE	19
1.1.2.1	25
1.1.2.2 Discusión	25
1.1.3 METODOLOGÍA	25
<u>CAPÍTULO 2: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE HARDWARE Y DESARROLLO DEL</u>	
<u>SOFTWARE PARA EL SISTEMA</u>	<u>27</u>
2.1 SISTEMA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE SEÑALES.	28
2.1.1 INTRODUCCIÓN	28
2.1.2 SISTEMA MICROCONTROLADO	30
2.2 SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GPS	31
2.2.1 INTRODUCCIÓN	31
2.2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	32
2.2.3 ARQUITECTURA DEL SISTEMA	33
2.2.3.1 Segmento Espacial	34
2.2.3.2 Segmento de Usuario	35
2.2.3.3 Segmento de Control	35
2.2.4 SEÑALES DEL RECEPTOR GPS, CÓDIGOS Y FRECUENCIAS	36
2.2.5 MODOS DE RECEPCIÓN DEL GPS	38
2.2.6 FUENTES DE ERRORES	40
2.2.7 TÉCNICAS DE MEJORAMIENTO PARA ADQUISICIÓN DE SEÑAL GPS	41
2.2.7.1 GPS Diferencial (DGPS)	41
2.2.7.2 Wide Area Augmentation System (WAAS)	43
2.2.7.3 Carrier-Phase Enhancement (CPGPS)	44
2.2.7.4 Real Time Kinematic	44
2.2.8 CONSIDERACIONES PARA SELECCIONAR UN GPS	45
2.2.9 APLICACIONES	45
2.2.10 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y ELÉCTRICAS DEL RECEPTOR GPS	46

2.2.10.1	Tramas de comunicación entregadas por el módulo GPS.	48
2.2.11	ADQUISICIÓN DE LA SEÑAL GPS A TRAVÉS DEL MICROCONTROLADOR	58
2.3	SISTEMA DE MEDICIÓN DE ALTITUD	62
2.3.1	INTRODUCCIÓN	62
2.3.2	TIPOS DE PRESIÓN	62
2.3.2.1	Presión absoluta	62
2.3.2.2	Presión manométrica	62
2.3.2.3	Vacío	63
2.3.2.4	Presión atmosférica	63
2.3.2.4.1	Ecuación altimétrica	63
2.3.3	MEDIDAS DE LA PRESIÓN	65
2.3.3.1	Elementos Mecánicos	65
2.3.3.2	Elementos Neumáticos.	66
2.3.3.3	Elementos Electromecánicos Electrónicos.	66
2.3.4	DETERMINACIÓN DE LA ALTURA PARA EL SISTEMA DE APUNTAMIENTO.	74
2.3.4.1	Etapa de acondicionamiento de las señales.	75
2.3.4.1.1	Etapa de resta de la señal	75
2.3.4.1.2	Etapa de amplificación de la señal	78
2.3.4.2	Algoritmo de programación para el cálculo de la altura.	79
2.4	COMPÁS MAGNÉTICO O BRÚJULA DIGITAL	82
2.4.1	INTRODUCCIÓN	82
2.4.2	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	83
2.4.3	TIPOS DE COMPÁS MAGNÉTICO	83
2.4.3.1	Compases de Núcleo Saturable.	83
2.4.3.2	Compases dependientes de la clase de núcleo y devanados.	83
2.4.3.3	Compases magnetointuctivos.	84
2.4.3.4	Compases Magnetoresistivos.	84
2.4.3.5	Compases de efecto Hall.	85
2.4.4	CONSIDERACIONES DE ORIENTACIÓN	85
2.4.5	CARACTERÍSTICAS DEL DISPOSITIVO EMPLEADO	86
2.4.5.1	Salida PWM.	87
2.4.5.2	Interface I2C	87
2.4.5.3	Pines de conexión.	89
2.4.6	COMUNICACIÓN ENTRE EL MICROCONTROLADOR Y EL MÓDULO CMPS03	91
2.5	ACCIONAMIENTOS PARA EL MOVIMIENTO DEL SISTEMA	94
2.5.1	MEDIOS DE TRANSMISIÓN	94

2.5.1.1	Transmisión por accionamiento directo	94
2.5.1.2	Transmisión por fricción	95
2.5.1.3	Bandas	95
2.5.1.4	Cadenas	96
2.5.1.5	Engranajes	96
2.5.2	ACTUADORES	99
2.5.2.1	Sistemas de actuadores hidráulicos	99
2.5.2.2	Sistemas de actuadores neumáticos	100
2.5.2.3	Sistemas de actuadores eléctricos	101
2.5.2.3.1	Dispositivos de Conmutación	102
2.5.2.3.2	Dispositivos tipo solenoide	102
2.5.2.3.3	Sistemas motrices	102
2.5.2.3.4	Servomotores	103
2.6	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE MOVIMIENTO	110
2.6.1	ESTRUCTURA MECÁNICA DEL SISTEMA FIJO	110
2.6.1.1	Solid Works	111
2.6.2	ESTRUCTURA MECÁNICA DEL SISTEMA MÓVIL.	114
2.6.3	SELECCIÓN DE LOS SERVOMOTORES COMO ACTUADORES	115
2.6.4	MODIFICACIÓN DE SERVO DIGITAL A ANALÓGICO	121
2.7	GRADOS DE LIBERTAD DE MOVIMIENTO	121
2.7.1	ALGORITMOS DE COMPENSACIÓN DE LAS VARIABLES DE LATITUD Y LONGITUD DE LA NAVE 123	
2.7.1.1	Ubicación de un punto sobre la superficie terrestre	125
2.7.1.2	Cálculo de Azimut en terminal Fija.	126
2.7.1.3	Cálculo de Azimut en terminal Móvil.	130
2.7.2	ALGORITMO DE COMPENSACIÓN DEL MOVIMIENTO DE ROTACIÓN DE LA NAVE EN LA ESTACIÓN MÓVIL	132
2.7.3	ALGORITMO PARA MOVIMIENTO DE INCLINACIÓN Y DECLINACIÓN DE LAS DOS ESTACIONES. 134	
2.7.3.1	Cálculo de Inclinación en terminal Fija.	134
2.7.3.2	Cálculo de declinación en terminal Móvil	138
2.7.4	GENERACIÓN DEL MOVIMIENTO AZIMUT E INCLINACIÓN EN LA TERMINAL FIJA.	140
2.7.4.1	Diseño del filtro activo pasa bajos	142
2.7.4.2	Análisis de la programación en la generación del movimiento azimut.	143
2.7.4.3	Análisis de la programación en la generación del movimiento de inclinación.	145
2.7.5	GENERACIÓN DEL MOVIMIENTO AZIMUT Y DECLINACIÓN EN LA TERMINAL MÓVIL.	149

2.7.5.1	Análisis de la programación en la generación del movimiento azimut.	149
2.7.5.2	Análisis de la programación en la generación del movimiento de declinación.	151
2.8	TRASMISIÓN INALÁMBRICA VÍA ZIGBEE	155
2.8.1	INTRODUCCIÓN	155
2.8.2	CARACTERÍSTICAS	157
2.8.3	TOPOLOGÍAS DE REDES ZIGBEE	158
2.8.3.1	Topología ZigBee en estrella	158
2.8.3.2	Topología Zigbee en Árbol (Cluster Tree)	158
2.8.3.3	Topología ZigBee en Malla	159
2.8.4	CARACTERÍSTICAS DE MODULO EMPLEADO	159
2.8.4.1	Características técnicas del módulo Xbee 868.	160
2.8.4.2	Configuración del módulo Xbee, mediante software X-CTU.	160
2.8.4.3	Adaptación de voltajes entre transmisión y recepción:	162
2.8.5	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE ZIGBEE	164
2.8.5.1	Ventajas.	164
2.8.5.2	Desventajas.	165
2.8.6	ASPECTOS PARA TRASMISIONES INALÁMBRICAS	165
2.8.6.1	Consideraciones de Distancia de Transmisión	165
2.8.6.1.1	Zonas de Fresnel	166
2.9	FUENTES DE ENERGÍA	168
2.9.1	INTRODUCCIÓN	168
2.9.2	ALIMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN FIJA	168
2.9.3	ALIMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN MÓVIL	169
2.10	SISTEMA FINAL	170

CAPÍTULO 3: PRUEBAS Y **175**

RESULTADOS **175**

3.1	PRUEBA DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GPS	176
3.2	PRUEBA DE ALTÍMETRO DIGITAL	178
3.3	PRUEBA DE TRASMISIÓN INALÁMBRICA ZIGBEE	179
3.4	PRUEBA DE ORIENTACIÓN MAGNÉTICA	181
3.5	PRUEBA DE MOVIMIENTO AZIMUT Y DE ELEVACIÓN DE ESTACIÓN FIJA Y MÓVIL.	183
3.5.1	PRIMERA PRUEBA	183
3.5.2	SEGUNDA PRUEBA	184

3.5.3	TERCERA PRUEBA	184
3.5.4	CUARTA PRUEBA	185
<u>CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>		187
4.1	CONCLUSIONES	188
4.2	RECOMENDACIONES	190
<u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>		192

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Secuencia de Adquisición de datos y Control de motores en Estación Fija.	29
Figura 2-2. Secuencia de Adquisición de datos y Control de motores en Estación Móvil.	30
Figura 2-3. Disposición de pines Atmega 164P.	31
Figura 2-4. Sectores del Sistema GPS.	33
Figura 2-5. Sistema GPS Diferencial.	42
Figura 2-6. Wide Area Augmentation System (WAAS)	44
Figura 2-7. GPS empleado para compensar el movimiento de traslación (longitud y latitud) de la nave.	46
Figura 2-8. Conector de receptor GPS Universal Polstar.	47
Figura 2-9. Conector de receptor GPS para placa de control.	47
Figura 2-10. Tramas que constantemente el módulo GPS envía.	49
Figura 2-11. Conexión entre microcontrolador y GPS.	58
Figura 2-12. Trama GPGGA con los datos a extraer.	58
Figura 2-13. Diagrama de flujo para comunicación serial USART del microcontrolador.	61
Figura 2-14. Elemento mecánico para medición de presión tubo Bourdon.	66
Figura 2-15. Transductor de presión resistivo.	67
Figura 2-16. Transductor de inductancia variable.	68
Figura 2-17. Transductor de reluctancia variable.	69
Figura 2-18. Transductor capacitivo.	70
Figura 2-19. Galga cementada y Galga sin cementar.	71
Figura 2-20. Puente de Wheatstone para galga extensométrica.	72
Figura 2-21. Transductor piezoeléctrico.	72
Figura 2-22. Gráfica de Voltaje Vs. Altura para el sensor MPX4115.	74
Figura 2-23. Etapas para adquisición de datos para el cálculo de la altura.	75
Figura 2-24. Diagrama circuital para restar la señal del sensor de presión.	76

Figura 2-25. Diagrama circuital para amplificar señal del sensor de presión.	78
Figura 2-26. Conexión entre acondicionamiento de Sensor de Presión y microcontrolador.....	80
Figura 2-27. Gráfica de Voltaje Vs. Presión para el sensor MPX4115.....	81
Figura 2-28. Diagrama de flujo para la obtención de la altura de 2000 a 4000 metros.	82
Figura 2-29. Brújula Digital CMPS03.....	86
Figura 2-30. Ciclos de tiempos en Generación PWM.....	87
Figura 2-31. Diagrama de tiempos para comunicación I2C.	87
Figura 2-32. Pines de conexión del módulo CMPS03.....	89
Figura 2-33. Conexión de pines para calibración.	90
Figura 2-34. Conexión de pines en tarjeta de recepción del módulo CMPS03. ...	91
Figura 2-35. Conexión de brújula digital con el microcontrolador.....	91
Figura 2-36. Diagrama de Flujo para obtener Giro de Nave.	93
Figura 2-37. Transmisión por accionamiento directo.....	94
Figura 2-38. Transmisión por fricción.	95
Figura 2-39. Transmisión por bandas.....	96
Figura 2-40. Transmisión por cadenas.....	96
Figura 2-41. Transmisión por engranes.	97
Figura 2-42. Transmisión por ruedas.	97
Figura 2-43. Actuador Hidráulico.....	99
Figura 2-44. Fuente de energía hidráulica.	100
Figura 2-45. Actuador Neumático.....	101
Figura 2-46. Fuente de energía neumática.	101
Figura 2-47. Vista externa e interna de un servomecanismo utilizado en robótica.	104
Figura 2-48. Sistema de engranaje acoplado al servomotor para aumentar el torque.	105
Figura 2-49. Control proporcional interno de un servomotor.	106

Figura 2-50. Posición del servomotor respecto de la señal de control.	108
Figura 2-51. Trazos básicos en Solid Works para la construcción de la estructura.	112
Figura 2-52. Soporte para la antena con un material adecuado.....	112
Figura 2-53. Varios elementos que forman parte de la estructura.....	113
Figura 2-54. Estructura fija con sus dos grados de libertad.	114
Figura 2-55. Estructura móvil con sus dos grados de libertad.....	114
Figura 2-56. Herramienta Solid Works Motion para el cálculo del torque.....	116
Figura 2-57. Ventana de Propiedades físicas de los elementos a ensamblar.	117
Figura 2-58. Ventana para seleccionar el eje rotacional.	117
Figura 2-59. Selección de la gravedad en la barra de herramientas.....	118
Figura 2-60. Momento en función del tiempo para movimiento de inclinación ...	119
Figura 2-61. Momento en función del tiempo para el movimiento azimut.	119
Figura 2-62. Servomotor HITEC HS-7955TG ocupado en el sistema de apuntamiento.....	121
Figura 2-63. Grados de libertad de movimiento que podría presentar la PGA...	122
Figura 2-64. Algunas de las posiciones que podría tener la PGA respecto del apuntamiento de las antenas de tierra.	122
Figura 2-65. Grados de libertad de movimiento a ser compensados en este trabajo: 1) Variaciones de latitud y longitud de la nave, 2) Variaciones de altura de la nave y 3) Rotación de la nave.	123
Figura 2-66. Variación de Latitud.	124
Figura 2-67. Variación de Longitud.	125
Figura 2-68. Ubicación en plano cartesiano de las dos coordenadas.	126
Figura 2-69. Variación de coordenada GPS de la nave (Estación Móvil) respecto a la Estación Fija.	126
Figura 2-70. Incremento del ángulo Azimut en estación Fija, conforme a cambio de posición de Estación Móvil.	128
Figura 2-71. Diagrama de flujo del cálculo de azimut de la estación fija.	129

Figura 2-72. Variación de coordenada GPS de la nave (Estación Móvil) respecto a la Estación Fija.	130
Figura 2-73. Incremento del ángulo Azimut en estación Móvil.	131
Figura 2-74. Compensación de giro de la antena, frente a rotación de la nave.	132
Figura 2-75. Diagrama de flujo para cálculo de azimut de la estación móvil, con variación de la rotación de la nave.	133
Figura 2-76. Variación de Inclinación de Antena Fija.	135
Figura 2-77. Triángulos formados en los planos.	135
Figura 2-78. Incremento de altura de Globo, respecto a estación Fija.	137
Figura 2-79. Diagrama de Flujo de Cálculo de Inclinación en Antena Fija.	138
Figura 2-80. Variación de declinación de Antena Móvil.	138
Figura 2-81. Triángulos proyectados al plano referencial.	139
Figura 2-82. Diagrama de Flujo de Cálculo de declinación en Antena Móvil.	140
Figura 2-83. Generación de la señal PWM de Azimut e Inclinación.	141
Figura 2-84. Secuencia de Adquisición de datos y Control de los servomotores en Estación Fija.	141
Figura 2-85. Diagrama circuital de los filtros activos pasa bajos para los dos movimientos.	142
Figura 2-86. Gráfica de la instrucción Pulseout en función de la conversión analógica digital para el movimiento azimut de la estación fija.	144
Figura 2-87. Gráfica de la instrucción Pulseout en función de la conversión analógica digital para el movimiento azimut de la estación fija.	145
Figura 2-88. Gráfica de la instrucción Pulseout en función de la conversión analógica digital para el movimiento de inclinación de la estación fija.	146
Figura 2-89. Gráfica de la instrucción Pulseout en función de la conversión analógica digital para el movimiento de inclinación de la estación fija.	147
Figura 2-90. Manejo de la estación fija en todos sus cuadrantes haciendo uso de sus dos movimientos.	148
Figura 2-91. Diagrama de flujo para el posicionamiento del sistema fijo.	148

Figura 2-92. Secuencia de Adquisición de datos y Control de motores en Estación Móvil.....	149
Figura 2-93. Gráfica de la instrucción Pulseout en función de la conversión analógica digital para el movimiento de azimut de la estación móvil.....	150
Figura 2-94. Gráfica de la instrucción Pulseout en función de la conversión analógica digital para el movimiento de azimut de la estación móvil.....	151
Figura 2-95. Gráfica de la instrucción Pulseout en función de la conversión analógica digital para el movimiento de declinación de la estación móvil.	152
Figura 2-96. Gráfica de la instrucción Pulseout en función de la conversión analógica digital para el movimiento de declinación de la estación móvil	153
Figura 2-97. Manejo de la estación fija en todos sus cuadrantes haciendo uso de sus dos movimientos.....	154
Figura 2-98. Diagrama de flujo para el posicionamiento del sistema móvil.....	154
Figura 2-99. Logotipo de Alianza de empresas.....	155
Figura 2-100. Malla de red entre nodos.	156
Figura 2-101. Topología Estrella.....	158
Figura 2-102. Topología en Árbol.....	158
Figura 2-103. Topología en Malla.....	159
Figura 2-104. Módulo Xbee 868.....	159
Figura 2-105. Explorador de puerto USB.	160
Figura 2-106. Comunicación entre módulos.....	161
Figura 2-107. Detalles físicos de los Módulos XBEE.	162
Figura 2-108. Conexión para transmisión de datos hacia microcontrolador.....	163
Figura 2-109. Conexión para recepción de datos desde el microcontrolador. ...	164
Figura 2-110. Zonas de Fresnel	166
Figura 2-111. Zonas de Fresnel.	166
Figura 2-112. Fuente conmutada de 120(Vac) a 12(Vdc) para 5 amperios como carga máxima.....	168
Figura 2-113. Batería de Polímero de Litio 2100 mAh 11.1 V, ocupada en sistema de apuntamiento móvil.	169

Figura 2-114. Diagrama circuital para conectar el sistema de apuntamiento móvil a la red eléctrica y batería.	170
Figura 2-115. Sistema de estación Fija.	171
Figura 2-116. Tablero de control de estación Fija.	171
Figura 2-117. Sistema de estación móvil.	172
Figura 2-118. Tablero de control de estación móvil.....	173
Figura 2-119. Sistema de brújula digital.	173
Figura 2-120. Sistema final: se puede apreciar tanto la antena transmisora como la receptora con sus respectivos sistemas de control.	174
Figura 3-1. Prueba de Posicionamiento de latitud y longitud.	176
Figura 3-2. Recepción de datos Vía inalámbrica.....	181
Figura 3-3. Brújula Analógica para proceso de calibración.	182
Figura 3-4. Sistema de simulación de Estación Móvil.	183
Figura 3-5. Seguimiento de estación Fija a Móvil.....	185
Figura 3-6. Inclinación de estación Fija.	186

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Presión Atmosférica para distintas alturas.	65
Tabla 2-2. Características elementos mecánicos.	66
Tabla 2-3. Características transductores electromecánicos.	73
Tabla 2-4. Valores de voltaje para distintas alturas etapa de resta de la señal... 77	77
Tabla 2-5. Valores de voltaje de 0 a 5 voltios para distintas alturas etapa acondicionada.	79
Tabla 2-6. Valores de Presión y Voltaje en función de la altura.	80
Tabla 2-7. Registros de Compás Magnético CMPS03.	88
Tabla 2-8. Pines del Módulo CMPS03.	89
Tabla 2-9. Diferentes tipos de color de cables para diferentes servos.	106
Tabla 2-10. Diferentes tiempos de control para el posicionamiento de algunos servos.	108
Tabla 2-11. Selección del servomotor para los distintos sistemas de movimiento.	120
Tabla 2-12. Pines de módulo Xbee 868.	162
Tabla 3-1. Tabla de variación de longitud.	177
Tabla 3-2. Tabla de variación de latitud.	177
Tabla 3-3. Medición de la altura con el altímetro en cada uno de los pisos.	179
Tabla 3-4. Tabla de pruebas de alcance de módulos Zigbee.	180
Tabla 3-5. Variación de brújula digital.	182
Tabla 3-6. Variación de coordenada geográfica en un punto fijo	184

ÍNDICE DE BLOQUES DE CÓDIGO

Código 2-1. Configuración de Comunicación de los dos Puertos USART.	59
Código 2-2. Cierre de Puerto de comunicación.....	60
Código 2-3. Código para extraer las coordenadas de Latitud y Longitud.....	60
Código 2-4. Código para transformar a grados los datos de Latitud y Longitud.....	60
Código 2-5 Configuración de Pines de Comunicación I2C.....	92
Código 2-6. Configuración de Lectura y escritura en la Comunicación I2C.	92

RESUMEN

El objetivo de este proyecto fue diseñar y construir un sistema de apuntamiento de dos antenas de radio enlace que permita mantenerlas apuntadas entre sí, donde una de ellas se encuentra fija en tierra y la otra se trasladará respecto a la estación fija.

Con este propósito se diseñó un sistema que posee dos estaciones que cuentan con un sistema GPS para obtener su ubicación geográfica y así encontrar la desviación en el ángulo de orientación de las antenas. Además, cuenta con un altímetro digital para compensar el segundo grado de libertad correspondiente a la inclinación de las antenas.

Cada una de las dos terminales cuenta con una estructura mecánica con dos grados de libertad empleados para mantener orientadas las dos antenas. La estación móvil, al estar sometido a movimiento de traslación y rotación necesitó compensación de rotación mediante una brújula digital. Todos estos datos son enviados inalámbricamente entre las dos estaciones vía Zigbee.

Las pruebas que se realizaron permitieron determinar que el sistema posee un error de 2° en cada una de las estaciones del sistema de apuntamiento.

PRESENTACIÓN

Dentro del Proyecto PGA denominado Plataforma de gran Altitud realizado entre la Fuerza Aérea del Ecuador (FAE) y la Escuela Politécnica Nacional (EPN), está el grupo de carga útil, encargado de diseñar y construir toda una arquitectura de telecomunicaciones para aplicaciones de banda ancha a través de la cual se enviarán servicios IP de internet, telefonía, difusión de radio y televisión del estado.

El grupo presentó un inconveniente en el momento de realizar las comunicaciones entre una estación terrena fija y la nave. El problema más relevante, es el movimiento de la nave, ya que puede producir la pérdida del enlace por lo que es imprescindible diseñar y construir un sistema que permita mantener apuntadas las antenas del enlace PTP evitando que el enlace sufra pérdidas en cuanto a su capacidad medida en Mbps.

Para solucionar este problema fue necesario el diseño y construcción de dicho sistema de apuntamiento, el cual está constituido por:

El capítulo 1, describe el planteamiento del problema, el estado del arte y la finalidad de uso del sistema. Este capítulo tiene por objetivo dar una breve visión sobre el problema al cual se le pretende dar una solución, también refiere a sistemas de seguimiento empleados en otros proyectos desarrollados a nivel mundial y finalmente se plantea la metodología a seguir para dar solución al problema.

El capítulo 2, describe la construcción del hardware para los sistemas de apuntamiento tanto para la estación fija y la estación móvil, de tal manera que tengan la capacidad de hacer uso de sus dos grados de libertad para su posicionamiento. Se detalla la instrumentación electrónica adecuada para variables físicas como posicionamiento geográfico, variación de altura, y su acondicionamiento respectivo de las señales, el efecto sobre los actuadores para que los sistemas puedan realizar su apuntamiento.

El desarrollo del software con sus algoritmos de programación que permiten la comunicación, y el correcto funcionamiento para los dos sistemas.

El capítulo 3, detalla las pruebas y resultados del sistema de apuntamiento.

Entre estas pruebas se tiene la prueba del sistema de posicionamiento GPS, prueba del Altimetro Digital, pruebas de Trasmisión inalámbrica, orientación magnética y prueba para el movimiento azimut y elevación de la estación fija y móvil. Con sus respectivas tablas de adquisición datos, el cálculo de los errores para algunas de las pruebas desarrolladas

El capítulo 4, contiene las conclusiones y recomendaciones para el sistema de apuntamiento descrito en este documento.

**CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN AL
DIRECCIONAMIENTO AUTOMÁTICO
ENTRE ANTENAS**

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

AL DIRECCIONAMIENTO AUTOMÁTICO ENTRE ANTENAS

El presente capítulo tiene por objetivo dar una breve visión sobre el problema que se pretende dar solución, se trata sobre el estado del arte sobre sistemas de seguimiento empleados en otros proyectos desarrollados a nivel mundial y finalmente se plantea la metodología a seguir para la solución del problema.

1.1 INTRODUCCIÓN

1.1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dentro del Proyecto Plataforma de Gran Altitud (PGA, o en inglés HAP: High Altitude Platform) realizado entre la Fuerza Aérea del Ecuador (FAE) y la Escuela Politécnica Nacional (EPN), está el Grupo de Carga Útil, encargado de diseñar y construir toda una arquitectura de telecomunicaciones para aplicaciones de banda ancha a través de la cual se enviarán servicios IP de internet, telefonía, difusión de radio y televisión del Estado. Estos servicios son enviados desde la estación terrena fija (terminal 1) hasta la nave (PGA) o terminal móvil (que se mantiene en continuo movimiento tanto en traslación como en rotación), mediante un enlace Punto-Punto (PTP).

Desde la PGA, aquellos servicios son difundidos hasta la zona de cobertura (huella) mediante un enlace punto-multipunto (PMP), y desde aquí, mediante una segunda fase de acceso inalámbrico o última milla, mediante un Access Point con tecnologías WiFi, son distribuidos hasta los usuarios finales. Uno de los problemas más graves que se enfrenta, es la movilidad de la nave que puede producir la pérdida del enlace, por lo cual es imprescindible diseñar y construir un sistema que permita mantener apuntadas las antenas del enlace PTP. Esto evitará que el enlace sufra pérdidas en cuanto a su capacidad, medida en Mbps, y sea factible la mencionada banda ancha.

1.1.2 ESTADO DEL ARTE

Si bien no existe todavía ningún sistema PGA en operación comercial, hay proyectos notificados a la UIT (Unión Internacional de telecomunicaciones) para su inscripción en el Registro Internacional de Frecuencias. Uno de estos sistemas notificado a la UIT, es el conocido como “**SKY STATION**” y sus características están contenidas en la Recomendación UIT-R F.1500. Por otro lado, las principales recomendaciones de la UIT [1] sobre PGAs, tampoco dice nada sobre dicho sistema de apuntamiento. Aquel documento, no dice nada sobre el sistema de seguimiento de antenas que se debería emplear.

Por otro lado, a pesar de que la bibliografía sobre HAPs es bastante amplia, muy pocos proyectos han llegado a la implementación práctica, y de estos, casi no existe documentación que demuestre las pruebas realizadas sobre servicios de telecomunicaciones basadas en HAPs y peor aún, ninguno habla del sistema de seguimiento de antenas requerido. A continuación se resume **los más recientes y relevantes proyectos precedentes** a nivel mundial que aportarían a los objetivos que se persigue en el presente proyecto.

En Chile también se realizó el proyecto denominado Globo Antena [2] En este proyecto se fabricó un globo tipo zeppelin de estructura no rígida, cuyo volumen de helio fue de 26 m³. Este pudo levantar hasta 7 kg de carga útil. Si bien se realizan aportes teóricos sobre comunicaciones de datos de control, al no dar datos de pruebas realizadas, se puede inferir que no existieron pruebas reales. Peor aún, del dato de 7 Kg de carga útil, se puede inferir que nunca tuvieron alguna solución de comunicaciones de banda ancha. No existe ningún dato de posible arquitectura de comunicaciones de banda ancha y no se menciona nada sobre sistemas de seguimiento de antenas, asunto de vital importancia para mantener los radioenlaces.

Alejandro Aragón-Zavala, en su libro High-Altitude Platforms for Wireless Communications [3], realizan una investigación de todos los proyectos sobre

HAPs. Lo más importante en cuanto a nuestro ámbito de servicios de telecomunicaciones, tenemos lo siguiente:

- “**Actividades Japonesas**”

En Japón, los proyectos nacionales de investigación y desarrollo (R&D) sobre sistemas estratosféricos de la plataforma comenzaron en 1998.

Actualmente, hay dos organizaciones relacionadas con la tecnología estratosférica (avión y dirigible): JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) y NICT (National Institute of Information and Communications Technology).

Skynet es el nombre de un proyecto para el desarrollo de un globo sobre la base de las plataformas estratosféricas (SPF) capaz de operar a una altitud de 20 km y llevar cargas útiles de misión en el tablero de comunicación, difusión y observación del medio ambiente. La aeronave tenía un casco semi-rígido de forma elipsoidal, con una longitud total de casi 200 m.

“Para los usuarios se tenía una velocidad de 100 Mb/s en el enlace de descarga y un máximo de 6 Mb/s en el enlace subida. **NTIC no ha realizado experimentos de vuelo de aeronaves a altitudes estratosféricas hasta la fecha.** ”

Conclusión:

Como se puede ver, en este proyecto no se realizó ningún experimento real, lo cual implica ausencia de resultados prácticos, y por ello en la documentación buscada sobre este proyecto, no se tiene información o dato de posible arquitectura de comunicaciones de banda ancha y no se menciona nada sobre sistemas de seguimiento de antenas, asunto de vital importancia para mantener los radioenlaces de banda ancha.

- **Proyecto Skystation:**

Se menciona que “es un proyecto muy ambicioso que pretende funcionar en las ciudades más grandes de todo el mundo; razón por la cual se plantea el funcionamiento solo en la banda de frecuencias de 47 GHz. Este proyecto prevee prestar servicio desde un Zeppelin con capacidad de carga superior a la tonelada, situado a 21 Km de altura. El tamaño físico será de 157 metros de largo y 62 de diámetro y la fuente de energía serán unos paneles solares fijados en la parte superior del globo.”

Conclusión:

Ya que no se tiene ninguna noticia sobre resultados prácticos, solo ha quedado en un simple planteamiento de proyecto.

- **Actividades Koreanas:**

Sobre su actividad de investigación sobre HAPs, menciona lo siguiente:

Las actividades de investigación en las plataformas estratosféricas empezaron en Corea en diciembre del 2000. Los proyectos de plataformas en estratósfera se han incluido como parte de un programa de 10 años, que consta de tres fases. El objetivo es desarrollar un dirigible no tripulado estratosférico y los sistemas de tierra para la operación básica y el control de la aeronave.

La primera fase se concluyó, donde un dirigible de 50 m no tripulado fue construido. La segunda fase, se inició recientemente y tiene como objetivo demostrar la viabilidad de desarrollar un sistema de la estratosfera. Se mostrará cómo la estación de mantenimiento podría funcionar a una altitud de 20 km, incluyendo algunas pruebas de enlace de comunicaciones con las instalaciones terrestres.

Para la tercera fase, se desarrollará una aeronave de 200 m. Donde se llevará a bordo cargas útiles de telecomunicaciones, teledetección, etc. Esta aeronave tendrá 10KW de potencia y un peso de hasta 1000 kg y el sistema de la estratósfera estará integrado por cinco subsistemas: plataforma (aeronave); telemetría, rastreo y comando; control de estación en tierra, carga útil de la misión y soporte en tierra.

En lo que respecta a las telecomunicaciones y las actividades ETRI (Electronic and telecommunications Research Institute) comenzaron en febrero de 2002.

Algunas de las tecnologías básicas y los estudios incluyen el desarrollo de una formación de haz directo de rayos múltiples sistema de recepción de banda S y banda Ka y beamsteering mecánica de 47/48 GHz, y el análisis de la interferencia y los estudios de compartición de WCDMA y 28/31 y / 47 48 GHz.

Conclusión: Como se puede ver, en este proyecto se dice haber construido una nave no tripulada tipo zeppelin de 50 (m) pero tampoco se dice nada de sistemas de apuntamiento de antenas.

- **PROYECTO CAPANINA:**

Este proyecto fue auspiciado por la Unión Europea dentro del Sexto Programa Marco. A nuestro parecer, luego de la revisión minuciosa del estado del arte, se cree que es el proyecto que, al menos, ya menciona aspectos sobre servicios de telecomunicaciones basados en un HAP. Debido a la importancia de lo realizado dentro de nuestra área, se cita textualmente lo más relevante encontrado en el documento oficial (paper) publicado y disponible en internet [4]:

“PRUEBAS DE BANDA ANCHA A USUARIOS FIJOS DE PLATAFORMAS AEREAS”

El proyecto también demuestra los diferentes servicios de banda ancha y sus aplicaciones. A continuación se describe las pruebas realizadas a los sistemas y equipos utilizados en los ensayos.

Prueba 1:

Se llevó a cabo entre agosto y octubre de 2004 en Pershore, Reino Unido, por medio de un globo aerostático esférico, capaz de operar a una altitud de 300m. Los siguientes aspectos se demostraron con éxito:

- Banda ancha de acceso inalámbrico fijo (BFWA), hasta un usuario fijo con banda de 28GHz.
- Demostración de conectividad de red de extremo a extremo, y servicios tales como: Internet de alta velocidad, video bajo demanda.
- Streaming audio/video media (Windows Media Server 2004 Enterprise Edition supporting IP Multicast).
- Distribución multimedia de audio y video (Windows Media Server 2004 Enterprise Edition apoyo a IP Multicast).
- Distribución de contenido (IP Multicast).
- Acceso a Internet (ISP simulado, utilizando el servidor Web), incluyendo descargas FTP / uploads.
- WiFi entre ordenadores (incluido el acceso WiFi a Internet desde ordenadores portátiles de usuarios).
- Comunicaciones ópticas, tierra HAP simplificada del sistema en general para realizar las pruebas de seguimiento.

Un sistema Alvarion WALKair 3000 se utilizó para ofrecer 36 Mbit/s de carga útil neta por el equipo local del cliente (CPE). Las antenas CPE fueron de tipo plato parabólico (empleadas para transmisión de datos del usuario y otra para la transmisión de señal utilizada por el sistema de rastreo de la carga útil).

Prueba 2:

Estaba prevista para el verano de 2005 cerca de Kiruna, Suecia y el uso de un globo estratosférico para una sola misión de varias horas, con el objetivo de evaluar los siguientes aspectos:

- Una selección de las pruebas de la banda ancha lleva a cabo en una prueba con antena hecha a la medida y los nodos de tierra que operan en las bandas de 28/29 GHz.
- Comunicaciones ópticas, incluyendo las pruebas de alta velocidad de datos de enlace de retorno y la medición de parámetros atmosféricos en el canal. Los resultados serán comparados con los de simulación y un ensayo japonés equivalente.
- Integración de un sistema multi carga en un soporte de la estratósfera en un entorno específico, y con el peso y la potencia desafiante.

Prueba 3:

Estaba prevista para el año 2006 con sus detalles por determinar. Es probable la incorporación de un HAP y la organización de las NTIC, como parte de la puesta en marcha del programa. Con el acceso a equipos HAP se tendría la presentación pruebas de banda ancha en próximos años.

CONCLUSIÓN:

Se puede comprender que sí se realizaron pruebas de enlaces de comunicaciones pero solo a 300 m de altura y con sistemas fijos. Sin embargo, como se debería entender, a esas frecuencias tan altas, haría falta un sistema de apuntamiento de antenas bastante exacto pero no dan detalles al respecto. No se menciona nada sobre los equipos comerciales empleados, solo se dice que se emplea un equipo Alvarion WalkAir 3000 'base station' pero no se indica la manera cómo estaba constituida la arquitectura general y no se dan datos de las pruebas reales realizadas en el globo atado. Además, en la prueba 2, menciona que la siguiente prueba será en un globo troposférico, pero solo deja indicado. En la prueba 3, menciona que las pruebas en un HAP serán planificadas por la NICT, ya estudiada anteriormente en este documento. Como sabemos, la NICT no tiene ningún experimento realizado en HAPs (airships o PGAs tipo zeppelin) hasta la fecha, dentro de todo lo revisado en el estado del arte.

1.1.2.1

1.1.2.2 Discusión

Del anterior análisis del estado del arte, se destaca lo siguiente:

En ninguna de las publicaciones se dice cómo fue resuelto el problema de movilidad pues no se comenta nada sobre algún sistema de apuntamiento de antenas, haciendo pensar que los experimentos, fueron realizados con antenas omnidireccionales las cuales reducen drásticamente la capacidad del enlace.

No se da ningún detalle de los experimentos ni de los resultados alcanzados.

Por todo lo anterior, es de importancia capital aportar al estado del arte, por medio del diseño y construcción de un **sistema de apuntamiento automático** entre las antenas de tierra y de la PGA de modo que los radioenlaces resistan al problema de movilidad de la nave y se mantenga sin interrupciones. Al ser un sistema de control, **éste fue asumido por el CID-FAE (Centro de Investigación y Desarrollo de la FAE) y deberá ser probado junto con los sistemas del Grupo de Carga Útil de la EPN**. No obstante, de manera no oficial, dicho equipo de Carga Útil también ha desarrollado dicho sistema.

1.1.3 METODOLOGÍA

Se revisó el estado del arte sobre sistemas de comunicaciones basados en PGA y dentro de estos, los sistemas de seguimiento de antenas empleados. Se comprobó que ninguno de los documentos revisados de los principales proyectos desarrollados a nivel mundial, tiene propuesto y peor desarrollado dicho sistema. Por lo anterior, todo el sistema desarrollado, no tiene ningún precedente.

Para llevar a cabo el objetivo propuesto, el proyecto desarrollado consiste en lo siguiente:

a) Dos GPSs, los cuales entregan información de latitud y longitud de cada terminal y que permiten compensar el movimiento de traslación de la nave;

- b) Una brújula digital, que entrega la información de giro respecto del norte magnético y que permite compensar el movimiento de rotación de la nave;
- c) Un altímetro construido en base a un sensor de presión: si bien los GPSs empleados, también entregan información de altura y en base a esta se puede compensar las variaciones de elevación de la nave, ésta produjo errores importantes del orden de los 20 metros, por lo cual fue necesario encontrar un nuevo método de estimación de altura. El altímetro construido produjo mucho mejores resultados y el error que se redujo fue de 4 metros.

Todos los anteriores elementos permitieron compensar el movimiento de traslación (cambio de latitud, longitud y de altura) y de rotación (giro) de la nave, todo esto para obtener un apuntamiento correcto y así mantener una capacidad de enlace lo mayor posible. Este proyecto puede ser empleado en cualquier aplicación de comunicaciones punto a punto como por ejemplo naves aéreas, marítimas, etc.

**CAPÍTULO 2: DISEÑO E
IMPLEMENTACIÓN DE HARDWARE Y
DESARROLLO DEL SOFTWARE PARA EL
SISTEMA**

CAPÍTULO 2: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE HARDWARE Y DESARROLLO DEL SOFTWARE PARA EL SISTEMA

2.1 SISTEMA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE SEÑALES.

2.1.1 INTRODUCCIÓN

En cada uno de los sistemas de posicionamiento, tanto para la parte fija como móvil, se utilizan dos microcontroladores, un Atmega 164 y un Atmega 8, los que se encargan de recibir las señales, procesarlas y realizar el control sobre los motores que realizan los dos grados de libertad, donde cada uno cumple con una tarea específica:

En la terminal fija: se tiene un microcontrolador Atmega 164P, encargado de recibir la coordenada de ubicación fija mediante su GPS local y la coordenada de ubicación variable obtenida por un segundo GPS, además de la altura que es sensada mediante un altímetro digital ubicado en la terminal móvil, comunicados entre sí mediante la transmisión inalámbrica Zigbee. El microcontrolador principal de la Terminal fija, un Atmega 164p, al poseer dos entradas de comunicación serial UART, permite recibir constantemente por la primera entrada serial los datos de altura y coordenada de posicionamiento de la estación móvil mediante comunicación inalámbrica Zigbee y por la segunda entrada serial la coordenada geográfica de la estación fija, donde dichos datos son necesarios para calcular el apuntamiento horizontal denominado azimut y el movimiento vertical llamado inclinación.

Al tener los valores de giro calculados, esta información se entrega a la siguiente etapa de control, mediante la generación de dos PWM, variando su relación de trabajo desde 0 al 100%, tanto para el giro horizontal (rango de 0 a 360°) y el vertical (rango de 0 a 90°). Estas dos señales ingresan a un filtro activo pasa bajas, encargado de convertir la señal PWM a una señal analógica de 0 a 5 voltios. Estas señales ingresan al microcontrolador Atmega 8 el cual realiza la

conversión analógica a digital, que permite el control de los servomotores en un rango de 0° a 360° en su movimiento azimut y de 0° a 90° para la inclinación (figura 2-1).

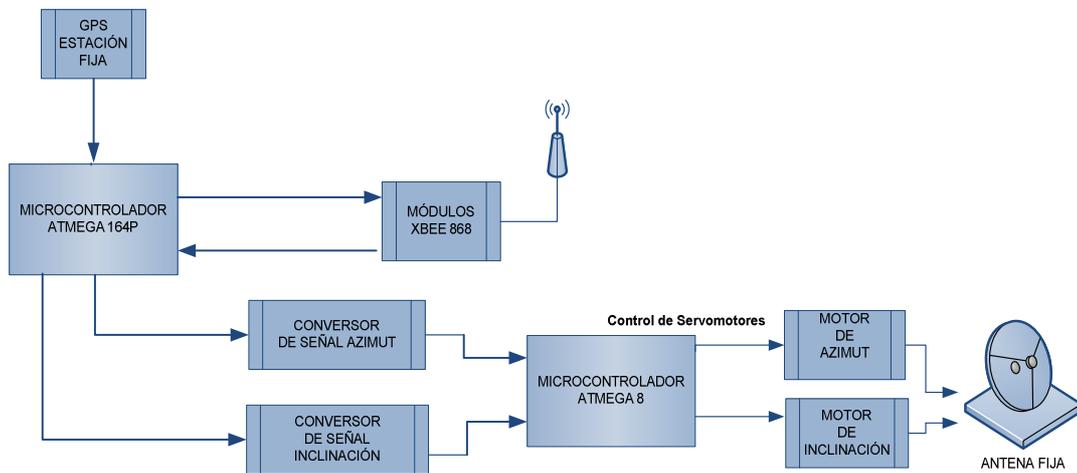


Figura 2-1. Secuencia de Adquisición de datos y Control de motores en Estación Fija.

En la estación móvil: de igual forma que el caso anterior, para ésta estación se tiene un microcontrolador Atmega 164P, encargado de recibir la coordenada geográfica que nos entrega el GPS instalado en ésta estación, además de la coordenada de ubicación de la estación fija, el valor de altura proveniente de su altímetro digital, y la variación de giro obtenida del Compas Magnético. Este microcontrolador principal, recibe la coordenada de la estación fija por un instante y la almacena, después envía de manera constante los datos de su posición y altura hacia la estación fija mediante comunicación inalámbrica Zigbee. Al tener todos estos parámetros, se emplea un algoritmo de control que permite calcular los dos giros, tanto el de azimut así como el de declinación.

Dichos datos calculados, se entregan de la misma forma que la estación fija hacia una etapa de control, mediante la generación de dos PWM que ingresan a la etapa de filtrado y que luego son recibidas por el microcontrolador Atmega 8, realizando la conversión analógica a digital y el control de los servomotores en sus dos grados de libertad (figura 2-2).

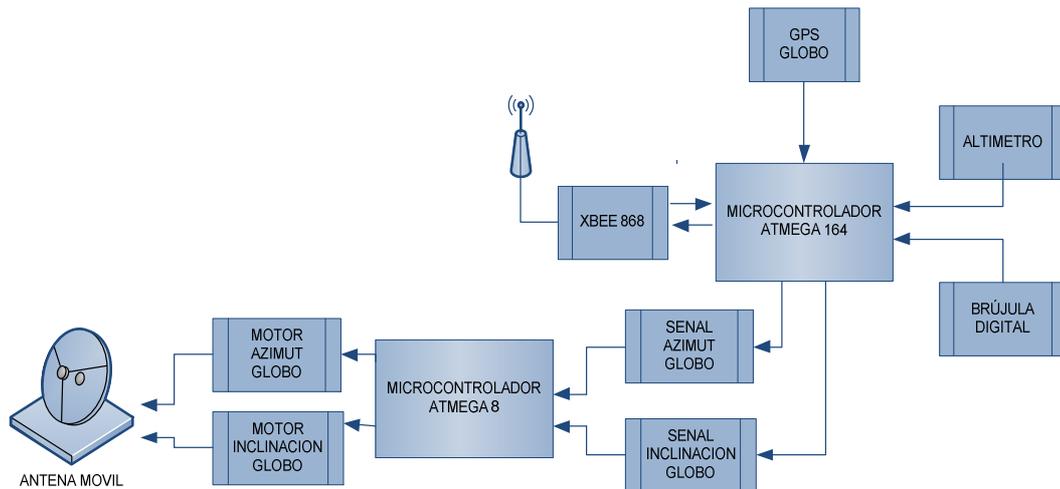


Figura 2-2. Secuencia de Adquisición de datos y Control de motores en Estación Móvil.

2.1.2 SISTEMA MICROCONTROLADO

El sistema cuenta con dos microcontroladores Atmegas de AVR, que son un Atmega 164p encargado de recibir las señales y un Atmega 8 encargado del control directo de los servomotores.

Se determinó que una buena opción es un microcontrolador ATMEGA 164p como cerebro para recibir las señales seriales, ADC, I2C, manejo de LCD de visualización, etc., debido a la disponibilidad de herramientas para desarrollo, además de su bajo costo y la facilidad de adquisición en el mercado local.

El microcontrolador Atmega 164p es un microcontrolador a 8 bits con 16 Kbytes de memoria flash programable, 512 Bytes de memoria EEPROM, 1K byte de memoria RAM, 40 pines tipo PDIP, 8 canales ADC a 10 bits, seis canales de salida PWM, 32 líneas de I/O, 32 registros de propósito general.

Posee Watchdog Timer con oscilador interno de 1MHz, 2MHz, 4MHz y 8 MHz, RTC interno con cristal de 32768 Hz, dos puertos de comunicación serial USART, un puerto serial SPI (**figura 2-3**).

(PCINT8/XCK0/T0) PB0	□ 1	40	□ PA0 (ADC0/PCINT0)
(PCINT9/CLKO/T1) PB1	□ 2	39	□ PA1 (ADC1/PCINT1)
(PCINT10/INT2/AIN0) PB2	□ 3	38	□ PA2 (ADC2/PCINT2)
(PCINT11/OC0A/AIN1) PB3	□ 4	37	□ PA3 (ADC3/PCINT3)
(PCINT12/OC0B/SS) PB4	□ 5	36	□ PA4 (ADC4/PCINT4)
(PCINT13/MOSI) PB5	□ 6	35	□ PA5 (ADC5/PCINT5)
(PCINT14/MISO) PB6	□ 7	34	□ PA6 (ADC6/PCINT6)
(PCINT15/SCK) PB7	□ 8	33	□ PA7 (ADC7/PCINT7)
RESET	□ 9	32	□ AREF
VCC	□ 10	31	□ GND
GND	□ 11	30	□ AVCC
XTAL2	□ 12	29	□ PC7 (TOSC2/PCINT23)
XTAL1	□ 13	28	□ PC6 (TOSC1/PCINT22)
(PCINT24/RXD0) PD0	□ 14	27	□ PC5 (TDI/PCINT21)
(PCINT25/TXD0) PD1	□ 15	26	□ PC4 (TDO/PCINT20)
(PCINT26/RXD1/INT0) PD2	□ 16	25	□ PC3 (TMS/PCINT19)
(PCINT27/TXD1/INT1) PD3	□ 17	24	□ PC2 (TCK/PCINT18)
(PCINT28/XCK1/OC1B) PD4	□ 18	23	□ PC1 (SDA/PCINT17)
(PCINT29/OC1A) PD5	□ 19	22	□ PC0 (SCL/PCINT16)
(PCINT30/OC2B/ICP) PD6	□ 20	21	□ PD7 (OC2A/PCINT31)

Figura 2-3. Disposición de pines Atmega 164P

Como se observa en la **figura 2-3**, el ATMEGA 164P posee 40 pines de los cuales 32 son de entrada/salida agrupados en 4 puertos, alimentación de 5 Vdc, consumo de 0.4mA.

2.2 SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GPS

2.2.1 INTRODUCCIÓN

El sistema GPS (Global Positioning System) fue desarrollado por el Departamento de Defensa de los estados Unidos y fue oficialmente nombrado NAVSTAR GPS (Navigation Satellite Timing And Ranging), empleado como medio para conocer la posición de un objeto o persona a nivel global y determinar su rumbo en aplicaciones de tipo civil o militar. Dichos satélites son operados por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos sección Ala Espacial 50.

Un receptor GPS es básicamente un aparato de orientación que muestra el lugar del planeta en el cual se encuentra exactamente. Inclusive algunos modelos tienen mapas almacenados de las regiones en las que se utiliza y se pueden visualizar a través de sus pantallas incorporadas, de igual manera existen GPS que no tienen pantalla; únicamente tiene su tarjeta receptora con su antena interna o externa los cuales pueden ser manejados por un procesador anfitrión a través del envío de comandos los datos del GPS se pueden obtener usando algún protocolo de comunicación.

En la década de los 80, el gobierno de los Estados Unidos promovió el uso gratuito de esta tecnología, tanto para el uso civil como un bien común, convirtiéndose desde ese entonces, en una gran ayuda para la navegación a nivel mundial.

Comercialmente se encuentran numerosos dispositivos de esta naturaleza que cualquier persona puede utilizar sin necesidad de tener muchos conocimientos en navegación, debido a que cuentan con dispositivos tales como su propia pantalla incorporada que le permiten usar fácilmente.

2.2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Las orbitas de los satélites están monitoreadas en tierra por estaciones que conocen la posición exacta de estos en cada momento. Esta información es la base de los cálculos para todos los receptores GPS.

El GPS recolecta dos tipos de códigos del satélite. El primer tipo de información se denomina “almanaque” que contiene las posiciones aproximadas de los satélites. Este dato se transmite continuamente y se almacena en la memoria del GPS. La información “almanaque” se actualiza constantemente a medida que el satélite cambia de posición.

Las estaciones de control en tierra deben vigilar y controlar que el satélite conserve su rumbo correcto. Para ello envían, cuando lo amerite, un tipo de información que incluye altitud, velocidad, orbita, etc., al satélite para que tome las medidas pertinentes. Esa información se denomina “efeméride”. De esta manera al recibir “almanaque” y “efeméride” el GPS sabe con exactitud la posición del satélite.

Por la captación de una serie de mensajes especialmente codificados que transmite cada satélite, un receptor GPS puede determinar cuándo una señal deja el satélite y cuando esta llega a la antena del receptor. Esta diferencia es el tiempo que se demora la señal en viajar desde un satélite determinado hasta el receptor y para conocer la distancia, se multiplica este tiempo por la velocidad de la luz.

$$D = tx3x10^{10} \text{ cm/s}$$

Donde D es el espacio o distancia que separa el receptor del satélite y t es el tiempo en segundos. Debido a la variabilidad en las condiciones atmosféricas, el tiempo que emplean las señales se ve alterado, por lo que se produce un error en los cálculos. Este error es corregido en el sistema DGPS (GPS DIFERENCIAL).

Conocida la posición exacta de los satélites y la distancia que separa al receptor de estos, se calcula finalmente la posición del receptor. Al tener dichas medidas que corresponden a 4 variables $-x, y, z$ y t , son tras transformadas a variables entendibles para el usuario, tales como latitud y longitud.

2.2.3 ARQUITECTURA DEL SISTEMA

El sistema está basado en una constelación de 24+3 satélites (3 de apoyo en caso de fallar alguno de los operativos), los cuales están ubicados en 6 planos orbitales a una altura sobre la tierra de 20 kilómetros aproximadamente.

Además de los satélites lógicamente se ha de disponer de un receptor de la señal enviada por los satélites en tierra, y de algún sistema sobre ellos, por lo que existe tres principales sectores que constituyen el sistema: Sector Espacial, Sector de Control y Sector de Usuario (**figura 2-4**).

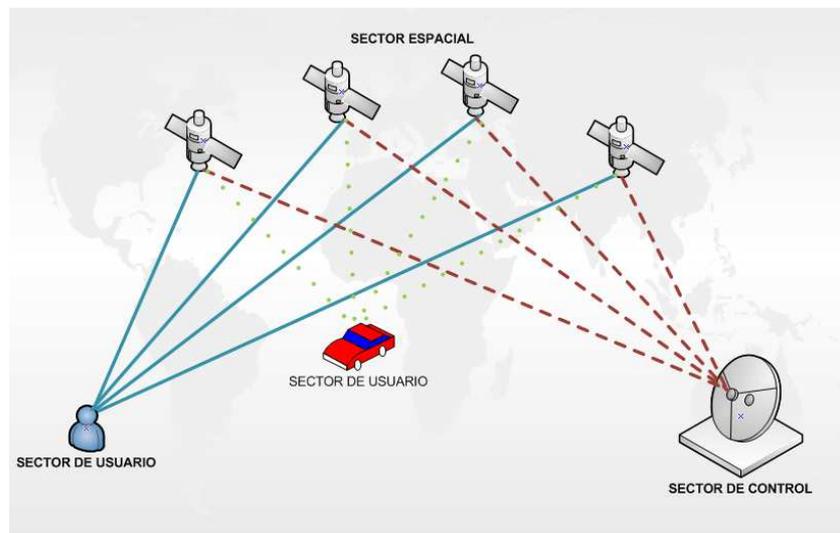


Figura 2-4. Sectores del Sistema GPS.

2.2.3.1 Segmento Espacial

Compuesto por la constelación de satélites NAVSTAR (Navigation System with Time And Ranging) que transmiten señal de tiempos sincronizadas, parámetros de posición de los satélites e información adicional del estado de salud de los satélites.

La constelación de los 24 satélites se encuentra distribuida en 6 planos orbitales con una inclinación de 55° y distribuidos uniformemente en el plano del Ecuador, pudiendo dar cobertura a cualquier hora del día y en cualquier parte del mundo.

Cada satélite consta con un sistema de alimentación de energía solar, mediante paneles de energía, los cuales alimentan un sistema de banco de baterías como sistema de respaldo en caso de algún eclipse.

Una de las características más importantes del Sistema GPS, es la medida precisa del tiempo, por esta razón, cada satélite contiene varios osciladores de alta precisión, con estabilizadores muy precisos, dando medidas de tiempo del orden de 10^{-14} .

Los satélites se mueven a 11.263 kilómetros por hora, es decir que la dan la vuelta a la tierra en 12 horas. También cuentan con un sistema de turbinas para mantener la ruta correcta.

Cada satélite transmite señales de radio de baja potencia en varias frecuencias. Los GPS civiles receptan en 1575.42 MHz en la banda UHF. Las señales viajan en lo que se denomina "línea de vista", esto quiere decir que pueden atravesar vidrios, plásticos, etc., pero no pueden atravesar objetos sólidos como montañas o edificios.

El satélite transmite una serie de códigos que permiten calcular el tiempo que se toma la señal para hacer el recorrido y mediante operaciones matemáticas se puede calcular la distancia entre el satélite y el receptor GPS.

2.2.3.2 Segmento de Usuario

El sector de usuarios comprende a cualquiera que reciba las señales GPS con un receptor, determinado su posición y hora.

Al hablar de recepción GPS, se orienta al uso de antenas que posee el equipo, dichas antenas se encuentran sintonizadas a la frecuencia que transmiten los satélites, además del procesamiento de recepción de cada uno de ellos.

Al comienzo del uso de la tecnología GPS, se encontraban limitados al uso de 4 o 5 canales, hoy en día existen dispositivos que son capaces de monitorear entre 12 y 20 canales al mismo tiempo.

Muchos de los GPS, dependiendo su uso, poseen pantalla de visualización de los distintos datos de ubicación, tales como latitud, longitud, hora, número de satélites enlazados, planos geográficos, etc. Además se pueden comunicar mediante interfaces USB, conexión serial o Bluetooth al computador, empleando su software de fabricante. La gran mayoría de GPS emplean el protocolo NMEA 0183 o NMEA 2000 así como también SIRF, MTK y GARMIN entre otros.

Dependiendo de la finalidad de uso del GPS, estaría compuesto de los siguientes elementos:

- **Antena.-** Componente que se encarga de recibir y amplificar la señal recibida por los satélites.
- **Receptor.-** Recibe la señal recogida por la antena y es decodificada para convertirla en información legible.
- **Software de gestión y cálculo de datos.-** Programas que poseen mapas digitales para aplicaciones de localización.

En aplicaciones de navegación o de observaciones en modo absoluto (recepción de señal en un solo receptor) por lo general la antena y el receptor irán unidos para formar una sola unidad.

2.2.3.3 Segmento de Control

Este segmento tiene la función de realizar el seguimiento

Controla los satélites de todo el sistema, donde se los sincroniza y proporciona la órbita correcta e información del tiempo.

Conformado por cinco estaciones de control ubicadas estratégicamente cerca del plano ecuatorial, que constantemente reciben y transmiten datos desde y hacia los satélites, dichas estaciones de control son:

- Colorado Springs (Estados Unidos)
- Ascensión (Ubicada en la costa oeste de África),
- Diego García (sur de la India),
- Kwajalein (ubicada en la Isla Marshall del Pacífico Occidental) y
- Hawaii.

Además de tres antenas terrestres que envían a los satélites las señales que deben transmitir, monitoreadas por la NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) y una estación experta de supervisión de todas las operaciones.

Los datos de las estaciones de seguimiento son transmitidos a la estación principal de control que es la de Colorado Springs, donde las orbitas de los satélites son pre dichas, junto con las correcciones del oscilador de los satélites, para luego ser transmitidos al correspondiente satélite.

La sincronización del tiempo de los satélites es una de las más importantes misiones del segundo control, por lo que la estación principal de control está conectada directamente con el tiempo estándar del observatorio naval de los Estados Unidos en Washington D.C.

2.2.4 SEÑALES DEL RECEPTOR GPS, CÓDIGOS Y FRECUENCIAS

Todos los datos que son enviados desde cada satélite conforman tramas o mensajes que contienen información fundamental para el procesamiento de coordenadas y datos. Cada uno de los satélites envían dichas tramas a 50 bps, donde se envía el estado, hora del GPS, la efeméride y el almanaque, donde la primera contiene información acerca de la posición precisa de los mismos. Sirviendo apoyo para computar las correcciones de posición usando al satélite.

Esta información cambia frecuentemente, siendo actualizada por las estaciones de seguimiento de la Tierra. Los parámetros orbitales de los satélites se van actualizando a medida que su movimiento se ve alterado por la atracción del Sol y la Luna, al existir diferencia de gravedad entre distintas zonas de la corteza terrestre, viento solar, etc. Un período de cambio típico sería de 4 horas.

El almanaque por otro lado es una información enviada periódicamente acerca del su propio estado y el estado de los otros satélites, dicha información varía de año en año. Además de proporcionar esta información, sirve para asistir al receptor en la adquisición de los satélites al momento de encenderse, ayudando de esta manera a una recopilación de los satélites visibles, basándose en una coordenada y tiempo almacenado.

Anteriormente donde no se tenía el dato de almanaque y el tiempo de espera antes de proveer una posición válida era muy largo, debido al tener que esperar la recepción de cada uno de los satélites, hoy en día ese procedimiento es mucho más rápido debido al almacenamiento de esa información. Además el almanaque permite a receptores de una sola frecuencia corregir el error ionosférico usando el modelo ionosférico global.

Las señales satelitales se retrasan al atravesar la atmósfera y al pasar la ionosfera, que está entre 100 y 1000 kilómetros de altitud, las radiaciones ultravioletas, solar y otras ionizan una porción de las moléculas gaseosas, liberando electrones. El retardo es proporcional al número total de electrones libres encontrados por la señal en su camino y está en función del inverso cuadrado de la frecuencia de onda, el retardo puede variar entre 2 ns y 50 ns para frecuencias de la banda L, llegando hasta 2.5 el factor por inclinación de la trayectoria y siendo hasta 5 veces mayor el efecto al medio día que entre media noche y el amanecer.

Una de las principales características entre el almanaque y el efeméride es su transmisión, debido a que cada satélite transmite sólo su propia efeméride pero transmite el almanaque de todos los satélites.

Cada satélite transmite su mensaje de navegación usando al menos dos códigos de espectro expandido con sus siglas en inglés CDMA (Code Division Multiple Access):

- Coarse/Acquisition (C/A), disponible para el público en general, sin ninguna limitación. Es un código pseudo-aleatorio (PRN) de 1023 chips, a 1.023 Mc/s. por lo que se repite cada milisegundo. Los satélites poseen su propio código (C/A) por lo que puede ser identificado y recibido por separado de otros satélites pudiendo a la misma frecuencia ser transmitidos.

- Precise(P), es encriptado y reservado para uso militar. Es un código PRN que trabaja a 10.23 Mchip/s. Cuando se activa el modo “anti-spoofing” (anti suplantaciones de identidad), se encripta al código P empleando el código Y, lo que produce el código P(Y), que puede ser descriptado solo con unidades con una llave de descriptación válida.

Tanto C/A como P(Y) entregan al usuario final la hora precisa del día.

Todos los satélites emplean dos frecuencias principales que son L1 a 1.57542 GHz y L2 a 1.2276 GHz.

Las frecuencias usadas por GPS son:

- L1 (1575.42 MHz): usan coarse-acquisition (C/A) y encrypted precision P(Y), además del nuevo LC1 para los satélites del futuro Bloque III. La Figura 2-2 muestra el esquema de modulación usado en esta banda.
- L2 (1227.60 MHz): usa código P(Y), además del nuevo código L2C para el Bloque IIR-M y nuevo satélites.
- L3 (1381.05 MHz): usado por el Nuclear Detonation (NUDET) Detection System Payload (NDS), para detectar señales de detonaciones nucleares y otros eventos de infrarrojos de gran energía.
- L4 (1379.913 MHz): se encuentra en proceso de estudio para correcciones inosféricas adicionales.
- L5 (1176.45 MHz): Propuesto para el uso civil de la señal seguridad-de-vida (SoL, por sus siglas en inglés Safety-of-Life). Esta frecuencia se halla en una banda internacionalmente protegida para la navegación aeronáutica.

2.2.5 MODOS DE RECEPCIÓN DEL GPS

Todos los GPS deben recibir información al menos desde cuatro satélites para determinar su posición. Por lo que se consideran los siguientes modos de recepción:

- **Recepción secuencial:** Los receptores secuenciales utilizan un solo canal para recibir la señal, esto implica que debe “sintonizar” un satélite, tomar y procesar la información y luego pasarse al próximo satélite para capturar la información. Este método requiere de circuitos relativamente sencillos, de bajo consumo y poco volumen; la desventaja que presentan es que se

interrumpe la recepción de cada satélite con lo cual la precisión del posicionamiento queda limitada.

- **GPS de un solo canal con bajo consumo:** Estos dispositivos son altamente portables y se diseñan para trabajar con pequeñas baterías. Para limitar el consumo de potencia, ellos hacen la lectura de su posición durante unos dos minutos y luego se apagan hasta que se requiera una nueva lectura. Su precisión es probablemente mejor que la mayoría de los sistemas LORAN y además pueden trabajar en cualquier parte del mundo. Su principal desventaja es la incapacidad para ser interconectado con otros equipos y la imposibilidad de que pueda medir la velocidad aun con baja precisión.
- **Recepción de un solo canal con multiplexado rápido:** Su diseño es muy similar al de los de canal simple con barrido lento, la diferencia radica en que las mediciones se realizan con mayor rapidez por lo que está constantemente actualizando sus datos. Su funcionamiento es continuo y tiene relojes más precisos.
- **Receptores secuenciales de dos canales:** El agregar un canal a los receptores GPS incrementa de manera significativa sus capacidades operativas. Se resalta el hecho de que son insensibles a la relación señal ruido, algo muy importante cuando se está trabajando en condiciones adversas al clima. Nunca interrumpen sus funciones de navegación y las medidas de velocidad son mucho más precisas; de hecho un buen receptor de dos canales utiliza una estrategia de computación que cancela cualquier imprecisión de los relojes, eliminando los errores en el cálculo de la velocidad. Como es lógico, el costo de estos receptores tiende a ser mucho más alto que los anteriores. Su adquisición está dirigida a aquellos usuarios que necesitan de la precisión de un receptor de dos canales.

- **Receptores de medición continua:** Son receptores que monitorean cuatro o más satélites simultáneamente para dar información instantánea sobre la velocidad y posición. Sus aplicaciones incluyen mediciones en casos altamente dinámicos con exigencias de gran precisión como en el caso de investigaciones de propósito científico.

2.2.6 FUENTES DE ERRORES

Igualmente que en todo equipo, el GPS está sometido a varias fuentes de error, que se pueden minimizar dependiendo del equipo que utilicemos y metodología de observación.

La posición exacta depende principalmente de la posición del satélite y el retraso de la señal. El retraso provocado puede ser medido, ya que el receptor compara la secuencia de bits recibida desde el satélite con una versión generada internamente, donde se compara los flancos ascendentes y descendentes de los bits, además que se mide el desplazamiento de la señal hasta en 1% del tiempo de bit o aproximadamente 10 nano segundos para el código C/A.

Las señales del receptor GPS se propagan a la velocidad de la luz, y al usar la señal GPS C/A, esta representa un error mínimo de 3 metros.

Por otro lado se puede mejorar la exactitud de la posición usando la señal P(Y) que al asumir el mismo 1% de tiempo de bit de exactitud, representa un error mínimo de 30 centímetros.

Los factores que más afectan a la buena adquisición de datos son los siguientes:

- **Retardos en la Ionosfera y la Troposfera:** Las señales satelitales se retrasan al atravesar la atmosfera. El sistema GPS utiliza un modelo sobre el cual se calcula un promedio (no exacto) de este valor.
- **Errores orbitales:** También se los conoce como “Errores de la Efeméride”, que son errores en el reporte de la posición del satélite.
- **Señal Multiruta:** Ocurre cuando la señal GPS se refleja en objetos tales como edificios, montañas, etc.

- **Errores de Reloj en el receptor:** No es común tener relojes atómicos en el receptor GPS, se producen errores con el reloj que se incorpora.
- **Geometría del satélite:** se refiere a las posiciones relativas de los satélites en un momento dado. La geometría ideal de un satélite se presenta cuando se encuentra en ángulos relativamente amplios entre ellos.

2.2.7 TÉCNICAS DE MEJORAMIENTO PARA ADQUISICIÓN DE SEÑAL GPS

2.2.7.1 GPS Diferencial (DGPS)

Los receptores GPS normales pierden precisión debido a variaciones de las orbitas satelitales, variaciones en las condiciones atmosféricas y en menor medida por el error de tiempo producido en los relojes de los satélites y los receptores.

Otra de las causas de estos errores tiene que ver con ciertos códigos o instrucciones que el departamento de defensa ha introducido intencionalmente en las señales de acceso al usuario civil, con el fin de mantener su exclusividad sobre el manejo de los equipos de alta precisión.

Para superar este inconveniente, varias empresas han desarrollado el sistema GPS diferencial o DGPS, que puede corregir dichos errores brindando una precisión de unos cuantos metros, para receptores que se encuentran en movimientos y de menos de un metro para los estáticos.

Un GPS diferencial establece la cooperación entre dos receptores, uno cuya posición dentro de un área determinada es cambiante y otro que si es fijo. El receptor fijo es una estación que se encuentra exactamente ubicada (para un área determinada) con respecto al plano de coordenadas; la estación recibe las señales de los satélites pero en vez de determinar su posición, esta toma en cuenta su propia posición para calcular los retardos en señales de los satélites, tal como se indica en la Figura 2-5.

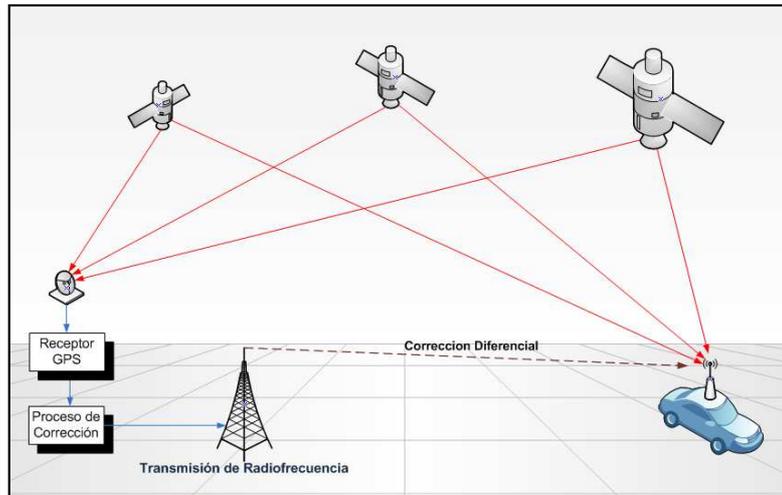


Figura 2-5. Sistema GPS Diferencial.

Ya que la estación sabe perfectamente en qué lugar del espacio se encuentran los satélites y también conoce con precisión donde ella se encuentra (se conoce exactamente su latitud, longitud y altura), puede entonces computar la distancia teórica entre ella y cada satélite. Luego divide esas distancias entre la velocidad de la luz y da los tiempos que realmente deben tomar las señales en forma ideal.

La diferencia entre los tiempos teóricos y medidos en la práctica marcan el error o retardo producido por las condiciones atmosféricas.

Este error debe ser enviado a los receptores móviles que se encuentren máximo a una distancia de 200km. (algunos sistemas especifican una distancia máxima de 700 km.). Como la estación de referencia no tiene forma de saber que satélites están siendo utilizados por un receptor determinado para calcular su posición, la estación debe calcular el error instantáneo de todos los satélites visibles y luego codificarlos en un formato estándar para ser transmitido a todos los receptores móviles dentro de la zona de cubrimiento.

Así cada receptor almacena toda la lista de errores y aplica la corrección de acuerdo a los satélites que está utilizando.

Para la transmisión de los factores de error se usan enlaces de radio-frecuencia, donde los usuarios solo deben agregar un pequeño receptor que codifique el mensaje de error y luego lo cargue al GPS.

Al realizar esta transmisión, se producen errores debido a la velocidad con que se transmiten los datos. Por esto, la estación de referencia no puede esperar demasiado tiempo para enviar los datos porque entonces se pierde la precisión.

2.2.7.2 Wide Area Augmentation System (WAAS)

Actualmente, los GPS de uso común no cumplen con los requisitos para la navegación aérea en el aspecto de precisión, integridad y disponibilidad. La Administración Federal de Aviación (FAA) y el Departamento de Transporte (DOT) de los Estados Unidos, están desarrollando el programa WAAS para su uso en los enfoques de vuelo de precisión.

WAAS está destinado a corregir los errores de la señal GPS causada por perturbaciones de la capa ionosfera, el tiempo y los errores de la órbita de satélites, y proporciona información vital con respecto a la integridad de la salud de cada satélite GPS.

Este sistema consiste en aproximadamente de 25 estaciones de referencia situadas en la superficie terrestre, encargadas de supervisar los datos de satélite GPS. Dos de las estaciones llamadas principales, se encuentran ubicadas al borde de las costas, que se encargan de recopilar datos de las estaciones de referencia y crear un mensaje de corrección GPS. Esto explica la corrección de órbita de los satélites GPS y la variación del reloj más retrasos de la señal causada por la atmósfera y la ionosfera. El mensaje de corrección diferencial se difunde a través de uno de los dos satélites en órbita geoestacionaria, satélites con una posición fija sobre el Ecuador.

La cobertura por satélite WAAS se encuentra disponible solo para América del Norte, no hay estaciones de referencia de tierra en América del Sur. Para algunos usuarios en los Estados Unidos la posición de los satélites sobre el ecuador hace que sea difícil para recibir las señales cuando existe árboles o montañas que interrumpen la línea de vista, ya que la señal WAAS es ideal para espacios abiertos y aplicaciones marinas.

WAAS proporciona una amplia cobertura tanto en tierra como en alta mar además que no requiere equipo adicional para receptor la señal, como es el caso de DGPS. Además se puede llegar a tener un erro menor a 3 m (**figura 2-6**).

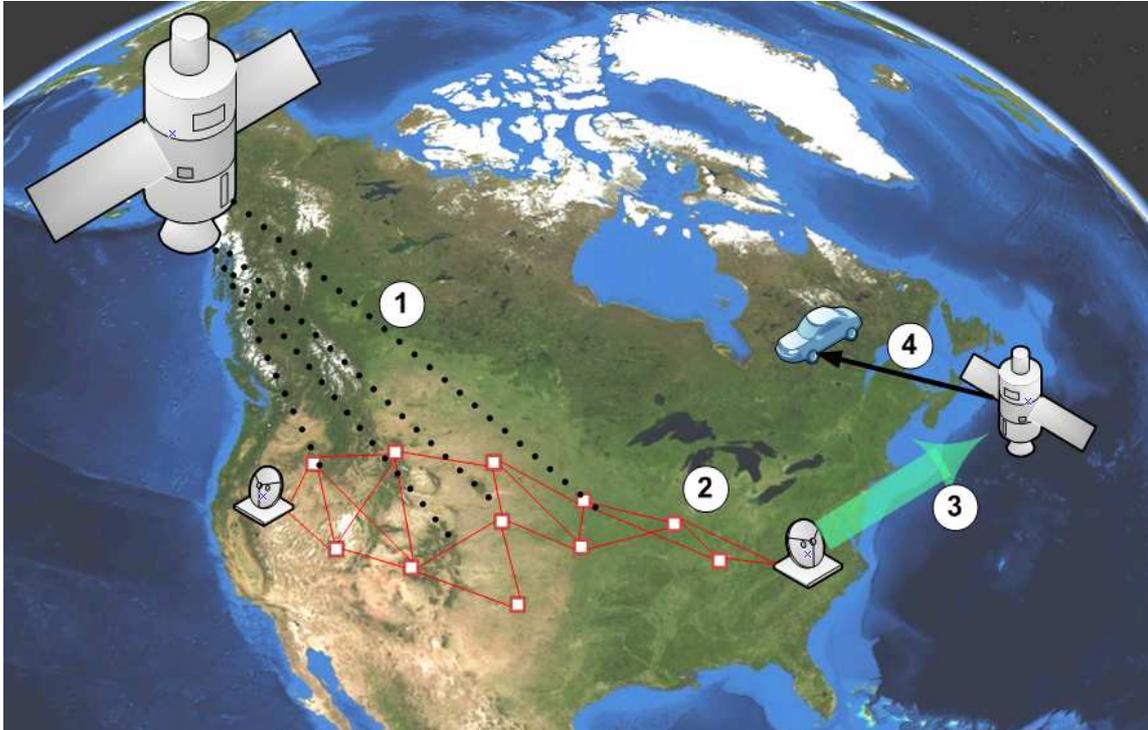


Figura 2-6. Wide Area Augmentation System (WAAS)

2.2.7.3 Carrier-Phase Enhancement (CPGPS)

Este tipo adquisición de señal emplea la frecuencia L1 como un reloj adicional debido a que la transición del código PRN no es instantánea lo que hace que el receptor muchas veces no pueda hacer una coincidencia entre su señal y la del satélite. Al tener también un respaldo de un DGPS se puede llegar a tener una precisión aproximada de 20 a 30 centímetros.

2.2.7.4 Real Time Kinematic

Es una de las últimas innovaciones en las técnicas de medición GPS, consiste en obtener coordenadas en tiempo real en el sistema de referencia adoptado previamente.

Mediante este procedimiento se puede mejorar la exactitud de posición hasta cerca los 10 centímetros. Se realiza determinando el número de ciclos entre lo que la señal es transmitida y recibida en el receptor, esto se hace mediante el uso de una combinación de datos de corrección DGPS, transmitiendo la fase de la señal GPS transmitida y técnicas de resolución de ambigüedad por medio de pruebas estadísticas y procesamiento en tiempo real.

2.2.8 CONSIDERACIONES PARA SELECCIONAR UN GPS

El sistema GPS es y será una ayuda básica para muchas personas en diferentes situaciones de la vida diaria, ya que se ajusta a la solución de una gran variedad de problemas o exigencias que demanda el mismo desarrollo tecnológico y social. Conseguir el equipo adecuado para una aplicación en particular, requiere de un cuidadoso análisis, en el que se determine en qué forma se requiere la información o si va a ser procesada o transmitida, etc. Algunos de los puntos que se debe tener en cuenta antes de tomar una decisión son los siguientes:

- Definir si el receptor será ubicado en un punto fijo o si por el contrario se instalará en un medio de transporte, para determinar su posición.
- Para medir la velocidad con gran precisión. Esto es especialmente útil cuando se necesita conocer la velocidad máxima de una embarcación.
- Costo del sistema. En algunos casos la precisión requerida se limita de acuerdo al costo del equipo.
- El consumo de potencia. Muchas veces los receptores GPS hacen parte de algún vehículo, de un equipo de campaña, etc. En estos casos es usual que se recurra a baterías para la alimentación del receptor. Por esto es muy importante que el consumo de corriente sea muy bajo, así el tamaño y por tanto el peso de la fuente de alimentación estará dentro de los límites prácticos.

2.2.9 APLICACIONES

La tecnología GPS se ha popularizado rápidamente que empresas transportadoras, automóviles y una infinidad de usuarios, están aprovechando esta tecnología y han descubierto la herramienta tan poderosa que tienen en sus manos.

Tras los últimos acontecimientos de nuestra sociedad y la creciente situación de inseguridad, las instituciones gubernamentales empiezan a considerar la posibilidad de implementar el sistema GPS como norma obligatoria para los servicios públicos de transporte.

Este sistema tiene un sinnúmero de aplicaciones ya sea en la tierra, mar o en el aire. Pueden usarse casi en cualquier lugar, pero no es posible leer la señal en el interior de algún edificio, debajo del agua y en garajes de parqueo, cuevas u otros sitios subterráneos.

El uso de este dispositivo, tiene un gran campo de aplicación, entre ellas se menciona las siguientes:

- En el mundo de la Topografía y la Geodesia.
- Detección de la trayectoria de objetos en movimientos.
- Levantamientos de carreteras, conductos y fronteras.
- Levantamientos hidrográficos.
- Levantamiento de detalles en ingeniería civil
- Modelos digitales de terrenos.
- Operaciones de rescate.
- Deporte
- Rastreo de Vehículos.
- Aeronáutica
- Navegación terrestre.
- Aplicaciones e Investigaciones científicas

2.2.10 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y ELÉCTRICAS DEL RECEPTOR GPS

Los dispositivos de recepción GPS empleados en esta aplicación son de la marca Polstar modelo PGM-111, que posee un chip GPS marca Sony de cuarta generación (**figura 2-7**).



Figura 2-7. GPS empleado para compensar el movimiento de traslación (longitud y latitud) de la nave.

El GPS empleado posee una carcasa plástica resistente a variaciones climáticas con un tamaño aproximado de 41 x 41 mm. Con salida y entrada serial TTL y Rs232, alimentación de 5 Vdc. Posee un conector PS2 con las siguientes terminales (**figura 2-8**):

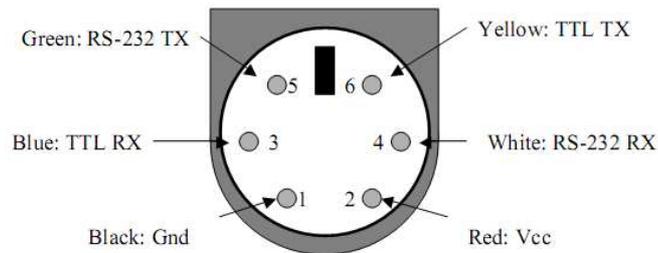


Figura 2-8. Conector de receptor GPS Universal Polstar.

Pero por efecto de adaptación hacia la placa de control se reemplazó por un conector polarizado de cuatro pines conectado al microcontrolador principal (**figura 2-9**).

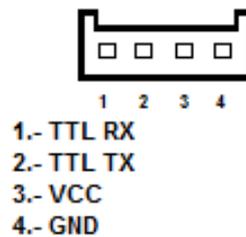


Figura 2-9. Conector de receptor GPS para placa de control.

Las dos terminales seriales TTL, se conectan directamente con el microcontrolador principal, para recibir las coordenadas que este provee.

El GPS al estar enlazado con tres satélites o más se tiene una precisión de $\pm 2m$ a $\pm 8m$. Al encontrarse en un punto de la tierra la información de los satélites se almacena en la memoria no volátil y al realizar un apagado y encendido el GPS trata de conectarse usando la información almacenada en la memoria. Pero al recorrer una distancia mayor a 5 km y encenderlo nuevamente se tardará en enlazarse en un promedio de 10 minutos.

2.2.10.1 Tramas de comunicación entregadas por el módulo GPS.

El GPS tiene la característica de receptor y enviar tramas de datos por sus puertos seriales, ya sea el puerto con niveles de voltaje TTL o con niveles RS232, donde al tener un puerto de entrada es factible ser manejado para que transmita determinadas tramas a diferente velocidad o con diferentes características. El módulo GPS cuando no existe manipulación en su programación, trabaja bajo las siguientes características de comunicación: velocidad de 4800 bps, 8 bits de datos, sin bit de paridad y un bit de parada.

Para enviar los datos de posicionamiento utiliza el protocolo NMEA0183: es capaz de enviar 8 diferentes tramas, cada una con diferente información. Las sentencias son: GPGGA, GPGLL, GPGSA, GPGSV, GPRMC, GPVTG, GPZDA y PSGSA.

El GPS constantemente envía las siguientes tramas:

- GPRMC
- GPGSV
- GPGGA
- GPGSA

Para obligar a que el GPS transmita una de las tramas mencionadas, se necesita enviar un comando hacia el módulo GPS.

@NC abcdefgh

Donde los valores de a-h pueden ser 0, 1, 2 o 5, dependiendo del periodo de tiempo entre la transmisión de cada frase. Estos valores representan lo siguiente:

- a: GPGGA
- b: GPGLL
- c: GPGSA
- d: GPGSV
- e: GPRMC
- f: GPVTG
- g: GPZDA
- h: PSGSA

Si se desea cambiar la velocidad de transmisión, se emplea el comando @CB *velocidad*, siendo *velocidad* = 4800/9600/19200/38400 bps

Para tener un control de inicio y detención de la transmisión del flujo de datos, es necesario enviar los siguientes comandos correspondientemente:

@OI 1 , empiezo o reanudo la transmisión de datos.

@OI 0 , detención del flujo de datos.

El protocolo NMEA0183 se conforma de las siguientes partes:

- un símbolo \$
- seguido del tipo de trama (GPGGA, GPGLL, GPGSA, GPGSV, GPRMC, GPVTG, GPZDA, PSGSA).
- datos separados por una “,” dependiendo del tipo de trama.

A continuación se presenta la descripción de cada una de las tramas del protocolo:

TRAMAS ENVIADAS POR RECEPTOR GPS DE FORMA CONTINUA

- **GPGGA:**

Trama principal, enviada por el receptor GPS de forma constante y empleada para la localización y variación de latitud y longitud, consta de 15 campos, que contienen la siguiente información (**figura 2-10**):

```
$GPGGA,173529,0016.8812,S,07832.1870,W,1,03,03.8,00003.7,M,013.2,M,,*4E
$GPGSA,A,2,12,15,30,,,,,,,,,04.0,03.8,00.9*01
$GPGSV,3,1,12,01,20,280,00,02,27,044,00,04,11,083,00,05,27,004,00*7D
$GPGSV,3,2,12,09,21,188,00,10,15,021,00,12,40,237,39,15,79,159,48*76
$GPGSV,3,3,12,17,09,140,00,18,14,251,00,24,06,319,00,27,24,180,00*7B
$GPRMC,173529,A,0016.8812,S,07832.1870,W,000.0,021.5,030210,,,A*76
$GPGGA,173530,0016.8812,S,07832.1870,W,1,03,03.8,00003.7,M,013.2,M,,*46
```

Figura 2-10. Tramas que constantemente el módulo GPS envía.

Carácter 7 al 12:

Tiempo en el que se tomó la posición en formato hh:mm:ss (UTC).

Carácter 14 al 22:

Latitud en formato ggmm.mmmm, donde gg son los grados y mm.mmmm son los minutos.

Carácter 24:

Norte o Sur (N/S).

Carácter 26 al 35:

Longitud en formato Gggmm.mmmm, donde Ggg son los grados y mm.mmmm son los minutos.

Carácter 37:

Este u Oeste (E/W).

Carácter 39:

Indicador de calidad GPS, puede tener los valores 0: deshabilitado, 1: posicionamiento GPS, 2: posicionamiento D-GPS.

Carácter 41 al 42:

Número de satélites utilizados en el cálculo del posicionamiento, de 00 a 012.

Carácter 44 al 47:

HDOP o Disolución de Precisión Horizontal, es un valor entre 01.00 que es el valor de precisión ideal hasta el 99.9. La precisión depende de la separación entre los satélites, si los satélites están muy separados se tendrá un mejor nivel de precisión.

Carácter 49 al 55:

Altitud.

Carácter 57

Unidad en la que se expresa la altitud, generalmente metros (m).

Carácter 59 al 63

Separación Geoidal, es la distancia vertical entre la superficie real de la Tierra y un modelo ideal de la Tierra. En el modelo ideal no se toman en cuenta los accidentes geográficos como las montañas.

Carácter 64

Unidad en la que se expresa la separación geoidal.

Carácter 66 al 67

Edad de los datos DGPS, es el tiempo transcurrido desde que se recibieron dichos datos, expresado en dos dígitos enteros.

Carácter 69 al 72

Identificación de la estación de referencia de DGPS.

Carácter 74

Suma de comprobación. Es un número hexadecimal, que se obtiene al aplicar la operación lógica XOR a todos los caracteres entre \$ y el *.Esta suma de

comprobación o *checksum* se la hace de la misma forma en todas las sentencias NMEA.

Ejemplo:

```
$GPGGA,173529,0016.8812,S,07832.1870,W,1,03,03.8,00003.7,M,013.2,M,08,0000*48
```

- **GPGSA:**

Trama enviada de forma constante por el dispositivo GPS, conformado de 18 campos, empleados en la información de la identificación de los satélites utilizados para calcular la posición; trama que no es empleada para la aplicación, dentro de los campos se encuentra lo siguiente:

Carácter 7

Modo de trabajo, puede ser M: manual o A: automático.

Carácter 9

Modo de posicionamiento: 1) fijación no disponible, 2) 2D, 3) 3D.

Carácter 11 al 46

Se tienen las identificaciones de los satélites que usa el GPS para calcular su ubicación son 12 en total. Si no se dispone de identificadores los espacios no se incluyen pero si las “,”

Carácter 48 al 51

PDOP, disolución de precisión, muestra una relación de la precisión de los resultados de posicionamiento que depende de la geometría de la distribución de los satélites en el espacio. Si los satélites están más separados, el PDOP es menor, mayor es la precisión debido a la separación angular mayor.

Carácter 53 al 56

HDOP: disolución de precisión horizontal.

Carácter 58 al 61

VDOP: disolución de precisión vertical.

Carácter 63 al 64

Suma de comprobación.

– Ejemplo:

\$GPGSA,A,2,12,15,18,19,21,23,25,27,,,,,04.0,03.8,00.9*01

- **GPGSV:**

Trama enviada por el dispositivo GPS de forma constante, que entrega características de posición en el espacio, potencia recibida e identificación de los satélites a la vista, los cuales se detallan a continuación:

Carácter 7

Número total de sentencias GPGSV a recibirse.

Carácter 9

Número secuencial de la sentencia, puede ser de 1 a 9. Aunque a 4800 bps solo se pueden tener 3 sentencias GPGSV en un intervalo.

Carácter 10 al 11

Número total de satélites a la vista.

Carácter 13 al 14

Identificación del satélite.

Carácter 16 al 17

Ángulo de elevación del primer satélite en grados de 00 a 90 visto desde el receptor.

Carácter 19 al 21

Azimut del primer satélite en grados desde 000 a 359 visto desde el receptor.

Carácter 23 al 24

SNR, nivel de la señal recibida C/N de 00 a 99 en dBHz.

Carácter 26 al 61

Los siguientes campos describen las características de los satélites restantes.

Carácter 62 al 63

Suma de comprobación.

– Ejemplo:

```
$GPGSV,3,1,12,01,20,280,00,02,27,044,00,04,11,083,00,05,27,004,00*70
```

- **GPRMC:**

Cuarta trama enviada por el dispositivo GPS de forma constante, es la sentencia más utilizada porque transmite la mayor cantidad de datos necesarios para aplicarlos en la ubicación:

Carácter 7 al 12

Hora de la adquisición de los datos.

Carácter 14

Validez de los datos.

Carácter 16 al 24

Latitud.

Carácter 26

N/S.

Carácter 28 al 37

Longitud.

Carácter 39

E/W.

Carácter 41 al 45

Velocidad del receptor en nudos en formato 000.00.

Carácter 47 al 52

Orientación del receptor, es un ángulo azimut que indica la dirección del movimiento. Se mide desde 000.00 a 360.00: 0 representa el Norte, 90 el Este, 180 el sur y 270 el Oeste.

Carácter 54 al 59

Fecha en formato dd:mm:yy.

Carácter 61 al 62

Variación magnética: es la diferencia en grados entre el norte magnético y el norte geográfico.

Carácter 63

E/W de la variación magnética. Este campo y el anterior no son mostrados en la sentencia., dependiendo mucho del receptor.

Carácter 65

Suma de comprobación.

- Ejemplo:

```
$GPRMC,173529,A,0016.8812,S,07832.1870,W,000.0,021.5,030210,,,
A*76
```

TRAMAS ENVIADAS POR RECEPTOR GPS CONFORME A LA TRAMA REQUERIDA POR COMANDOS:

Las siguientes tramas son obtenidas desde el GPS, por medio de la interacción con el mismo, dependiendo de la trama requerida se envía el código de petición y se receptorá la trama con el periodo de transmisión establecido.

- **GPGLL:**

Trama de información básica donde se indica datos de posicionamiento, tiempos, hora. Tiene los siguientes 8 campos fijos:

Carácter 7 al 15

Latitud

Carácter 17

N/S

Carácter 19 al 23

Longitud

Carácter 25

E/W

Carácter 27

Hora de adquisición del dato de ubicación.

Carácter 34

Validez de los datos: A para datos válidos y precisos, V para datos no precisos

Carácter 36

Indicador del modo, puede ser A o autónomo, D o DGPS y N o no válido

Carácter 38

Suma de verificación.

- Ejemplo: \$GPGLL,173529,0016.8812,S,07832.1870,W,034639,A,A*41

• **GPVTG:**

Indica las características del movimiento del receptor:

Carácter 7 al 11

Dirección de movimiento tipo azimut desde 000.0 hasta 360.0 grados

Carácter 13

T (texto fijo)

Carácter 15 al 16

Variación magnética.

Carácter 18

M (texto fijo).

Carácter 20 al 24

Velocidad sobre la tierra en nudos.

Carácter 26

N, unidad de la velocidad (nudos).

Carácter 28 al 32

Velocidad sobre la tierra en km/h.

Carácter 34

K, unidad de la velocidad (K).

Carácter 36

Validez de los datos. A: autónomo, D: DGPS, N: datos no válidos

Carácter 38

Suma de verificación.

– Ejemplo: \$GPVTG,183.3,T,,M,000.0,N,000.0,K,A*0B

- **GPZDA:**

Campos que contiene información referente al tiempo, descritos a continuación:

Carácter 7 al 12

Hora a la que se tomó la información

Carácter 14 al 15

Día

Carácter 17 al 18

Mes

Carácter 20 al 23

Año

Carácter 25

Suma de verificación.

– Ejemplo: \$GPZDA,105512,12,11,2003,,*48

- **PSGSA:** es una sentencia propietaria de Sony.

Carácter 7

Modo de posicionamiento: 1) fijación no disponible, 2) 2D, 3) 3D.

Carácter 9 al 45

Se tienen las identificaciones de los satélites que usa el GPS para calcular su ubicación son 12 en total. Si no se dispone de identificadores los espacios no se incluyen pero si las “,”

Carácter 47 al 50

PDOP, disolución de precisión, muestra una relación de la precisión de los resultados de posicionamiento que depende de la geometría de la distribución de los satélites en el espacio. Si los satélites están más separados, el PDOP es menor, mayor es la precisión debido a la separación angular mayor.

Carácter 52 al 55

HDOP: disolución de precisión horizontal.

Carácter 57 al 60

VDOP: disolución de precisión vertical.

Carácter 62 al 66

TCXO valor

Carácter 68 al 75

Hora de la adquisición de los datos.

Carácter 77

Código de reserva de SONY

Carácter 79

Suma de verificación.

- Ejemplo: \$PSGSA,4,11,23,27,03,08,28,20,31,,,,,01.5,00.9,01.2,016
82,10270708,D*29

Para la aplicación, se extrae la trama GPGGA que contiene 15 campos fijos, cada uno separado por una “,” conteniendo información sobre: hora, latitud, longitud, altitud, indicador de calidad GPS y número de satélites utilizados. Esta información es enviada hacia el microcontrolador principal, que es un Atmega 164p, encargado de procesar los datos de los sensores y dispositivos de orientación.

2.2.11 ADQUISICIÓN DE LA SEÑAL GPS A TRAVÉS DEL MICROCONTROLADOR

Tanto la terminal fija como la móvil poseen un GPS para saber la información de posicionamiento geográfico en donde se encuentra ubicada la terminal, por lo que es necesario extraer dicha coordenada del dispositivo GPS mediante las sentencias NEMA, para lo cual mediante la ayuda del segundo puerto serial del Microcontrolador Atmega 164P se extraerá la coordenada de Latitud, Longitud e Indicador de calidad GPS (**figura 2-11**).

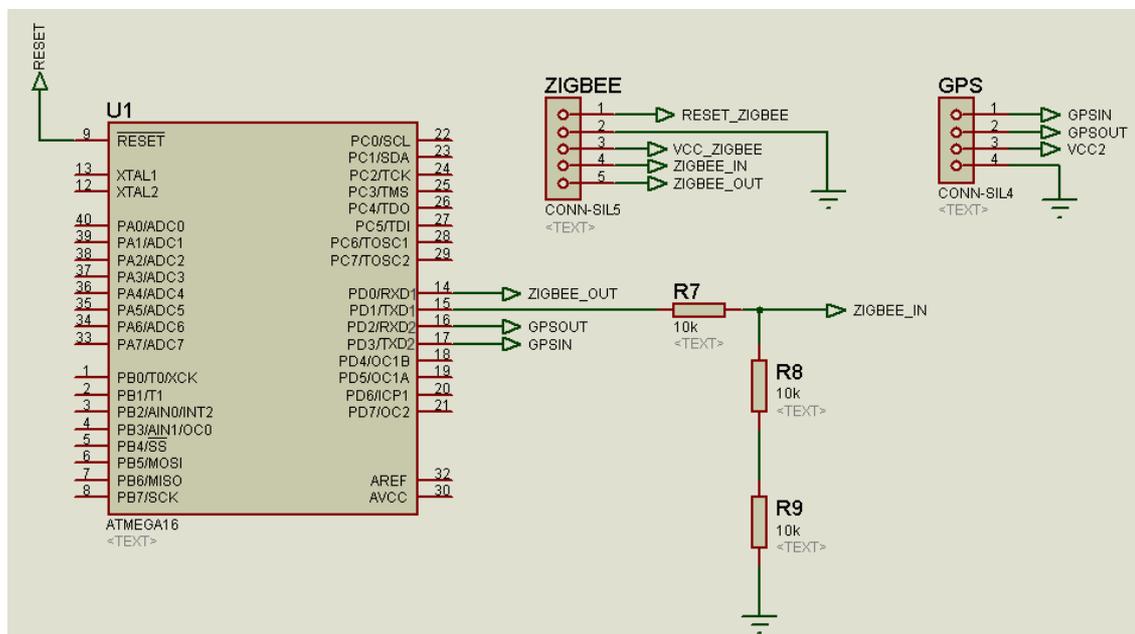


Figura 2-11. Conexión entre microcontrolador y GPS

La trama NMEA que más se ajusta a esto es la GPGGA que posee dicha información que además por propósitos de pruebas se empleaba el valor de altura, que proporciona el mismo GPS, pero debido a que generaba errores demasiado grandes, fue descartado y reemplazado por otro sistema, como se comentará más adelante.

```

LATITUD      LONGITUD      Calidad GPS      ALTURA
$GPGGA,173529,0016.8812,S,07832.1870,W,1,03,03.8,02835.6,M,013.2,M,08,0000*48
GRADOS= 00          GRADOS= 078          0: Deshabilitado
MINUTOS= 16,8812   MINUTOS= 32,1870    1: Posicionamiento GPS
ORIENTACION= S     ORIENTACION= W     2: Posicioanmiento D-GPS
  
```

Figura 2-12. Trama GPGGA con los datos a extraer.

Latitud:

Es la distancia angular que existe entre un punto cualquiera y el ecuador, medida sobre el meridiano que pasa por dicho punto. Se expresa en grados sexagesimales y es medido de 0 a 90 ° con su respectiva orientación Norte o Sur. El GPS entrega dicha latitud en una de sus tramas, en grados y minutos, y por lo ya mencionado anteriormente, dichos valores son transformados a grados solamente.

$$\begin{aligned} \text{Grados Latitud}_{\text{Grad-Min}} &= \text{Grados}^\circ \text{ Minutos}' \\ \text{Grados Latitud}_{\text{Grad-Min}} &= gg^\circ mm.mmmm' \end{aligned}$$

$$\text{Grados Latitud}_{\text{Grados}} = \text{Grados} + \text{Minutos}/60$$

Longitud:

Es la distancia que existe entre un punto cualquiera y el Meridiano de Greenwich, medida sobre el paralelo que pasa por dicho punto.

$$\begin{aligned} \text{Grados Longitud}_{\text{Grad-Min}} &= \text{Grados}^\circ \text{ Minutos}' \\ \text{Grados longitud}_{\text{Grad-Min}} &= ggg^\circ mm.mmmm' \end{aligned}$$

$$\text{Grados Longitud}_{\text{Grados}} = \text{Grados} + \text{Minutos}/60$$

Para poder recibir los datos vía serial de los dos puertos de comunicación es necesario configurar vía software, el puerto a ser usado, la velocidad de transmisión, bit de parada, bits de datos, la apertura del mismo, para cual se emplea el siguiente código:

```

***** CONFIGURAR COMUNICACION *****
Config Com1= 4800, Synchron= 0, Parity= None, Stopbits=1,
Databits=8, Clockpol= 0
Config Com2 = 4800, Synchron= 0, Parity= None, Stopbits=1,
Databits=8, Clockpol= 0
'Open all UARTS
Open "com1:" For Binary As #1
Open "COM2:" For Binary As #2

```

Código 2-1. Configuración de Comunicación de los dos Puertos USART.

Así como también después de adquirir el dato se debe cerrar el puerto al que se haya hecho uso:

```

Input Utm_tierra()
'Almaceno la trama GPS en Variable Utm_globo
Input # 2 , Utm_globo()   Print Strr
Close# 1
Close# 2

```

Código 2-2. Cierre de Puerto de comunicación.

Para poder extraer los datos requerido como es el caso de Latitud y Longitud, se emplea un algoritmo de extracción de los datos según su ubicación en la trama GPGGA, donde al comprobar que la trama es la correcta continua su extracción de los datos:

```

Input # 2 , Utm_globo()
For X = 1 To 5
  If Mid(utm_globo , X , 5) = "GPGGA" Then
    Grad_lat_globo_strin = Mid(utm_globo , X , 2)
    Min_lat_globo_strin = Mid(utm_globo , X , 7)
    Orien_globo_la = Mid(utm_globo , X , 1)
  END IF
Next

```

Código 2-3. Código para extraer las coordenadas de Latitud y Longitud

Después de obtener los datos de la trama, los transformo a grados, para poder realizar las operaciones respectivas de cálculo de azimut e inclinación, además de que los visualizo en la pantalla LCD.

```

Grad_latitud_globo = Val(grad_lat_globo_strin)
Grad_longitud_globo = Val(grad_lon_globo_strin)
Min_latitud_globo = Val(min_lat_globo_strin)
Min_longitud_globo = Val(min_lon_globo_strin)

Min_latitud_globo = Min_latitud_globo / 60
Min_longitud_globo = Min_longitud_globo / 60
Grad_latitud_globo = Grad_latitud_globo + Min_latitud_globo
Grad_longitud_globo = Grad_longitud_globo + Min_longitud_globo

```

Código 2-4. Código para transformar a grados los datos de Latitud y Longitud.

Su diagrama de flujo se muestra en la figura 2-13:

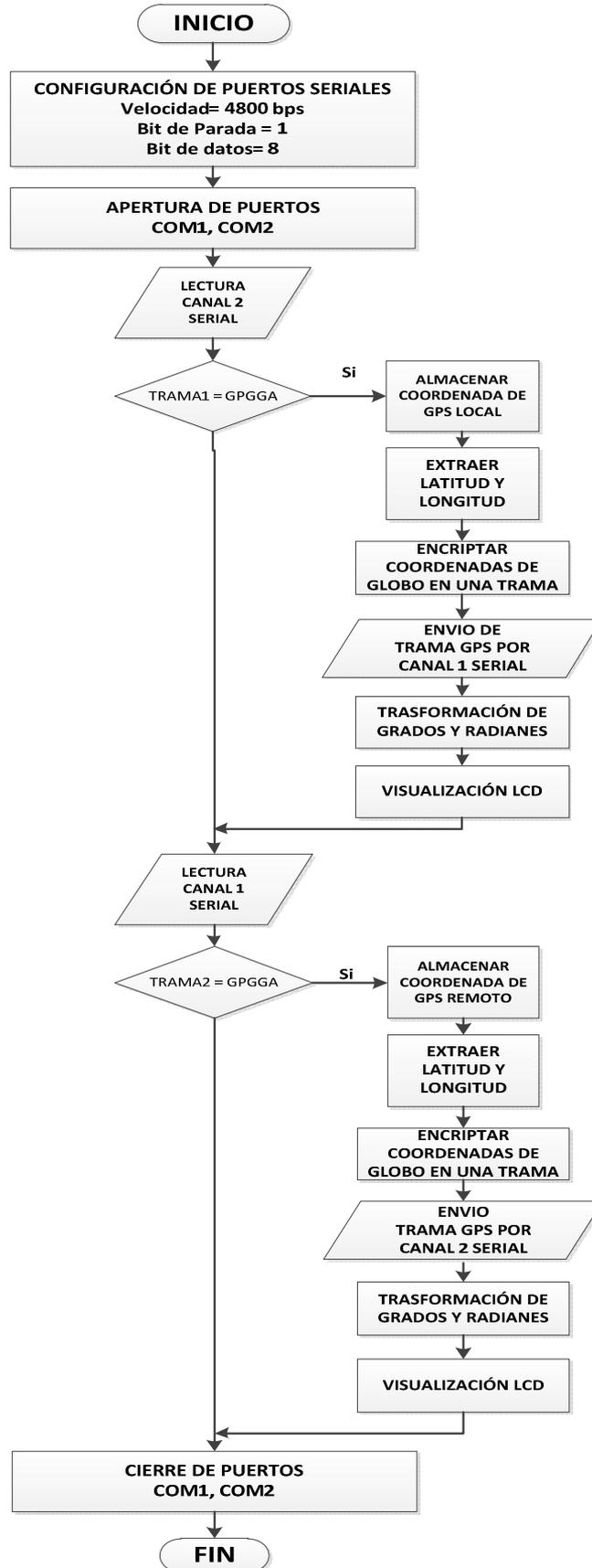


Figura 2-13. Diagrama de flujo para comunicación serial USART del microcontrolador.

2.3 SISTEMA DE MEDICIÓN DE ALTITUD

2.3.1 INTRODUCCIÓN

La altitud es la distancia vertical de un objeto respecto de un origen o nivel cero determinado. Dicho nivel cero suele ser el nivel medio del mar.

2.3.2 TIPOS DE PRESIÓN

2.3.2.1 Presión absoluta

Es la presión de un fluido medida con referencia al vacío perfecto o cero absoluto. La presión absoluta es cero únicamente cuando no existe choque entre las moléculas lo que indica que la proporción de moléculas en estado gaseoso o la velocidad molecular es muy pequeña. Este término se creó debido a que la presión atmosférica varía con la altitud y muchas veces los diseños se hacen en otros países a diferentes altitudes sobre el nivel del mar por lo que un término absoluto unifica criterios.

2.3.2.2 Presión manométrica

Son normalmente las presiones superiores a la atmosférica, que se mide por medio de un elemento que se define la diferencia entre la presión que es desconocida y la presión atmosférica que existe, si el valor absoluto de la presión es constante y la presión atmosférica aumenta, la presión manométrica disminuye; esta diferencia generalmente es pequeña mientras que en las mediciones de presiones superiores, dicha diferencia es insignificante, es evidente que el valor absoluto de la presión puede obtenerse adicionando el valor real de la presión atmosférica a la lectura del manómetro.

La presión puede obtenerse adicionando el valor real de la presión atmosférica a la lectura del manómetro.

Presión Absoluta = Presión Manométrica + Presión Atmosférica.

2.3.2.3 Vacío

Se refiere a presiones manométricas menores que la atmosférica, que normalmente se miden, mediante los mismos tipos de elementos con que se miden las presiones superiores a la atmosférica, es decir, por diferencia entre el valor desconocido y la presión atmosférica existente. Los valores que corresponden al vacío aumentan al acercarse al cero absoluto y por lo general se expresa a modo de centímetros de mercurio (cmHg), metros de agua, etc.

De la misma manera que para las presiones manométricas, las variaciones de la presión atmosférica tienen solo un efecto pequeño en las lecturas del indicador de vacío.

Sin embargo, las variaciones pueden llegar a ser de importancia, que todo el intervalo hasta llegar al cero absoluto solo comprende 760 mmHg.

2.3.2.4 Presión atmosférica

La presión atmosférica es la presión ejercida por el aire en cualquier punto de la atmósfera. La presión en un punto coincide numéricamente con el peso de una columna estática de aire de sección recta unitaria que se extiende desde ese punto hasta el límite superior de la atmósfera.

Como la densidad del aire disminuye conforme aumenta la altura la razón de decrecimiento es de 1mmHg o Torr por cada 10 metros de elevación en los niveles próximos al del mar.

En la práctica se utilizan instrumentos, llamados altímetros, que son simples barómetros calibrados para una altura respectiva.

La presión atmosférica normalizada para 1 atmósfera, fue definida como la presión atmosférica media al nivel del mar que se adoptó exactamente a 101325 Pa. o 760 Torr.

2.3.2.4.1 Ecuación altimétrica

La ecuación altimétrica establece una relación entre la altitud de un lugar (altura sobre el nivel del mar) con la presión atmosférica en ese lugar.

Para deducir la ecuación elemental de la ecuación altimétrica se debe considerar que el aire se comporta como un gas ideal o perfecto y que su densidad viene dada en función de la presión y de la temperatura, cuya ecuación es:

$$P_1 = \frac{P_0}{e^{\frac{Z \cdot g}{R \cdot T_m}}}$$

Dónde:

P_1 = Presión a una altitud de Z metros (en Hecto pascales)

P_0 = Presión en superficie (en Hecto pascales)

Z = altitud del nivel de presión P_1 (en metros)

g = aceleración de la gravedad = 9.80617 m/seg²

R = Constante de los gases = 287.04 N*m/Kg*°K

T_m = Temperatura media entre los niveles de presión P_1 y P_0 .

Se puede escribir de la siguiente manera:

$$T_m = (T_0 + T_1) / 2 \text{ y } T_1 = T_0 - g \cdot Z$$

Podemos escribir $T_m = (T_0 + T_0 - (g \cdot Z)) / 2$, por lo tanto:

$T_m = T_0 - g \cdot Z / 2$, donde T_0 es la temperatura en superficie (en °K), g es el gradiente térmico vertical y Z es la altitud.

Si tenemos en cuenta una atmósfera estándar

$$P_0 = 1013.3 \text{ Hpa}$$

$$T_0 = 15^\circ\text{C} = 288^\circ\text{K}$$

$$g = 0.65^\circ\text{C}/100 \text{ m}$$

Reemplazando en la fórmula original, la fórmula para una atmósfera estándar es:

$$P_1 = \frac{1013.3}{e^{\frac{Z}{(8430.15 - Z \cdot 0.09514)}}}$$

Dónde:

P1 = Presión en Hecto Pascales a la altitud Z

Z = altitud en metros

De esta manera se puede obtener la presión P1 en Hpa para distintos puntos de altura. En la tabla 2-1 se puede observar algunos valores de presión para algunas alturas.

ALTURA	PRESIÓN
(m)	(Hpa)
0	1013,3
1000	898,738173
1500	845,5360669
2000	794,9230635
2500	746,8041769
3000	701,0865004
3500	657,6792106
4000	616,4935693

Tabla 2-1. Presión Atmosférica para distintas alturas.

2.3.3 MEDIDAS DE LA PRESIÓN

2.3.3.1 Elementos Mecánicos

Se dividen en dos grupos, el primero llamado de medida directa que miden la presión comparándola con la ejercida por un líquido de densidad y altura conocida, entre ellos tenemos barómetro de cubeta, manómetro de tubo en U, manómetro de tubo inclinado, etc.

El segundo grupo consiste en elementos primarios elásticos que se deforman por la presión interna del fluido que contienen.

Los elementos primarios elásticos más empleados son: el tubo Bourdon, el elemento en espiral, el helicoidal, el diafragma y el fuelle (**figura 2-14**).

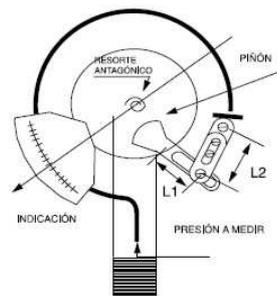


Figura 2-14. Elemento mecánico para medición de presión tubo Bourdon.

En la tabla 2-2 pueden verse las características de los elementos mecánicos descritos.

	<i>Campo de medida</i>	<i>Precisión en % de toda la escala</i>	<i>Temperatura máxima de servicio</i>	<i>Presión estática máxima</i>
Barómetro cubeta	0,1-3 m cda	0,5-1 %	Ambiente	6 bar
Tubo en U	0,2-1,2 m cda	0,5-1 %		10 bar
Tubo inclinado	0,01-1,2 m cda			↓
Toro pendular	0,5-10 m cda			100-600 bar
Manómetro campana	0,005-1 m cda			Atmosférica
Tubo Bourdon	0,5-6000 bar		90° C	6000 bar
Espiral	0,5-2500 bar			2500 bar
Helicoidal	0,5-5000 bar			5000 bar
Diafragma	50 mm cda-2 bar			2 bar
Fuelle	100 mm cda-2 bar			↓
Presión absoluta	6-760 mm Hg abs	1 %	Ambiente	Atmosférica
Sello volumétrico	3-600 bar	0,5-1 %	400° C	600 bar

Tabla 2-2. Características elementos mecánicos.

2.3.3.2 Elementos Neumáticos.

Como elementos neumáticos consideramos los instrumentos transmisores neumáticos, el sistema tobera-obturador, la válvula piloto, etc.

2.3.3.3 Elementos Electromecánicos Electrónicos.

Los elementos electromecánicos de presión utilizan un elemento mecánico elástico combinado con un transductor eléctrico que genera la señal eléctrica correspondiente. El elemento mecánico consiste en un tubo Bourdon, espiral, hélice, diafragma, fuelle o una combinación de los mismos que, a través de un sistema de palancas convierte la presión en una fuerza o en un desplazamiento mecánico.

Los elementos electromecánicos de presión se clasifican según el principio de funcionamiento en los siguientes tipos:

- Resistivos.
- Magnéticos
- Capacitivos.
- Extenso métricos.
- Piezoeléctricos.

Transductores resistivos

Constituyen, sin duda, uno de los transmisores eléctricos más sencillos. Consisten en un elemento elástico (tubo Bourdon o capsula) que varía la resistencia óhmica de un potenciómetro en función de la presión. El potenciómetro puede adoptar la forma de un solo hilo continuo o bien estar arrollado a una bobina siguiendo un valor lineal o no de resistencia. Existen varios tipos de potenciómetro según sea el elemento de resistencia: potenciómetros de grafito, de resistencia bobinada, de película metálica y de plástico moldeado. En la **figura 2-15** puede verse un transductor resistivo representativo que consta de un muelle de referencia, el elemento de presión y un potenciómetro de precisión. El muelle de referencia es el corazón del transductor ya que su desviación al comprimirse debe ser únicamente una función de la presión y además debe ser independiente de la temperatura, de la aceleración y de otros factores ambientes externos.

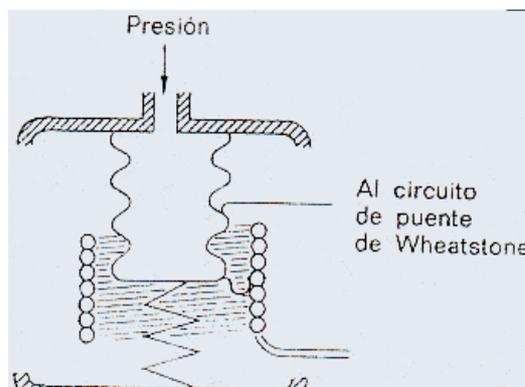


Figura 2-15. Transductor de presión resistivo.

El movimiento del elemento de presión se transmite a un brazo móvil aislado que se apoya sobre el potenciómetro de precisión. Este se encuentra conectado a un circuito de puente de Wheatstone.

Los transductores resistivos son simples y su señal de salida es bastante potente como para proporcionar una corriente de salida suficiente para el funcionamiento de los instrumentos de indicación sin necesidad de amplificación. Sin embargo, son insensibles a pequeños movimientos del contacto del cursor, muy sensibles a vibraciones y presentan una estabilidad pobre en el tiempo. La precisión es del orden de 1-2 %.

Transductores magnéticos

Se clasifican en dos grupos según el principio de funcionamiento.

a) **Transductores de inductancia variable**, en los que el desplazamiento de un núcleo móvil dentro de una bobina aumenta la inductancia de esta en forma casi proporcional a la porción metálica del núcleo contenida dentro de la bobina (**figura 2-16**).

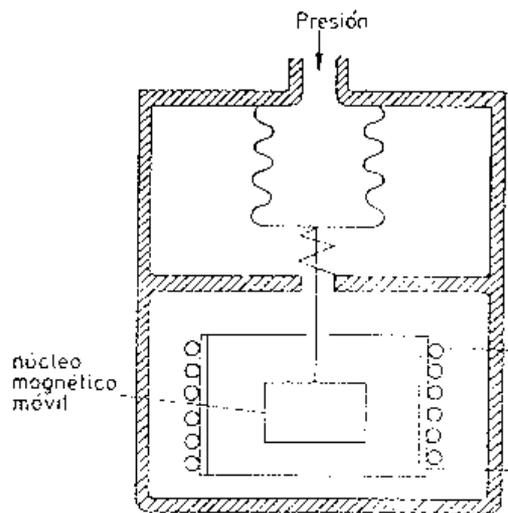


Figura 2-16. Transductor de inductancia variable.

El devanado de la bobina se alimenta con una corriente alterna y la f.e.m. de autoinducción generada se opone a la f.e.m. de alimentación, de tal modo que al ir penetrando el núcleo móvil dentro de la bobina la corriente presente en el circuito se va reduciendo por aumentar la f.e.m. de autoinducción.

Los transductores de inductancia variable tienen las siguientes ventajas: no producen rozamiento en la medición, tienen una respuesta lineal, son pequeños, de construcción robusta y no precisan ajustes críticos en el montaje. Su precisión es del orden de $\pm 1 \%$.

b) **Los transductores de reluctancia variable**, consisten en un imán permanente o un electroimán que crea un campo magnético dentro del cual se mueve una armadura de material magnético (**figura 2-17**).

El circuito magnético se alimenta con una fuerza magneto motriz constante con lo cual al cambiar la posición de la armadura varía la reluctancia y por lo tanto el flujo magnético. Esta variación del flujo da lugar a una corriente inducida en la bobina que es, por tanto, proporcional al grado de desplazamiento de la armadura móvil.

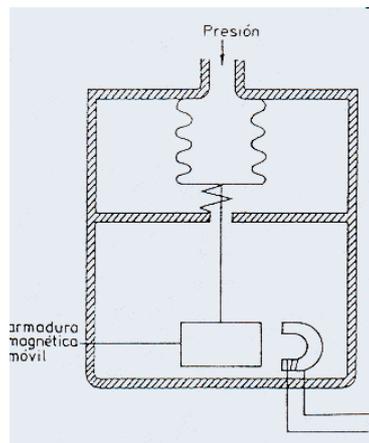


Figura 2-17. Transductor de reluctancia variable.

El movimiento de la armadura es pequeño (del orden de un grado como máximo en armaduras giratorias) sin contacto alguno con las partes fijas, por lo cual no existen rozamientos eliminándose la histéresis mecánica típica de otros instrumentos. Los transductores de reluctancia variable presentan una alta sensibilidad a las vibraciones, una estabilidad media en el tiempo y son sensibles a la temperatura. Su precisión es del orden de $\pm 0,5 \%$.

Transductores capacitivos

Se basan en la variación de capacidad que se produce en un condensador al desplazarse una de sus placas por la aplicación de presión **figura 2-18**. La placa móvil tiene forma de diafragma y se encuentra situada entre dos placas fijas. De este modo se tienen dos condensadores uno de capacidad fija o de referencia y el otro de capacidad variable, que pueden compararse en circuitos oscilantes o bien en circuitos de puente de Wheatstone alimentados con corriente alterna.

Los transductores capacitivos se caracterizan por su pequeño tamaño y su construcción robusta, tienen un pequeño desplazamiento volumétrico y son adecuados para medidas estáticas y dinámicas. Su señal de salida es débil por lo que precisan de amplificadores con el riesgo de introducir errores en la medición. Son sensibles a las variaciones de temperatura y a las aceleraciones transversales y precisan de un ajuste de los circuitos oscilantes y de los puentes de c.a. a los que están acoplados.

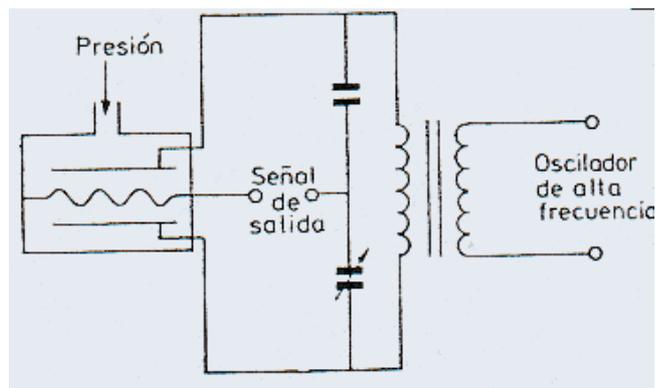


Figura 2-18. Transductor capacitivo.

Su intervalo de medida es relativamente amplio, entre 0,05-5 a 0,5-600 bar y su precisión es del orden de $\pm 0,2$ a $\pm 0,5$ %.

Galgas extensométricas

Se basan en la variación de longitud y de diámetro, y por lo tanto de resistencia, que tiene lugar cuando un hilo de resistencia se encuentra sometido a una tensión mecánica por la acción de una presión.

Existen dos tipos de galgas extensométricas: galgas cementadas **figura 2-19** formadas por varios bucles de hilo muy fino que están pegados a una hoja base de cerámica, papel o plástico, y galgas sin cementar en las que los hilos de resistencia descansan entre un armazón fijo y otro móvil bajo una ligera tensión inicial.

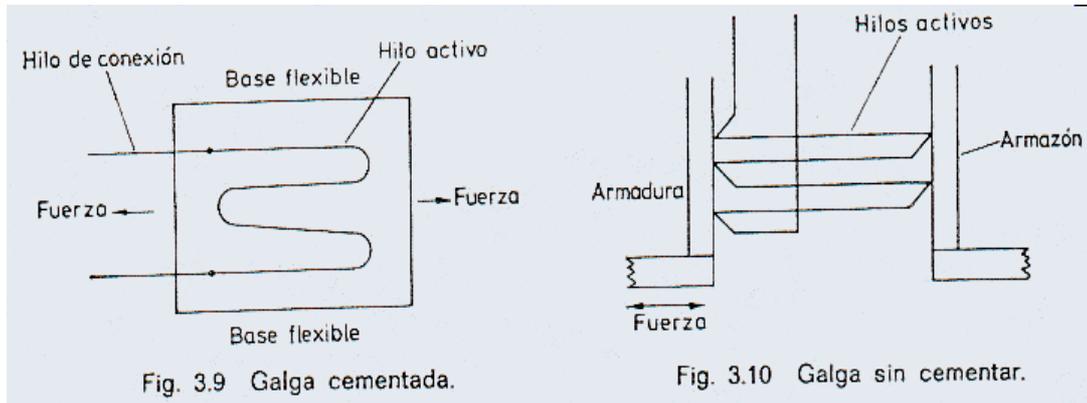


Figura 2-19. Galga cementada y Galga sin cementar.

En ambos tipos de galgas, la aplicación de presión estira o comprime los hilos según sea la disposición que el fabricante haya adoptado, modificando pues la resistencia de los mismos.

La galga forma parte de un puente de Wheatstone **figura 2-20** y cuando está sin tensión tiene una resistencia eléctrica determinada. Se aplica al circuito una tensión nominal tal que la pequeña corriente que circula por la resistencia crea una caída de tensión en la misma y el puente se equilibra para estas condiciones.

Cualquier variación de presión que mueva el diafragma del transductor cambia la resistencia de la galga y desequilibra el puente.

El intervalo de medida de estos transductores varía de 0-0,6 a 0-10 000 bar y su precisión es del orden de $\pm 0,5\%$

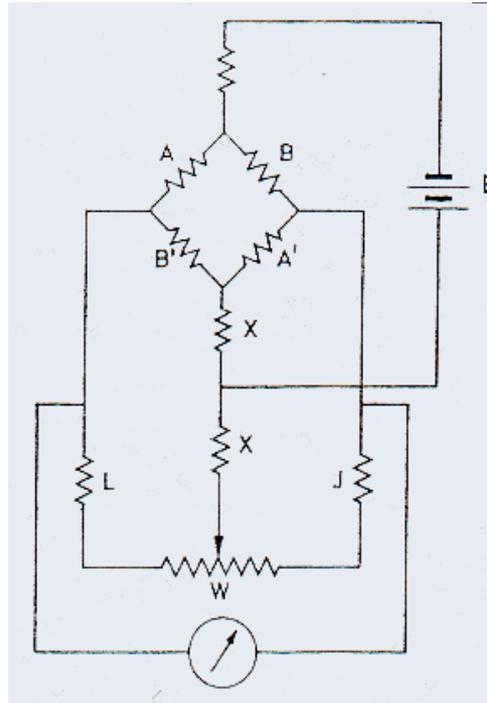


Figura 2-20. Puente de Wheatstone para galga extensométrica.

Las galgas extensométricas pueden alimentarse con c.c. o c.a. Tienen una respuesta excelente y pueden utilizarse en medidas estáticas y dinámicas. Presentan una compensación de temperatura relativamente fácil y generalmente no son influidas por campos magnéticos.

Transductores piezoeléctricos

Los elementos piezoeléctricos **figura 2-21** son materiales cristalinos que, al deformarse físicamente por la acción de una presión, generan una señal eléctrica. Dos materiales típicos en los transductores piezoeléctricos son el cuarzo y el titanato de bario, capaces de soportar temperaturas del orden de 150° C en servicio continuo y de 230°C en servicio intermitente.

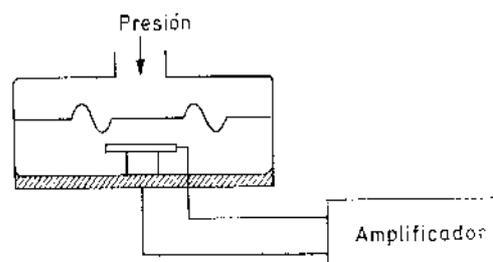


Figura 2-21. Transductor piezoeléctrico.

Son elementos ligeros, de pequeño tamaño y de construcción robusta. Su señal de respuesta a una variación de presión es lineal y son adecuados para medidas dinámicas, al ser capaces de respuestas de frecuencia de hasta un millón de ciclos por segundo. Tienen la desventaja de ser sensibles a los cambios en la temperatura y de experimentar deriva en el cero y precisar ajuste de impedancias en caso de fuerte choque. Asimismo, su señal de salida es relativamente débil por lo que precisan de amplificadores y acondicionadores de señal que pueden introducir errores en la medición.

En la tabla 2-3 puede verse las características de los elementos electromecánicos descritos anteriormente.

	Margen en bar	Precisión en % de toda la escala	Estabilidad en el tiempo	Sobrecarga	Temp. máz. de servicio °C	Nivel señal salida	Impedancia salida	Error de cero por influencia temperat. ambiente	Resolución	Sensibilidad a vibraciones
Equilibrio de fuerzas	2-6000	0,5	Media a mala	150 %	65	10 V	600 Ω	0,9-2,3 %	Continua	Alta
Resistivos	0-0,1 a 0-300	1	Mala	150 %	80	Variac. res.	0-Res. total	0,7-3 %	0,25 %	↓
Magnéticos	Inductancia variable Reluctancia variable	0,5	Media	150 %	↓	0-5 V	2 k Ω	0,9-2,3 %	Continua	↓
		↓	Media	150 %	↓	0-5 V	2 k Ω	0,6-2,4 %	↓	↓
Capacitivos	0,05-5 a 0,05-600	1	Media a buena	150 %	150	↓	5 k Ω	0,5-1,9 %	↓	Media
Galgas extensométricas	Cementadas	0-0,5 a 0-3000	0,5	Mala	↓	120	35 mV	350 Ω	0,5-2,4 %	Alta
	Sin cementar	0-0,01 a 0-600	1	Mala	200 %	↓	↓	350 Ω	↓	↓
	Silicio difundido	0-2 a 0-600	0,3	Muy buena	200 %	107	2-10 V	600 Ω	0,4-1 %	↓
Piezoeléctricos	0,1-600	1	Mala	↓	90	600 mV/bar	1000 M Ω	1-4,8 %	1/5000	Baja

Tabla 2-3. Características transductores electromecánicos.

2.3.4 DETERMINACIÓN DE LA ALTURA PARA EL SISTEMA DE APUNTAMIENTO.

Para determinar la altura se utilizó el sensor piezoeléctrico MPX4115 diseñado para sensar la presión absoluta del aire, una de sus aplicaciones es usado como altímetro o barómetro.

Sus principales características se encuentran en su datasheet del **Anexo A.1**. La elección de este sensor para esta aplicación la justifica varios factores entre ellos tenemos su disponibilidad en el mercado, precio accesible y su rango de medición que va desde 15 a 115KPa. Con este rango de medición se puede llegar a alturas que van desde 1080 metros por debajo del mar hasta 13600 metros de altura.

En esta aplicación, se determinó llegar a una altura máxima de 4000 (m) sobre el nivel del mar, y una altura mínima de 2000(m). Por ende el sensor cumple con las condiciones adecuadas para realizar aplicaciones como la requerida.

El sensor entrega una señal de 0.2 (V) a 4.8 (V) para presiones atmosféricas que varían de 15 (KPa) a 115 (KPa) respectivamente. Como la aplicación trabaja en alturas de 2000 a 4000 (m), los valores entregados por el sensor, tienen una resolución de voltaje muy pequeña que varía de 3.1 a 2.31 (V) respectivamente **(figura 2-22)**.

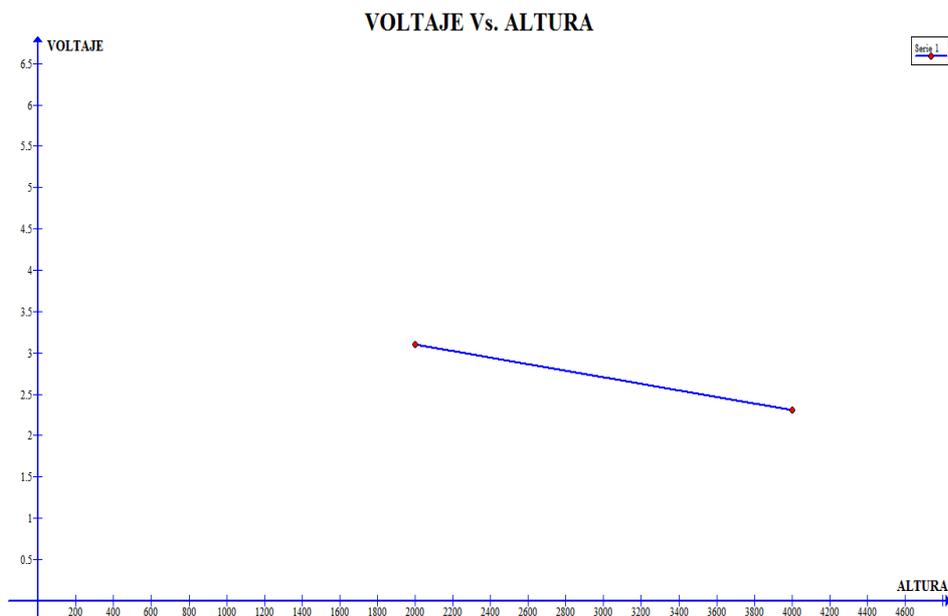


Figura 2-22. Gráfica de Voltaje Vs. Altura para el sensor MPX4115.

Por esta razón se tiene que adaptar esta pequeña variación, mediante la introducción de una etapa de resta y amplificación de la señal para obtener un escalamiento de voltaje de 0 a 5 (V) (**figura 2-23**). De esta manera, el microcontrolador puede tener una altura estimada tanto de la estación fija como de la estación móvil y con esto obtener la diferencia de alturas entre ellas. Con este resultado se determina el ángulo de elevación y depresión de cada una de las antenas, cuando estas se encuentren trabajando en alturas diferentes.

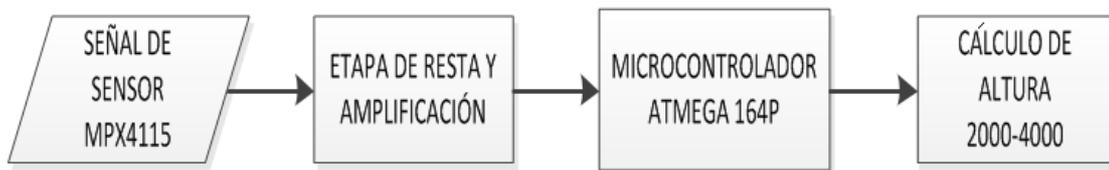


Figura 2-23. Etapas para adquisición de datos para el cálculo de la altura.

2.3.4.1 Etapa de acondicionamiento de las señales.

Por tener una diferencia de señales muy pequeña por parte del sensor cuando se trabaja de 2000 a 4000 metros se realizaron las siguientes etapas.

2.3.4.1.1 Etapa de resta de la señal

La etapa de resta consiste en llevar a la señal más baja (2.31 V) a un nivel de referencia de 0 voltios, para después amplificarla a niveles de 0 a 5 (V) su diagrama circuital se ve en la **figura 2-24**.

La resistencia R4 y C2 están configurados para eliminar interferencia electromagnética, estos valores lo dan en la hoja técnica de este sensor.

Se utiliza un amplificador LM358 cuya configuración está en modo de amplificador diferencial, con las resistencias R1, R2, R3 y R5.

Para este caso $R_f = R1 = R2$ y $R_x = R3 = R5$ cuyos valores se escogió arbitrariamente a 100KΩ.

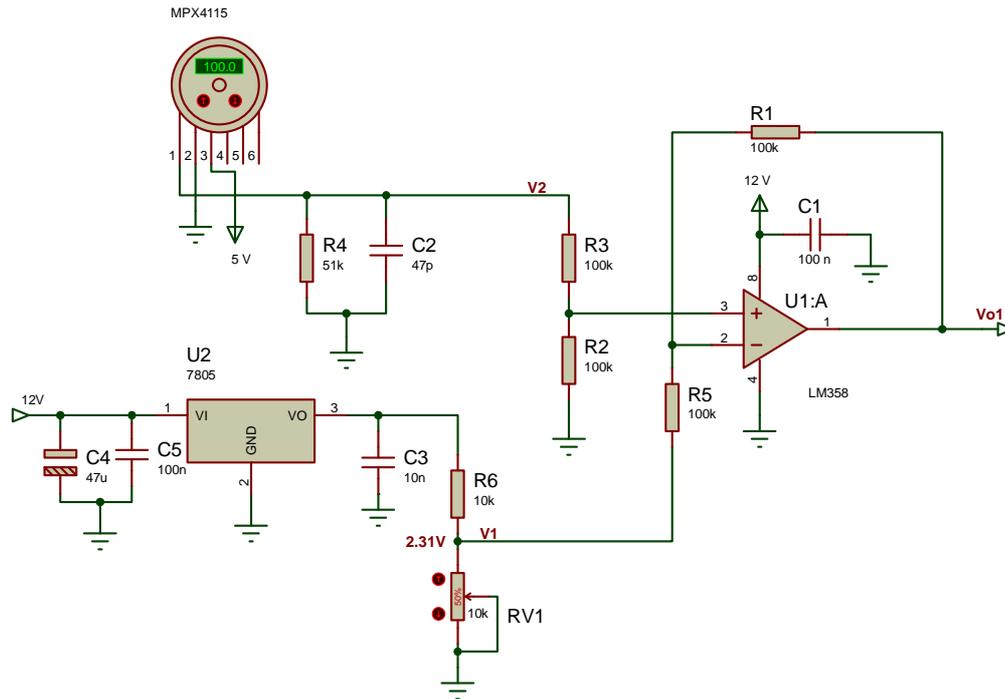


Figura 2-24. Diagrama circuital para restar la señal del sensor de presión.

De esta manera se obtiene la ecuación para el circuito restador que es:

$$Vo1 = (V2 - V1) * \frac{Rf}{Rx}$$

Para obtener un valor de referencia estable para $V1$, se utilizó un regulador de voltaje 7805 y un divisor de voltaje.

Las frecuencias de corte de los filtros empleados dependen de los componentes $C3$, $C4$, y $C5$.

Con los 5 voltios estables se realiza un divisor de voltaje para obtener $V1 = 2.31$ voltios.

El cálculo para los elementos del divisor es el siguiente:

$$V1 = \frac{5 * RV1}{RV1 + R6}$$

Se escoge arbitrariamente $R6 = 10000K\Omega$

$$2.31 = \frac{5 * RV1}{RV1 + 10000}$$

Y despejando $RV1$ tenemos

$$RV1 = 8.6K\Omega$$

Con un margen de tolerancia de un +/- 20% se tendrían valores de 10.3KΩ y 6.8KΩ, por lo tanto se ocupa un potenciómetro de 10KΩ.

Con este valor estable de 2.31 voltios se restaría con el voltaje V_2 proporcionado por el sensor a 4000 metros de altura, que sería límite máximo al cual se podría llegar con la plataforma.

Para ello tenemos a 4000 metros:

$$V_{o1} = (V_2 - V_1) * \frac{R_f}{R_x}$$

$$V_{o1} = (3.1 - 2.31) * \frac{10K\Omega}{10K\Omega}$$

$$V_{o1} = 0 \text{ Voltios}$$

A 2000 metros:

$$V_{o1} = (V_2 - V_1) * \frac{R_f}{R_x}$$

$$V_{o1} = (3.1 - 2.31) * \frac{10K\Omega}{10K\Omega}$$

$$V_{o1} = 0,79 \text{ Voltios}$$

A 2850 metros que es un nivel de referencia al cual se trabaja se tendría un valor aproximado de:

$$V_{o1} = 0,45 \text{ Voltios}$$

Este valor servirá para la realización de la calibración respectiva tanto en la etapa de resta como en la etapa de amplificación. La tabla 2-4 indica los valores de voltaje promedio a alturas diferentes.

Altura	Voltaje Vo1	
(m)	(V)	
2000	3,1 - 2,31	0,79
2500	2,89 - 2,31	0,58
2850	2,76 - 2,31	0,45
3000	2,69 - 2,31	0,38
3500	2,5 - 2,31	0,19
4000	2,31 - 2,31	0

Tabla 2-4. Valores de voltaje para distintas alturas etapa de resta de la señal.

2.3.4.1.2 Etapa de amplificación de la señal

Con los valores de voltaje obtenidos en V_{o1} que varía de 0 a 0,79 voltios como indica la tabla 2-4, es necesario amplificar estos valores para llegar a valores de 0 a 5 voltios; señales adecuadas para realizar la conversión analógica a digital por parte del microcontrolador y así obtener el cálculo de la altura.

Para ello la etapa de amplificación se muestra en la figura 2-25:

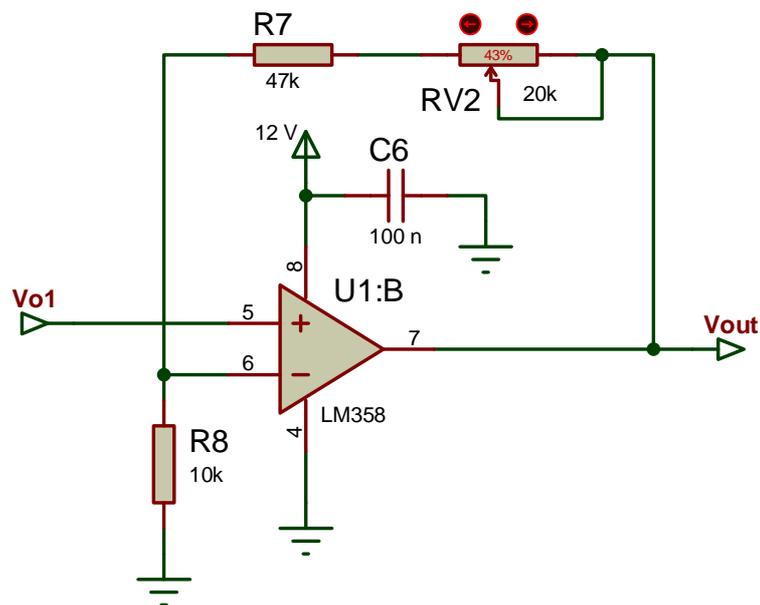


Figura 2-25. Diagrama circuital para amplificar señal del sensor de presión.

En la figura se muestra la etapa de amplificación de voltaje, esta etapa consta de un amplificador LM358 configurado como amplificador no inversor su ecuación es:

$$\frac{V_{out}}{V_{o1}} = 1 + \frac{R7 + RV2}{R8}$$

También se tiene:

$$\frac{V_{out}}{V_{o1}} = \Delta G$$

Donde ΔG es la ganancia que para este caso es de:

$$\Delta G = \frac{5}{0.79} = 6.32$$

Para encontrar los valores de R7, RV2 y R8 se asume un valor para R8 de 10K, de esta manera se puede despejar R7 y RV2

$$6.32 = 1 + \frac{R7 + RV2}{10K\Omega}$$

$$R7 + RV2 = 53200\Omega$$

Con un margen de tolerancia de un +/- 20% se tendrían valores de 63.8KΩ y 42.5KΩ, por lo tanto se escoge un valor de 43KΩ para R7 y un valor de 20KΩ para el potenciómetro RV2.

La tabla 2-5 indica los valores finales de voltaje acondicionados para ser entregados al microcontrolador a diferentes alturas.

Altura	Voltaje Vo1		Vout.
(m)	(V)		(V)
2000	3,1 -2,31	0,79	4,9928
2500	2,89 -2,31	0,58	3,6656
2850	2,76 -2,31	0,45	2,844
3000	2,69 -2,31	0,38	2,4016
3500	2,5 -2,31	0,19	1,2008
4000	2,31 -2,31	0	0

Tabla 2-5. Valores de voltaje de 0 a 5 voltios para distintas alturas etapa acondicionada.

2.3.4.2 Algoritmo de programación para el cálculo de la altura.

Una vez realizado la etapa de acondicionamiento se obtiene una variación de 0 a 5 Vdc, los cuales son ingresados al microcontrolador Atmega 164P, encargado del procesamiento y obtención de la variación de altura.

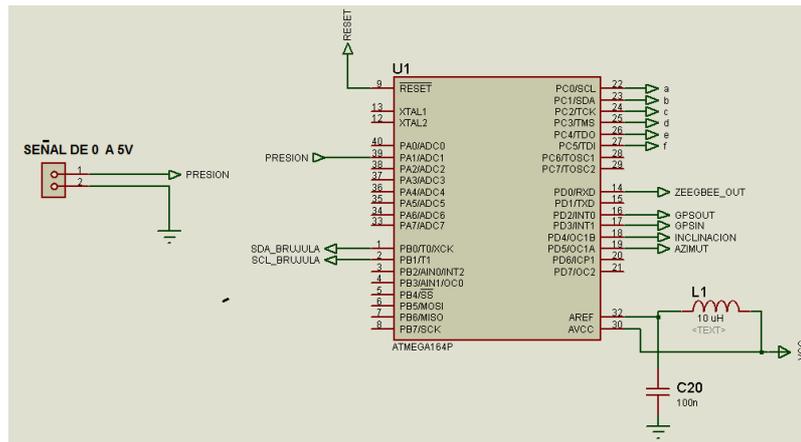


Figura 2-26. Conexión entre acondicionamiento de Sensor de Presión y microcontrolador.

Para el cálculo de la altura se utiliza la fórmula para una atmósfera estándar:

$$P1 = \frac{1013.3}{e^{(8430.15 - Z * 0.09514)}}$$

Cuyos valores ya se habló en el capítulo de la ecuación altimétrica. Donde P1 es la presión en Hecto Pascales y Z la altitud en metros, se procede a despejar Z quedando de la siguiente manera:

$$Z = \frac{8430.15(\ln 1013.3 - \ln P1)}{1 + 0.09514(\ln 1013.3 - \ln P1)}$$

De esta manera se procede a realizar un algoritmo de programación con todas estas constantes para el cálculo de la altura. Lo único que faltaría es el cálculo de la presión que se puede calcular partir de los valores de la tabla 2-6 y de la señal obtenida por parte de la etapa acondicionada en el sensor de presión.

Altura	Voltaje Vo1		Vout	Presión
(m)	(V)		(V)	(hPa)
2000	3,1 -2,31	0,79	4,9928	794,92
2500	2,89 -2,31	0,58	3,6656	746,8
2850	2,76 -2,31	0,45	2,844	714,55
3000	2,69 -2,31	0,38	2,4016	701,08
3500	2,5 -2,31	0,19	1,2008	657,67
4000	2,31 -2,31	0	0	616,49

Tabla 2-6. Valores de Presión y Voltaje en función de la altura.

Para encontrar las constantes de programación de la presión se tiene la **figura 2-27** que representa Presión en función del voltaje.

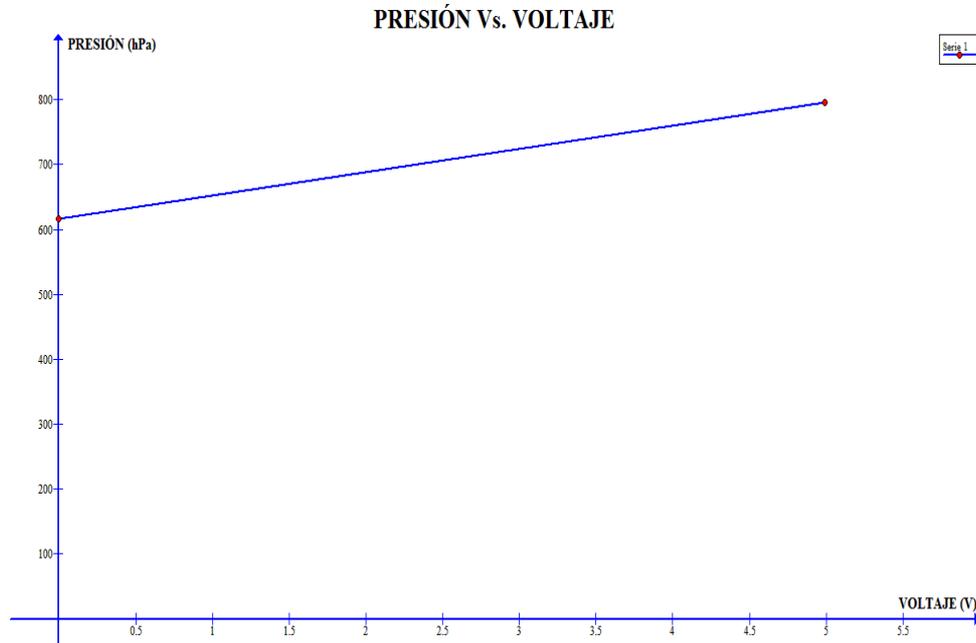


Figura 2-27. Gráfica de Voltaje Vs. Presión para el sensor MPX4115

Su pendiente es:

$$m = \frac{794.92 - 616.49}{4.99}$$

$$m = 35.75$$

Su ecuación sería:

$$Presion = 35.75 * Voltaje + 616.49$$

Se procede a realizar la conversión analógica a digital a 10 bits y con la utilización de un algoritmo adecuado de programación, se puede obtener la presión en Hecto Pascales, para después obtener el cálculo de la altura.

Su diagrama de flujo se muestra en la figura 2-28 y el programa del cálculo de la altura en el **Anexo A.2**.

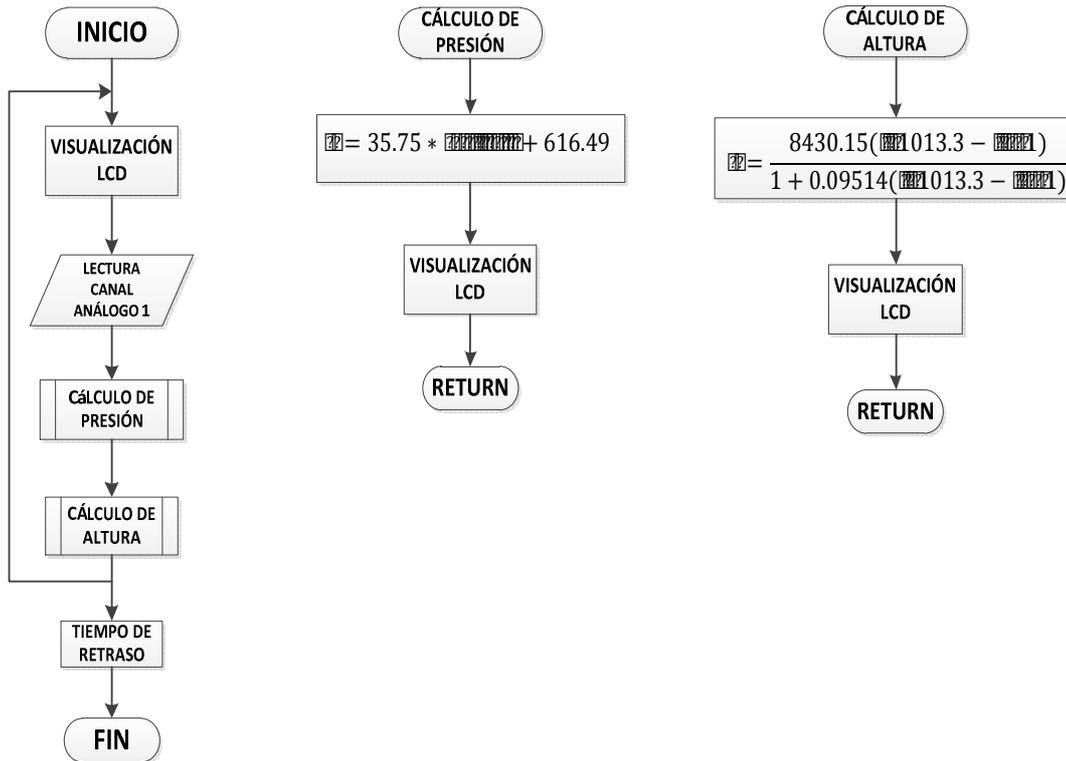


Figura 2-28. Diagrama de flujo para la obtención de la altura de 2000 a 4000 metros.

2.4 COMPÁS MAGNÉTICO O BRÚJULA DIGITAL

2.4.1 INTRODUCCIÓN

Los compases o brújulas son magnetómetros capaces de sensar o medir el campo magnético de una región del espacio, por lo que se emplea como medio de medición del campo magnético de la Tierra.

Al tener un campo magnético y una barra imanada, dicho campo que es el magnético terrestre, ocasiona que la barra se situé de forma paralela con respecto a sus líneas de fuerza. Empleándose por lo largo de los años como fundamento para la construcción de las brújulas, logrando llegar a obtener un sistema conformado por una aguja imanada y un soporte vertical, que permite girar libremente y apuntar al Norte, donde se puede colocar en un plano horizontal y determinar las orientaciones en dicho plano sobre una escala graduada.

2.4.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

La brújula o compás magnético es un instrumento de orientación que emplea como medio de funcionamiento al magnetismo terrestre, ya que al tener un medio imantado como lo es su aguja interna y la libertad de movimiento para rotar en un plano horizontal, nos indicará la dirección del campo magnético terrestre, así como el polo norte y Sur. Gracias al campo magnético terrestre se orientara según el meridiano magnético del lugar, indicando la dirección del norte magnético.

Una de los principales usos del compás magnético fue en la navegación donde se tenía compases muy sencillos que consistían en agujas magnetizadas que flotaban en el agua, en la actualidad los compases mecánicos emplean anillos magnéticos, o pares de barras, sujetos a un disco graduado de mica, donde este conjunto flota en una mezcla de agua, alcohol o glicerina como medio de soporte, de forma que le permite rotar alrededor de un pivote.

2.4.3 TIPOS DE COMPÁS MAGNÉTICO

2.4.3.1 Compases de Núcleo Saturable.

Se basan en la saturación magnética del núcleo de un material altamente permeable, empleando para ello una corriente alterna. Cuando este material se introduce en un campo magnético uniforme, las líneas de fuerza se dirigen por el camino de menor resistencia. Sin embargo, si el material está saturado por un efecto magnetizador suplementario, las líneas de flujo del campo externo no se modifican. El magnetómetro hace uso de este efecto de saturación para medir la intensidad del campo magnético de los alrededores.

Hoy en día gozan de gran popularidad debido a su precio y reducidas dimensiones.

2.4.3.2 Compases dependientes de la clase de núcleo y devanados.

Los núcleos con geometría de anillo consisten en un devanado de excitación, así como devanados de medida enrollados sobre el anillo dispuestos en forma

ortogonal, provocando tensiones de corriente continua sobre las salidas V_x y V_y de los devanados. La variación de ángulo se la obtiene, sensando dichos valores de voltaje y realizando operaciones trigonométricas:

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{V_x}{V_y}$$

2.4.3.3 Compases magnetointuctivos.

Emplean un solenoide por cada eje logrando una reducción en el consumo de energía, donde el devanado de medida sirve como elemento inductivo en un oscilador de relajación L/R de baja potencia, cuya inductancia efectiva viene influenciada por el componente paralelo al eje de devanado, del campo magnético del medio, donde L está dada por:

$$L = \mu_0 n^2 V \frac{dB}{dH}$$

Siendo μ_0 , la permeabilidad magnética del aire, n el número de vueltas del devanado por unidad de longitud, V el volumen material del núcleo, B el flujo magnético total y H la fuerza de magnetización.

Al aplicar una corriente continua sobre el solenoide se crea un flujo, provocando una fuerza de magnetización H_0 , centrada en la zona en la que la permeabilidad relativa μ varía linealmente con H . La presencia de un campo exterior H_e , provoca una desviación con respecto a H_0 , dependiendo del cambio asociado de la permeabilidad efectiva.

Cuando mayor sea el campo magnético externo H_e menor es la inductancia efectiva, aumentando la frecuencia del oscilador, donde dicho cambio permite medir la orientación del devanado de medida, o ángulo con respecto al campo geomagnético.

2.4.3.4 Compases Magnetoresistivos.

Se basan en una propiedad conocida como magnetorresistencia donde determinados materiales aumentan su resistencia al ser sometidos a un campo magnético externo, provocando el efecto de desviación en la trayectoria de los electrones.

Son empleados para desplazamientos angulares pequeños y lineales.

2.4.3.5 Compases de efecto Hall.

Se basa en el efecto Hall, donde se requiere un arreglo de sensores que nos permiten la medición de campo magnético o corrientes, donde si por dichos sensores circula corriente y se le coloca en un campo magnético, aparece un voltaje proporcional al producto entre la corriente y la intensidad de la componente normal del campo magnético que es perpendicular a la dirección del flujo.

Cuando una carga eléctrica en movimiento, se desplaza en una zona donde existe un campo magnético, se ve sometida a la acción de una fuerza, denominada Fuerza de Lorentz, dicha fuerza hace que los electrones experimenten una desviación.

2.4.4 CONSIDERACIONES DE ORIENTACIÓN

La tierra posee un campo magnético con polos Norte y Sur con un alcance aproximado de 36000 millas en el espacio, además que se encuentra rodeado por una región llamada magnetósfera, que es generada por partículas de sol trasladadas con el viento solar.

En el interior de la tierra se tiene un núcleo líquido de magma muy caliente y de material conductor, al estar en movimiento de rotación la tierra, dicha magna aunque de manera no uniforme, crea un dinamo dando lugar al campo magnético terrestre, que presenta un polo norte y un polo Sur.

Los polos magnéticos Norte y Sur de la tierra, se invierten a intervalos irregulares de cientos de miles de años, debiéndose esto a la teoría geofísica que explica el origen del campo magnético principal de la Tierra, el Efecto Dinamo.

Este efecto Dinamo consiste en el movimiento del fluido en el núcleo exterior de la tierra, donde se mueve el material conductor a través de un campo magnético débil existente, generando una corriente eléctrica que producirá un campo magnético que también interactúa con el movimiento del fluido para crear un

campo magnético secundario. Juntos ambos campos son más intensos que el original y yacen a lo largo del eje de rotación de la tierra.

Como medios de orientación tanto aeronáuticos y aéreos existen dos puntos de referencia como lo es el Norte Geográfico o Norte Polar y el Norte Magnético, donde cada uno tiene su origen.

2.4.5 CARACTERÍSTICAS DEL DISPOSITIVO EMPLEADO

Se emplea una brújula digital con sensores de campos magnéticos KMZ51 de Philips que son lo suficientemente sensibles como para captar el campo magnético de la tierra. Posicionados en ángulo de recto entre sí, permitiendo al microprocesador de la brújula calcular la dirección de la componente horizontal del campo magnético natural y entregar con una precisión de 3-4 grados y una resolución de decimas mediante dos interfaces hacia el usuario.

El módulo empleado es el CMPS03 diseñado por DEVANTECH Ltd., capaz de medir su posición en grados respecto al norte magnético, mediante la colocación de los sensores de efecto Hall ubicados de forma estratégica sobre la placa impresa (**figura 2-29**).

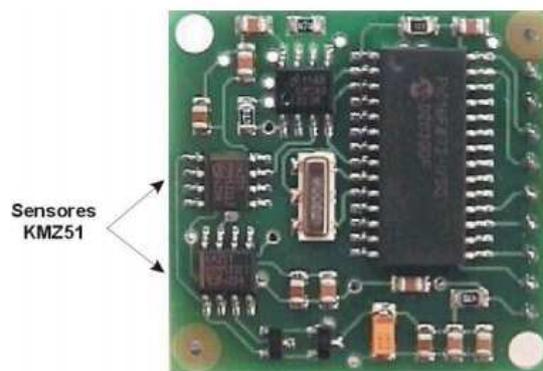


Figura 2-29. Brújula Digital CMPS03.

El dispositivo es polarizado con 5 Vdc y proporciona dos salidas diferentes que indican su posición, donde la una es un salida PWM cuyo ancho de pulso determina dicha posición y la otra una interface I2C para realizar la comunicación mediante un microcontrolador.

2.4.5.1 Salida PWM.

Esta salida proporciona un pulso modulado que varía conforme a la posición del módulo respecto al norte magnético, donde la variación de ancho de pulso varía desde 1mS (0°) hasta 36.99 mS (359.9°), con una resolución de $100\mu\text{S}/^\circ$ con un offset de +1mS y al finalizar el sensado se coloca en 0L durante 65mS, teniendo un ciclo total mínimo de 66mS para posición de 0° y 102 mS para la posición de 359.9° .

El pulso es generado por un timer interno de 16 bits, en la figura 2-30 se muestra un diagrama de tiempos donde se han representado 4 medidas distintas.

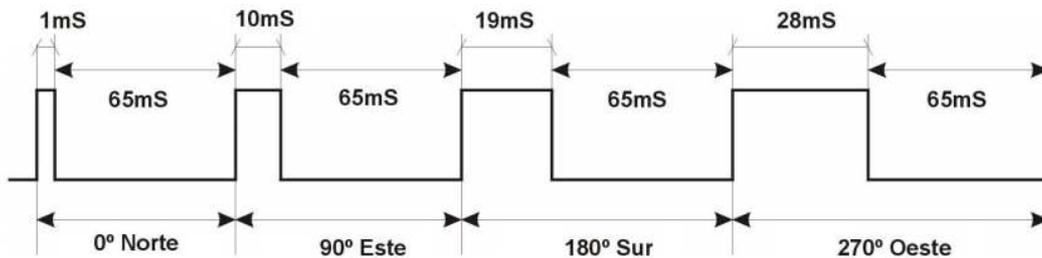


Figura 2-30. Ciclos de tiempos en Generación PWM.

2.4.5.2 Interface I2C

Esta interface nos permite comunicarnos entre nuestro microcontrolador de adquisición de datos y ser gobernado para realizar las tareas necesarias, el protocolo empleado es igual a cualquier otro dispositivo I2C, el diagrama de tiempos es el siguiente (figura 2-31):

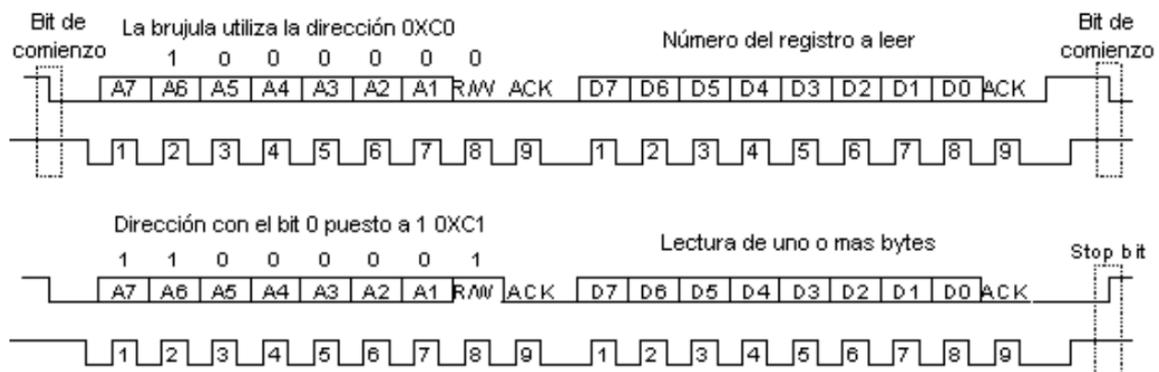


Figura 2-31. Diagrama de tiempos para comunicación I2C.

Después del bit de inicio, el microcontrolador envía la dirección del módulo “0xC0” para modo escritura y “0xC1” para modo lectura, luego se envía la dirección del registro interno al que se quiere acceder (**Ver tabla 2-7**), nuevamente se envía el bit de inicio para luego enviar la dirección “0xC1” del dispositivo en modo lectura, momento en que el modulo comenzará a transmitir de forma secuencial el contenido de sus distintos registros, terminando este envía hasta que el microcontrolador genere el bit de parada.

El módulo CMPS03 tiene un total de 16 registros internos, los cuales se resumen en la siguiente tabla:

Registro	Función
0	Numero de Revisión del Software
1	Dirección. en 1 byte 0-255 para 0 - 360°
2,3	Dirección. en 2 bytes 0-3599 para 0 - 359,9°
4,5	Test interno señal diferencial sensor 1
6,7	Test interno señal diferencial sensor 2
8,9	Test interno, valor de calibración 1
10,11	Test interno, valor de calibración 2
12	Sin usar, devuelve 0
13	Sin usar, devuelve 0
14	Sin usar, devuelve 0
15	Comando de calibración, escribir 255 para calibrar

Tabla 2-7. Registros de Compás Magnético CMPS03.

Registros:

- 0 → Es la revisión del software que actualmente es 8
- 1 → Valor de dirección en grados convertida en un valor entre 0 y 255 correspondiente a 0 y 360 Grados
- 2 y 3 → Valor de dirección en grados convertida en un valor entre 0 y 3599 correspondiente a 0 y 359.9°
- 4 a 11 → De uso interno del modulo
- 12 a 14 → No se emplean
- 15 → Registro de calibración

2.4.5.3 Pines de conexión.

El módulo consta de una placa de 32x35 mm, es alimentado con 5 Vdc, con un consumo de 20 mA. Consta de 9 pines de conexión, correspondientes a alimentación, señales de salida, los cuales son detallados a continuación:

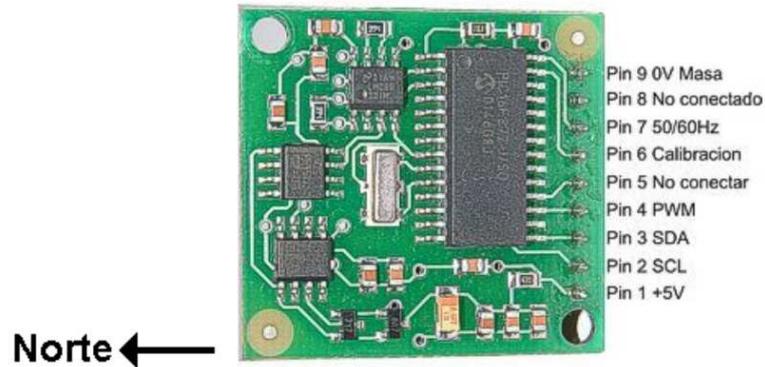


Figura 2-32. Pines de conexión del módulo CMPS03.

Nº Pin	Señal	Descripción
1	+5Vcc	Entrada de alimentación de +5Vcc
2	SCL	Entrada de reloj procedente del bus I2C puede ser desde 100KHz (estándar) hasta 1 MHz
3	SDA	Entrada/salida de datos del bus I2C
4	Salida PWM	Salida modulada en anchura que representa la orientación del módulo.
5	N.C.	No conectada
6	CALIBRACION	Entrada para la calibración por hardware del módulo. Ver el apartado 4
7	50/60Hz	Mediante esta entrada se activa un filtro interno que permite anular en cierta medida los campos magnéticos generados por la red eléctrica. Cuando se pone a nivel alto "1" se activa un filtro de 60Hz (por defecto). Poniendo esta entrada a nivel bajo "0" se activa un filtro a 50Hz.
8	N.C.	No conectada
9	GND	Tierra de alimentación

Tabla 2-8. Pines del Módulo CMPS03.

Este módulo cuenta con la facilidad de calibración ya sea por dos medios, por hardware y software, donde el primero es uno de los más sencillos, debido a que se emplea la entrada de calibración del pin 6, que posee su propia resistencia pull-up, que en estado de reposo la mantiene en "1L".

Para poder realizar la calibración tan solo es necesario aplicar un "0L" por cada uno de los cuatro puntos cardinales. Por lo que se coloca un pulsador conectado al pin 6 y el otro extremo a GND (figura 2- 33).

Pasos de calibración método hardware:

1. Colocar la brújula de forma paralela al plano horizontal y orientado al **NORTE**, luego presionar y soltar el pulsante
2. Colocar la brújula de forma paralela al plano horizontal y orientado al **ESTE**, luego presionar y soltar el pulsante
3. Colocar la brújula de forma paralela al plano horizontal y orientado al **SUR**, luego presionar y soltar el pulsante
4. Colocar la brújula de forma paralela al plano horizontal y orientado al **OESTE**, luego presionar y soltar el pulsante

Las señales SCL y SDA deben tener conectadas resistencias Pull-up a la alimentación de 5 Vdc.

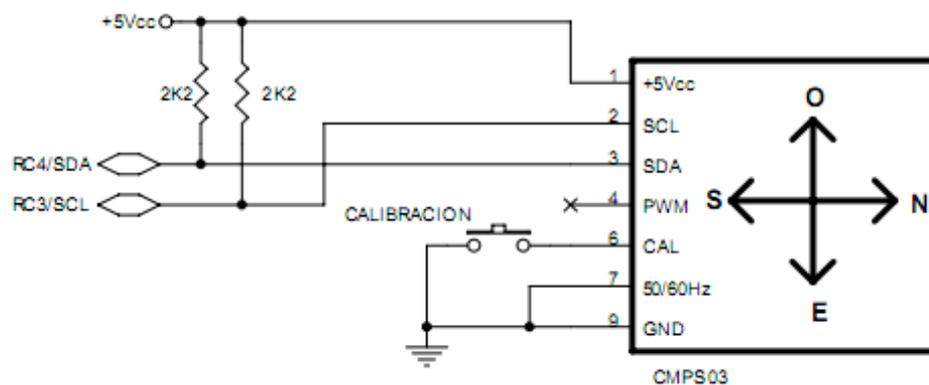


Figura 2-33. Conexión de pines para calibración.

El segundo método es por software donde se emplea la comunicación I2C que el modulo posee, donde solo basta escribir el valor 0xFF sobre el registro interno 0x0F en cada uno de los cuatro puntos cardinales.

Pasos de calibración método Software:

1. Colocar la brújula de forma paralela al plano horizontal y orientado al **NORTE**, luego escribir 0xFF en la posición 0x0F.
2. Colocar la brújula de forma paralela al plano horizontal y orientado al **ESTE**, luego escribir 0xFF en la posición 0x0F.
3. Colocar la brújula de forma paralela al plano horizontal y orientado al **SUR**, luego escribir 0xFF en la posición 0x0F.
4. Colocar la brújula de forma paralela al plano horizontal y orientado al **OESTE**, luego escribir 0xFF en la posición 0x0F

2.4.6 COMUNICACIÓN ENTRE EL MICROCONTROLADOR Y EL MÓDULO CMPS03

La brújula digital se encuentra ubicada sobre la estructura de la estación móvil, mediante una tarjeta electrónica, capaz de recibir y enviar los datos de comunicación y polarización hacia la tarjeta de control principal, ubicada en el tablero de control (**figura 2-34**).

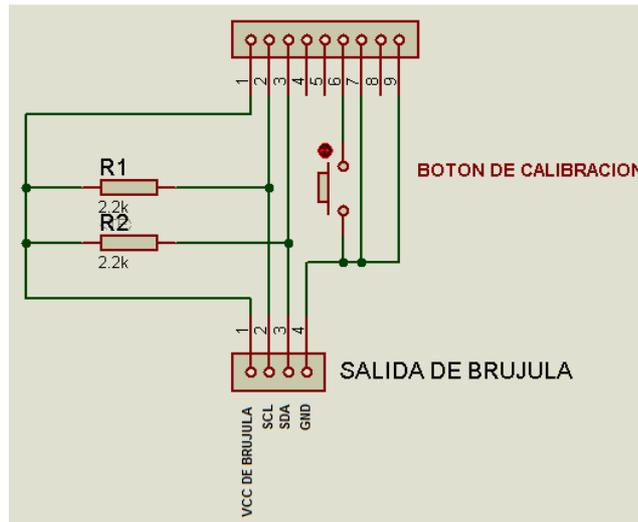


Figura 2-34. Conexión de pines en tarjeta de recepción del módulo CMPS03.

Estos pines son conectados hacia el microcontrolador ATMEGA 164P y a los pines de alimentación de la brújula digital (**figura 2-35**).

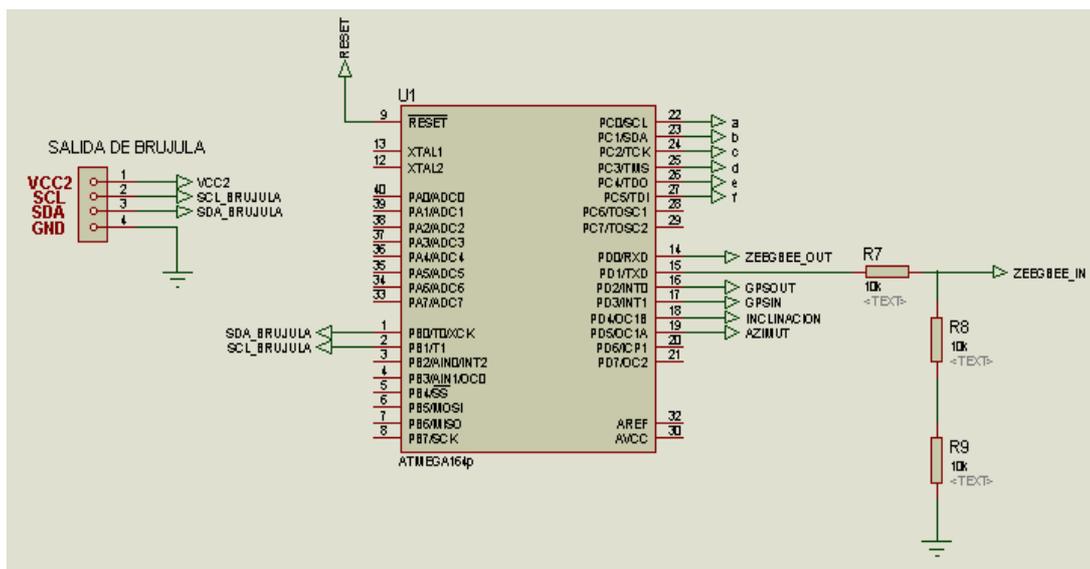


Figura 2-35. Conexión de brújula digital con el microcontrolador.

El microcontrolador Atmega 164P es el encargado de interactuar con el módulo CMPS03, empleando la comunicación I2C que posee dicho microcontrolador.

El siguiente código indica la configuración de la comunicación I2C en el compilador Bascom.

```

'**** CONFIGURACION DE COMUNICACION I2C ****
Config Clock = User
Config Sda = Portb.0
Config Scl = Portb.1
Const Cmps03w =&HC0
Const Cmps03r =&HC1

```

Código 2-5 Configuración de Pines de Comunicación I2C.

```

I2cstart          ' Empiezo comunicacion i2c
I2cwbyte Cmps03w ' Envio la direccion de escritura
I2cwbyte 0 ' Comienzo comunicacion con brujula
I2cstart          ' Se empieza a generar el codigo
I2cwbyte Cmps03r ' Envio la direccion
I2crbyte _dat1 , Ack
I2crbyte _dat2 , Nack ' valor de giro 0 a 255
I2cstop
Giro = K_giro * _dat2

```

Código 2-6. Configuración de Lectura y escritura en la Comunicación I2C.

A continuación se indica el diagrama de flujo (**figura 2-36**).

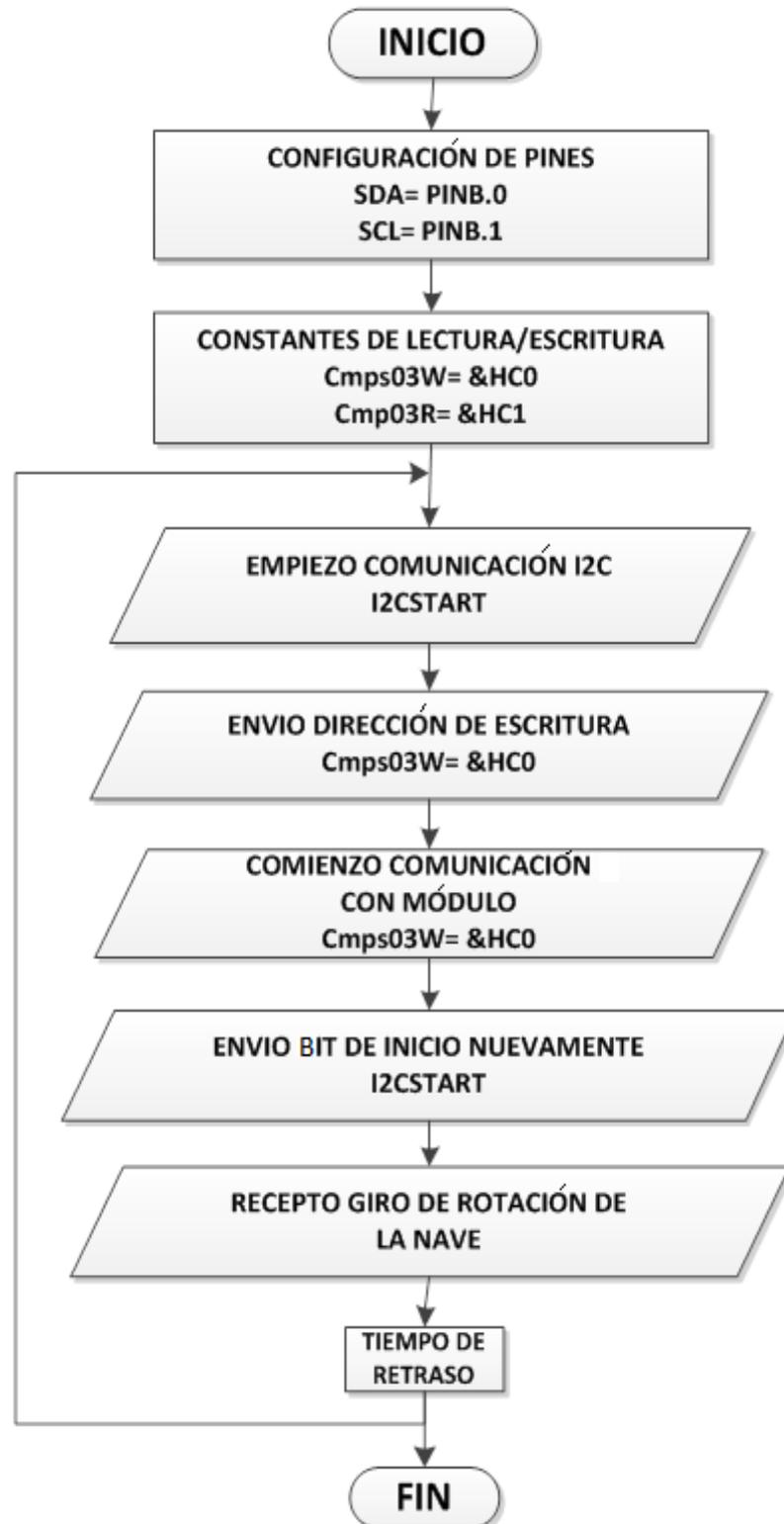


Figura 2-36. Diagrama de Flujo para obtener Giro de Nave.

2.5 ACCIONAMIENTOS PARA EL MOVIMIENTO DEL SISTEMA

2.5.1 MEDIOS DE TRANSMISIÓN

Permiten transmitir el movimiento desde los actuadores hacia la carga en este caso hacia la estructura y este a su vez a la antena.

Muchas veces el peso, el momento de inercia de los elementos, torques estáticos son un problema a la hora de escoger el actuador y medio de transmisión adecuado.

2.5.1.1 Transmisión por accionamiento directo

El accionamiento directo (Direct Drive DD), en donde el eje del actuador se acopla directamente a la carga sin la utilización de un medio de transmisión; este sistema se utiliza en donde se requiere altas velocidades y poco torque. Entre las principales ventajas de la utilización de accionamientos directos se tiene las siguientes:

- Simplificación del sistema mecánico.
- Peso

En la figura 2-37 se observa un sistema de accionamiento directo.



Figura 2-37. Transmisión por accionamiento directo.

2.5.1.2 Transmisión por fricción

La fricción se refiere al efecto de oposición o resistencia que se produce cuando se unen dos piezas y se trata de moverlas. En unos casos, la fricción es un factor negativo ya que se opone a algún tipo de movimiento y en otros casos la fricción es útil para mover algo y debe ser lo más alta posible.

Para que exista fricción alta las ruedas o elementos deben ser de un material que no se deslice fácilmente como el caucho.

En la figura 2-38 se puede observar algunos ejemplos de transmisión de movimiento por fricción.

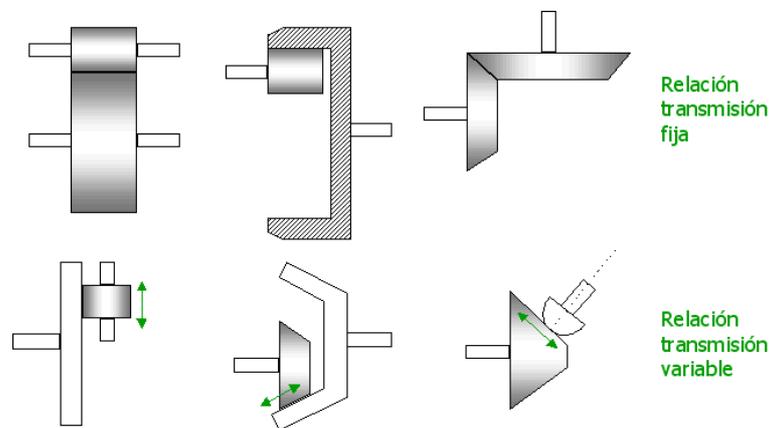


Figura 2-38. Transmisión por fricción.

2.5.1.3 Bandas

Las bandas son elementos flexibles que se utilizan para transmitir el movimiento rotatorio de un eje a otro utilizando poleas. Las poleas son los elementos que reciben las bandas y deben estar aseguradas a los ejes o a las ruedas que se requieran mover. Las bandas pueden ser de diferentes formas y materiales según la necesidad o disponibilidad de un momento dado.

Hay bandas tan simples como una banda de caucho, hasta una correa dentada de precisión.

En la figura 2-39 se muestra el esquema básico de un sistema de transmisión de movimiento por banda.

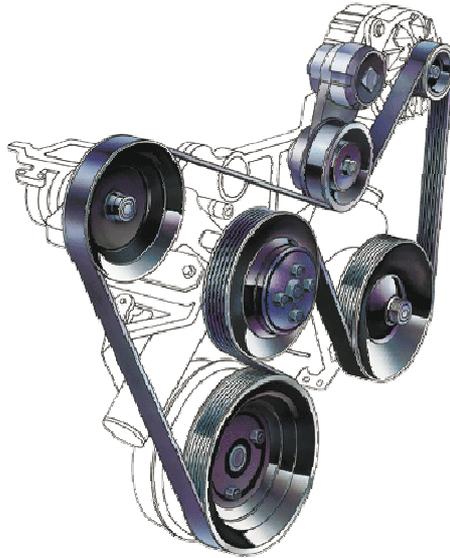


Figura 2-39. Transmisión por bandas.

2.5.1.4 Cadenas

Cuando las bandas no pueden tener suficiente agarre, se pueden utilizar las cadenas, que acopladas a un engranaje apropiado, aseguran una transmisión de movimiento muy confiable en cuanto a este aspecto se refiere. Una cadena es un elemento flexible formado por una serie de eslabones o piezas iguales que se acoplan entre sí por medio de pequeños ejes cilíndricos (**figura 2-40**).

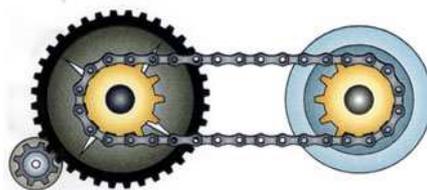


Figura 2-40. Transmisión por cadenas.

Las cadenas son utilizadas en donde se requiera un alto torque de transmisión, una de las aplicaciones más comunes se encuentran en las motocicletas.

2.5.1.5 Engranajes

Uno de los sistemas más utilizados para este propósito son los reductores con engranajes llamados Gears en inglés. En robótica, estos mecanismos tienen tres

propósitos principales: reducir la velocidad del movimiento rotacional del motor, aumentar la fuerza o torque y transmitir el movimiento en forma segura.

Un engranaje básico está formado por dos piñones **figura 2-41** y permite la transmisión de movimiento sin el posible deslizamiento que podría ocurrir entre un sistema de transmisión de dos ruedas lisas (**figura 2-42**).

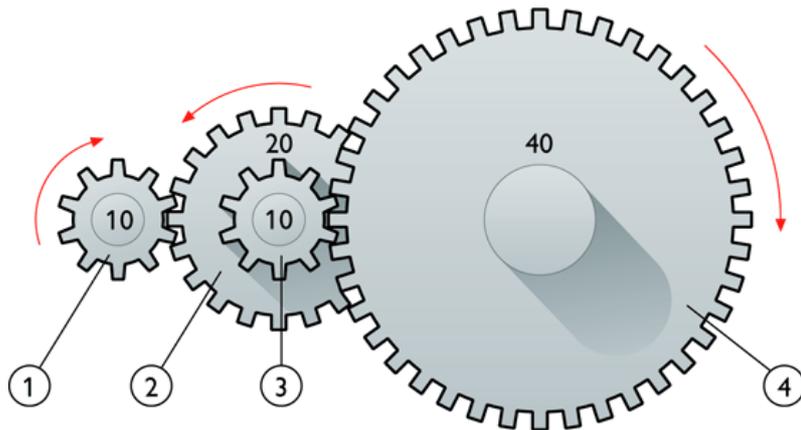


Figura 2-41. Transmisión por engranes.

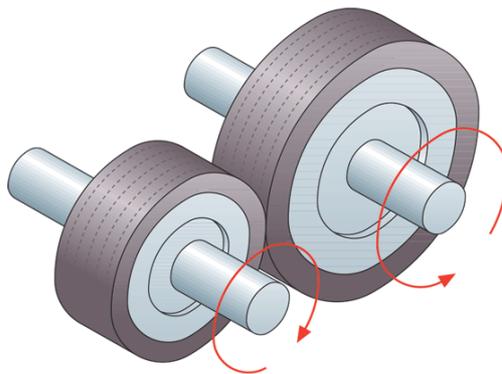


Figura 2-42. Transmisión por ruedas.

Los engranajes se encuentran en todo tipo de sistemas de transporte y en general, en aparatos impulsados por motores. En robótica tanto a nivel experimental como industrial, se utilizan ampliamente sistemas de varios piñones llamados “cajas reductoras”.

Las cajas reductoras son necesarias en este sistema ya que los motores entregan en sus ejes velocidades de rotación muy altas, que si se transmiten directamente al sistema no se podría realizar un control adecuado de posición.

La reducción de la velocidad implica automáticamente un fenómeno muy favorable en el sistema; el aumento de la fuerza o torque rotacional en el eje que recibe el movimiento hacia la antena. Esto se debe a que la potencia o energía original del motor se debe conservar y como esta es directamente proporcional a la velocidad de rotación (ω) y al torque (τ); cuando la primera disminuye, el segundo debe aumentar

$$Pm = \tau * \omega$$

Dónde:

Pm : Es la fuerza o potencia mecánica

τ : Es el torque

ω : La velocidad de rotación

En la práctica, hay una pérdida muy pequeña de potencia debido a que la transmisión del movimiento no es total al 100% por las imperfecciones físicas en la forma y construcción de los engranajes; pero esta pérdida es tan pequeña que se puede despreciar.

Relaciones Matemáticas en los engranajes

La reducción de la velocidad y el aumento del torque en un engranaje se puede expresar matemáticamente de una forma muy sencilla. En la ecuación que se muestra a continuación se establece una relación llamada "relación del número de dientes".

$$RND = \frac{NA}{NB}$$

Dónde:

RND : Relación del número de dientes

NA : Número de dientes del piñón A

NB : Número de dientes del piñón B

Y por medio de esta relación se puede deducir la velocidad angular y el torque de la siguiente manera:

$$\frac{\omega A}{\omega B} = \frac{\tau A}{\tau B} = \frac{NA}{NB}$$

Si se conocemos la velocidad aplicada al eje A, por ejemplo a partir de un motor, se puede deducir la velocidad resultante en el eje B y viceversa. A sí mismo, podemos encontrar el torque resultante en los dos casos.

2.5.2 ACTUADORES

Los dispositivos de actuación para los diferentes movimientos son varios depende de la precisión, velocidad, torque, etc. En la mayoría de los casos son motores eléctricos, cilindros neumáticos, o motores hidráulicos.

2.5.2.1 Sistemas de actuadores hidráulicos

Las señales hidráulicas se usan en dispositivos de control de mucha mayor potencia; sin embargo, son más costosas que los sistemas neumáticos y hay riesgos asociados de fuga de aceite, que no exigen una fuga de aire (**figura 2-43**).



Figura 2-43. Actuador Hidráulico.

Fuentes de energía

En un sistema hidráulico la presurización del aceite se logran mediante una bomba accionada por un motor eléctrico o mecánico. La bomba envía aceite al sistema desde un pozo colector a través de una válvula de retención y un acumulador; en la figura 2-44 se ilustra este sistema. La válvula de alivio libera presión cuando ésta rebasa determinado nivel de seguridad; la válvula de retención evita que el aceite regrese a la bomba y el acumulador equilibra las fluctuaciones de corta duración en la presión de salida del aceite. En esencia del acumulador es un recipiente que mantiene el aceite bajo presión, soportando una fuerza externa, contiene gas presurizado; dentro de esta cámara de gas, se encuentra el fluido hidráulico; si la presión del aceite aumenta, la cámara se contrae, aumenta el volumen que ocupa el aceite y disminuye la presión, lo mismo sucede en el caso de disminuir la presión.

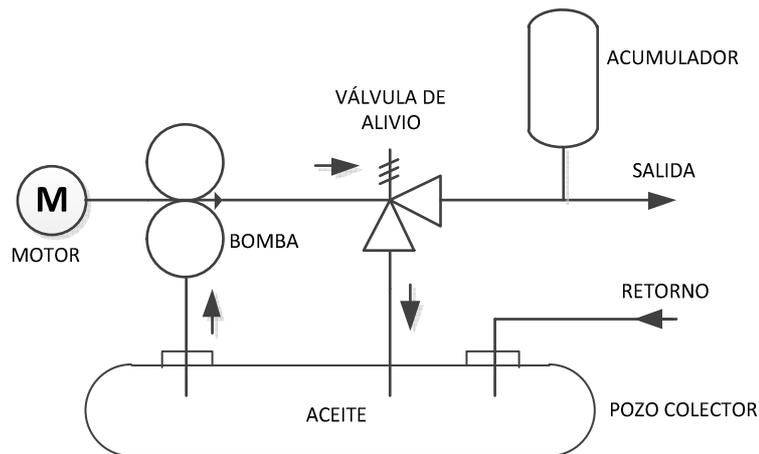


Figura 2-44. Fuente de energía hidráulica.

2.5.2.2 Sistemas de actuadores neumáticos

Con frecuencia las señales neumáticas son utilizadas para controlar elementos de actuación final, incluso cuando el sistema de control es eléctrico. Esto se debe a que con dichas señales es posible accionar válvulas de grandes dimensiones y otros dispositivos de control que requieren mucha potencia para mover cargas considerables. La principal desventaja en los sistemas neumáticos es la compresibilidad del aire. La figura 2-45 muestra un actuador neumático.



Figura 2-45. Actuador Neumático.

Fuentes de energía

En una fuente de energía neumática como se muestra en la figura 2-46, se acciona un compresor de aire con un motor eléctrico. El aire que entra al compresor se filtra y pasa por un silenciador para reducir el nivel de ruido. La válvula de alivio de presión protege contra el aumento de la presión del sistema que excede el nivel de seguridad. Dado que el compresor aumenta la temperatura del aire, es posible que sea necesario un sistema de enfriamiento.

En la mayoría de casos el aire contiene partículas de agua por el efecto de la evaporación; para eliminar estas partículas, se utiliza un filtro, un separador de agua y un dispensador de aceite, este último inyecta partículas de aceite con el fin de evitar remordimiento en los sistemas neumáticos

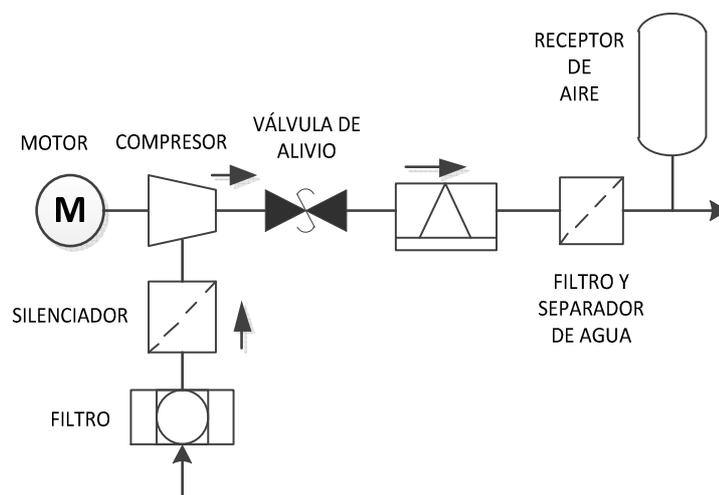


Figura 2-46. Fuente de energía neumática.

2.5.2.3 Sistemas de actuadores eléctricos

Al mencionar los sistemas eléctricos como actuadores de control deberán tenerse en cuenta los siguientes dispositivos y sistemas:

2.5.2.3.1 Dispositivos de Conmutación

Como son los interruptores mecánicos (relevadores) y los interruptores de estado sólido (diodos, tiristores y transistores), en los que la señal de control enciende o apaga un dispositivo eléctrico

2.5.2.3.2 Dispositivos tipo solenoide

En los cuales una corriente que pasa por un solenoide acciona un núcleo de hierro, por ejemplo una válvula hidráulica/neumática operada por solenoide, donde la corriente de control pasa por el solenoide que se utiliza para regular el flujo hidráulico/neumático.

2.5.2.3.3 Sistemas motrices

Dispositivos en los cuales la corriente que pasa por dicho sistema produce una rotación, por ejemplo motores de cd y de ca. La mayoría de los motores que se emplean en los sistemas de control modernos son motores de cd.

Las características de control, sencillez y precisión de los accionamientos eléctricos han hecho que sean los más usados en robots industriales, industria, aplicaciones de uso múltiple, etc.

Dentro de los actuadores eléctricos pueden distinguirse tres tipos:

➤ **Motores de corriente continua (DC)**

Controlado por voltaje de armadura

Controlados a través de la corriente de excitación

➤ **Motores de corriente alterna (AC)**

Síncronos

Asíncronos

➤ **Motores paso a paso**

2.5.2.3.4 Servomotores

En la industria se usan muchos tipos de motores de cd. Los motores de cd que se usan en los sistemas de seguimiento se denominan servomotores. Los servomotores de cd que tienen rangos de corriente muy pequeños son usados en instrumentos y equipo relacionados como computadoras, tales como unidades de disco, unidades de cinta, impresoras y procesadores de texto. Los servomotores de cd, con razones de corriente mediana y grande, se usan en sistemas robóticos, en máquinas de fresado controladas numéricamente, etc.

En los servomotores de cd, las bobinas de campo se conectan en serie con la armadura o la bobina de campo se separa de la armadura. (Es decir, el campo magnético se produce mediante un circuito independiente.) En este último caso, en el que el campo se excita en forma independiente, el flujo magnético es independiente de la corriente de la armadura.

En algunos servomotores de cd, el campo magnético se produce mediante un imán permanente y, por tanto, el flujo magnético es constante. Tales servomotores de cd se denominan servomotores de cd con imán permanente.

Los servomotores se caracterizan por su capacidad para colocarse de forma casi inmediata en cualquier posición dentro de su intervalo de operación (0° a 180°).

Se dice que el servo es un dispositivo con un eje de rendimiento controlado ya que puede ser llevado a posiciones angulares específicas al enviar una señal codificada. Con tal que exista una señal codificada en la línea de entrada, el servo mantendrá la posición angular del engranaje. Cuando la señal codificada cambia, la posición angular de los piñones cambia. La figura 2-47 muestra la vista de un servomotor ocupado como actuador.



Figura 2-47. Vista externa e interna de un servomecanismo utilizado en robótica.

2.5.2.3.4.1. Composición del servomotor

Un servomotor lleva por lo general consigo un motor DC, quien realiza la función de actuador que al aplicarse un voltaje entre sus dos terminales, el motor gira en un sentido, produciendo un bajo par y alta velocidad.

Para aumentar el par, el dispositivo utiliza un juego de piñones dentro de una caja reductora, acoplados al motor por el un extremo y a la carga por el otro; de esta manera se transforma gran parte de la velocidad de giro en torque. Para obtener una velocidad de posicionamiento lenta y un torque más alto se adapta un engranaje fuera de la caja reductora; produciendo alto torque y baja velocidad **(figura 2-48).**



Figura 2-48. Sistema de engranaje acoplado al servomotor para aumentar el torque.

Todos los servos tienen tres cables principales, el primero que proporciona la alimentación, usualmente de 4 a 8 voltios, el segundo cable para la conexión a tierra y el tercero que lleva la señal de control de posicionamiento, esta señal le dice al servo a través de pulsos en qué posición debe ubicarse; valor de ángulo que varía entre 0° y 180°.

El color del cable de cada terminal varía con cada fabricante, aunque el cable del terminal positivo de alimentación siempre es rojo. El cable del terminal de alimentación negativo puede ser marrón o negro, y el del terminal de entrada de señal suele ser de color blanco, naranja o amarillo.

La tabla 2-9 muestra el color de cable de acuerdo a cada fabricante.

Fabricante	Voltaje positivo	Tierra	Señal de control
Futaba	Rojo	Negro	Blanco
Dong Yang	Rojo	Marrón	Naranja
Hobico	Rojo	Negro	Amarillo
Hitec	Rojo	Negro	Amarillo
JR	Rojo	Marrón	Naranja
Airtronics	Rojo	Negro	Naranja
Fleet	Rojo	Negro	Blanco
Krafr	Rojo	Negro	Naranja
E-Sky	Rojo	Negro	Blanco

Tabla 2-9. Diferentes tipos de color de cables para diferentes servos.

2.5.2.3.4.2. Control de posición

Los servomotores utilizan un circuito de control interno, el cual permite ubicar al eje en una posición angular específica. Éste control es de tipo proporcional.

En la figura 2-49 se visualiza el diagrama de bloques del control de posición del servo.

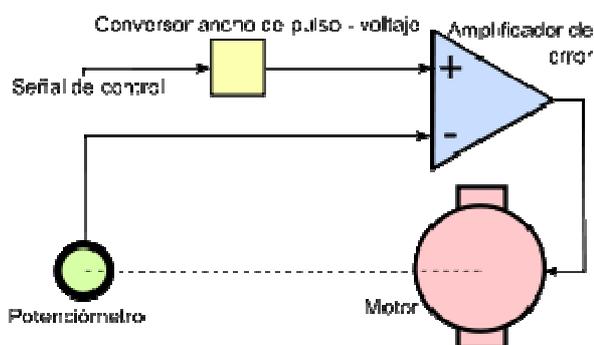


Figura 2-49. Control proporcional interno de un servomotor.

El set-point se ingresa mediante una señal de control cuadrada, donde el ancho que dura el pulso es proporcional al ángulo de giro que se desea.

La señal PWM (Modulación de ancho de pulso) que sirve para el control del motor, se convierte en una señal que será comparada con la del potenciómetro que es la señal de realimentación que indica el valor actual de posición y mediante éstas dos señales, se obtiene la señal de error.

El valor del error de posición, es la diferencia entre la referencia y la posición en que se encuentra el motor. Un error de posición mayor significa que hay una diferencia mayor entre el valor deseado y el existente, de modo que el motor deberá rotar más rápido para alcanzarlo; uno menor, significa que la posición del motor está cerca de la deseada por el usuario, así que el motor tendrá que rotar más lentamente. Si el servo se encuentra en la posición deseada, el error será cero, y no habrá movimiento.

Para que el amplificador de error pueda calcular el error de posición, debe restar dos valores de voltaje analógicos. La señal de control PWM se convierte entonces en un valor analógico de voltaje, mediante un convertidor de ancho de pulso a voltaje. El valor de la posición del motor se obtiene usando un potenciómetro de realimentación acoplado mecánicamente a la caja reductora del eje del motor, cuando el motor rote, el potenciómetro también lo hará, variando el voltaje que se introduce al amplificador de error.

Una vez que se ha obtenido el error de posición, éste se amplifica con una ganancia, y posteriormente se aplica a los terminales del motor.

2.5.2.3.4.3. Utilización de un servomotor

Dependiendo del modelo o marca del servomotor, la tensión de alimentación puede estar comprendida entre 4 y 8 voltios.

El ángulo para la ubicación angular del servo, depende del tiempo en alto de la señal, cuyos rangos de operación van a depender de cada servo, ya sea por marca o como esté ensamblado internamente. Por lo que es necesario antes de

su utilización, calibrar el rango de valores para obtener un movimiento de 0° a 180° .

Para algunos servos los valores de tiempo de la señal en alto varían entre 1 y 2 ms, que posicionan al motor en sus extremos de giro (0° y 180° ; respectivamente). Los valores de tiempo de alto para ubicar el motor en otras posiciones se halla mediante una relación completamente lineal: el valor 1,5 ms indica la posición central, y otros valores de duración del pulso dejarían al motor en la posición proporcional a dicha duración.

En la figura 2-50 se muestra el valor de posición angular respecto a la señal de control.

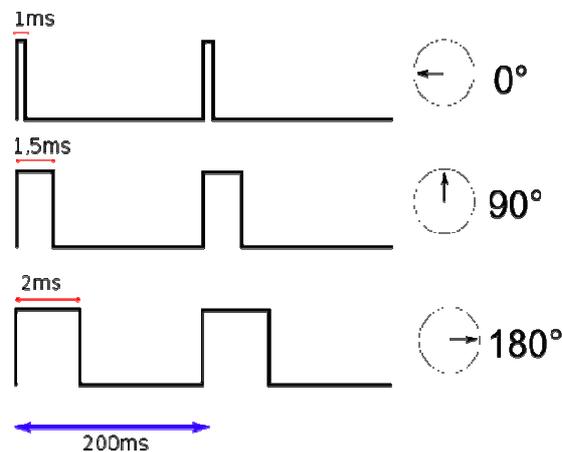


Figura 2-50. Posición del servomotor respecto de la señal de control.

La tabla 2-10 muestra el tiempo en milisegundo que posicionan al motor en sus extremos de giro (0° y 180° ; respectivamente).

Ancho de pulso (msg)				
Fabricante	min.	neutral.	máx.	Hz
Futaba	0.9	1.5	2.1	50
Hitech	0.9	1.5	2.1	50
Graupner/Jr	0.8	1.5	2.2	50
Multiplex	1.05	1.6	2.15	40
Robbe	0.65	1.3	1.95	50
Simprop	1.2	1.7	2.2	50

Tabla 2-10. Diferentes tiempos de control para el posicionamiento de algunos servos.

La duración del pulso alto para conseguir un ángulo de posición θ estará dada por la fórmula:

$$t = 1 + \frac{\theta}{180}$$

Donde t está dado en milisegundos y θ en grados. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que ningún valor de ángulo o de duración de pulso puede estar fuera del rango de operación del dispositivo.

En efecto, el servomotor tiene un límite de giro de modo que no puede girar más de cierto ángulo en un mismo sentido debido a la limitación física que impone el potenciómetro del control de posición. Si los valores del pulso están fuera del rango, el servomotor tiene un tope mecánico que obliga a que sus piñones no sigan girando más de 180° y menos de 0° . Si estos valores están presentes por periodos prolongados, el motor puede quemarse o sus piñones pueden destruirse.

Para lograr mantener al servo en una posición específica, es necesario mantener la misma relación de trabajo de la señal PWM, de esta manera mantener así el control continuamente, sin importar que el eje esté sometido a torques externos, éste mantendrá la posición indicada hasta los límites de su torque; lo que no sucede cuando se lo desconecta de la alimentación o del control, ya que cualquier torque externo podrá mover el eje.

2.5.2.3.4.4. Velocidad y torque en los servos

Muy aparte de la parte física (tamaño), los servos se diferencian también por su velocidad y torque. La velocidad esta medida por el tiempo que toma a un servomotor en rotar unos grados en un momento determinado. Estos grados se han estandarizado para mayor facilidad en la medición a un valor de 60 grados; es decir cuánto demora un servo en rotar 60 grados en un momento determinado.

Por ejemplo: Un servo a 0.12 sec/60°, significa que le tomara 0.12 segundos en rotar su brazo 60 grados. Esto es el doble de un servo estándar que está en el rango de 0.24 sec/60°.

En otra instancia el torque determina la cantidad máxima de fuerza que un servo puede otorgar en un momento determinado. Esto se mide en onzas por pulgada (oz-in), o en kilogramos por centímetro (kg-cm). Es importante tener en cuenta que tanto la velocidad como la fuerza dependen de la alimentación que se aplique al servomotor.

2.5.2.3.4.5. Servos digitales

Los servos digitales son similares a los servos convencionales (analógicos); la diferencia es la señal de control y como es procesada.

Un microcontrolador dentro del servo analiza y procesa la señal recibida, le convierte en un pulso de voltaje de alta frecuencia que es enviada al motor. La señal de alta frecuencia alrededor de 300 pulsos, distinta a la señal tradicional del servo análogo que es de 50 pulsos.

Al existir mayor cantidad de pulsos por segundo, el motor tendrá más fuerza, su movimiento es rápido y tiene mejor poder de sujeción en una posición dada.

Un inconveniente en este tipo de servomecanismos es su alto consumo de energía; lo que dificulta utilizarlos en sistemas en los cuales su alimentación depende de baterías ya que se agotarían muy rápido, o en aplicaciones que requieran el máximo ahorro de energía posible.

2.6 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE MOVIMIENTO

2.6.1 ESTRUCTURA MECÁNICA DEL SISTEMA FIJO

Para lograr el movimiento de la antena ubicada en tierra se dispone de una estructura que permita obtener dos grados de libertad y soportar a la antena con sus respectivos componentes.

La estructura debe ser de un material liviano pero a la vez resistente a los cambios físicos como intemperie, variación de temperatura, etc. Se ha escogido el aluminio por ser un material que posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería mecánica, tales como su baja densidad su alta resistencia a la corrosión y se mecaniza con facilidad.

A partir de estas características se diseñó la estructura utilizando un software de diseño mecánico CAD como es Solid Works, para crear un prototipo virtual, antes de proceder a su construcción lo cual da la oportunidad de solucionar posibles contrariedades volviendo al diseño, en lugar de tener problemas con el sistema ya construido.

2.6.1.1 Solid Works

Este software de diseño CAD, como se mencionó anteriormente, permite realizar modelos virtuales de sistemas mecánicos, para ello cuenta con herramientas de diseño en dos y tres dimensiones. Adicionalmente, es posible realizar diferentes operaciones de conformado mecánico como son: Extrusión, Corte, Redondeos, Chaflanes, Sólidos de Revolución, Vaciado, etc.

Una vez dibujado el croquis en el espacio de trabajo de SOLID WORKS, se puede realizar cualquiera de estas operaciones, teniendo en cuenta que el croquis dibujado debe ser cerrado, y congruente con el tipo de operación a realizar, también se puede generar una matriz principal de la estructura a partir de un sistema de trazos básicos como se visualiza en la figura 2-51.

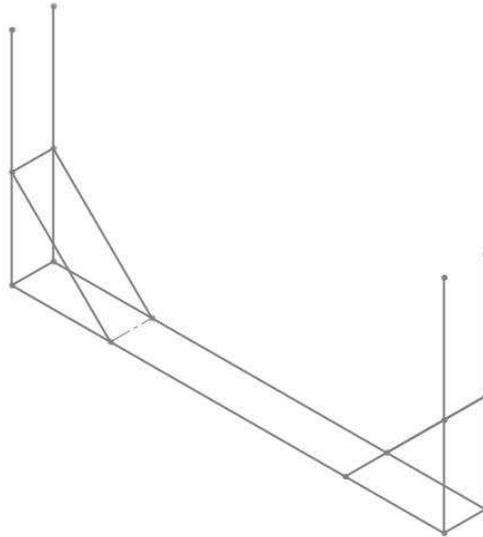


Figura 2-51. Trazos básicos en Solid Works para la construcción de la estructura.

En cada una de las piezas que se diseñen, se puede escoger el material del cual estarán formadas, color, textura para brindar a la simulación más herramientas que la acerquen a la realidad (**figura 2-52**).

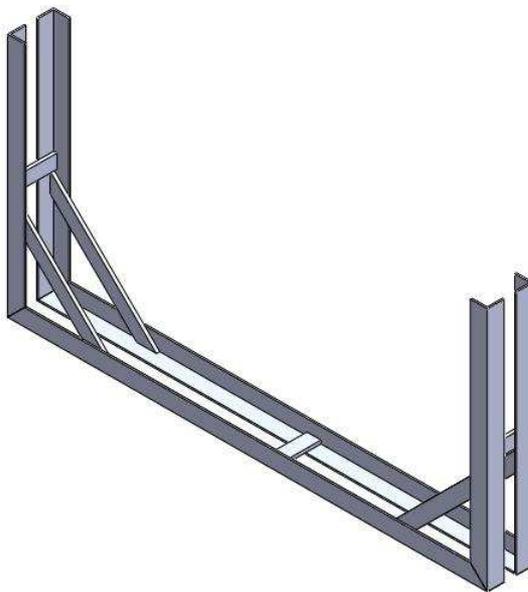


Figura 2-52. Soporte para la antena con un material adecuado.

Las piezas generadas, posteriormente pueden agruparse y formar parte de un ensamble que represente finalmente una estructura más elaborada (**figura 2-53**).

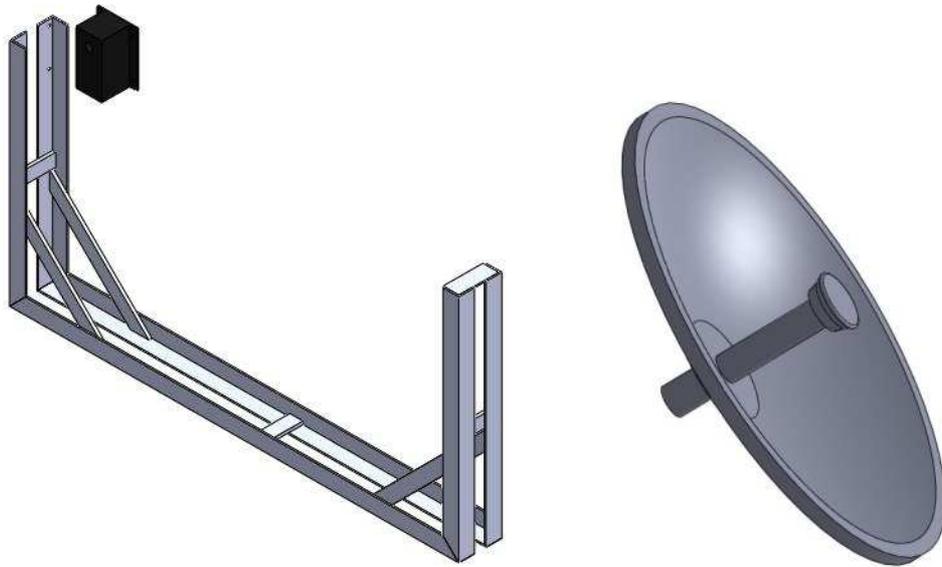


Figura 2-53. Varios elementos que forman parte de la estructura.

Para formar un ensamble se debe colocar relaciones de posición entre las piezas que forman el ensamble; por ejemplo, relaciones de perpendicularidad, paralelismo, tangencia, concéntricas, etc. Mediante la correcta aplicación de relaciones de posición entre las diferentes piezas que forman el ensamble se puede llegar a una estructura final que tenga las propiedades adecuadas.

En la figura 2-54 se visualiza el ensamble total que conforma la estructura fija, la antena y sus respectivos actuadores que permitan generar los movimientos respectivos a la antena. Cada uno de los movimientos independientes que puede realizar cada actuador respecto del anterior, se denomina **grado de libertad** (GDL). Con los grados de libertad obtenidos podemos generar 2 movimientos tanto en la parte horizontal conocido como azimut y la parte vertical conocida como inclinación.

En el movimiento de azimut puede alcanzar un posicionamiento de 0° a 180° , mientras que en el movimiento de inclinación puede gobernar de 0° a 90° , movimientos suficientes para direccionar la antena a cualquier posición que se encuentre el sistema móvil.

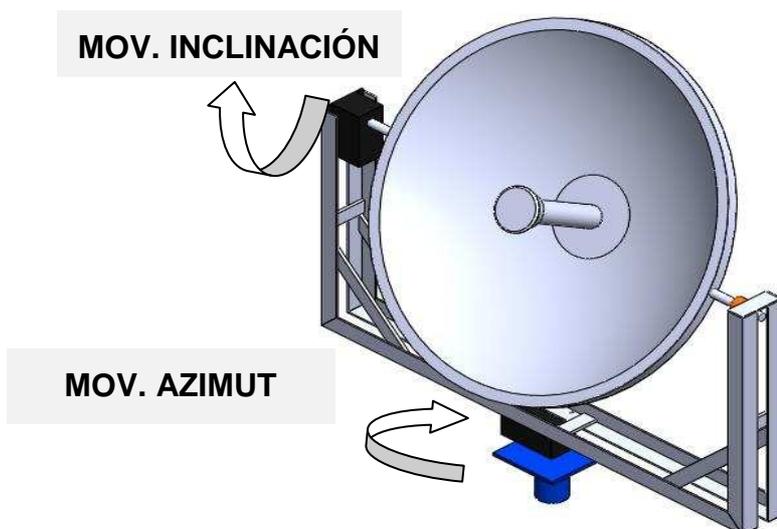


Figura 2-54. Estructura fija con sus dos grados de libertad.

2.6.2 ESTRUCTURA MECÁNICA DEL SISTEMA MÓVIL.

De la misma manera que en la estructura fija se utilizó el software Solid Works para el diseño y simulación de la misma; este sistema presenta las mismas características y medidas que el fijo con la particularidad que la antena forma un ángulo de depresión respecto a la horizontal, es decir que el movimiento de la antena será de declinación por encontrarse debajo de la estructura como se puede observar en la figura 2-55.

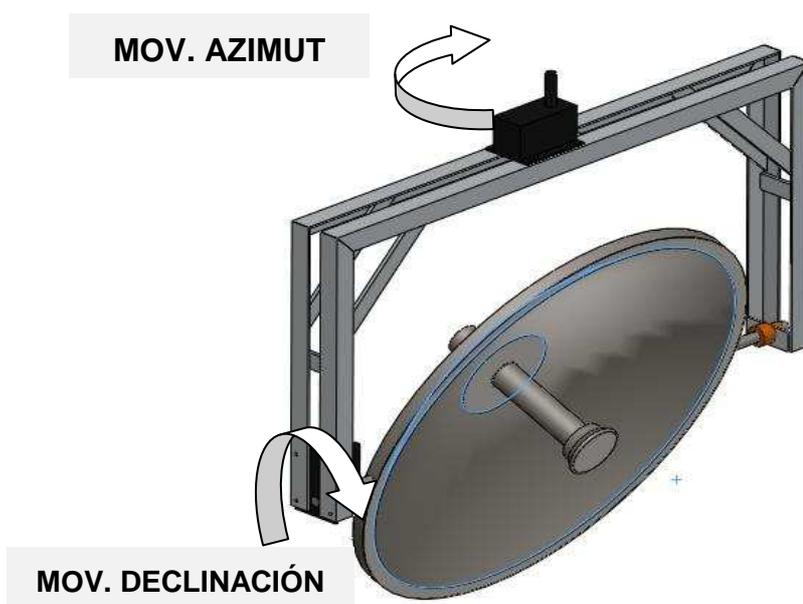


Figura 2-55. Estructura móvil con sus dos grados de libertad.

De esta manera se tendrá ángulos de 0° a 180° para el azimut y de 0 a -90° para el movimiento de declinación. Los planos de los dos sistemas diseñados se presentan en el **Anexo B.1 y B.2**, indicando las dimensiones de cada una de las piezas que integran el sistema.

El material utilizado para la construcción es ángulo de aluminio $1\frac{1}{4}$ con espesor 2.5mm, platina de aluminio 1" con espesor 6mm, pernos en acero inoxidable M4, soportes para las estructuras tipo trípode de aluminio color negro 35mm de diámetro.

A partir de estas características se construyó la estructura de manera que soporte a una antena tipo parábola doble polarización modelo HG5158DP-29D cuyas características se presentan en el **Anexo B.3**.

El peso de la estructura fija y móvil es de 3kg respectivamente, sin considerar el peso de los servomotores y accesorios. Para el cálculo de Torque en los servomecanismos se considerará el peso total, incluida la antena.

2.6.3 SELECCIÓN DE LOS SERVOMOTORES COMO ACTUADORES

Para la selección del servomotor, se ha utilizado una herramienta del software SolidWorks, como es SolidWorks Motion, ubicada en la opción de la barra de herramientas/ Complementos (**figura 2-56**).

Dicha herramienta permite calcular algunas variables, tales como análisis de esfuerzos, torque, presión, posición, velocidad, etc. Considerando que cada uno de estos resultados dependen de variables externas que son tomadas en consideración.

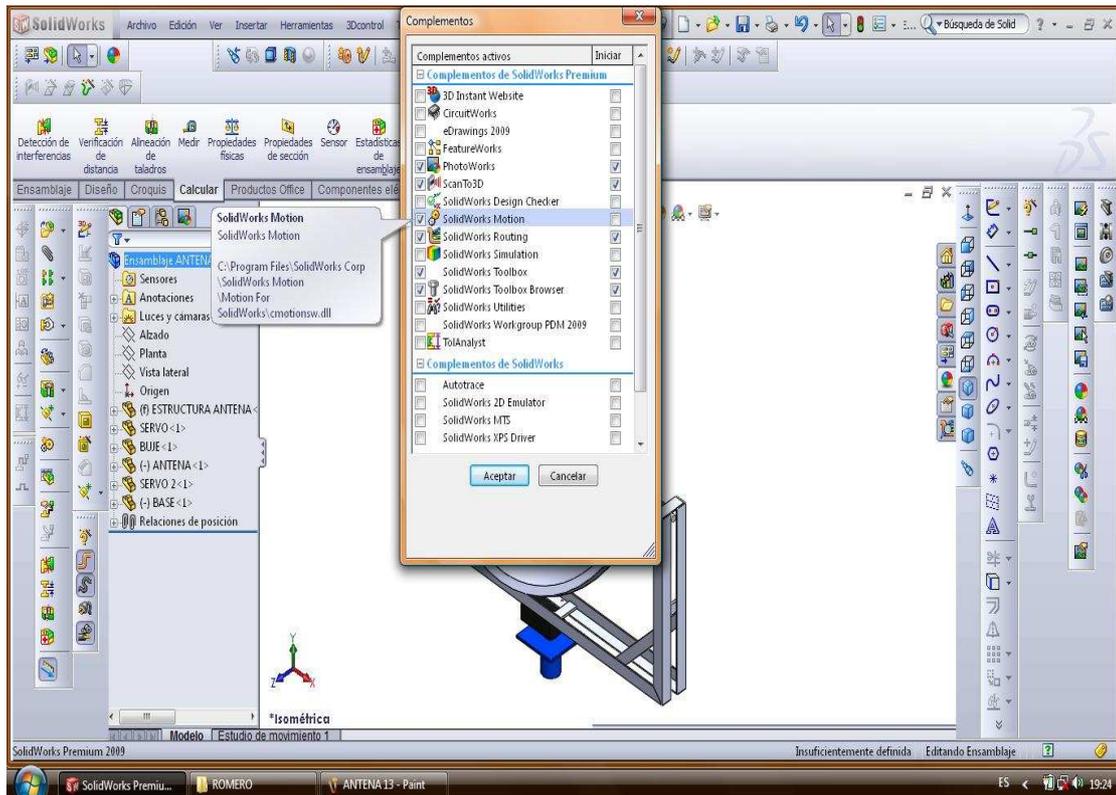


Figura 2-56. Herramienta Solid Works Motion para el cálculo del torque.

El cálculo del torque, puede realizarse en una pieza o en un ensamble total; cabe anotar que la explicación es relacionada con SolidWorks 2009.

Se escoge el ensamble que es la estructura con la antena y seleccionamos para realizar el análisis en la ventana de propiedades físicas, para obtener el peso. El peso total de la estructura es una de las condiciones necesarias para obtener el cálculo del torque en cada uno de los actuadores.

Esta variable depende del material a utilizar, y de las piezas que se estén ensamblando el sistema (**figura 2-57**).

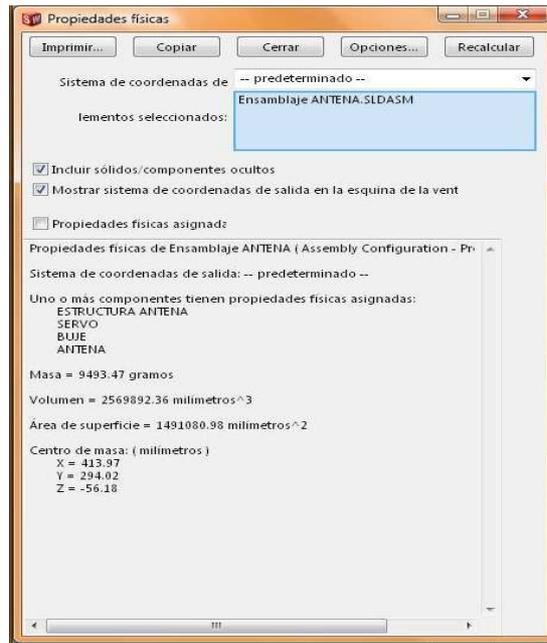


Figura 2-57. Ventana de Propiedades físicas de los elementos a ensamblar.

Una vez calculado el peso el siguiente paso a seguir es dar un punto de referencia motriz, para escoger el eje rotacional; en otras palabras donde vamos a realizar el movimiento, se escoge el eje de la antena acoplada en la estructura (figura 2-58).

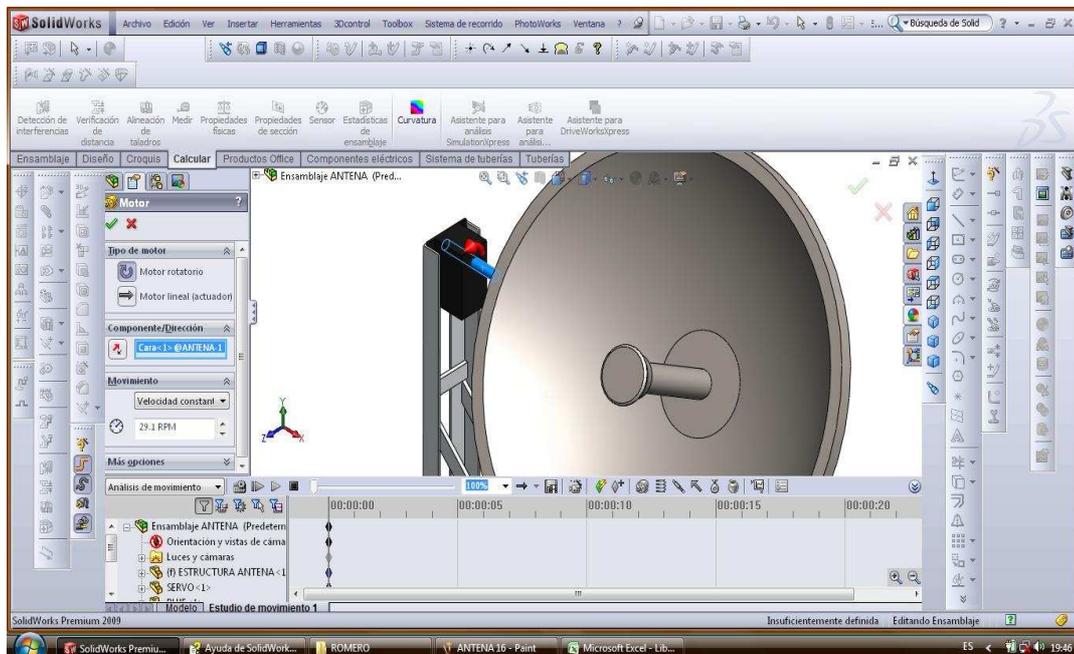


Figura 2-58. Ventana para seleccionar el eje rotacional.

Algo que hay que tomar en cuenta es dar una referencia a la aceleración de la gravedad, ya que esta fuerza interviene en el movimiento de la antena (**figura 2-59**).

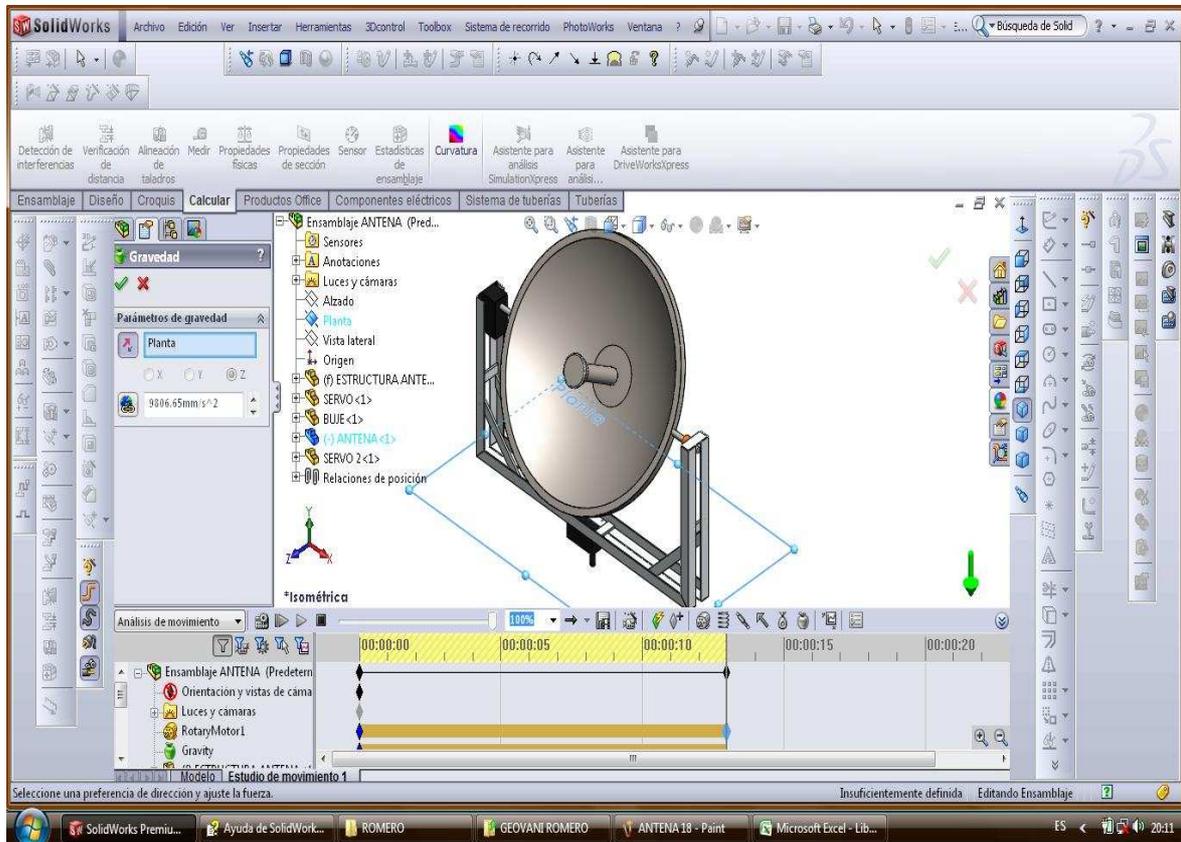


Figura 2-59. Selección de la gravedad en la barra de herramientas

Con estas condiciones se procede a realizar la simulación, y obtener los resultados dando un click sobre el icono de resultados y se escoge Fuerzas/Torsión Aplicada/Magnitud, y de esta manera se obtiene la gráfica de Momento en función del tiempo.

La figura 2-60 indica la gráfica de torque en función del tiempo para la estructura del sistema de apuntamiento fijo y móvil en su movimiento de inclinación, mientras que la figura 2-61 indica la gráfica de torque en función del tiempo para el sistema de apuntamiento fijo y móvil en su movimiento azimut.

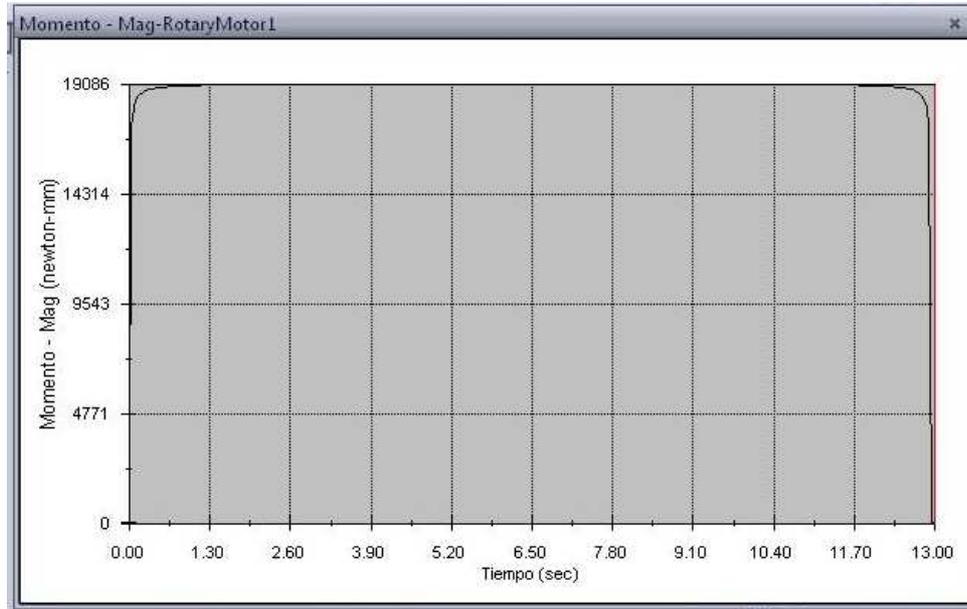


Figura 2-60. Momento en función del tiempo para movimiento de inclinación

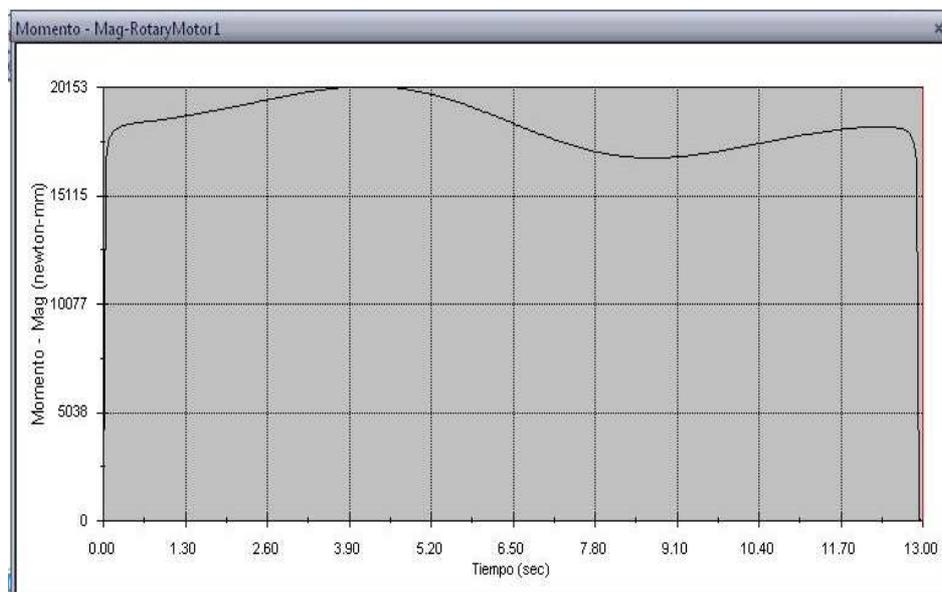


Figura 2-61. Momento en función del tiempo para el movimiento azimutal.

Estas curvas están expresadas en Newton*mm; mientras que el tipo de servomotores a usarse, se dimensionan en base al torque expresado en kg.cm, por lo que es necesaria una conversión de unidades.

Para el dimensionamiento de actuadores, se toma el valor pico de la curva de torque mostrada.

Para el caso de la gráfica de la figura 2-60 tenemos:

$$19086 \text{ N. mm} \frac{1\text{Kg}}{9,8\text{N}} * \frac{1\text{cm}}{10\text{mm}}$$

$$T = 194.75 \text{ Kg. cm}$$

En la gráfica de la figura 2-61 su torque es:

$$20143 \text{ N. mm} \frac{1\text{Kg}}{9,8\text{N}} * \frac{1\text{cm}}{10\text{mm}}$$

$$T = 205.54 \text{ Kg. cm}$$

Luego del análisis y la respectiva conversión de unidades (1N.mm=0,0102kg.cm), se procede a la selección de los actuadores. En la Tabla 2.11 se muestra el requerimiento de torque para cada actuador, y su correspondiente servomotor escogido.

ACTUADOR	TORQUE REQUERIDO	SERVOMOTOR ESCOGIDO	TORQUE SERVOMOTOR
ESTACIÓN FIJA MOV. AZIMUT	205,54	HS-7955TG (13.5:1 ratio)	243 Kg.cm
ESTACIÓN FIJA MOV. ELEVACIÓN	194,75	HS-7955TG (13.5:1 ratio)	244 Kg.cm
ESTACIÓN MOV. AZIMUT	205,54	HS-7955TG (13.5:1 ratio)	245 Kg.cm
ESTACIÓN FIJA MOV. DECLINACIÓN	194,75	HS-7955TG (13.5:1 ratio)	246 Kg.cm

Tabla 2-11. Selección del servomotor para los distintos sistemas de movimiento.

De esta manera se ha escogido el servomotor digital de la empresa HITEC (figura 2-62) cuyas características técnicas se ven en el **Anexo B.4.**



Figura 2-62. Servomotor HITEC HS-7955TG ocupado en el sistema de apuntamiento.

2.6.4 MODIFICACIÓN DE SERVO DIGITAL A ANALÓGICO

Por tratarse de un servo digital de alto torque el que se ocupa; su consumo de energía es de aproximadamente tres veces mayor al de un servo análogo según las pruebas realizadas. Para el sistema de apuntamiento resultaría muy crítico utilizar servos digitales porque la alimentación depende de un banco de baterías de polímero, y a la vez se trata de optimizar al máximo el consumo de energía.

Por esta razón se realizó un cambio en la tarjeta de control de este servomecanismo, aprovechando la parte física como es el motor, engranajes, y se adaptó una tarjeta de control de un servo análogo, logrando obtener resultados óptimos con lo que refiere al ahorro de energía y obteniendo de esta manera el mismo torque.

2.7 GRADOS DE LIBERTAD DE MOVIMIENTO

Al desplazarse la nave por su trayectoria se enfrentaría con posibles movimientos que ocasionarían la ruptura del enlace entre las dos estaciones, los que se pueden ver en la figura 2-63.



Figura 2-63. Grados de libertad de movimiento que podría presentar la PGA.

Algunas de las posiciones que podría tener la PGA respecto del apuntamiento de la antena de tierra, los podemos ver en la **figura 2-64**.

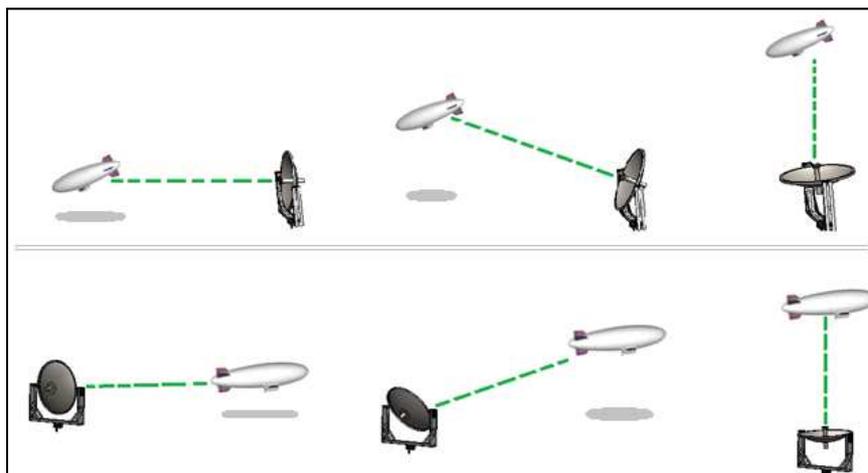


Figura 2-64. Algunas de las posiciones que podría tener la PGA respecto del apuntamiento de las antenas de tierra.

Por lo anterior, los grados de libertad de movimiento a ser compensados en este trabajo son:

- Traslación de la nave:
 - a) variaciones de latitud y longitud de la nave,
 - b) variaciones de altura de la nave
- Rotación de la nave.

Esto se lo puede ver en la **figura 2-65**:

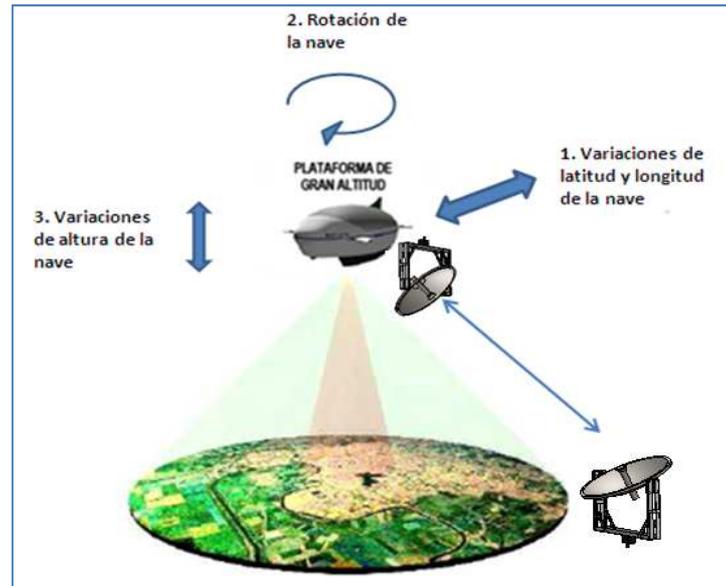


Figura 2-65. Grados de libertad de movimiento a ser compensados en este trabajo: 1) Variaciones de latitud y longitud de la nave, 2) Variaciones de altura de la nave y 3) Rotación de la nave.

En la sección siguiente, se detalla la manera cómo han sido compensados los anteriores grados de libertad de movimiento.

En cada uno de los sistemas de posicionamiento, tanto para la parte fija y móvil, se utilizan dos microcontroladores, un Atmega 164P y un Atmega 8, los que se encargan de recibir las señales, las procesan y realizan el control sobre los motores que proporcionan los dos grados de libertad, donde cada uno cumple con una tarea específica:

2.7.1 ALGORITMOS DE COMPENSACIÓN DE LAS VARIABLES DE LATITUD Y LONGITUD DE LA NAVE

Tanto el sistema de la terminal fija como de la móvil, poseen su propio sistema GPS que entregan la posición geográfica de los dos puntos, respectivamente.

Cada coordenada geográfica es recibida por el microcontrolador principal y transformada del formato de grados y minutos, a grados solamente, tanto para la longitud como para latitud. Esto con el propósito de poder emplear en los

algoritmos un factor de transformación entre grados y Km de modo que se puedan calcular los giros de las antenas.

Latitud:

Es la distancia angular que existe entre un punto cualquiera y el ecuador, medida sobre el meridiano que pasa por dicho punto. Se expresa en grados sexagesimales y es medido de 0 a 90 ° con su respectiva orientación Norte o Sur.

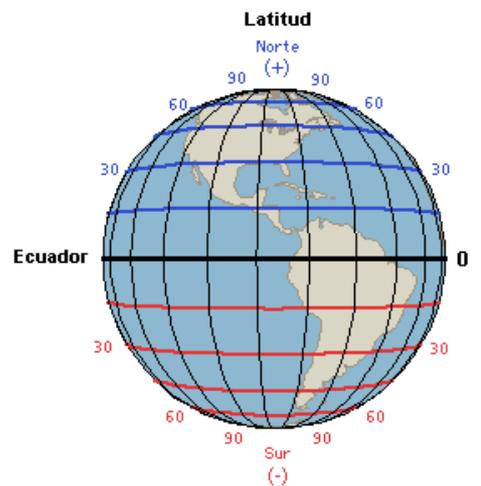


Figura 2-66. Variación de Latitud.

El GPS entrega dicha latitud en una de sus tramas, en grados y minutos, y por lo ya mencionado anteriormente, dichos valores son transformados a grados solamente.

$$\begin{aligned} \text{Grados Latitud}_{\text{Grad-Min}} &= \text{Grados}^{\circ} \text{ Minutos}' \\ \text{Grados Latitud}_{\text{Grad-Min}} &= gg^{\circ} mm.mmmm' \\ \text{Grados Latitud}_{\text{Grados}} &= \text{Grados} + \text{Minutos}/60 \end{aligned}$$

Longitud:

Es la distancia que existe entre un punto cualquiera y el Meridiano de Greenwich, medida sobre el paralelo que pasa por dicho punto. Existen varias maneras de medirlo: entre 0 y 360 °, aumentando hacia el Este del meridiano 0°, entre 0° y 180° indicando a qué hemisferio (Occidental o W -del inglés West nombre en inglés del punto cardinal Oeste- y Oriental o E -punto cardinal Este-) y entre 0° y 180° positivos -Este- o negativos -Oeste

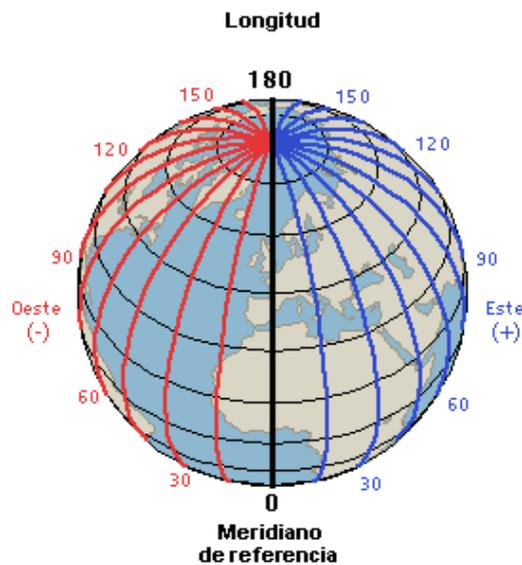


Figura 2-67. Variación de Longitud.

De la misma forma el GPS entrega el valor de la longitud en grados y minutos, y por lo ya mencionado anteriormente, dichos valores son transformados a grados:

$$\begin{aligned} \text{Grados Longitud}_{\text{Grad-Min}} &= \text{Grados}^{\circ} \text{ Minutos}' \\ \text{Grados longitud}_{\text{Grad-Min}} &= \text{ggg}^{\circ} \text{ mm.mmmm}' \\ \text{Grados Longitud}_{\text{Grados}} &= \text{Grados} + \text{Minutos}/60 \end{aligned}$$

2.7.1.1 Ubicación de un punto sobre la superficie terrestre

Al tener los dos datos anteriores (latitud y longitud), se crea una coordenada cartesiana sobre el plano terrestre (**figura 2-68**). Al tener dos puntos cartesianos, uno correspondiente a la estación terrena (fija) y el otro correspondiente a la nave (estación móvil), para compensar el movimiento de traslación de dicha nave y mantener apuntadas las antenas, se realiza un cálculo trigonométrico, encontrando la variación del ángulo conforme varíe la posición de la nave.



Figura 2-68. Ubicación en plano cartesiano de las dos coordenadas.

2.7.1.2 Cálculo de Azimut en terminal Fija.

Al tener los dos puntos de coordenadas y el plano cartesiano imaginario, se crea un centro o punto inicial (0,0) igual a (Longitud_tierra; Latitud_tierra) obteniendo la variación de azimut de 0 a 360 conforme la estación móvil realice los cambios en su posición (Longitud_globo; Latitud_globo), desplazándose sobre los cuatro cuadrantes del plano cartesiano (**figura 2-69**).

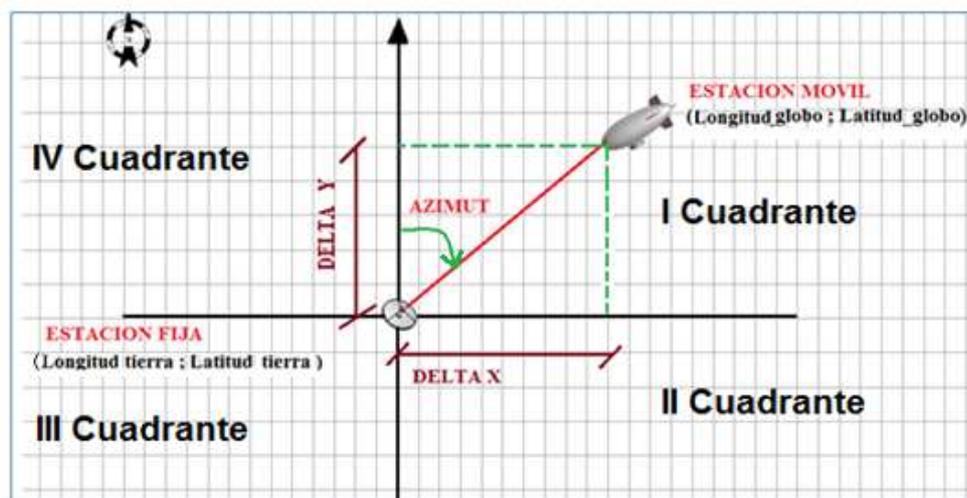


Figura 2-69. Variación de coordenada GPS de la nave (Estación Móvil) respecto a la Estación Fija.

I Cuadrante:

Si Grad_longitud_tierra > Grad_longitud_globo Y

Si Grad_latitud_tierra > Grad_latitud_globo, **entonces**

$$\text{DELTA X} = \text{Grad_longitud_tierra} - \text{Grad_longitud_globo}$$

$$\text{DELTA Y} = \text{Grad_latitud_tierra} - \text{Grad_latitud_globo}$$

$$\text{Azimut} = \arctan(\text{DELTA X} / \text{DELTA Y})$$

II Cuadrante:

Si Grad_longitud_tierra > Grad_longitud_globo Y

Si Grad_latitud_tierra < Grad_latitud_globo, **entonces**

$$\text{DELTA X} = \text{Grad_longitud_tierra} - \text{Grad_longitud_globo}$$

$$\text{DELTA Y} = \text{Grad_latitud_globo} - \text{Grad_latitud_tierra}$$

$$\text{Azimut} = 90 + \arctan(\text{DELTA Y} / \text{DELTA X})$$

III Cuadrante:

Si Grad_longitud_tierra < Grad_longitud_globo Y

Si Grad_latitud_tierra < Grad_latitud_globo, **entonces**

$$\text{DELTA X} = \text{Grad_longitud_globo} - \text{Grad_longitud_tierra}$$

$$\text{DELTA Y} = \text{Grad_latitud_globo} - \text{Grad_latitud_tierra}$$

$$\text{Azimut} = 180 + \arctan(\text{DELTA X} / \text{DELTA Y})$$

IV Cuadrante:

Si Grad_longitud_tierra < Grad_longitud_globo Y

Si Grad_latitud_tierra > Grad_latitud_globo, **entonces**

$$\text{DELTA X} = \text{Grad_longitud_globo} - \text{Grad_longitud_tierra}$$

$$\text{DELTA Y} = \text{Grad_latitud_tierra} - \text{Grad_latitud_globo}$$

$$\text{Azimut} = 270 + \arctan(\text{DELTA Y} / \text{DELTA X})$$

Al tener el punto de la estación fija y la variación de posición de la estación móvil se crea un incremento del Angulo azimuth, conforme el globo se desplace por el contorno de la estación de tierra **(figura 2-70)**.

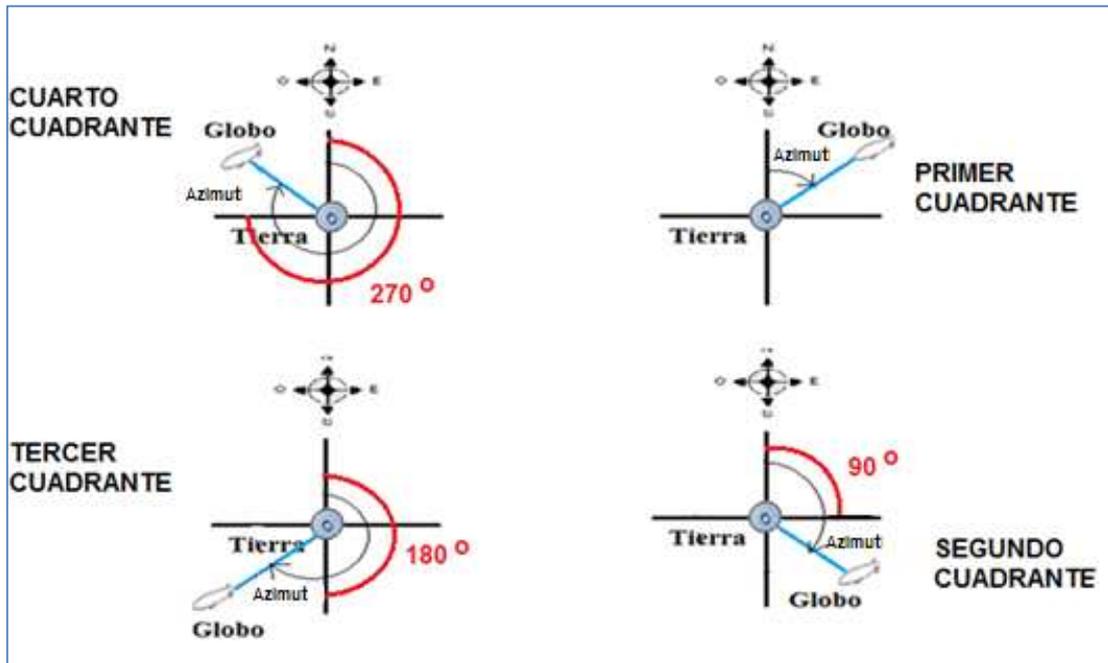


Figura 2-70. Incremento del ángulo Azimut en estación Fija, conforme a cambio de posición de Estación Móvil.

A continuación se indica el diagrama de flujo para el cálculo de Azimut en la estación Fija **(figura 2-71)**.

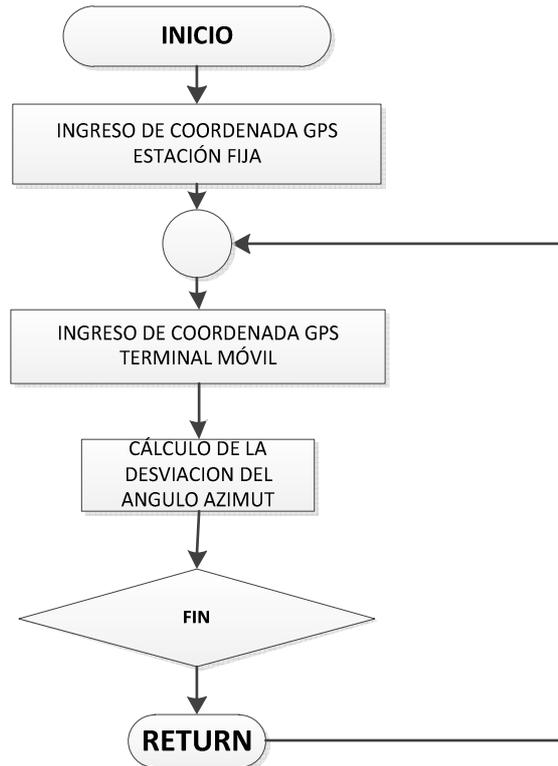


Figura 2-71. Diagrama de flujo del cálculo de azimut de la estación fija.

A continuación se realiza una breve descripción en lenguaje estructurado de las tareas.

Ingreso de coordenadas GPS Estación Fija.

Abrir primer puerto serial.
Almacenar la coordenada de GPS Estación Fija.

Ingreso de coordenadas GPS Estación Móvil.

Abrir segundo puerto serial.
Almacenar la coordenada de GPS Estación Móvil.

Calculo de la desviación del ángulo azimut.

Comparación de los datos de latitud y longitud de las dos estaciones.
Transformación de coordenadas de grados a radianes.
Cálculo trigonométrico de ángulo azimut.
Visualización en LCD.

Fin

Return

2.7.1.3 Cálculo de Azimut en terminal Móvil.

De la misma forma se tiene un nuevo eje imaginario que estará sobre la estación móvil, creándose un centro o punto inicial (0,0) igual a (Longitud_globo; Latitud_globo) y la variación de azimut de la antena de estación móvil de 0 a 360 grados al trasladarse por el contorno de la estación fija (**figura 2-72**).

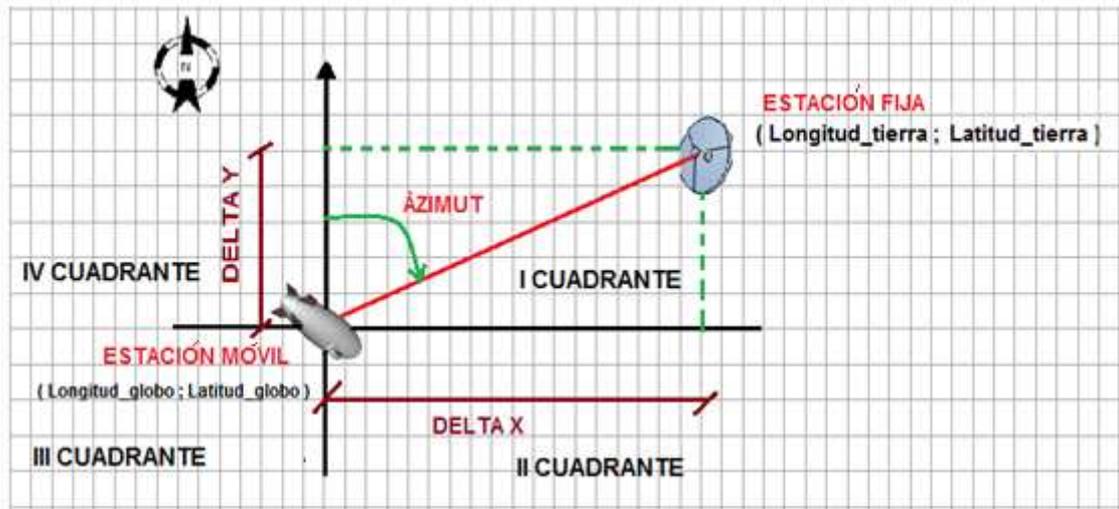


Figura 2-72. Variación de coordenada GPS de la nave (Estación Móvil) respecto a la Estación Fija.

I Cuadrante:

Si Grad_longitud_tierra < Grad_longitud_glob Y
Si Grad_latitud_tierra < Grad_latitud_glob, **entonces**

$$\text{DELTA X} = \text{Grad_longitud_globo} - \text{Grad_longitud_tierra}$$

$$\text{DELTA Y} = \text{Grad_latitud_globo} - \text{Grad_latitud_tierra}$$

$$\text{Azimut} = \arctan(\text{DELTA X} / \text{DELTA Y})$$

II Cuadrante:

Si Grad_longitud_tierra < Grad_longitud_glob Y
Si Grad_latitud_tierra > Grad_latitud_glob, **entonces**

$$\text{DELTA X} = \text{Grad_longitud_globo} - \text{Grad_longitud_tierra}$$

$$\text{DELTA Y} = \text{Grad_latitud_tierra} - \text{Grad_latitud_globo}$$

$$\text{Azimut} = 90 + \arctan(\text{DELTA Y} / \text{DELTA X})$$

III Cuadrante:

Si $\text{Grad_longitud_tierra} > \text{Grad_longitud_globo}$

Si $\text{Grad_latitud_tierra} > \text{Grad_latitud_globo}$, **entonces**

$$\text{DELTA X} = \text{Grad_longitud_tierra} - \text{Grad_longitud_globo}$$

$$\text{DELTA Y} = \text{Grad_latitud_tierra} - \text{Grad_latitud_globo}$$

$$\text{Azimut} = 180 + \arctan(\text{DELTA X} / \text{DELTA Y})$$

IV Cuadrante:

Si $\text{Grad_longitud_tierra} > \text{Grad_longitud_globo}$

Si $\text{Grad_latitud_tierra} < \text{Grad_latitud_globo}$, **entonces**

$$\text{DELTA X} = \text{Grad_longitud_tierra} - \text{Grad_longitud_globo}$$

$$\text{DELTA Y} = \text{Grad_latitud_globo} - \text{Grad_latitud_tierra}$$

$$\text{Azimut} = 270 + \arctan(\text{DELTA Y} / \text{DELTA X})$$

Al tener el punto de la estación fija y la variación de posición de la estación móvil se crea un incremento del ángulo azimut en la estación móvil, conforme la estación móvil desplace por el contorno de la estación de tierra (**figura 2-73**).

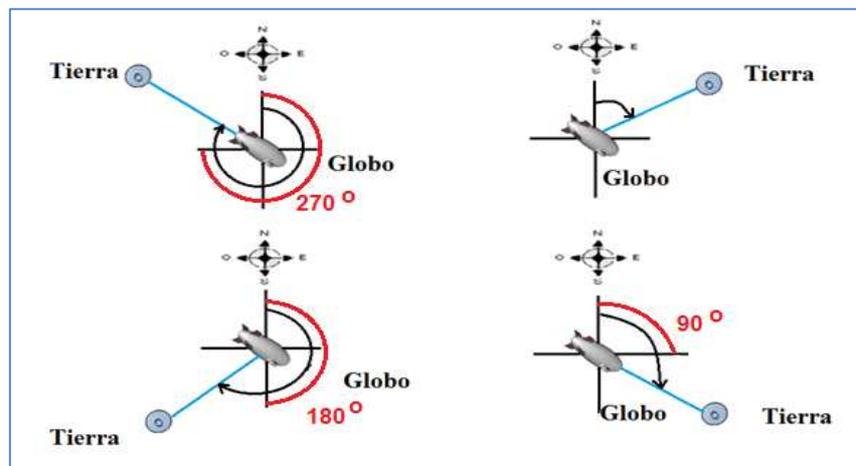


Figura 2-73. Incremento del ángulo Azimut en estación Móvil.

2.7.2 ALGORITMO DE COMPENSACIÓN DEL MOVIMIENTO DE ROTACIÓN DE LA NAVE EN LA ESTACIÓN MÓVIL

Además de compensar los cambios de traslación de la nave (latitud y longitud), la estación móvil puede girar y por tanto, se debe compensar este ángulo de rotación. La brújula digital empleada permite conocer este ángulo de giro respecto del norte magnético, con lo cual es posible re direccionar la antena de la nave conforme ocurra la rotación de esta en su propio eje. Por otro lado, para la estación fija, no se necesita compensar dicho ángulo debido a que nunca se producirá esta rotación y siempre será orientada teniendo como referencia al norte magnético (**figura 2-74**).

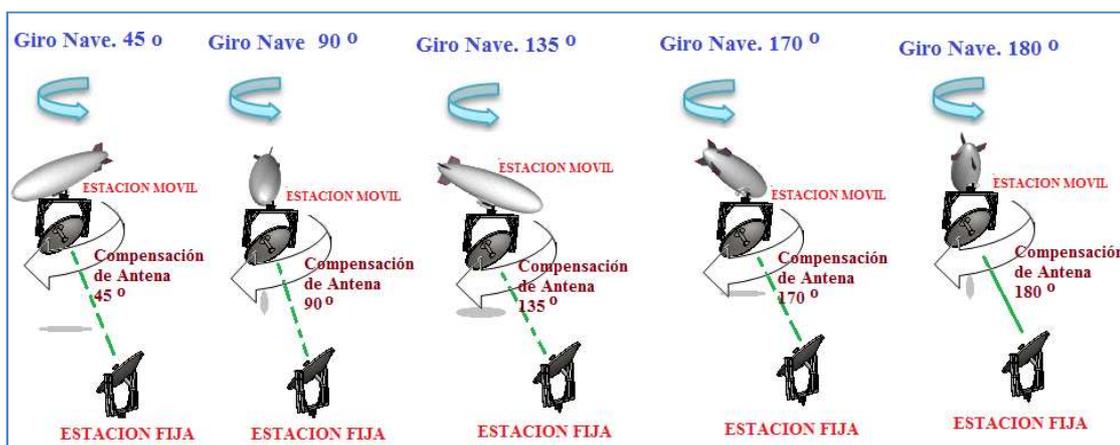


Figura 2-74. Compensación de giro de la antena, frente a rotación de la nave.

Para la compensación del giro en el cálculo del azimut en la estación móvil al momento de surgir una rotación, se emplea el siguiente código según el giro que realice:

Al realizarse un giro de la nave mayor al Azimut calculado inicialmente o Azimut sin Giro, entonces se tiene:

$$\text{Azimut_Globo} = \text{Azimut_sin_giro} - \text{Giro nave}$$

Dónde:

Azimut_Globo= Valor de azimut con compensación de giro de nave

Azimut_sin_giro= Valor de azimut, sin que exista rotación sobre su eje

Giro_nave= Es el valor de giro que entrega la brújula digital.

Si el giro de la nave es mayor al azimut calculado, el nuevo azimut final con compensación de giro será igual a:

$$\text{Azimut_Globo} = 360 - \text{Giro_nave}$$

$$\text{Azimut_Globo} = 360 - \text{Giro_nave} - \text{Azimut_sin_giro}$$

Su diagrama de flujo se muestra en la figura 2-75.

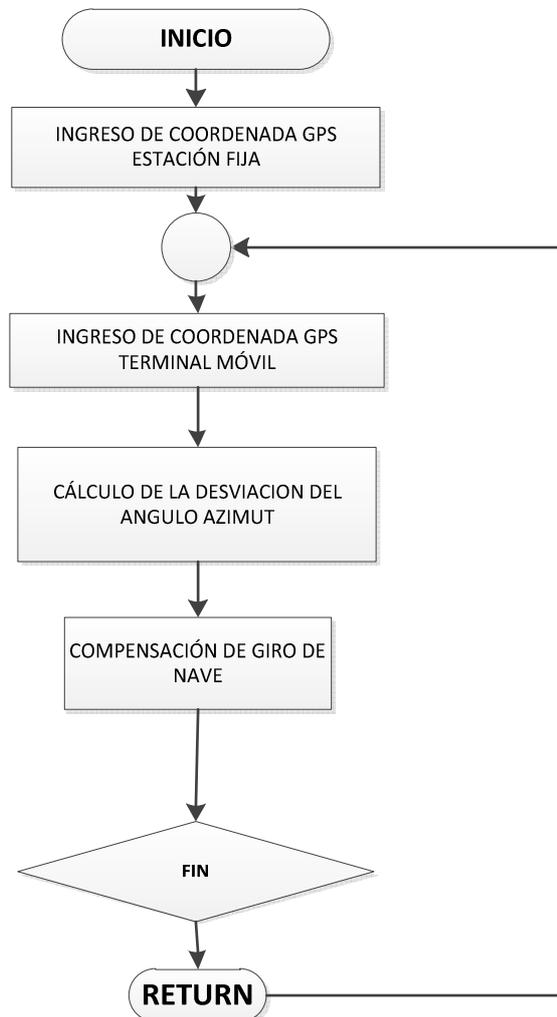


Figura 2-75. Diagrama de flujo para cálculo de azimut de la estación móvil, con variación de la rotación de la nave

A continuación se realiza una breve descripción en lenguaje estructurado de las tareas.

Ingreso de coordenadas GPS Estación Fija.

Abrir primer puerto serial.

Almacenar la coordenada de GPS Estación Fija.

Ingreso de coordenadas GPS Estación Móvil.

Abrir segundo puerto serial.

Almacenar la coordenada de GPS Estación Móvil.

Cálculo de la desviación del ángulo azimut

Lectura de canal análogo de microcontrolador.

Almacenar valor de altura de la nave.

Configuro puertos para comunicación I2C.

Almacenar valor de giro de brújula digital.

Comparación de los datos de latitud y longitud de las dos estaciones.

Transformación de coordenadas de grados a radianes

Cálculo trigonométrico de ángulo azimut

Compensación de giro.

Compensación del valor de giro entregado por Brújula Digital.

Visualización en LCD.

Fin

Return

2.7.3 ALGORITMO PARA MOVIMIENTO DE INCLINACIÓN Y DECLINACIÓN DE LAS DOS ESTACIONES.

2.7.3.1 Cálculo de Inclinación en terminal Fija.

Con el valor de altura proporcionado por el altímetro digital implementado en la estación Móvil, se calcula la declinación de la estación móvil y la inclinación de la estación fija, este dato de altura es transmitida vía inalámbrica desde el globo hacia la terminal fija.

Con la información anterior, el ángulo de inclinación debido a las variaciones de altura de la nave, quedaría de la siguiente manera (**figura 2-76**):

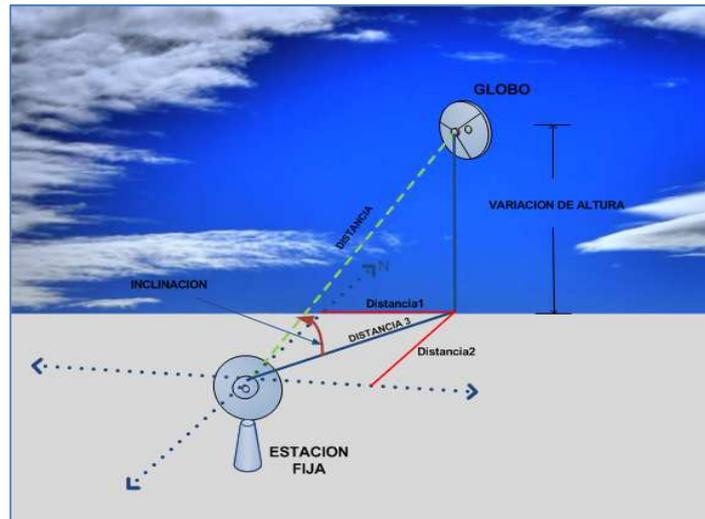


Figura 2-76. Variación de Inclinación de Antena Fija.

Al tener los datos de la coordenada de ubicación en unidades de grados, es indispensable transformar a unidades de metros, para mantenerse en un sistema de unidades fijo y realizar las operaciones respectivas y mediante cálculos trigonométricos encontrar el ángulo de inclinación de la antena de estación fija.

Lo primero es obtener la “*distancia 1*” que es la diferencia entre la longitud de la estación fija y la longitud de la estación móvil y la “*distancia 2*” que es a diferencia entre la latitud del globo y la latitud de tierra (**figura 2-77**).

$$\text{Distancia1} = \text{Grad_longitud_globo} - \text{Grad_longitud_tierra}$$

$$\text{Distancia2} = \text{Grad_latitud_globo} - \text{Grad_latitud_tierra}$$

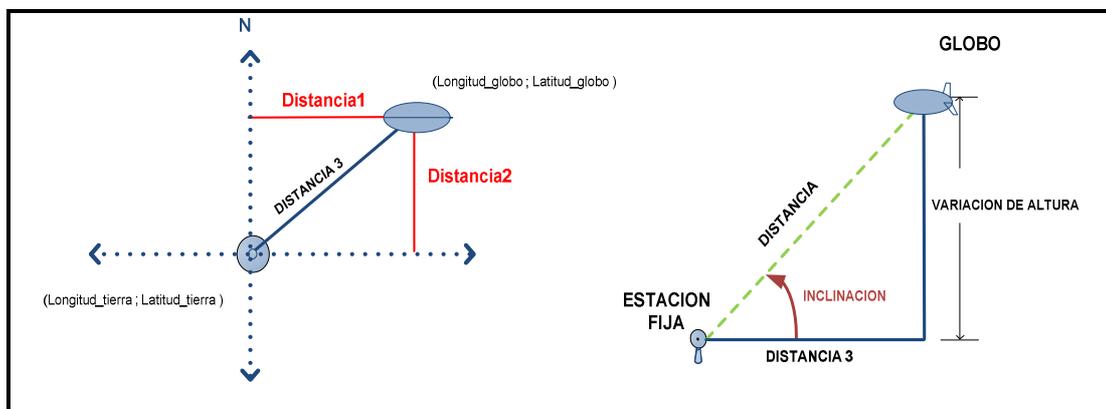


Figura 2-77. Triángulos formados en los planos.

El resultado de la diferencia entre las variables de latitud y longitud se encuentran en unidades de grados, por lo que es necesaria la debida transformación a metros, donde se tiene lo siguiente:

La longitud mide el ángulo a lo largo del ecuador desde cualquier punto ubicado en la tierra, dichos círculos que pasan por los polos se llaman meridianos conformando una circunferencia de 40.007 km de longitud, donde 1° equivale a 111130.55 metros.

Por otro lado la latitud mide el ángulo entre cualquier punto y el Ecuador, donde a dichas líneas se les llama paralelos y son círculos paralelos al ecuador en la superficie terrestre, además se tiene que la circunferencia que corresponde al Ecuador mide 40.075,004 km, donde 1° equivale a 111319.45 metros.

$$\text{Distancia1} = \left(\text{Grad}_{\text{longitud}_{\text{globo}}} - \text{Grad}_{\text{longitud}_{\text{tierra}}} \right) \times \frac{111130.55 \text{ metros}}{1 \text{ Grado}_{\text{Longitud}}}$$

$$\text{Distancia2} = \left(\text{Grad}_{\text{latitud}_{\text{globo}}} - \text{Grad}_{\text{latitud}_{\text{tierra}}} \right) \times \frac{111319.45 \text{ metros}}{1 \text{ Grado}_{\text{Latitud}}}$$

Además se encuentra la distancia proyectada sobre el suelo del globo y el punto de estación fijo, denominado “*distancia 3*” (figura 2-77).

$$\text{Distancia3} = \sqrt{\text{Distancia1}^2 + \text{Distancia2}^2}$$

A medida que el globo realiza su cambio de altura, incrementa el valor de altura del altímetro digital, por lo que se tendrá una variación de dicho parámetro con respecto al punto inicial o estación fija.

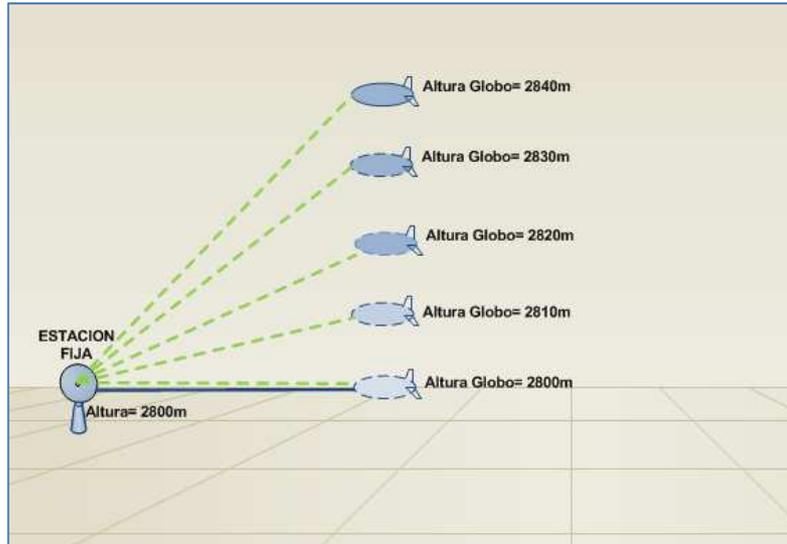


Figura 2-78. Incremento de altura de Globo, respecto a estación Fija.

$$\text{Variacion_alt} = \text{Altura_globo} - \text{Altura_tierra}$$

$$\text{Distancia} = \sqrt{\text{Distancia}^2 + \text{Variacion_alt}^2}$$

$$\text{Inclinacion} = \arcsen\left(\frac{\text{Variacion_altura}}{\text{Distancia}}\right)$$

Dónde:

- Distancia= Distancia en línea de vista desde la estación fija a la estación Móvil.
- Inclinación= Valor en Grados de la inclinación de la antena de Estación Fija

Su diagrama de flujo se muestra en la figura 2-79.

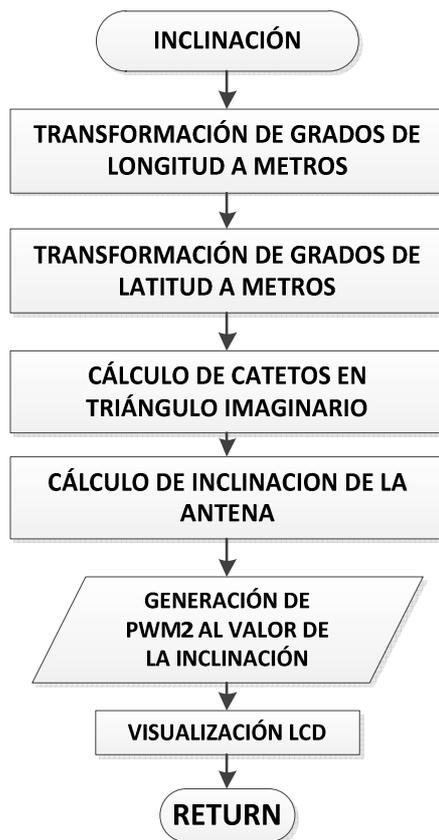


Figura 2-79. Diagrama de Flujo de Cálculo de Inclinación en Antena Fija.

2.7.3.2 Cálculo de declinación en terminal Móvil

Al tener los valores de posición geográfica de la estación móvil y estación fija y la variación de altura se puede obtener la declinación de la antena ubicada en la estación móvil (figura 2-80):



Figura 2-80. Variación de declinación de Antena Móvil

De la misma forma se obtiene los valores de los catetos de los triángulos imaginarios proyectados sobre el plano (**figura 2-81**).

$$\text{Distancia1} = \left(\text{Grad}_{\text{longitud}_{\text{globo}}} - \text{Grad}_{\text{longitud}_{\text{tierra}}} \right) \times \frac{111130.55 \text{ metros}}{1 \text{ Grado}_{\text{Longitud}}}$$

$$\text{Distancia2} = \left(\text{Grad}_{\text{latitud}_{\text{globo}}} - \text{Grad}_{\text{latitud}_{\text{tierra}}} \right) \times \frac{111319.45 \text{ metros}}{1 \text{ Grado}_{\text{Latitud}}}$$

$$\text{Distancia3} = \sqrt{\text{Distancia1}^2 + \text{Distancia2}^2}$$

De igual forma se obtiene un incremento de altura al elevarse la nave, por lo que es necesario calcular el valor de variación de altura.

$$\text{Variacion_alt} = \text{Altura_globo} - \text{Altura_tierra}$$

$$\text{Distancia} = \sqrt{\text{Distancia3}^2 + \text{Variacion_alt}^2}$$

$$\text{Declinacion} = \arcsen\left(\frac{\text{Variacion_altura}}{\text{Distancia}}\right)$$

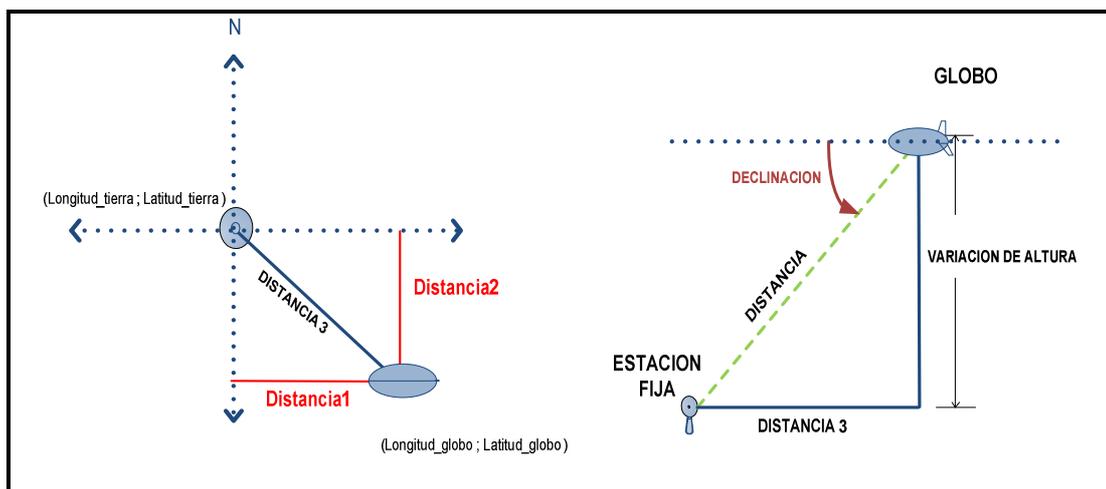


Figura 2-81. Triángulos proyectados al plano referencial.

Su diagrama de flujo se muestra en la figura 2-82.

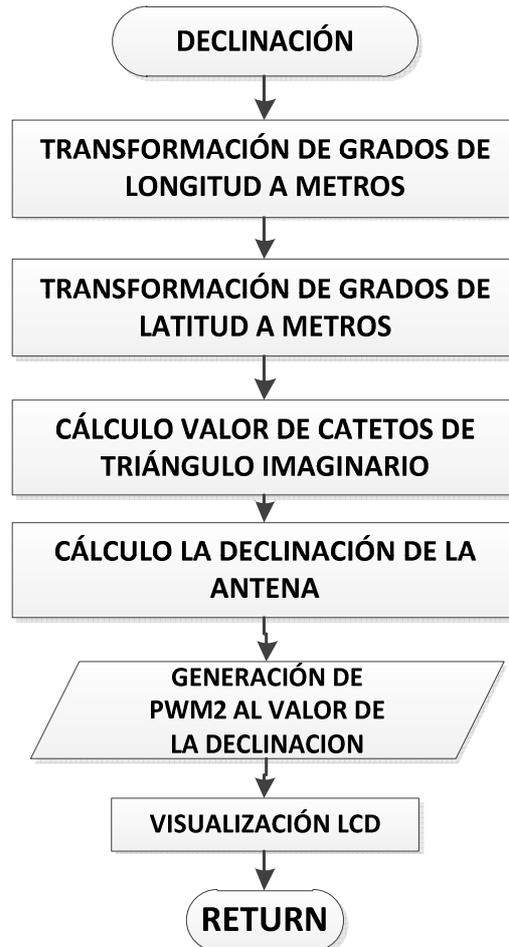


Figura 2-82. Diagrama de Flujo de Cálculo de declinación en Antena Móvil.

2.7.4 GENERACIÓN DEL MOVIMIENTO AZIMUT E INCLINACIÓN EN LA TERMINAL FIJA.

El microcontrolador Atmega 164P, encargado de recibir las coordenadas de ubicación fija mediante su GPS local y las coordenadas de ubicación móvil obtenida por un segundo GPS, las procesa y envía esta información en forma de PWM (Modulación de ancho de pulso); variando su relación de trabajo desde 0 al 100%, tanto para el giro horizontal (Rango de 0° a 360°) y el giro vertical (Rango de 0 a 90°) (**figura 2-83**).

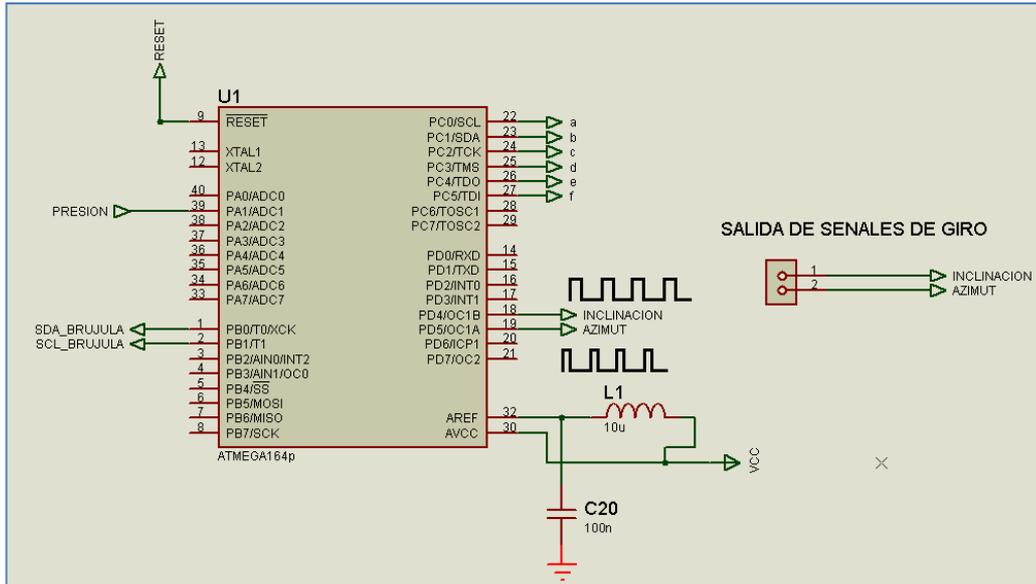


Figura 2-83. Generación de la señal PWM de Azimut e Inclinación.

Estas dos señales ingresan a un respectivo filtro activo pasa bajo, encargado de convertir la señal PWM a una señal analógica de 0 a 5 voltios; señales que ingresan al microcontrolador Atmega 8, el cual realiza la conversión analógica a digital, y permite el control de los servomotores en un rango de 0° a 360° en su movimiento azimut y de 0° a 90° para la inclinación . (Figura 2-84).

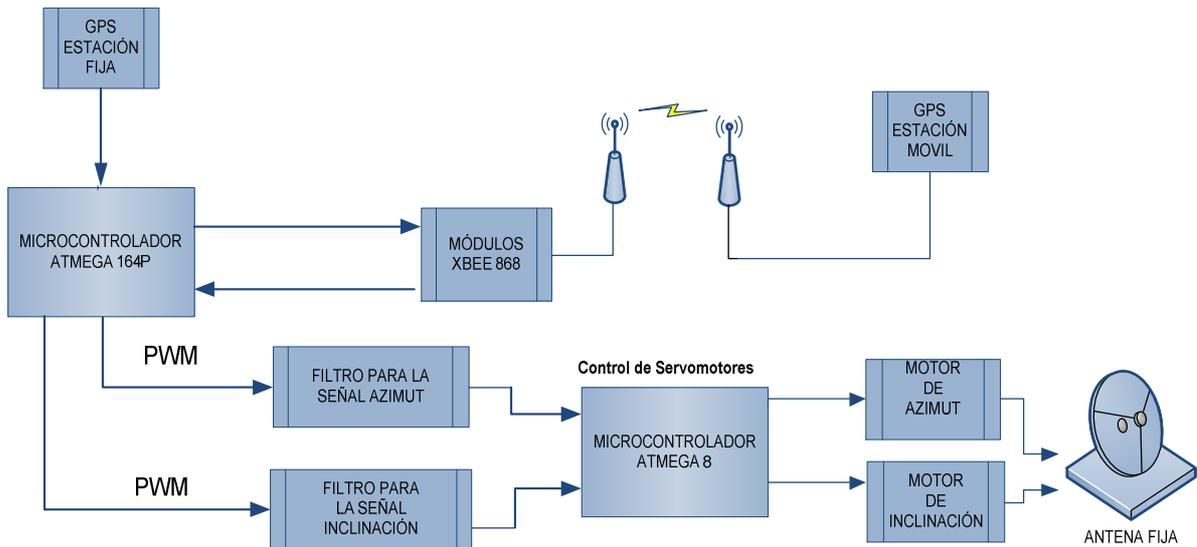


Figura 2-84. Secuencia de Adquisición de datos y Control de los servomotores en Estación Fija.

2.7.4.1 Diseño del filtro activo pasa bajos

En la figura 2-85 se observa los filtros activos pasa bajos de uso común utilizados para la conversión de señal PWM a señal analógica. Esta señal de PWM tiene un valor de aproximadamente 1953.12 Hz a una conversión de 8 bits (**ver Anexo A.3**).

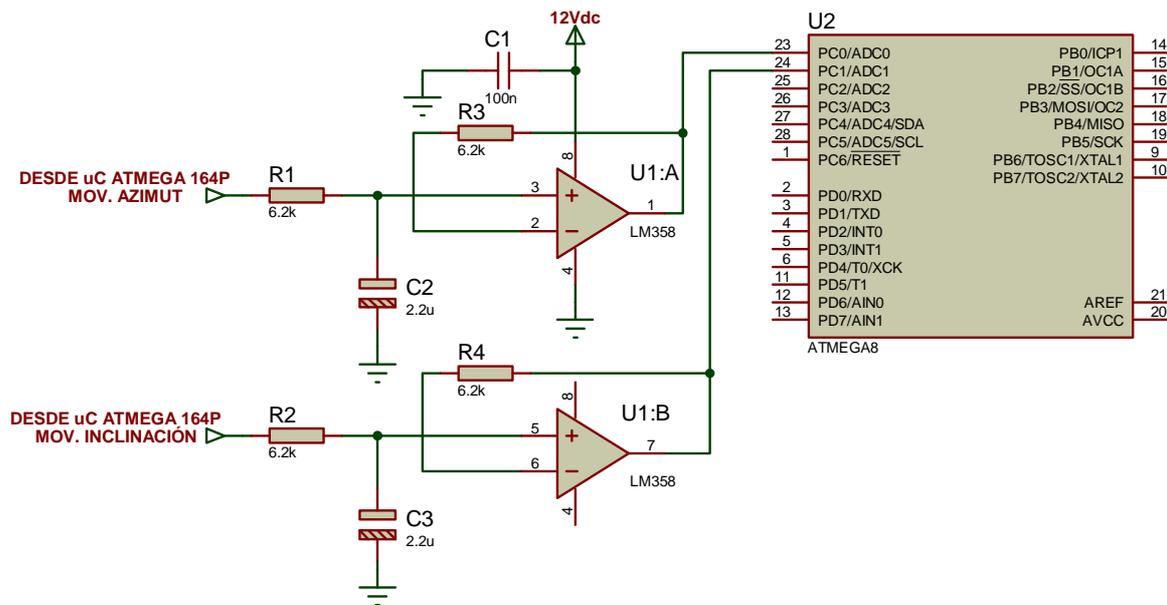


Figura 2-85. Diagrama circuital de los filtros activos pasa bajos para los dos movimientos.

El objetivo de estos filtros, es permitir el paso únicamente de la componente DC, y evitar fluctuaciones de la señal en la entrada de sistemas que están diseñados para la lectura de señales analógicas. El filtrado se hace con el circuito RC y el amplificador operacional que se utiliza como amplificador de ganancia unitaria; las resistencias R1 y R2 son iguales a R3 y R4, y se incluye para la desviación de cd. Para la obtener la frecuencia de corte se realizó el análisis de armónicos para una señal PWM con valores que oscilan entre 0 y 5v. Ver Anexo A.4 y Anexo A.5 para su justificación.

Una vez calculada la frecuencia de corte se procede al cálculo de los componentes del filtro pasivo que se encarga se entregar una señal analógica variable de 0 a 5 voltios para cada uno de los movimientos de azimuth e inclinación (**Anexo 6**).

2.7.4.2 Análisis de la programación en la generación del movimiento azimut.

La programación del segundo microcontrolador Atmega 8 encargado de generar las señales tipo PWM para los servomotores, se realizó en el software BASCOM-AVR.

Con la señal analógica entregada por los filtros activos, valor que varía de 0 a 5 voltios para un rango de 0° a 360°, se realiza la conversión a 10 bits y su escalamiento adecuado en el programa, de tal manera que se genere un tren de pulsos, para el posicionamiento del servomotor.

Se utiliza la instrucción Pulseout con un valor de 1500 para posicionar el servo en 0° (respecto al norte geográfico) y 4872 para posicionarlo en 180°. Estos valores se calcularon de manera manual y depende del servomotor que se esté ocupando.

La instrucción pulseout significa que va a generar un pulso por un pin del microcontrolador, y su sintaxis es la siguiente:

PULSEOUT PORT, PIN, PERIOD

Dónde:

Port= Es el nombre del puerto por donde se genera el pulso:

Pin= Es la variable o constante; es el número del pin (0-7).

Period= Es el número de periodos que el pulso va a durar.

Con los datos obtenidos, se puede encontrar la ecuación que permita posicionar el servomotor en cualquier punto dentro de esta ubicación, y así cubrir todo el rango de posición de 0° a 180°, para ello debemos fijarnos en la figura 2-86.

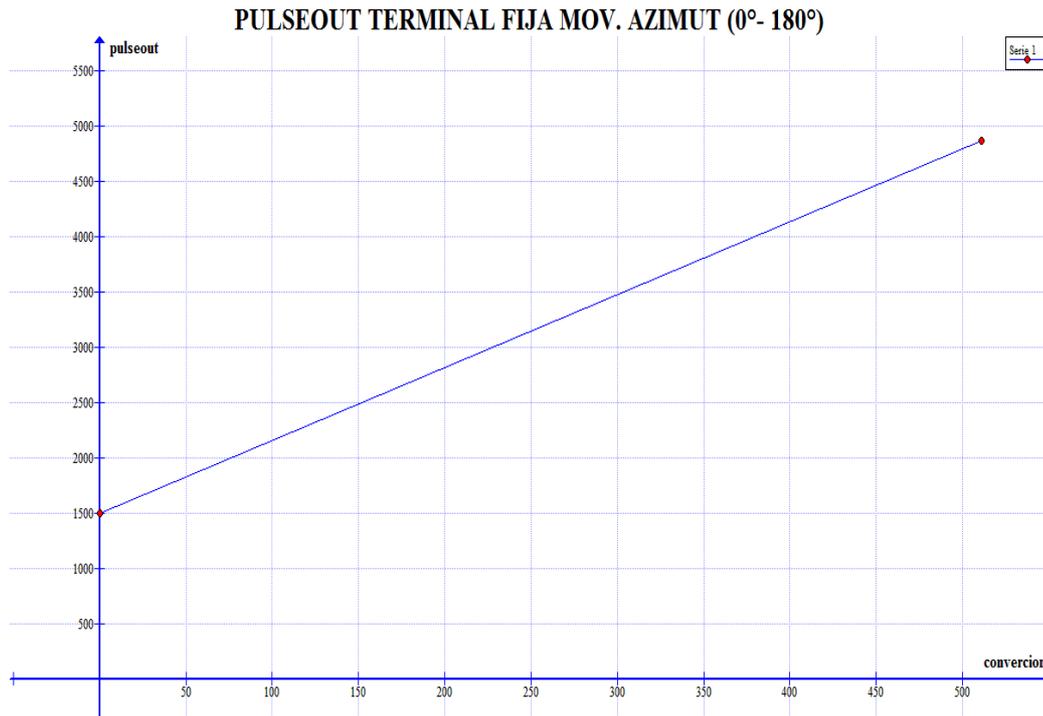


Figura 2-86. Gráfica de la instrucción Pulseout en función de la conversión analógica digital para el movimiento azimut de la estación fija.

$$m = \frac{4872 - 1500}{511} = 6,59$$

$$pulseout = \left(\frac{66}{10} * conversion \right) + 1500$$

Estos valores obtenidos son los que se ingresan en el algoritmo de programación en el microcontrolador Atmega 8. Esta ecuación, sirve únicamente si el globo se encuentra en la periferia de 0° a 180° con respecto al norte geográfico; en caso de que el globo sobrepasara este contorno el algoritmo de programación del microcontrolador toma de la ecuación perteneciente a la figura 2-87.

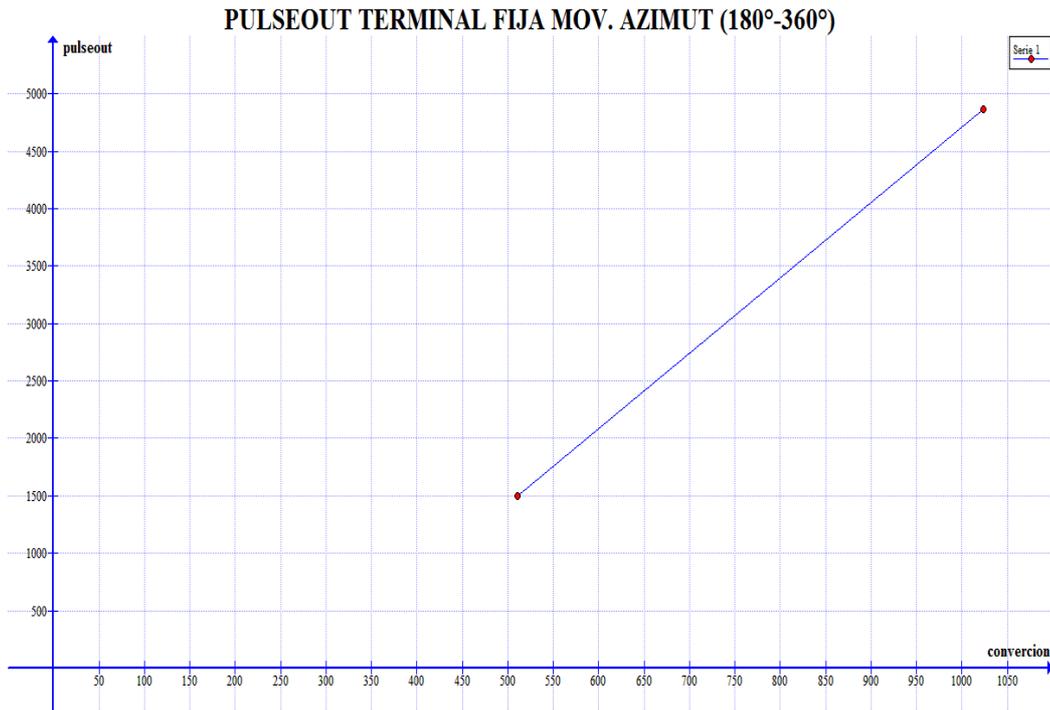


Figura 2-87. Gráfica de la instrucción Pulseout en función de la conversión analógica digital para el movimiento azimut de la estación fija.

$$m = \frac{4872 - 1500}{1023 - 511} = 6,59$$

$$pulseout = \left(\frac{66}{10} * conversion \right) - 1873$$

De esta manera el movimiento azimut se cubre en su totalidad, su movimiento empieza en 0° con respecto al norte geográfico hasta los 180°, los valores de 180° a 360° se realiza utilizando una combinación d el movimiento azimut y el movimiento de elevación, con esto se garantiza que el cable de comunicación de las antenas y el cable de alimentación de los servomotores no se enreden.

2.7.4.3 Análisis de la programación en la generación del movimiento de inclinación.

Para el caso de la generación del movimiento de inclinación se realiza la misma lógica de programación que para la generación del movimiento azimut, con la diferencia que su desplazamiento se realizara desde 0° con respecto a la horizontal hasta los 90° que sería el punto máximo de elevación.

De igual manera se utiliza la instrucción pulseout con un valor de 1800 para la posición horizontal (es decir 0°) y pulseout de 3335 para 90° para el caso en que el globo se encontrara en la periferia de su azimut de 0 a 180°.

Estos valores se calcularon de forma manual; y se puede ajustar una ecuación que permita posicionar al servomotor en todos estos desplazamientos utilizando la gráfica 2-88 cuya ecuación es:

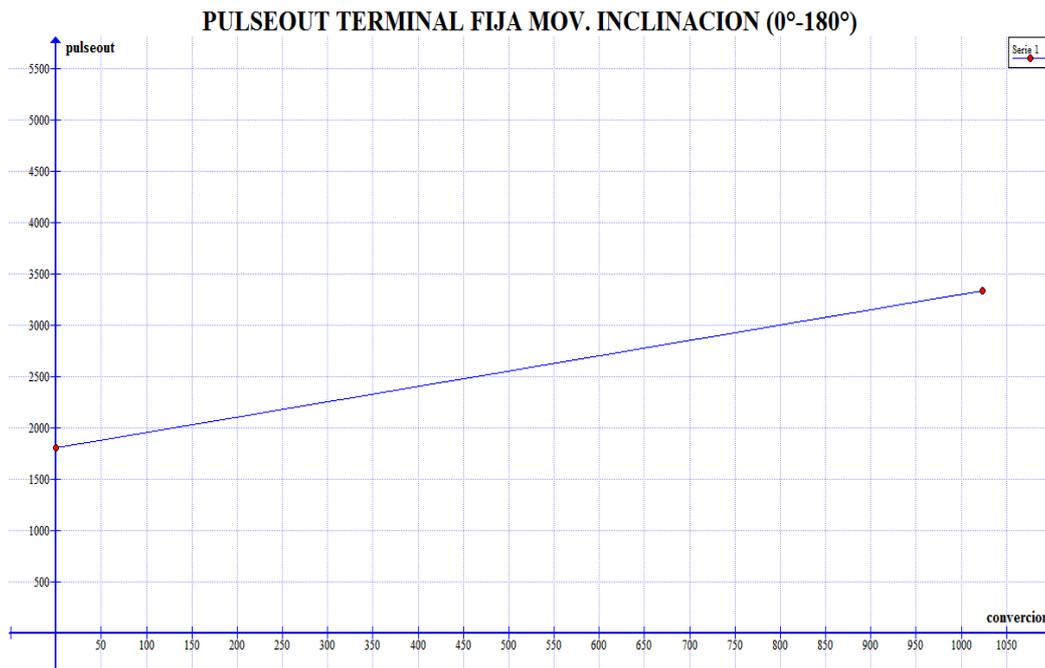


Figura 2-88. Gráfica de la instrucción Pulseout en función de la conversión analógica digital para el movimiento de inclinación de la estación fija.

$$m = \frac{3335 - 1800}{1023} = 1,5$$

$$pulseout = \left(\frac{15}{10} * conversion\right) + 1790$$

Si el globo está en la periferia que corresponde de 180° a 360° el pulseout para el movimiento de inclinación sería de 4736 para su posición horizontal (es decir 180°) y 3335 para los 90°, su nueva gráfica con su respectiva ecuación es la siguiente:

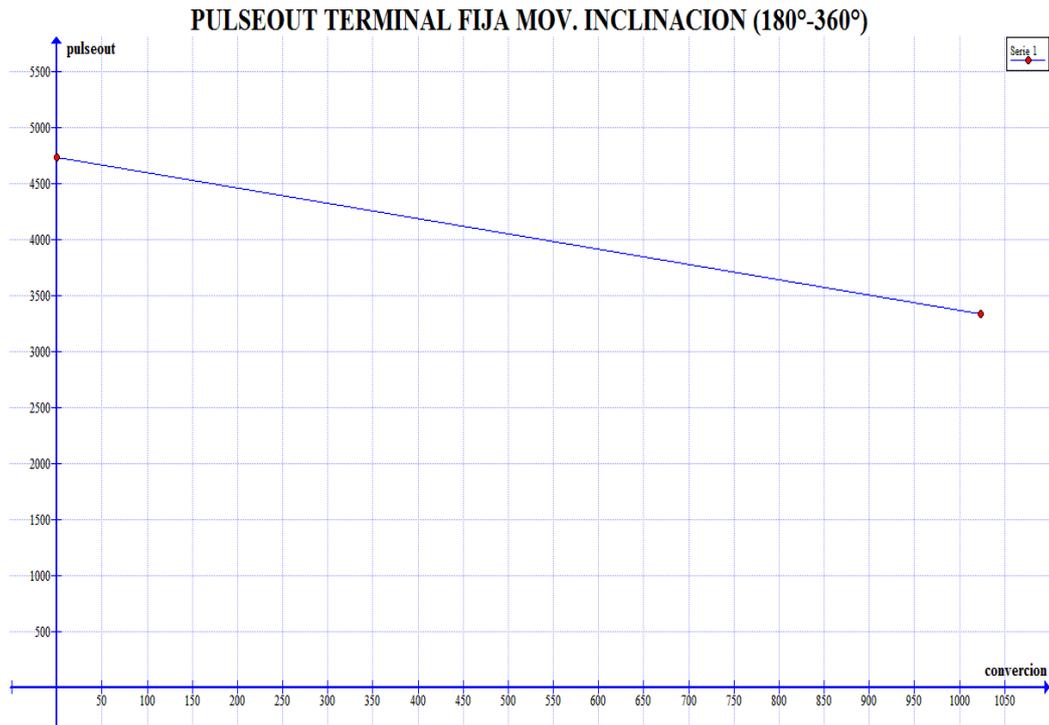


Figura 2-89. Gráfica de la instrucción Pulseout en función de la conversión analógica digital para el movimiento de inclinación de la estación fija.

$$m = \frac{4736 - 3335}{0 - 1023} = -1,37$$

$$pulseout = \left(-\frac{14}{10} * conversion \right) + 4736$$

Una vez encontradas las ecuaciones se puede utilizar un algoritmo de programación que permita la combinación de estas y posicionar a los dos servomecanismos dentro de todo el perímetro que puede ocupar el globo. Es decir dentro los de los 4 cuadrantes del plano cartesiano de 0° a 360° en su azimut y de 0° a 180° en su movimiento de elevación como muestra la figura 2-90.

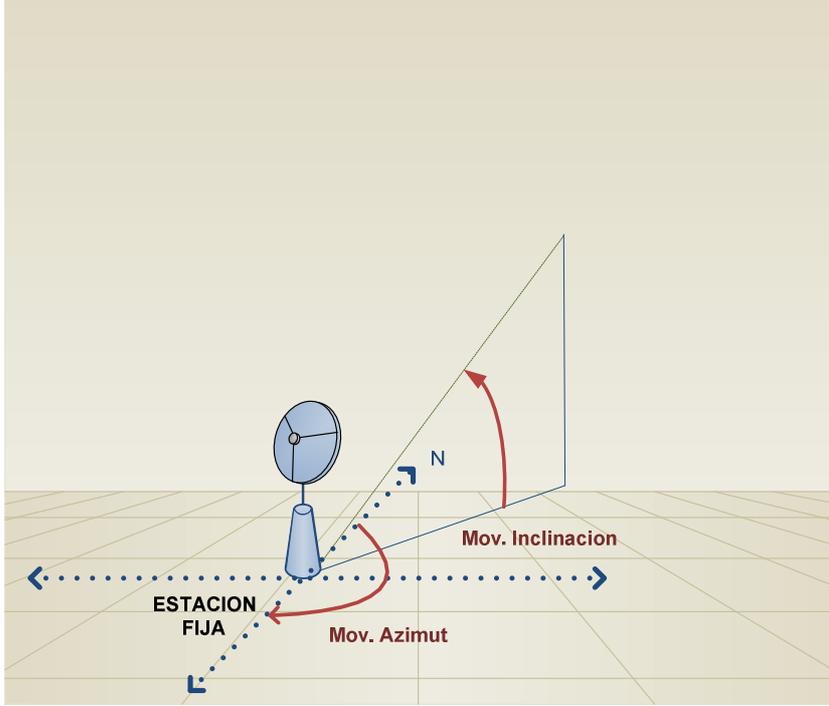


Figura 2-90. Manejo de la estación fija en todos sus cuadrantes haciendo uso de sus dos movimientos.

El diagrama de flujo se muestra en la figura 2-91 y el programa de posicionamiento de los servomotores se indica en el **Anexo A.7**.

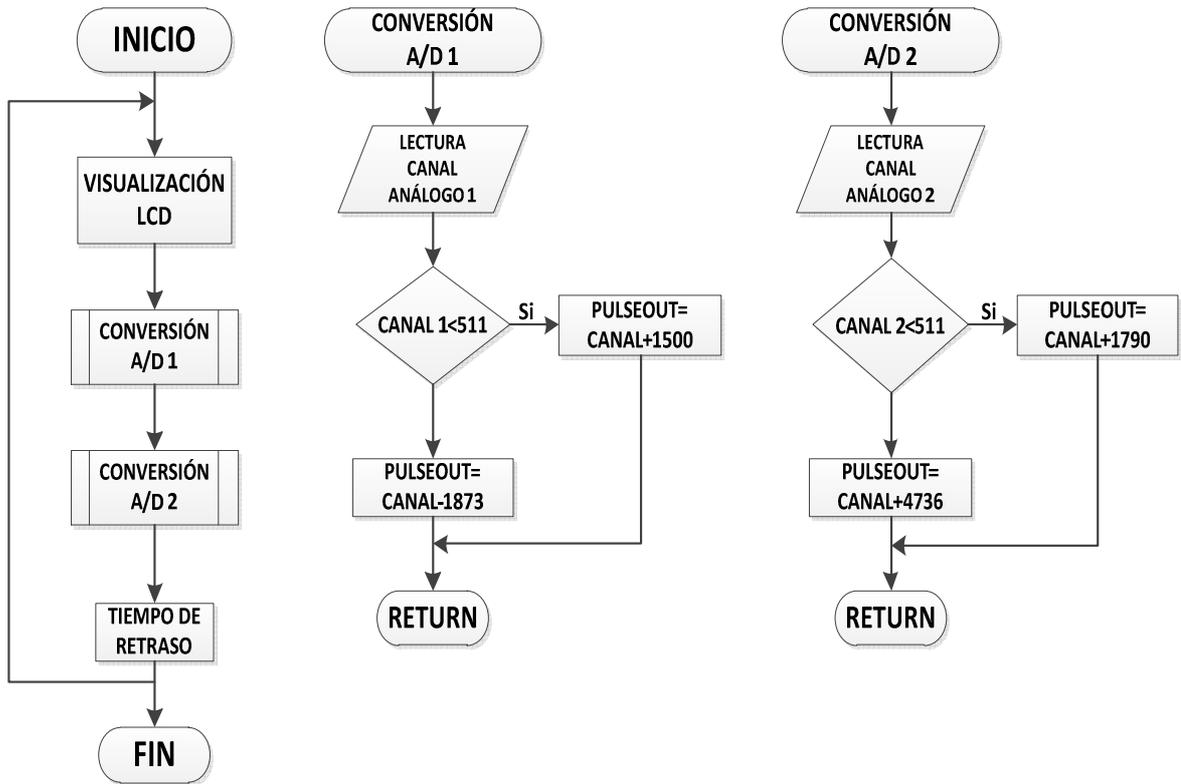


Figura 2-91. Diagrama de flujo para el posicionamiento del sistema fijo.

2.7.5 GENERACIÓN DEL MOVIMIENTO AZIMUT Y DECLINACIÓN EN LA TERMINAL MÓVIL.

Para ésta estación se tiene un microcontrolador Atmega 164P, encargado de recibir la coordenada geográfica que nos entrega el GPS instalado en la misma, además de la coordenada de ubicación geográfica de la estación fija; el valor de la altura proveniente de su altímetro, y la variación de giro obtenida por el compás magnético.

Los datos calculados, se entregan de la misma forma que en la estación fija hacia la etapa de control mediante la generación de dos PWM, señales que ingresan a la etapa de filtrado conformada por filtros activos para obtener señales analógicas que luego son recibidas por el microcontrolador Atmega 8. Con su respectivo algoritmo de control se puede manipular los servomotores haciendo uso de sus dos grados de libertad (**figura 2-92**).

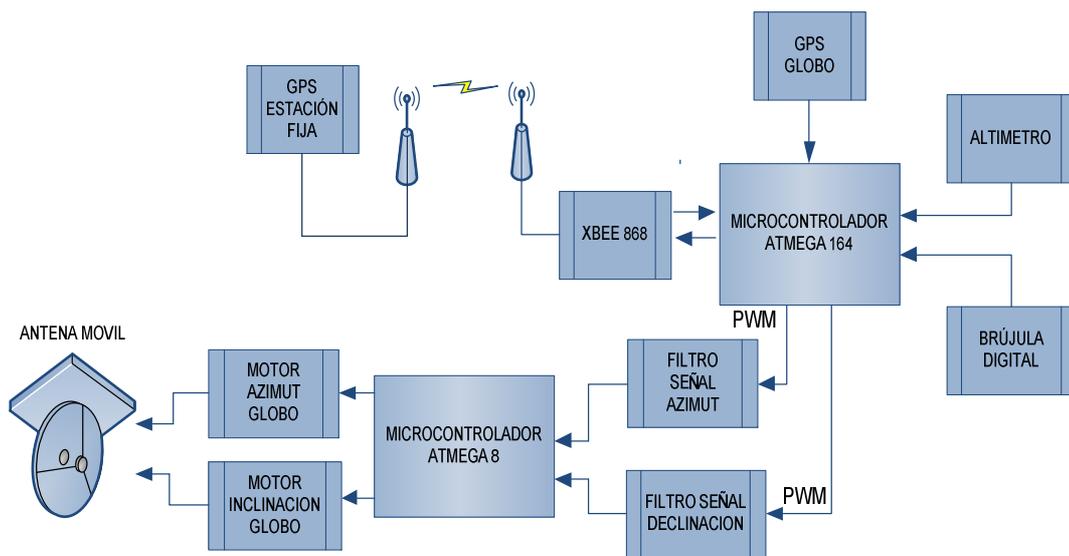


Figura 2-92. Secuencia de Adquisición de datos y Control de motores en Estación Móvil.

Los filtros activos para bajar utilizados en la conversión PWM a analógica tienen las mismas características que los filtros de la figura 2-85.

2.7.5.1 Análisis de la programación en la generación del movimiento azimut.

Se utiliza la instrucción Pulseout con un valor de 4485 para posicionar el servo en 0° y 1500 para posicionarlo en 180°.

Con estos valores se puede encontrar una ecuación que permita posicionar el servomotor en cualquier punto dentro de esta ubicación, y así cubrir todo el rango de posición de 0° a 180°; para ello debemos fijarnos en la figura 2-93.

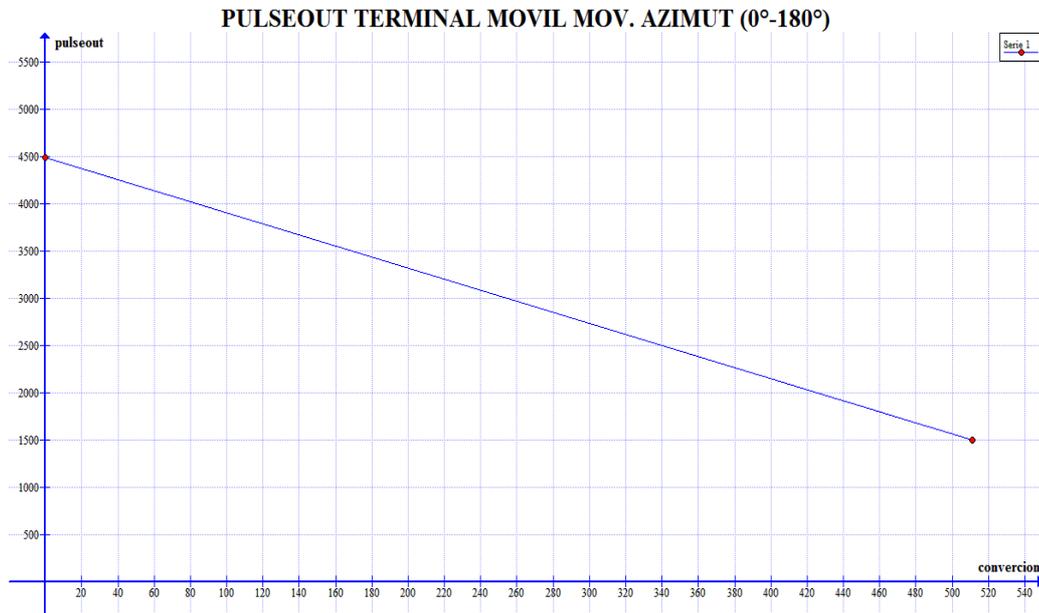


Figura 2-93. Gráfica de la instrucción Pulseout en función de la conversión analógica digital para el movimiento de azimut de la estación móvil.

$$m = \frac{4485 - 1500}{0 - 511} = -5,84$$

$$pulseout = \left(-\frac{58}{10} * conversion \right) + 4485$$

Con estos valores se puede realizar su respectivo algoritmo de programación en el microcontrolador para el control de los servomotores.

En el caso de que se sobrepasara el rango de 180° e l algoritmo de programación del microcontrolador toma la siguiente ecuación de la figura 2-94.

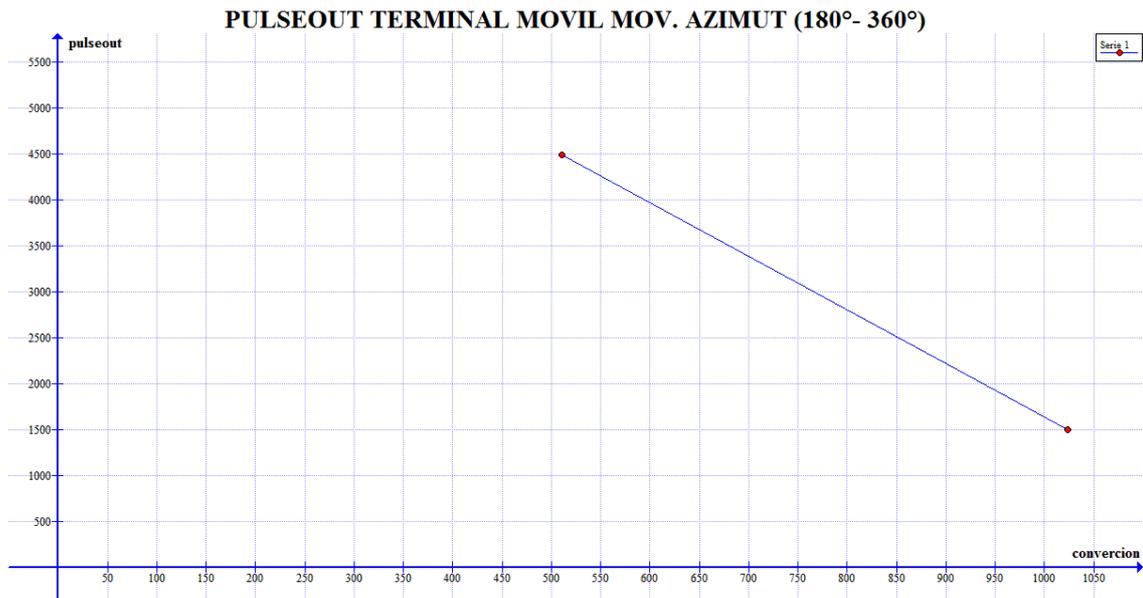


Figura 2-94. Gráfica de la instrucción Pulseout en función de la conversión analógica digital para el movimiento de azimut de la estación móvil.

$$m = \frac{4485 - 1500}{511 - 1023} = -5,84$$

$$pulseout = \left(-\frac{58}{10} * conversion \right) + 7464$$

2.7.5.2 Análisis de la programación en la generación del movimiento de declinación.

De manera similar que los casos anteriores para generar el movimiento de declinación su desplazamiento será de 0° con respecto a la horizontal hacia -90°.

La instrucción pulseout con un valor de 1620 para la posición horizontal (es decir 0°) y pulseout de 3154 para -90° en el caso que el globo se encontrara en la periferia de su azimut de 0° a 180° (**figura 2-95**).

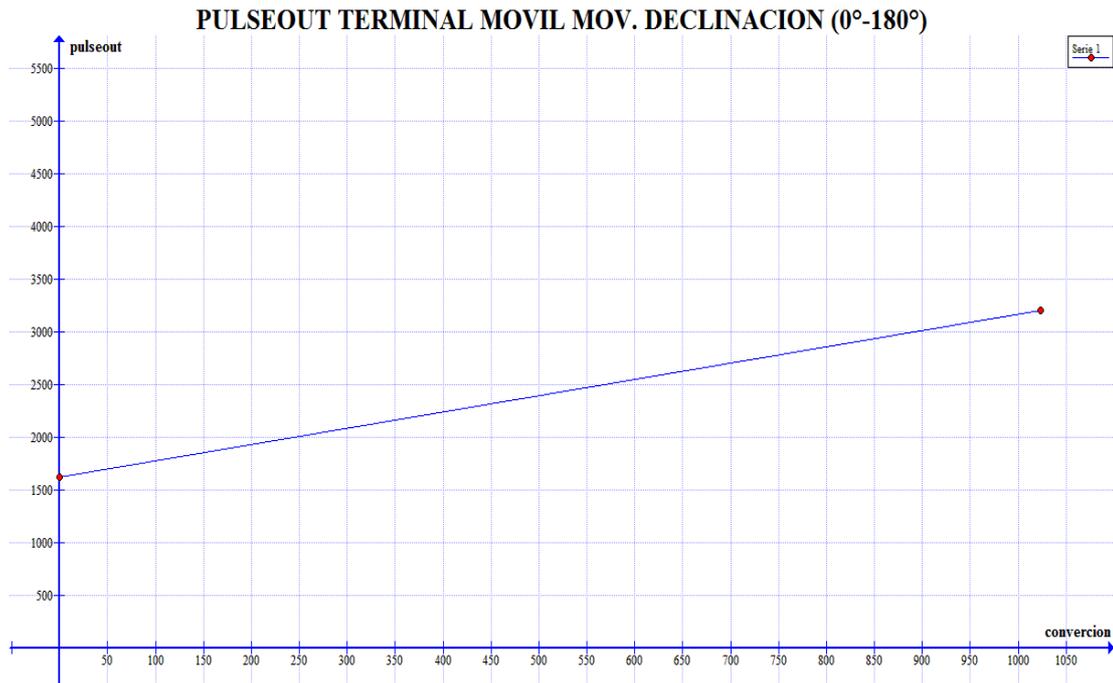


Figura 2-95. Gráfica de la instrucción Pulseout en función de la conversión analógica digital para el movimiento de declinación de la estación móvil.

$$m = \frac{3200 - 1620}{1023} = 1,58$$

$$pulseout = \left(\frac{16}{10} * conversion \right) + 1720$$

Si el globo está en la periferia que corresponde de 180° a 360° el pulseout para el movimiento de declinación cambiaría a 4700 para su posición horizontal es decir 0° y 3165 para -90° (**figura 2-96**). Con estos datos se puede trazar sus gráficas y encontrar sus respectivas ecuaciones para ingresarlas en el algoritmo de programación en el microcontrolador.

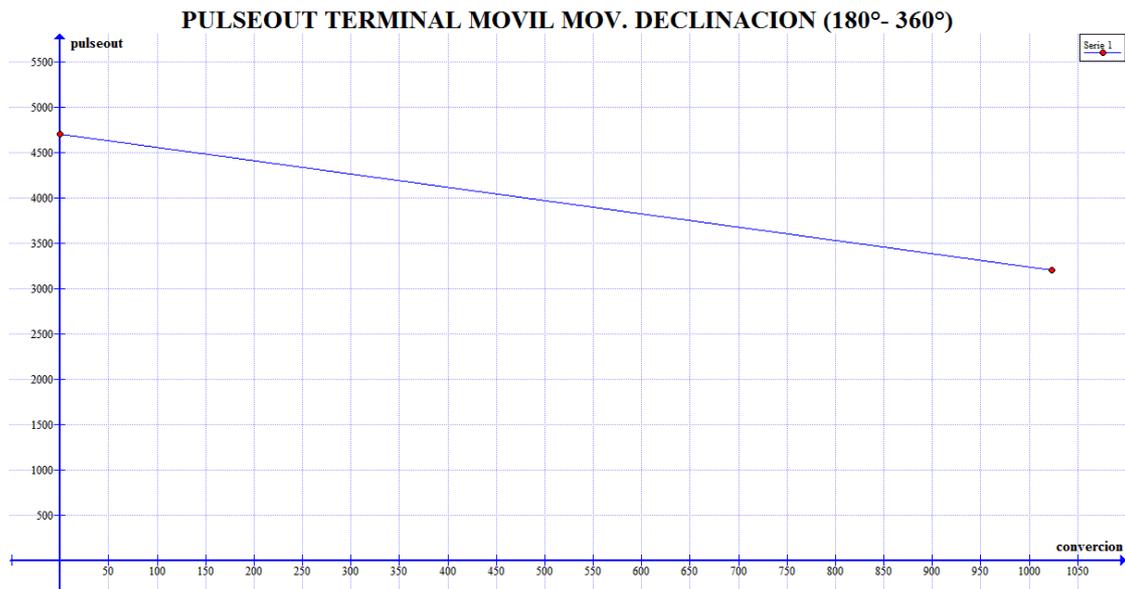


Figura 2-96. Gráfica de la instrucción Pulseout en función de la conversión analógica digital para el movimiento de declinación de la estación móvil

$$m = \frac{4700 - 3200}{0 - 1023} = -1,46$$

$$pulseout = \left(-\frac{15}{10} * conversion \right) + 4700$$

Una vez encontradas las ecuaciones para el sistema de apuntamiento móvil se puede utilizar un algoritmo de programación que permita la combinación de estas y posicionar a los dos servomecanismos dentro de todo el perímetro que puede ocupar el globo respecto a la estación fija. Es decir dentro de los 4 cuadrantes del plano cartesiano de 0° a 360° en su azimut y de 0° a -90° en su movimiento de declinación como muestra la figura 2-97.

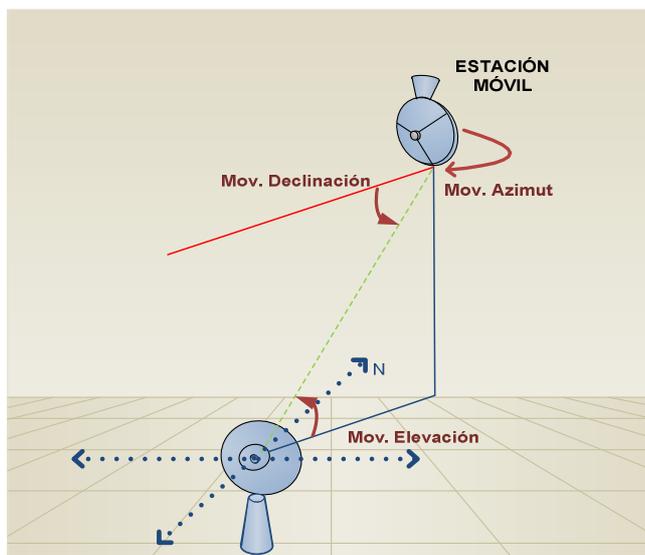


Figura 2-97. Manejo de la estación fija en todos sus cuadrantes haciendo uso de sus dos movimientos.

Su diagrama de flujo se muestra en la figura 2-98 y el programa en el **Anexo A.8**.

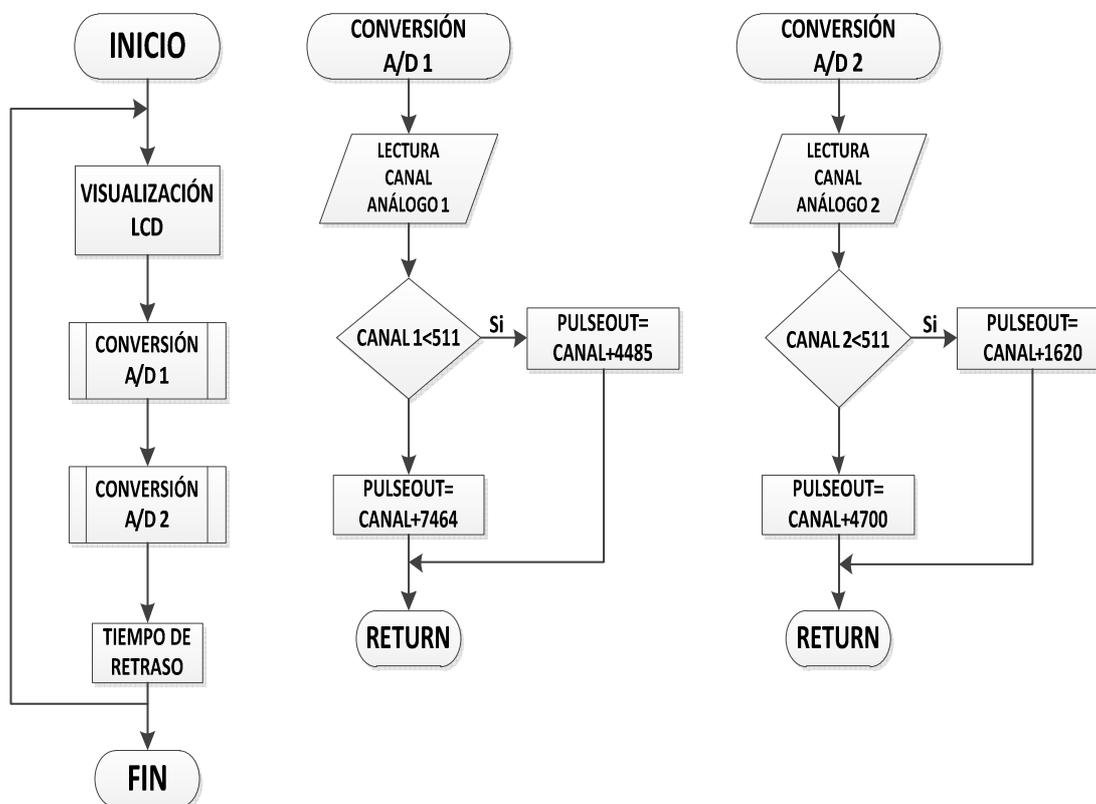


Figura 2-98. Diagrama de flujo para el posicionamiento del sistema móvil.

2.8 TRASMISIÓN INALÁMBRICA VÍA ZIGBEE

2.8.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe una gran variedad de estándares que permiten la transmisión de datos, voz, video, etc., sin embargo muchas veces se requieren medios que os permitan hacer el menor consumo de energía además de no requerir un gran ancho de banda, es decir donde se requiera tener un estándar inalámbrico dedicado a sensores y dispositivos de control.

Un gran número de empresas fabricantes formaron una alianza con el objeto de promover un estándar global y abierto para redes de sensores y control.

Zigbee Alliance conforma más de 100 empresas tecnológicas de fabricantes conformadas con el fin de fomentar el desarrollo e implementación de una tecnología inalámbrica de área personal a bajo costo, dentro de estas empresas se encuentra Mitsubishi, Honeywell, Philips, Motorola, Invensys.



Figura 2-99. Logotipo de Alianza de empresas.

Zigbee es un protocolo de comunicaciones inalámbrico basado en el estándar de comunicaciones IEEE_802.15.4 para redes inalámbricas, donde permite que dispositivos de bajo consumo puedan realizar sus comunicaciones inalámbricas.

Las comunicaciones Zigbee se realizan en la banda libre de 2.4GHz. A diferencia de bluetooth no utiliza FHSS (Frequency hopping), sino que realiza las comunicaciones a través de una única frecuencia, es decir, de un canal.

La velocidad de transmisión de datos de una red Zigbee es de hasta 256kbps. Por último decir que una red Zigbee la pueden formar, teóricamente, hasta 65535 equipos, es decir, el protocolo está preparado para poder controlar en la misma red esta cantidad enorme de dispositivos. La realidad es menor, siendo, de todas formas, de miles de equipos.

Dispositivos de ZigBee pueden formar una malla de red entre nodos (**figura 2-100**), permitiendo aumentar comunicación a mayores distancias, creando zonas de mayor cobertura, conformado de tres elementos básicos:

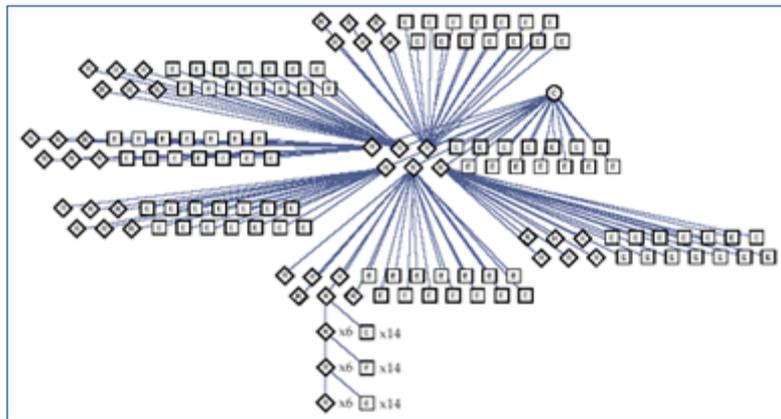


Figura 2-100. Malla de red entre nodos.

Existen dos tipos de dispositivos definidos por el estándar IEEE 802.15.4:

- Dispositivos con funciones completas (FFD)
- Dispositivos con funciones reducidas (RFD)

Los FFDs utilizan cualquier topología y son capaces de comunicarse con cualquier otro dispositivo y pueden ser: coordinador, ruteador o terminal.

Los RFDs están limitados a utilizar la topología estrella, no pueden ser ni coordinadores ni ruteadores, solo son capaces de comunicarse con el coordinador de la red, pueden operar solo como terminales.

El Coordinador.

Es el nodo de la red que tiene la única función de formar una red. Es el responsable de establecer el canal de comunicaciones y del PAN ID (identificador de red) para toda la red. Una vez establecidos estos parámetros, el Coordinador puede formar una red, permitiendo unirse a él a dispositivos Routers y End Points. Una vez formada la red, el Coordinador hace las funciones de Router, esto es, participar en el enrutado de paquetes y ser origen y/o destinatario de información.

Los Routers.

Es un nodo que crea y mantiene información sobre la red para determinar la mejor ruta para enrutar un paquete de información. Lógicamente un router debe unirse a una red Zigbee antes de poder actuar como Router retransmitiendo paquetes de otros routers o de End points.

End Device.

Los dispositivos finales no tienen capacidad de enrutar paquetes. Deben interactuar siempre a través de su nodo padre, ya sea este un Coordinador o un Router, es decir, no puede enviar información directamente a otro end device. Normalmente estos equipos van alimentados a baterías. El consumo es menor al no tener que realizar funciones de enrutamiento.

2.8.2 CARACTERÍSTICAS

- Estándar de comunicación de datos a corto y largo alcance.
- Se basa en el estándar IEEE 802.15.4 para redes de área local.
- Bajo consumo de energía.
- Velocidades de datos de 250 kbps a 2,4 GHz, 40 kbps a 915 MHz, y 20 kbps a 868 MHz.
- Variedad en configuración de topologías: estrella, malla, árbol.
- Protocolo de transferencia de fiabilidad.
- Fácil integración.
- Canal de acceso CSMA-CA.
- Máximo 65.535 nodos por red.

2.8.3 TOPOLOGÍAS DE REDES ZIGBEE

Zigbee permite implementar tres tipos de configuraciones, las cuales se detallan a continuación:

2.8.3.1 Topología ZigBee en estrella

El destino de la información es determinado por el coordinador, el cual se sitúa en el centro, a través de tablas de relaciones, éstas permiten que si, en un momento dado, un nodo del camino falla y se cae, pueda seguir la comunicación entre todos los demás nodos terminales debido a que se rehacen todos los caminos. La gestión de los caminos es tarea del coordinador (**figura 2-101**).



Figura 2-101. Topología Estrella.

2.8.3.2 Topología Zigbee en Árbol (Cluster Tree)

Esta topología consta de un coordinador más una o más configuraciones tipo estrella. Los ruteadores ZigBee extienden el rango de la red permitiendo a los dispositivos terminales unirse a ellos para comunicarse con el coordinador central (**figura 2-102**).

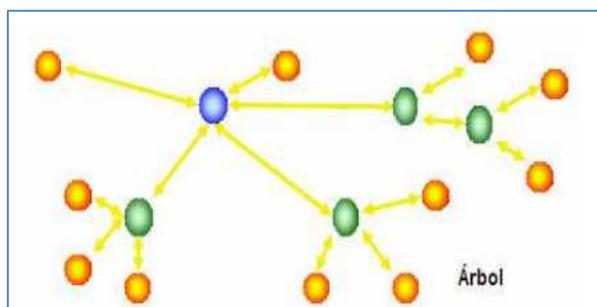


Figura 2-102. Topología en Árbol.

2.8.3.3 Topología ZigBee en Malla

Los FFDs pueden comunicarse directamente, y al menos uno de los nodos tendrá más de dos conexiones, esta topología brinda baja latencia y alta confiabilidad. A cambio, se requiere mayor memoria de programa y datos en un dispositivo para soportarlo (**figura 2-103**).

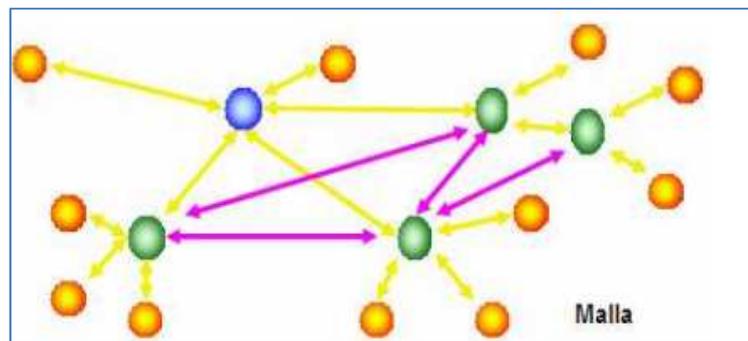


Figura 2-103. Topología en Malla.

2.8.4 CARACTERÍSTICAS DE MODULO EMPLEADO

Se empleó el Xbee 868 por ser uno de los módulos con mayor alcance dentro de la rama de los módulos Zigbee, son módulos de radio frecuencia que trabajan en la banda de 868 mhz con protocolo de comunicación 802.15.4 fabricados por maxstream (**figura 2-104**).



Figura 2-104. Módulo Xbee 868.

Estos módulos Zigbee pueden ser programados a través de una hyperterminal y una interface serial con un max3232 y una serie de comandos llamados at, pero este método es más complicado. Existen dos tipos de interfaces, serial y USB que pueden ser utilizadas para programar los módulos Xbee con un software propietario llamado X-ctu.

Con este software se puede definir de una forma rápida todos los parámetros que se desean modificar en los nuestros módulos.

2.8.4.1 Características técnicas del módulo Xbee 868.

- Tiene un alcance de hasta 25 millas (40 Km), con antena dipolo.
- Alcance de hasta 10 millas (16 Km) con antena dipolo de 13.7dBm.
- Alcance de hasta 1800 pies (550m) sin antena.
- Potencia de transmisión de 1mW a 315mW.
- Interface Serial de datos de 3.3V CMOS UART.
- Configuración con comandos API y AT.
- Banda de Frecuencia de 868 MHz.
- Voltaje de alimentación de 3.0V a 3.6 V.
- Corriente transmitida 500mA (800mA máximo).
- Corriente recibida 65mA.
- Tasa de comunicación serial desde 1200 bps a 250kbps.

2.8.4.2 Configuración del módulo Xbee, mediante software X-CTU.

Para que dichos módulos se comuniquen entre si es necesario programarlos con las características que el usuario requiera, para ello se hace uso de placas exploradoras que son de dos tipos: una con conector USB y otra que posee un conector DB-9, por cuanto si se requiere trabajar con el explorador de conector USB (**Figura 2-105**), es necesaria su previa configuración como puerto serial.

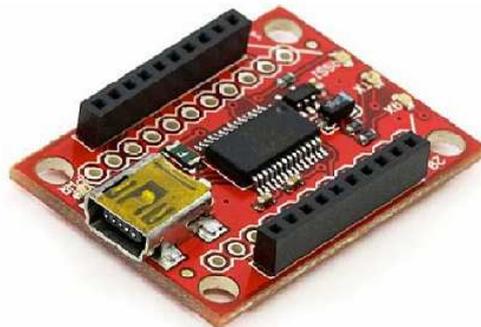


Figura 2-105. Explorador de puerto USB.

Dichas tarjetas convierten los voltajes de RS232 a CMOS y viceversa, permitiendo como primera función la configuración del módulo en parámetros como dirección de destino, de origen, velocidad, canal de comunicación, etc., y además permite la comunicación entre el módulo y el computador.

El puerto serial del explorador USB, posee un circuito integrado MAX232 para el momento de la recepción de datos, acoplar los niveles de voltaje captados por la antena del Módulo XBEE y convertir dichos niveles TTL en niveles RS232, permitiendo así la comunicación con el Computador Central, y viceversa en el momento de transmisión. Es necesario y muy importante tomar en cuenta los parámetros requeridos para realizar la comunicación serial. Los dispositivos involucrados en la comunicación deben poseer las mismas características de comunicación como: baud-rate, bits de datos, paridad, bits de parada y control de flujo. Los módulos provienen desde la fábrica con una velocidad de 9600 bps, por lo que para esta aplicación se configuro a una velocidad de 4800.

Los módulos también provienen de fábrica listos para transmitir y recibir datos, sin embargo es necesario tomar en cuenta que si se aumenta el número de dispositivos en la red, se tendrá que direccionar los módulos para evitar conflictos entre los mismos. Del mismo modo, hay que tomar en cuenta aspectos de seguridad, por cuanto si se requiere un mayor grado de seguridad, es recomendable proporcionar a los módulos direcciones de origen y destino distintas de las de fábrica, así como el canal por el cual se lleva a cabo la comunicación (figura 2-106).

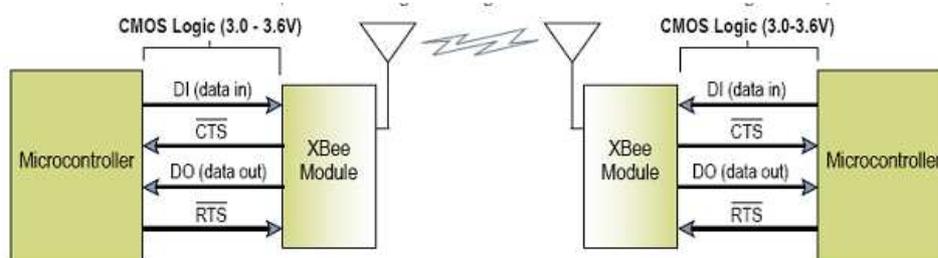


Figura 2-106. Comunicación entre módulos.

Los detalles físicos de los módulos se los puede apreciar en la figura 2- 107

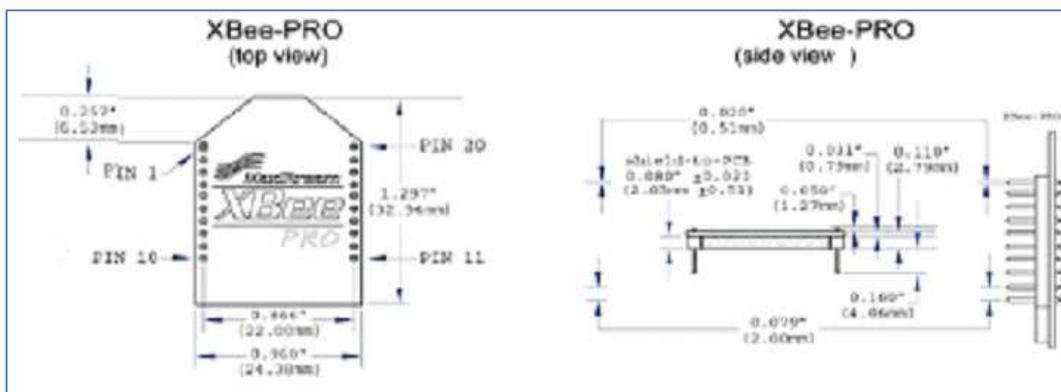


Figura 2-107. Detalles físicos de los Módulos XBEE.

Los pines de conexión se encuentran detallados en la siguiente tabla 2-12 y su hoja de datos en el **Anexo A.9**

Pin #	Name	Direction	Description	Max Voltage
1	Vcc	-	Power supply	3.6V
2	DOUT	Output	UART Data Out	Vcc
3	DIN / CONFIG	Input	UART Data In	5V
4	DIO12*	Either	Digital I/O 12	Vcc
5	RESET	Input/Open drain output	Module Reset (reset pulse must be at least 100 us. This must be driven as an open drain/collector. The module will drive this line low when a reset occurs. This line should never be driven high.)	Vcc
6	PWM0 / RSSI / DIO10*	Either	PWM Output 0 / RX Signal Strength Indicator / Digital IO	Vcc
7	PWM / DIO11*	Either	Digital I/O 11	Vcc
8	[reserved]	-	Do not connect	n/a
9	DTR / SLEEP_RQ* / DIO8*	Either	Pin Sleep Control Line or Digital IO 8	5V
10	GND	-	Ground	0V
11	DIO4* / AD4*	Either	Digital I/O 4	Vcc
12	CTS / DIO7*	Either	Clear-to-Send Flow Control or Digital I/O 7	Vcc
13	ON / SLEEP	Output	Module Status Indicator or Digital I/O 9	Vcc
14	Vref	-	This line must be connected if AD sampling is desired. Must be between 2.6 V and Vcc.	Vcc
15	Associate / DIO5 / AD5*	Either	Associated Indicator, Digital I/O 5	Vcc
16	RTS / DIO6*	Either	Request-to-Send Flow Control, Digital I/O	5V
17	AD3* / DIO3*	Either	Analog Input 3 or Digital I/O 3	Vcc
18	AD2* / DIO2*	Either	Analog Input 2 or Digital I/O 2	Vcc
19	AD1* / DIO1*	Either	Analog Input 1 or Digital I/O 1	Vcc
20	AD0* / DIO0*	Either	Analog Input 0, Digital I/O 0	Vcc

Tabla 2-12. Pines de módulo Xbee 868.

2.8.4.3 Adaptación de voltajes entre transmisión y recepción:

En la placa de control existe el sistema de alimentación de energía, el cual nos entrega una alimentación de 3,3 voltios gracias al uso de un regulador LM1117D.

Cuando el circuito trabaje con el módulo XBEE, es indispensable tomar en cuenta la diferencia de voltaje de 5 voltios con la que trabaja el microcontrolador y los 3.3 voltios que requiere el Módulo, por ello es preciso conocer la conexión directa entre sus pines de transmisión y recepción. Estas conexiones son directas pero es muy importante tomar en cuenta los enlaces de los pines TX/RX del microcontrolador y del Módulo, y por ello se los detalla a continuación:

1. Entre el pin de salida (TX) del microcontrolador, y el pin de entrada (RX) del Módulo, tiene que implementarse necesariamente un divisor de voltaje ya que el nivel de tensión de entrada del Módulo XBEE no debe exceder 3.3 voltios, y cuya implementación se reduce a resistencias conectadas en serie para obtener $2/3$ del voltaje de salida, es decir, los 5 voltios que operan se reducen a 3.3 voltios de entrada hacia el Módulo (**figura 2.108**).

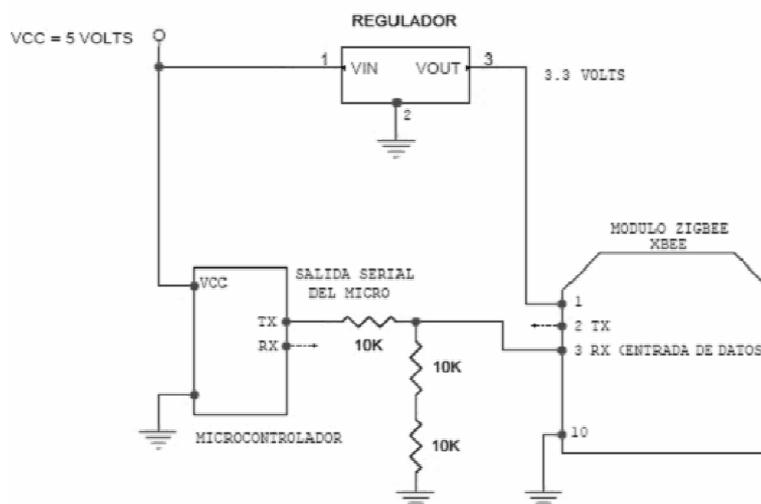


Figura 2-108. Conexión para transmisión de datos hacia microcontrolador.

2. Entre el pin de entrada (RX) del microcontrolador, y el pin de salida (TX) del Módulo, la conexión es directa, sin implementar nada entre los pines, gracias a una de las muchas características que posee el microcontrolador Atmega 164p, respecto al voltaje con que éste puede operar, ya que dicho micro puede trabajar con 5 voltios o con los 3.3 voltios que le entrega el Módulo en el momento de la recepción, por cuanto su conexión es directa en la entrada serial del microcontrolador (**figura 2.109**).

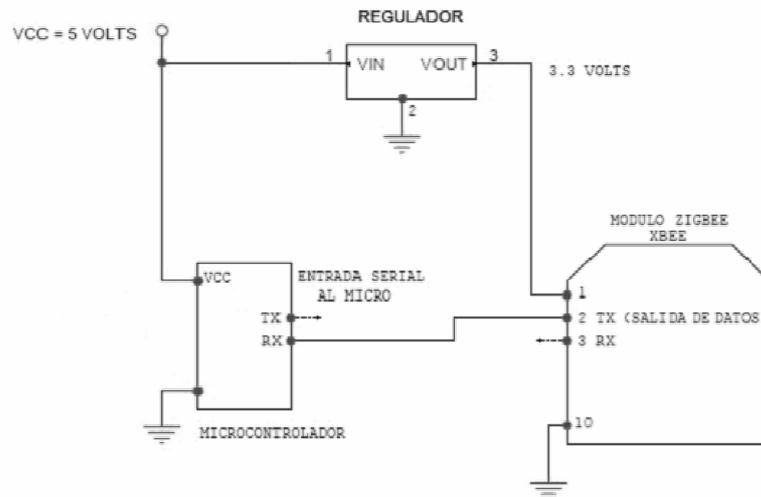


Figura 2-109. Conexión para recepción de datos desde el microcontrolador.

2.8.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE ZIGBEE

2.8.5.1 Ventajas.

- Opera en la banda libre de ISM 2.4 Ghz para conexiones inalámbricas.
- Sistema ideal para conexiones punto a punto y punto a multipunto.
- Permite el direccionamiento y constante actualización de información de la red.
- Óptimo para redes de baja tasa de transferencia de datos.
- Permite hasta 65.000 nodos en una red.
- Puede trabajar en muchas topologías de red: estática, dinámica, estrella y malla.
- Alojamiento de 16 bits a 64 bits de dirección extendida.
- Reduce tiempos de espera en transmisión y recepción de paquetes.
- Al trabajar en cortos periodos, aumenta la duración de la batería.
- Alto porcentaje de seguridad en la red y todas sus conexiones.

2.8.5.2 Desventajas.

- Esta tecnología permite muy baja tasa de transferencia de datos.
- A diferencia de otras tecnologías solo manipula textos pequeños.
- ZigBee no es compatible con Bluetooth debido a no emitir las mismas tasas de transferencia, ni poseer la misma capacidad de soporte para nodos.
- Al ser parte de WPAN, posee poca cobertura al igual que toda red inalámbrica.

2.8.6 ASPECTOS PARA TRASMISIONES INALÁMBRICAS

2.8.6.1 Consideraciones de Distancia de Transmisión

Habitualmente en los dispositivos de transmisión inalámbrica de mediano alcance lo más importante es el alcance o la distancia de las comunicaciones y muchas veces por catálogo se indica la máxima distancia a la que se pueden comunicar un equipo emisor y receptor, los datos que se indican en los catálogos son ciertos, pero se tienen que saber interpretar.

Los datos proporcionados por los fabricantes de alcance máximo RF son siempre bajo ciertas condiciones idóneas. Estas condiciones idóneas son básicamente:

- 1.- Utilización de antenas correctas.** No vale utilizar una antena de 868Mhz para un dispositivo de 2.4Ghz.
- 2.- Ausencia de condiciones climatológicas adversas** (en el caso de comunicaciones outdoor (exteriores)).
- 3.- Visión directa** entre dispositivos radio, es decir, sin obstáculos entre medio.
- 4.- Altura correcta donde se colocarán las antenas** para respetar la primera zona de Fresnel.

2.8.6.1.1 Zonas de Fresnel

Se le llama al volumen de espacio entre emisor y receptor RF de manera que el desfase entre las ondas en dicho volumen no supere los 180° (figura 2-110).

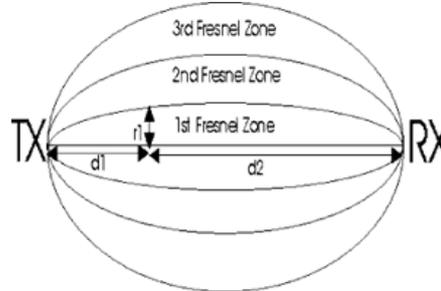


Figura 2-110. Zonas de Fresnel

Es decir, cuando se transmite algo en tierra se tiene rebotes en el suelo. Los rebotes pueden contribuir positivamente a la recepción de la señal en el caso de que lleguen en fase y negativamente si llegan en contrafase.

Fresnel definió una zona que hay que tener en cuenta además de tener, la visibilidad directa entre antenas. Realmente definió una serie de zonas. La zona 1 contribuye positivamente a la propagación de la onda, la segunda negativamente, la tercera positivamente, la cuarta negativamente, y así sucesivamente. Es decir, las impares contribuyen positivamente y las pares negativamente. Además, la primera zona concentra el 50% de la potencia de la señal por lo que debemos procurar que llegue lo más íntegra posible al receptor.

Para conseguir el máximo alcance entre los dispositivos se debe mantener despejado, al menos, el **80% de la primera zona de Fresnel**, tal como indica la figura 2-111.

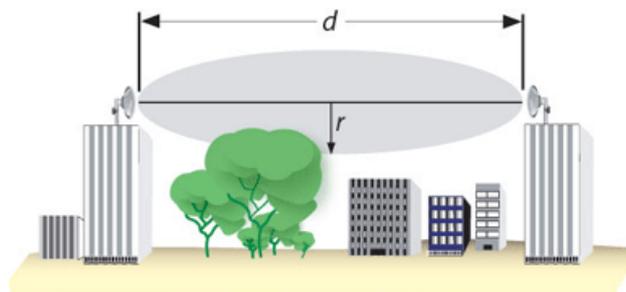


Figura 2-111. Zonas de Fresnel.

En color gris se representa a la primera zona de fresnel. Es decir para conseguir comunicarnos a una **distancia D** con una señal portadora de **frecuencia f**, debemos conseguir que la altura **r de la primera zona de Fresnel** (o al menos el 80% de r) esté libre de obstáculos.

Para conseguir no entorpecer al menos el 80% de la primera zona de fresnel y conseguir el máximo alcance, es necesario que el parámetro r cumpla con la siguiente formula:

$$r = 17.32x \sqrt{\frac{D}{4f}}$$

Dónde:

D: Distancia en Kilómetros

r : Distancia en metros

f: Frecuencia en Ghz

Pues si aplicamos la fórmula antes mencionada y el fabricante dice que la distancia máxima de su dispositivo que trabaja por ejemplo a 2.4Ghz es de:

- **300 metros**, implica que las antenas tienen que estar por lo menos a **2.45 metros de altura** respecto al suelo.
- **1.6 kilómetros**, implica que las antenas tienen que estar por lo menos a **5.65 metros de altura** respecto al suelo.
- **8 kilómetros**, implica que las antenas tienen que estar por lo menos a **12.64 metros de altura** respecto al suelo.
- **16 kilómetros**, implica que las antenas tienen que estar por lo menos a **17.88 metros de altura** respecto al suelo.

2.9 FUENTES DE ENERGÍA

2.9.1 INTRODUCCIÓN

Las fuentes de energía ocupadas en el sistema de apuntamiento de antenas, prácticamente están divididas en dos secciones, la alimentación para la estación fija y la alimentación para la estación móvil. Su diferencia radica en que la primera depende de la red eléctrica mientras que la estación móvil depende de un banco de baterías que se encuentran sobre la plataforma de gran altitud.

2.9.2 ALIMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN FIJA

Para alimentar al sistema de apuntamiento ubicado en la estación de tierra, se utiliza una fuente conmutada 120 (Vac) a 12 (Vdc) con la capacidad de entregar hasta 5 (A), cuyas características técnicas se encuentran en el **Anexo A.10**. En la figura 2-112 se muestra la fuente conmutada 120(Vac) a 12(Vdc).



Figura 2-112. Fuente conmutada de 120(Vac) a 12(Vdc) para 5 amperios como carga máxima.

Para el correcto funcionamiento de los componentes electrónicos que conforman el sistema de la estación fija, es necesario obtener de algunos voltajes respecto de tierra. Estos voltajes son de 5 (Vdc) y 3 (Vdc), los mismos que se pueden obtener a partir de reguladores de voltaje como el LM7805 para la obtención de los 5 (Vdc) y el regulador LM1117 para los 3 (Vdc).

Es necesaria la colocación de filtros para la eliminación de la EMI (Interferencia Electromagnética), introducida en la red y para la variación brusca de voltaje. Para ello se ocupa un arreglo de capacitores colocados antes y después de cada uno de los reguladores de voltaje y en la polarización de cada uno de los circuitos integrados. Con este arreglo se puede obtener voltajes estables y garantizar el buen funcionamiento de todos los componentes electrónicos.

En el **Anexo A.11** se muestra el diagrama circuital de los filtros ocupados en los reguladores de voltaje para la alimentación de la circuitería de la estación fija, así como también sus respectivos diagramas de ruteado.

2.9.3 ALIMENTACIÓN DE LA ESTACIÓN MÓVIL

Para la alimentación de la estación móvil se emplearon tarjetas electrónicas similares a las que se ocuparon en la estación fija, cuyos diagramas circuitales y de ruteo se muestran en el **Anexo A.12**. La diferencia radica que la alimentación para todos los componentes se obtiene a partir de un banco de baterías de Polímero de Litio de 11.1 (Vdc), con una corriente de entrega de 2100 (mAh) (**figura 2-113**).



Figura 2-113. Batería de Polímero de Litio 2100 mAh 11.1 V, ocupada en sistema de apuntamiento móvil.

Para realizar las pruebas de la estación móvil se necesitó de una fuente regulada como la de la figura 2-109. El objetivo de esta fuente es suministrar de energía eléctrica a todo el sistema para sus respectivos ensayos, y a la vez realizar la carga de la batería de polímero de litio.

En caso de que la estación salga al campo de trabajo, se interrumpe el funcionamiento de la fuente conmutada a través del interruptor S1 en la posición

off, y de esta manera permitir el funcionamiento del sistema a través de las baterías. Su diagrama circuital se muestra en la figura 2-114.

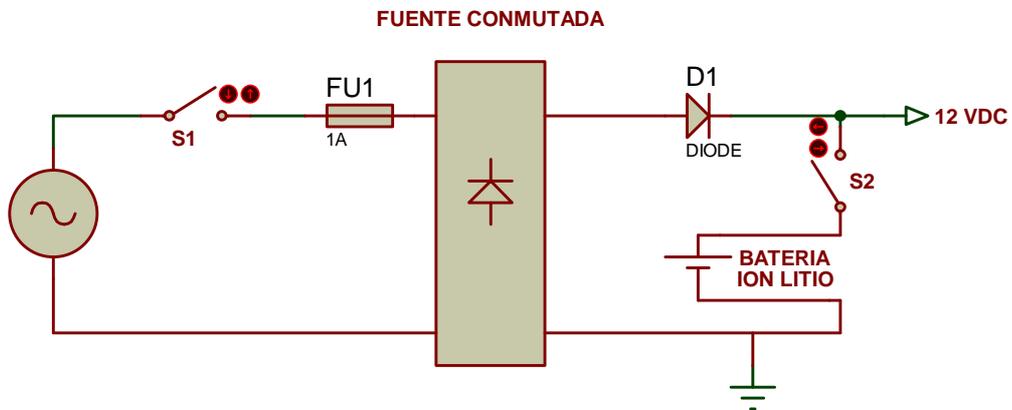


Figura 2-114. Diagrama circuital para conectar el sistema de apuntamiento móvil a la red eléctrica y batería.

El diodo D1 permite que la corriente entregada por la batería no regrese hacia la fuente conmutada. Los interruptores S1 y S2 en la posición de off se encargan de apagar todo el sistema. Además el banco de baterías tiene la suficiente potencia para mantener energizado a la terminal móvil durante varias horas.

2.10 SISTEMA FINAL

El sistema final consta de la estación fija y la estación móvil con sus estructuras y tableros de control, los cuales son detallados a continuación:

El sistema final de la estación fija armado con todos los circuitos anteriormente descritos, se los puede ver en la figura 2-115.



Figura 2-115. Sistema de estación Fija.

Para la estación fija se tiene un panel de control conformado por su sistema de alimentación de energía, placa de adquisición de señales, placa de control de servomotores, y el selector de encendido y apagado del sistema (**figura 2-2116**).

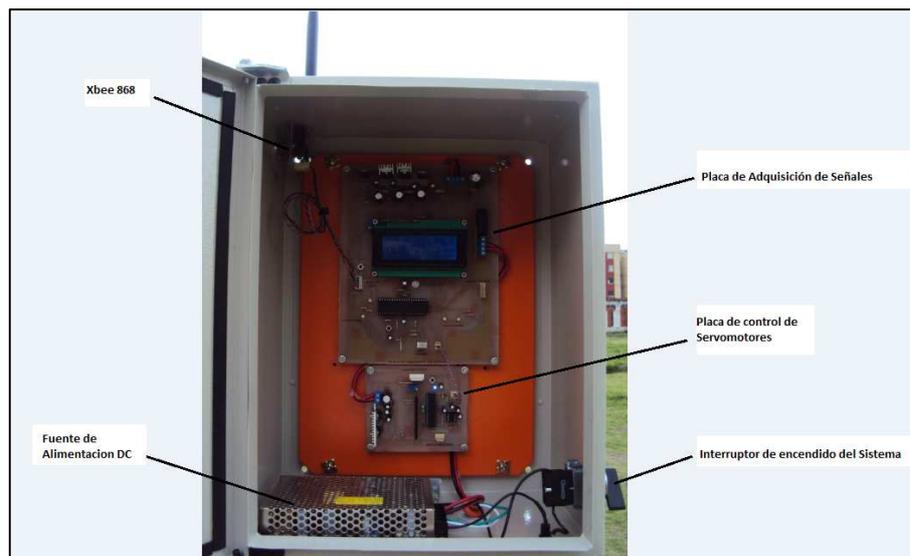


Figura 2-116. Tablero de control de estación Fija.

Una descripción completa del funcionamiento del sistema de estación fija se puede encontrar en el manual de usuario (**Anexo A.13**), además de su código de programa (**Ver Anexo A.14**).

De la misma forma se tiene el sistema para la estación móvil completamente armado y constituido de los circuitos antes detallados, el cual se lo indica en la figura 2-117.



Figura 2-117. Sistema de estación móvil.

Para la estación Móvil se tiene un panel de control conformado por su sistema de alimentación de energía, batería de polímero de litio, placa de adquisición de señales, placa de control de servomecanismo, altímetro digital, sensor de presión, y selectores de encendido y apagado del sistema (**figura 2-2116**).

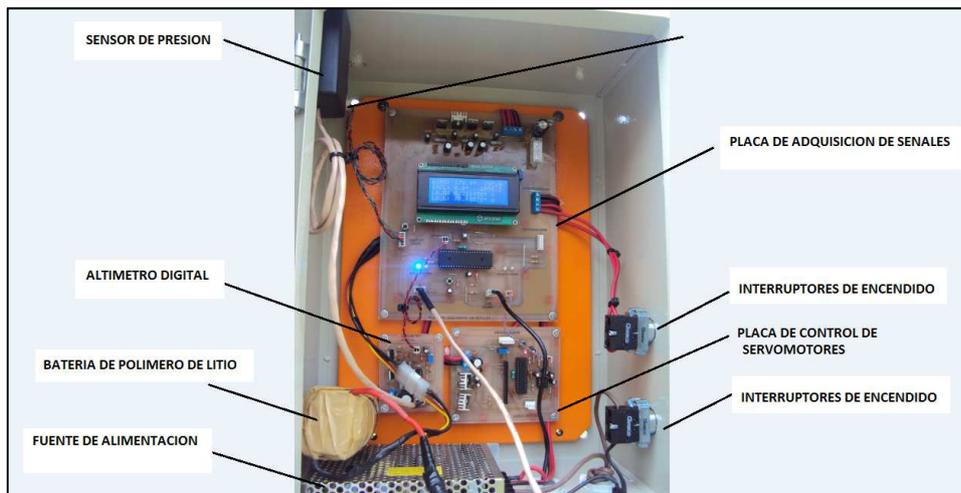


Figura 2-118. Tablero de control de estación móvil.

Una descripción completa del funcionamiento del sistema de estación móvil se puede encontrar en el manual de usuario (**Anexo A.15**), además del código de programa para la estación móvil (**Ver Anexo A.16**).

Su estructura mecánica cuenta con un soporte, el cual permite el montaje de la antena así como también el sistema de brújula digital sobre toda la estructura.



Figura 2-119. Sistema de brújula digital.

El sistema final ya armado y que incluye todos los circuitos anteriormente descritos, se los puede ver en la figura 2-120:



Figura 2-120. Sistema final: se puede apreciar tanto la antena transmisora como la receptora con sus respectivos sistemas de control.

CAPÍTULO 3: PRUEBAS Y RESULTADOS

CAPÍTULO 3: PRUEBAS Y RESULTADOS

Dentro de las pruebas realizadas se detallan las siguientes:

- Prueba del Sistema de Posicionamiento GPS
- Prueba de Altímetro Digital
- Prueba de Trasmisión inalámbrica Zigbee
- Prueba de Orientación Magnética
- Prueba de movimiento azimut y elevación de la estación fija y Móvil

3.1 PRUEBA DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GPS

La prueba del sistema de posicionamiento consistió en utilizar cada uno de los GPS's, para realizar la medición de latitud y longitud geográfica utilizando un punto de referencia y desplazarse una distancia respecto a dicho punto.

Se consideró distancias de 40 metros con intervalos de 10 metros, desplazándose desde el punto de partida hacia el norte y el sur para ver el error de latitud, y hacia el este y oeste para obtener el error de longitud (**figura 3.1**).

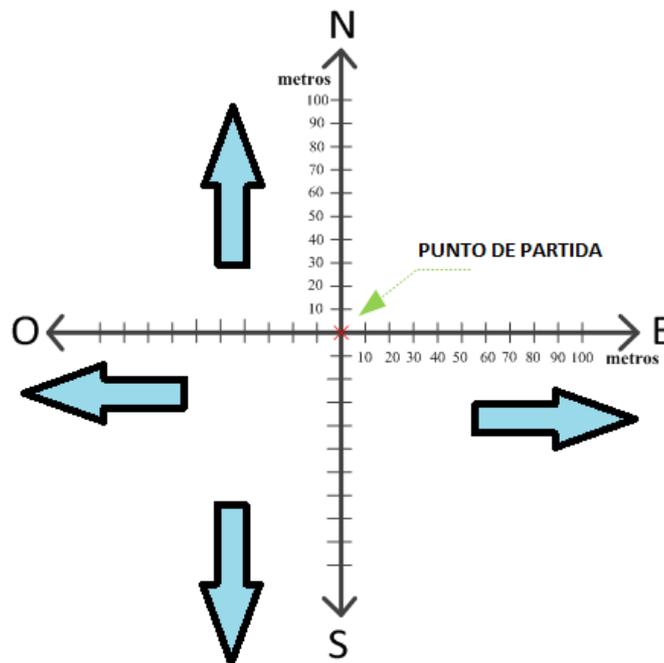


Figura 3-1. Prueba de Posicionamiento de latitud y longitud.

En la Tabla 3-1 y 3-2 se detalla los datos obtenidos de la variación de latitud y longitud con el cálculo del error.

PUNTOS DE REFERENCIA (METROS)	LONGITUD (GRADOS)	VALOR EN METROS LONGITUD (METROS)	ERROR EN LATITUD
10 METROS ESTE DEL CENTRO	78,48892118	10,28	2,79%
20 METROS ESTE DEL CENTRO	78,48883820	19,50	-2,50%
30 METROS ESTE DEL CENTRO	78,48873664	30,79	2,62%
40 METROS ESTE DEL CENTRO	78,48863820	41,73	4,32%
CENTRO	78,48901367	0,00	0,00%
10 METROS OESTE DEL CENTRO	78,48911210	10,94	9,38%
20 METROS OESTE DEL CENTRO	78,48920204	20,93	4,67%
30 METROS OESTE DEL CENTRO	78,48929104	30,82	2,75%
40 METROS OESTE DEL CENTRO	78,48938136	40,86	2,15%
		ERROR DE MEDICION DE LONGITUD	2,91%

Tabla 3-1. Tabla de variación de longitud.

PUNTOS DE REFERENCIA (METROS)	LATITUD (GRADOS)	VALOR EN METROS LATITUD (METROS)	ERROR EN LATITUD
40 METROS AL NORTE DEL CENTRO	0,211534974	39,88	-0,29%
30 METROS NORTE DEL CENTRO	0,211619910	30,43	1,43%
20 METROS NORTE DEL CENTRO	0,211709912	20,41	2,05%
10 METROS NORTE DEL CENTRO	0,211799917	10,39	3,91%
CENTRO	0,211893257	0,00	0,00%
10 METROS SUR DEL CENTRO	0,211989223	10,68	6,83%
20 METROS SUR DEL CENTRO	0,212079211	20,70	3,50%
30 METROS SUR DEL CENTRO	0,212170570	30,87	2,90%
40 METROS SUR DEL CENTRO	0,212259257	40,74	1,86%
		ERROR DE MEDICION DE LATITUD	2,46%

Tabla 3-2. Tabla de variación de latitud.

La medición se realizó para cada uno de los GPS`s, por tres veces consecutivas. Cabe recalcar que el GPS empleado en las pruebas es de uso comercial, y dicho error frente a largas distancias entre los dos puntos no causaría mayor dificultad para los cálculos respectivos de posicionamiento

3.2 PRUEBA DE ALTÍMETRO DIGITAL

A inicios del proyecto se utilizaba el dato de altura entregado por el GPS, pero se observó que existe una variación brusca de aproximadamente 20 metros con un intervalo de tiempo de 3 minutos, razón por la cual se decidió implementar un sistema que permita mantener constante la altura en un determinado punto y que no sufra variaciones bruscas de altura.

Se utilizó un altímetro digital, cuyo principio de funcionamiento está basado en la medición de la presión atmosférica, cuya resolución mínima es de 4 metros.

Las pruebas de altura se realizaron en las inmediaciones del edificio de ingeniería eléctrica de la escuela, midiendo la altura en cada uno de los pisos por 3 veces consecutivas. La tabla 3.3 indica las lecturas obtenidas en tres eventos diferentes para cada uno de los pisos.

PISOS	EVENTOS	ALTURA	ERROR EN ALTIMETRO	PATRON DE MEDIDA
PISO 1	EVENTO 1	2835,07	0,00%	
	EVENTO 2	2837	0,07%	2835,0
	EVENTO 3	2831,21	-0,13%	
PISO 2	EVENTO 1	2840,85	0,03%	
	EVENTO 2	2842,78	0,10%	2840,0
	EVENTO 3	2836,99	-0,11%	
PISO 3	EVENTO 1	2844,7	-0,01%	
	EVENTO 2	2846,63	0,06%	2845,0
	EVENTO 3	2840,84	-0,15%	
PISO 4	EVENTO 1	2848,55	-0,05%	
	EVENTO 2	2850,48	0,02%	2850,0
	EVENTO 3	2844,69	-0,19%	
PISO 5	EVENTO 1	2852,41	-0,09%	
	EVENTO 2	2854,34	-0,02%	2855,0
	EVENTO 3	2848,55	-0,23%	
PISO 6	EVENTO 1	2856,27	-0,13%	
	EVENTO 2	2858,2	-0,06%	2860,0
	EVENTO 3	2852,41	-0,27%	
PISO 7	EVENTO 1	2862,06	-0,10%	
	EVENTO 2	2863,99	-0,04%	2865,0
	EVENTO 3	2858,2	-0,24%	
	ERROR DE ALTIMETRO		-0,07%	

Tabla 3-3. Medición de la altura con el altímetro en cada uno de los pisos.

3.3 PRUEBA DE TRASMISIÓN INALÁMBRICA ZIGBEE

Como medio de comunicación inalámbrica inicial se utilizó módulos de transmisión inalámbrica marca Sure, cuyas características en su alcance no satisfacen para el sistema de apuntamiento. Con este tipo de módulo inalámbrico, se obtuvo una distancia de comunicación máxima de 200 metros y sobre este valor se comienza a perder el enlace de comunicación. Por esta razón se decidió adquirir otro medio de comunicación inalámbrica de mayor alcance, por lo se adquirió los módulos Xbee 868, logrando un alcance sobre los 1000 metros de distancia en línea de vista.

De igual forma se realizaron algunas pruebas para la transición y recepción de los datos, tomando un punto de referencia destinado para el sistema de apuntamiento fijo y desplazando el sistema de apuntamiento móvil en línea de vista hasta cuando se pierda el enlace de comunicación. La tabla 3.3 indica la distancia en la cual la trasmisión y recepción se pierde en su totalidad.

Distancia (m)	Trasmisión 1 h(m)	Trasmisión 2 h(m)
100	✓	✓
200	✓	✓
300	✓	✓
400	✓	✓
500	✓	✓
600	✓	✓
700	✓	✓
800	✓	✓
900	✓	✓
1000	✓	✓
1100	✗	✓
1200	✗	✗

Tabla 3-4. Tabla de pruebas de alcance de módulos Zigbee.

En la Figura 3-3 se indica los datos que llegan a la estación móvil vía inalámbrica, para poder ser extraídos e interpretados por el microcontrolador.



Figura 3-2. Recepción de datos Vía inalámbrica.

3.4 PRUEBA DE ORIENTACIÓN MAGNÉTICA

Para la compensación del movimiento de rotación en el sistema de apuntamiento móvil se utilizó una brújula digital, cuyas pruebas de orientación se realizó en un espacio amplio donde no exista la generación de campos magnéticos ni electromagnéticos proveniente de fuentes de alimentación y dispositivos electrónicos que se encuentran a su alrededor. Para las pruebas de orientación se utilizó una brújula de referencia análoga de muy buena precisión (**figura 3.3**).



Figura 3-3. Brújula Analógica para proceso de calibración.

A la brújula analógica se le ubico en diferentes posiciones respecto al norte magnético y una vez calibrada la brújula digital se comenzó a ubicarla en la misma posición de la brújula análoga y por medio del LCD se realizó un programa para que nos permita ver la lectura de la brújula digital.

La tabla 3-5 indica los valores de lectura de la brújula digital y de la analógica para algunas posiciones.

GRADOS DE BRÚJULA ANALÓGICA	GRADOS DE BRÚJULA DIGITAL	ERROR
10	9,88	-1,2%
20	19,76	-1,2%
30	29,65	-1,2%
40	39,53	-1,2%
45	45,18	0,4%
90	90,35	0,4%
135	135,53	0,4%
180	180,71	0,4%
225	224,47	-0,2%
270	269,65	-0,1%
315	314,82	-0,1%
360	360,00	0,0%
ERROR DE BRUJULA DIGITAL		-0,30%

Tabla 3-5. Variación de brújula digital.

3.5 PRUEBA DE MOVIMIENTO AZIMUT Y DE ELEVACIÓN DE ESTACIÓN FIJA Y MÓVIL.

3.5.1 PRIMERA PRUEBA

Esta prueba se realizó en los patios de la Escuela Politécnica Nacional con la estación fija y un equipo móvil que emula al globo y que comprende de un GPS y del circuito de transmisión inalámbrica (**figura 3-4**).

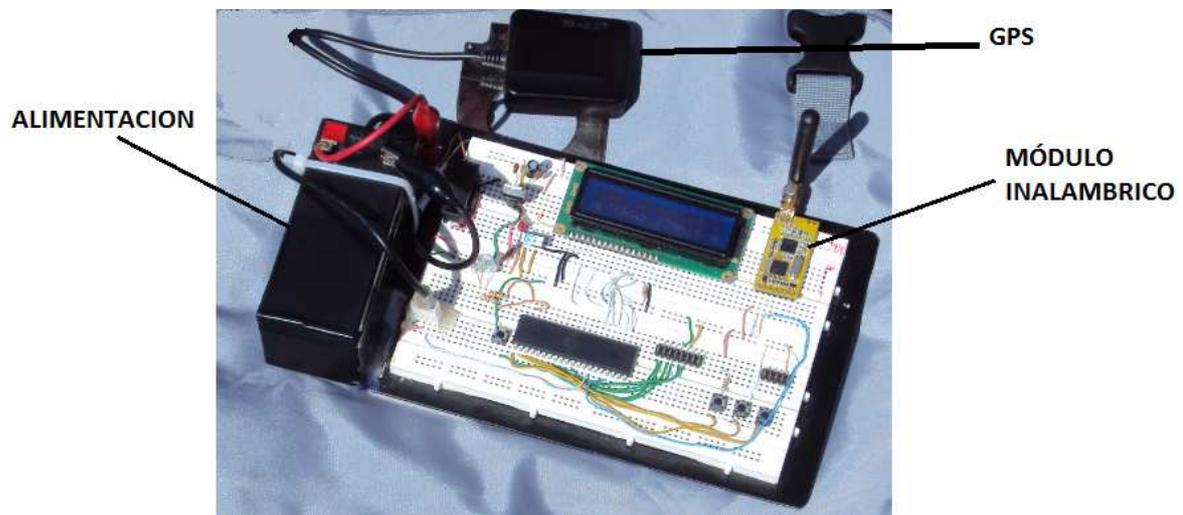


Figura 3-4. Sistema de simulación de Estación Móvil.

La intención de esta prueba es el seguimiento por parte de la antena fija a la antena del equipo móvil, con el fin de ver el desplazamiento de la antena en todo su rango que comprende de 0° a 360° .

Se observó que la actualización en la comunicación de los datos es constante y a medida que nos acercamos a la estación fija el sistema comienza a fallar esto se debe a el error presente en el GPS ubicado en la estación de simulación móvil este error es aproximadamente de 5 a 8 m.

3.5.2 SEGUNDA PRUEBA

La segunda prueba consiste en determinar el error que existe ubicando el sistema de simulación móvil en un mismo punto fijo por varias ocasiones tras un tiempo determinado, para poder obtener el error de posición.

Para ello se ubicó el equipo en un punto cuya latitud es 0,211893257° SUR y longitud de 78,489013671° OESTE (Centro del estadio de la Escuela Politécnica Nacional), y tras intervalos de tiempo de media hora por 5 horas consecutivas se obtuvo la variación de los mismos tal como se indica en la Tabla 3-6.

TIEMPO	LATITUD (GRADOS)	VALOR EN METROS DE LATITUD (metros)		LONGITUD (GRADOS)	VALOR EN METROS LONGITUD (metros)
08h00	0,211893257	0,00		78,489013671	0,00
08h30	0,211899194	0,66		78,489017910	0,47
09h00	0,211910325	1,90		78,489018671	0,56
09h30	0,211909122	1,77		78,489023687	1,11
10h00	0,211930251	4,12		78,489023646	1,11
10h30	0,211943258	5,57		78,489038684	2,78
11h00	0,211932923	4,42		78,489042580	3,21
11h30	0,211936101	4,77		78,489057295	4,85
12h00	0,211931103	4,21		78,489063652	5,55
VARIACION DE LATITUD (metros)		3,05		VARIACION DE LONGITUD (metros)	2,18

Tabla 3-6. Variación de coordenada geográfica en un punto fijo .

Con los datos de la tabla se puede establecer su error de posición que es aproximadamente 3,05 metros para la latitud y de 2,18 metros para la longitud.

3.5.3 TERCERA PRUEBA

Esta prueba se realizó en el centro de investigación de la FAE con el fin de determinar la distancia de enlace y la velocidad de posicionamiento entre el

equipo de simulación y la estación fija; para lo cual se ubicó el sistema de simulación móvil en un vehículo y se comenzó a alejar de la estación fija, se determinó que la distancia máxima de enlace en línea de vista es aproximadamente de 200m y la actualización de los datos entre la estación móvil y fija en movimiento circular con un radio de 200m es de un 100% para velocidades menores a 40K/h, para velocidades mayores el sistema sufre un retraso debido a la actualización de los datos, y en el sistema mecánico **(figura 3-5)**.



Figura 3-5. Seguimiento de estación Fija a Móvil.

3.5.4 CUARTA PRUEBA

De igual manera esta prueba se desarrolló en el centro de investigación de la FAE, para determinar el ángulo de inclinación entre la estación fija y el equipo de simulación para lo cual se ubicó el equipo de simulación en un globo de helio y determinar el ángulo de inclinación por parte de la estación fija **(figura 3-6)**.



Figura 3-6. Inclinación de estación Fija.

Colocando la estación fija en un punto determinado y a una distancia de aproximadamente 50 metros se colocó el sistema de transmisión móvil para ir elevándolo poco a poco hasta llegar a una altura de 200 metros. Se observó el exacto seguimiento por parte del sistema de apuntamiento fijo hacia el globo.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

Tanto para el sistema fijo como para el móvil, se tiene que esperar un tiempo 5 minutos que se lo denomina de calibración, para que se pueda estabilizar los sistemas de GPS y el sensor de presión. En el caso de los GPS's, este retardo de tiempo se debe a la actualización de los datos que llegan desde los satélites artificiales.

El error de posición obtenido en las pruebas del sistema de apuntamiento fijo existe por la utilización de un GPS de tipo comercial, es decir que no es muy exacto. Otra causa que puede establecerse a la variación de la latitud y longitud es la conexión entre los satélites artificiales y el GPS para un determinado punto de ubicación y al tiempo que se demora en actualizar los datos entre el GPS y los satélites artificiales.

La altura obtenida por el sensor de presión varía debido a que la presión atmosférica cambia con el transcurso del tiempo; esto no es inconveniente para los sistemas ya que trabajan con altura referencial es decir que ambos equipos tienen la misma altura en el momento de iniciar el apuntamiento.

El compás Magnético o brújula digital nos entrega una variación con una exactitud de 1 grado, pero al realizar una mala calibración, esta es alterada y puede llegar a un error de 4 grados de desplazamiento.

La utilización del sistema de transmisión inalámbrica Zigbee optimiza el consumo de energía y su largo alcance entre una distancia punto - punto de 1km en la transmisión de datos, además de la facilidad de crear un sistema de red entre ellos.

Un aspecto principal en la estructura mecánica fue la optimización del peso, logrando obtener un peso de 4 kilogramos en la estructura; al estar construida de aluminio, además de su facilidad de transportación e instalación.

El consumo de energía en la estación móvil fue minimizado, debido a que se empleó sistemas de bajo consumo, como los servomotores y la transmisión inalámbrica, logrando un sistema de respaldo de 7 horas de forma continua.

Los dos grados de libertad que posee la estructura, son suficientes para mantener el enlace entre la estación fija y móvil. Esto se debe a la instrumentación electrónica implementada que refuerza en la compensación de giros o variaciones bruscas de la nave.

4.2 RECOMENDACIONES

Para disminuir el error de lectura por parte de los sistemas de posicionamiento global GPS's se recomienda utilizar equipos más exactos utilizados en el área militar, o aeronáutica, dichos sistemas tiene un margen de error de aproximadamente 45 cm.

También puede existir el caso de que el GPS puede desconectarse con los satélites debido a que puede existir mucha nubosidad o se encuentre en lugares en los cuales la señal de recepción no puede llegar con facilidad. Por ejemplo árboles o en medio de edificios, etc. Para tratar de reducir este error se recomienda utilizar un GPS de mayor exactitud. Este error se vuelve despreciable a medida que la nave se aleja de la estación de tierra.

Una de las limitaciones en la utilización de los sistemas GPS, es que su funcionamiento debe realizarse en exteriores, es decir en espacios físicos amplios para facilitar en enlace con los satélites artificiales, en caso de no existir el enlace el sistema no funcionara.

En la transmisión de los datos por parte de los módulos Zigbee, hay que considerar el tipo de antena que se esté ocupando para la transmisión y recepción. Estas antenas tienen que ser del tipo dipolo de 2.4Ghz para el receptor y una antena mono polar de 2.4Ghz para la transmisión.

Para aumentar la distancia de comunicación entre los dos módulos se recomienda que se encuentren en línea de vista y tomar muy en cuenta el fenómeno de la zona de Fresnel.

En el caso de realizar mediciones con la brújula electrónica hay que tomar muy en cuenta que los campos magnéticos y de origen electromagnético pueden perturbar la medición real de la brújula por esta razón se colocó la brújula lo más

alejado posible de la estructura del sistema móvil. En el caso de que la brújula se encontrara inmersa en campo magnético de gran intensidad se puede correr el riesgo que se descalibre, o más aun el dispositivo puede llegar a dañarse.

Para obtener un sistema de apuntamiento más exacto, es decir un control más fino entre ambos sistemas; es realizar una realimentación de la potencia de transmisión y recepción de los equipos de comunicación y el sistema de apuntamiento, con ello se lograría mejorar de manera exacta su apuntamiento y a la vez aumentar o disminuir la potencia de transmisión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R&M International Consulting Group Ltd Engineering, Regulation & Business, “Estudio de Nuevas Tecnologías (WIMAX, FSO, HAPS y UWB),” Septiembre 2004.
- [2] Proyecto fondef - Chile, “Aeroplataforma globo antenna como base de un sistema de comunicación digital para redes inalámbricas”.
- [3] Alejandro Aragón Zabala, “High-Altitude Platforms for Wireless Communications”, John Wiley & Sons, Ltd. 2008.
- [4] D. Grace, et all, “CAPANINA – Communications from Aerial Platform Networks Delivering Broadband Information for All”
- [5] Frank J. Blatt, “Fundamentos de Física”, tercera edición, México, 1991.
- [6] KatsuikoOgata, “Ingeniería de control moderna”, tercera edición, México, 1995.
- [7] W. Bolton, “Sistemas de control electrónico en ingeniería mecánica y eléctrica”, segunda edición.
- [8] Charles K. Alexander, Matthew N. Sadiku, “Fundamentos de circuitos eléctricos”, tercera edición, México, 2006.
- [9] Robert F. Coughlin, “Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales”, segunda edición, México, 1993
- [10] Cekit, “Electrónica industrial”, Colombia, Vol. 10-20, 1992.
- [11] Antonio Creus Solé, “Instrumentación Industrial”, sexta edición, Barcelona España, 1997

[12] Enrique Laurent Quirós, “Optimización de sistemas de inyección de gasolina”, Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2007.

[13] Wikipedia, “Presión Atmosférica”, http://es.wikipedia.org/wiki/Presi%C3%B3n_atmosf%C3%A9rica
Clubcierzo, “manuales”, <http://www.clubcierzo.com/Mauales/Entendiendo%20los%20diferentes%20servos%20RC.pdf>.

[14] Wikipedia, “Coordenadas Geográficas”, http://es.wikipedia.org/wiki/Coordenadas_geogr%C3%A1ficas.

[15] Pablo, barómetro y altímetro digital, <http://personales.ya.com/perropinto/robotidus/altimetro.htm>.

[16] Ciencias de la tierra, Medio ambiente, <http://www.tecnun.es/asignaturas/Ecologia/Hipertexto/03AtmHidr/110Atmosf.htm>.

[17] Tu tiempo, formulas por aquí formulas por allá, http://www.tutiempo.net/silvia_larocca/Temas/ecuaciones.htm

[18] Garmin, “Wide Area Augmentation System WAAS”, Mayo 2011, <http://www8.garmin.com/aboutGPS/waas.html>

[19] NAVSTAR GPS Operations. “USNONAVSTAR Global Positioning System”. US Naval Observatory Home Page. <http://tycho.usno.navy.mil/gpsinfo.html>.

[20] Digi Solution, Solutions in wireless communication, <http://www.digi.com/>