



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

**“ANÁLISIS, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UNA SOLUCIÓN
TECNOLÓGICA QUE PERMITA LA SUAVIZACIÓN Y AUMENTO DE LA
RESOLUCIÓN DE LOS DATOS GENERADOS POR LA PLATAFORMA
INERCIAL COMERCIAL PLFOG EN LOS SISTEMAS DE ARMAS DE LAS
CORBETAS CLASE “ESMERALDAS””**

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO EN COMPUTACIÓN
ESPECIALIZACIÓN SISTEMAS TECNOLÓGICOS

Presentado por:

JULIO RAFAEL ARÁUZ MANCILLA

Guayaquil-Ecuador

2008

AGRADECIMIENTO

A todos mis compañeros y amigos de la
DINDES cuyo apoyo es parte del trabajo
aquí expuesto.

DEDICATORIA

Dedicada al amor incondicional de mi familia. Padre, madre y hermano. Julio, Delfa y Edison.

“Noche dieque incubando”

(Día y noche dándole vueltas)

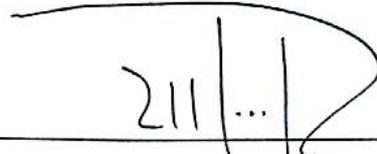
Sir Isaac Newton

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Ing. Holger Cevallos U.

Presidente del Tribunal



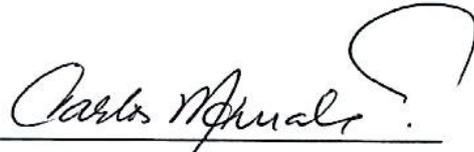
Ing. Marcelo Looz R.

Director de Tesis



Ing. César Martín M.

Vocal Principal



Ing. Carlos Monsalve A.

Vocal Principal

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”.

Art. 12 del Reglamento de Graduación

Julio Rafael Aráuz Mancilla

RESUMEN

La Dirección de Investigación y Desarrollo Naval de la Armada del Ecuador tiene la intención de reemplazar las plataformas inerciales militares de sus unidades navales.

Los buques de guerra necesitan saber en todo momento su posición respecto al plano horizontal para poder estabilizar y controlar sus radares y armas. El sensor que permite obtener los datos de actitud del buque es la plataforma inercial. Debido al elevado costo de las plataformas inerciales militares, se desea utilizar una plataforma comercial a una fracción del costo de las militares. Las diferencias fundamentales entre estos dos tipos de plataformas son la resolución y la precisión de sus datos.

Las plataformas inerciales comerciales que se intentan adaptar, no cuentan con la resolución adecuada para sus sistemas de armas, por lo que se necesita que sus lecturas sean suaves y aumentar su resolución.

La solución consta de dos componentes principales: un filtro pasa bajo dimensionado respecto al ruido producido en el buque y a las señales analógicas de la plataforma PLFOG; y un módulo de software de procesamiento de señales que suaviza e incrementa la resolución de los

datos de actitud mediante métodos matemáticos de predicción, y que a su vez transmite dicha información en señal sincrónica a los sistemas de armas del buque.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VIII
ABREVIATURAS	XIV
INDICE DE FIGURAS	XVII
INDICE DE TABLAS	XXII
INTRODUCCION	XXIV
CAPITULO 1	
1. CONCEPTOS GENERALES DE LOS SISTEMAS A BORDO DE LAS CORBETAS CLASE “ESMERALDAS”	1
1.1. Sistema NA-21	2
1.1.1. Componentes del Sistema NA-21	3
1.2. Importancia de los Sensores	6
1.3. Datos de Actitud	8
1.4. Tecnologías en Sistemas de Navegación Inerciales	10
1.4.1. Plataformas Inerciales de Giróscopos	10
1.4.2. Plataformas de Fibra Óptica	12
1.4.3. Plataformas de Anillo Láser	14
1.5. Sistema Litef PL41	16
1.5.1. Especificaciones Técnicas	17
1.6. Sistema OceanTools FOG OTG-64	17

1.6.1. Especificaciones Técnicas	18
1.6.2. Componentes del Sistema	18
1.6.3. Interfaces de Salida	20
1.7. Necesidad de Adaptación	20
1.7.1. Antecedentes	20
1.7.2. Consideraciones de Cambio	21
CAPITULO 2	
2. ARQUITECTURA Y DISEÑO DEL SISTEMA PROPUESTO	24
2.1. Alcance del Sistema	25
2.2. Requerimientos Funcionales del Sistema	25
2.3. Requerimientos Suplementarios del Sistema	27
2.4. Especificación de Interfaces	27
2.4.1. Interfaz IF-HERMES-01	30
2.4.2. Interfaz IF-HERMES-02	32
2.4.3. Interfaz IF-HERMES-03	32
2.4.4. Interfaz IF-HERMES-04	33
2.4.5. Interfaz IF-HERMES-05	34
2.5. Arquitectura del Sistema	34
2.6. Plataforma de Despliegue	36
2.6.1. Hardware	36
2.6.2. Software	37
2.6.3. Determinismo	38

2.7. Componentes del Sistema	38
2.8. Decisiones Generales de Diseño	41
CAPÍTULO 3	
3. ANÁLISIS Y DISEÑO DEL ACONDICIONADOR DE SEÑALES	43
3.1. Descripción de las Señales de Actitud	44
3.2. Medición de las Señales de Actitud	45
3.2.1. Niveles de Ruido	47
3.3. Filtros Activos	52
3.4. Diseño del Acondicionador	54
3.4.1. Diseño del Filtro Butterworth de Cuarto Orden	56
3.4.2. Diseño del Filtro Butterworth de Segundo Orden	60
3.4.3. Distribución de Señales en las Interfaces	64
3.5. Producto Final	64
3.6. Pruebas del Acondicionador	64
3.6.1. Ambiente de Prueba	64
3.6.2. Respuesta del Filtro Butterworth de Cuarto Orden	65
3.6.3. Respuesta del Filtro Butterworth de Segundo Orden	67
Capítulo 4	
4. COMPONENTES INHERENTES AL DESARROLLO DEL SOFTWARE: SUBSISTEMA DE TIEMPO REAL RTX, FILTRO KALMAN Y MODELO LAX-WENDROFF	71
4.1. Subsistema de Tiempo Real RTX	71

4.1.1. Arquitectura del Subsistema RTX	72
4.1.2. Interfaz de Programación de Aplicación	74
4.1.3. Tipos de Componentes Ejecutables en RTX	76
4.1.4. Servicios de RTX	76
4.2. Filtro Kalman	77
4.2.1. Definición Matemática	78
4.2.2. Descripción Funcional	80
4.2.3. Algoritmo del Filtro Kalman	83
4.2.4. Diagrama de Flujo	85
4.3. Modelo Lax-Wendroff	87
4.3.1. Definición Matemática	87
4.3.2. Diagrama de Flujo	88
4.4. Personalización del Filtro Kalman y el Modelo Lax-Wendroff para las Señales del Sistema FOG OTG-64	89

CAPÍTULO 5

5. DISEÑO DEL COMPONENTE DE SOFTWARE DE

PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES	93
5.1. Arquitectura del Software	94
5.2. Modelo de Casos de Uso	97
5.2.1. Caso de Uso: Transmitir Datos FOG	98
5.2.2. Caso de Uso: <Inclusión> Adquirir Señales de Actitud	101
5.2.3. Caso de Uso: <Inclusión> Verificar el Estado de las	

Tarjetas D/S	102
5.2.4. Caso de Uso: <Extensión> Alternar Señal de Rumbo	104
5.2.5. Caso de Uso: Detener la Transmisión de Datos	105
5.2.6. Caso de Uso: Probar Hardware	107
5.3. Modelo Estático	109
5.3.1. Clases de la Interfaz Gráfica de Usuario	110
5.3.2. Clases de Adquisición de Datos	112
5.3.3. Clases de Filtrado Digital	115
5.3.4. Clases de Sincronización	117
5.3.5. Clases del Filtro Kalman	119
5.3.6. Clases del Proceso RT	121
5.3.7. Clases de la Librería de la Tarjeta D/S 76CS1	124
5.4. Modelado Dinámico	127
5.4.1. Tareas del Proceso Win32	127
5.4.2. Tareas del Proceso RT	128
5.4.3. Secuencia Transmitir Datos FOG	129
5.4.4. Secuencia Probar Hardware	134
5.4.5. Secuencia Detener Transmisión de Datos	136
5.5. Interfaz Gráfica de Usuario	137
CAPÍTULO 6	
6. DESPLIEGUE, CONFIGURACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA	141
6.1. Despliegue y Configuración de Hardware	141

6.1.1. Componentes de Hardware	144
6.1.2. Descripción del Cableado	144
6.2. Despliegue y Configuración de Software	152
6.2.1. Componentes de Instalación	153
6.2.2. Configuración del Aplicativo	154
6.2.3. Instalación del Aplicativo	155
6.3. Prueba del Sistema en la Mar	156
6.3.1. Datos Generales de la Prueba	156
6.3.2. Asignación de Requisitos	156
6.3.3. Equipos y Herramientas Habilitantes	157
6.3.4. Condiciones de Pre-Requisito	157
6.3.5. Entradas para la Prueba	158
6.3.6. Resultados Esperados	158
6.3.7. Procedimiento de Prueba	159
6.3.8. Supuestos y Limitaciones	160
CONCLUSIONES	162
RECOMENDACIONES	165
ANEXOS	168
BIBLIOGRAFÍA	197

ABREVIATURAS

A/D	Analógico a Digital
API	Application Programming Interface (Interfaz de Programación de Aplicación)
CIC	Centro de Información y Combate
C _ψ	Variable Matemática de Rumbo
DAQ	Data Acquisition
DOS	Disk Operating System (Sistema Operativo de Disco)
DPC	Deferred Procedure Call (Llamada a Procedimiento Demorado)
D/S	Digital a Sincrónico
DSP	Digital Signal Processing (Procesamiento Digital de Señales) Digital Signal Processor (Procesador de Señales Digitales)
EMI	Electromagnetic Interference (Interferencia Electromagnética)
E _ψ	Variable Matemática de Cabeceo
FOG	Fiber Optic Gyro

	(Giro de Fibra Óptica)
GPS	Global Position System (Sistema de Posicionamiento Global)
HAL	Hardware Abstraction Layer (Capa de Abstracción del Hardware)
hPa	Hecto Pascales
IPC	Inter Process Communication (Comunicación entre Procesos)
ISA	Industry Standard Architecture
LSB	Less Significant Bit (Bit Menos Significativo)
MAX	Measurement Automation Explorer
Mn	Milla náutica
MTBF	Mean Time Between Failures (Tiempo Medio entre Fallas)
NA-21	Naval Antiship model 21 (Sistema Anti-buque modelo 21)
PCI	Peripheral Component Interconnect (Interconexión de Componentes Periféricos)
POSIX	Portable Operating System Interface (Interfaz de Sistema Operativo Portátil basado en UNIX)
RTSS	Real-Time Subsystem

	(Subsistema de Tiempo Real)
RTX	Real-Time eXtension (Extensión de Tiempo Real)
SBC	Single Board Computer (Computador en Tarjeta Simple)
S/D	Sincrónico a Digital
SDDU	Synchro Data Distribution Unit (Unidad de Distribución de Datos Sincrónicos)
SDK	Software Development Kit (Paquete para el Desarrollo de Software)
SNI	Sistema de Navegación Inercial
SP4	Service Pack 4 (Paquete de Actualización 4)
SSA	Synchro Servo Amplifiers (Amplificadores Sincrónicos)
VISA	Virtual Interface Storage Architecture
Win32	Plataforma Windows® de 32 bits
WOW	Windows On Windows
Zo	Variable Matemática de Balanceo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Diagrama de Componentes del Sistema NA-21	3
Figura 1.2	Procesos Dependientes de la Plataforma Inercial	7
Figura 1.3	Representación del Rumbo (Cqo)	8
Figura 1.4	Representación del Cabeceo (Eio)	9
Figura 1.5	Representación del Balanceo (Zo)	10
Figura 1.6	Estructura Interna de un Giroscopio de Masa Rotante	11
Figura 1.7	Esquema Interno del Sensor de una Plataforma de Fibra Óptica	13
Figura 1.8	Esquema Interno del Sensor de una Plataforma de Anillo Láser	14
Figura 1.9	Plataforma Inercial Litef PL-41	17
Figura 1.10	Giro de OceanTools FOG-S y la Unidad de Control OFIS	19
Figura 2.1	Interfaces Externas del Sistema Hermes	29
Figura 2.2	Interfaz Interna del Sistema Hermes	30
Figura 2.3	Etapas de un Sistema de Procesamiento de Señales	35
Figura 2.4	Diagrama de Componentes del Sistema Hermes	39
Figura 2.5	Componentes según la Etapa del Procesamiento	40
Figura 3.1	Equipos del Ambiente de Prueba de Medición de Ruido	46
Figura 3.2	Mediciones de la Señal Rumbo_1	48

Figura 3.3	Distribución de las Mediciones de la Señal Rumbo_1	48
Figura 3.4	Mediciones de la Señal Rumbo_2	49
Figura 3.5	Distribución de las Mediciones de la Señal Rumbo_2	49
Figura 3.6	Mediciones de la Señal Cabeceo	50
Figura 3.7	Distribución de las Mediciones de la Señal Cabeceo	50
Figura 3.8	Mediciones de la Señal Balanceo	51
Figura 3.9	Distribución de las Mediciones de la Señal Balanceo	51
Figura 3.10	Interfaces y Componentes del Acondicionador de Señales	56
Figura 3.11	Diagrama del Filtro Butterworth de Cuarto Orden	57
Figura 3.12	Respuesta de Atenuación y Desfase del Filtro Butterworth de Cuarto Orden	58
Figura 3.13	Atenuación de Ruido de 60Hz del Filtro Butterworth de Cuarto Orden	59
Figura 3.14	Retardo del Filtro Butterworth de Cuarto Orden	60
Figura 3.15	Diagrama del Filtro Butterworth de Segundo Orden	61
Figura 3.16	Respuesta de Atenuación y Desfase del Filtro Butterworth de Segundo Orden	62
Figura 3.17	Atenuación del Ruido de 60Hz del Filtro Butterworth de Segundo Orden	63
Figura 3.18	Retardo del Filtro Butterworth de Segundo Orden	64
Figura 3.19	Señal de Rumbo Filtrado	66

Figura 3.20	Distribución del Rumbo Filtrado	66
Figura 3.21	Señal de Cabeceo Filtrado	68
Figura 3.22	Distribución del Cabeceo Filtrado	69
Figura 4.1	Arquitectura de Win32 y RTX	73
Figura 4.2	Diagrama de Flujo del Filtro Kalman	86
Figura 4.3	Diagrama de Flujo del Modelo Lax-Wendorff	89
Figura 5.1	Componentes del Software RTXHermes	96
Figura 5.2	Diagrama de Casos de Uso	98
Figura 5.3	Caso de Uso: Transmitir Datos FOG	98
Figura 5.4	Caso de Uso: Adquirir Señales de Actitud	101
Figura 5.5	Caso de Uso: Verificar Estado de Tarjetas D/S	102
Figura 5.6	Caso de Uso: Alternar Señal de Rumbo	104
Figura 5.7	Caso de Uso: Detener Transmisión de Datos	105
Figura 5.8	Caso de Uso: Probar Hardware	107
Figura 5.9	Clases de la Interfaz Gráfica de Usuario	111
Figura 5.10	Clases de la Adquisición de Datos	113
Figura 5.11	Clases de Filtrado Digital	116
Figura 5.12	Clases de Sincronización	118
Figura 5.13	Clases del Filtro Kalman	120
Figura 5.14	Clases del Generador de Señales RTX	122
Figura 5.15	Estructuras y Componentes de la Librería D/S 76CS1	126
Figura 5.14	Secuencia: Adquisición de Señales en Win32	130

Figura 5.15	Secuencia: Traspaso de Datos de Actitud de Win32 a RTX	131
Figura 5.16	Secuencia: Verificar el Estado de las Tarjetas D/S	132
Figura 5.17	Secuencia: Generar las Señales Sincrónicas	133
Figura 5.18	Secuencia: Detectar Tarjeta A/D PCI-6221	134
Figura 5.19	Secuencia: Detectar Tarjeta D/S 76CS1	135
Figura 5.20	Secuencia: Detener Receptor de Datos	136
Figura 5.21	Ventana Principal: Pestaña de Datos FOG	138
Figura 5.22	Ventana Principal: Pestaña Tarjetas Sincro	139
Figura 5.23	Ventana Principal: Pestaña de Información	140
Figura 6.1	Disposición Física del Sistema Hermes en la Sala de Giro	142
Figura 6.2	Despliegue de las Interfaces	143
Figura 6.3	Despliegue de las Tarjetas en el Computador	143
Figura 6.4	Cable HERMES-01	145
Figura 6.5	Cable HERMES-02	146
Figura 6.6	Cable HERMES-03	147
Figura 6.7	Cable HERMES-04	148
Figura 6.8	Cable HERMES-05	151
Figura 6.9	Despliegue de los componentes de Software	154
Figura C.1	Vista Posterior de la Plataforma FOG OTG-64	176
Figura C.2	Conector J1 AB05 2100 12 10 SN00 – Vista Frontal	177

Figura C.3	Conector J2 AB05 2100 10 06 SN00 – Vista Frontal	178
Figura D.1	Vista Superior Tarjeta de Filtros Pasa Bajos Butterworth	180
Figura D.2	Vista Lateral de la Tarjeta de Filtros Pasa Bajos Butterworth	180
Figura E..1	Tarjeta Butterworth: Capa Superior	186
Figura E.2	Tarjeta Butterworth: Capa Inferior	187
Figura E.3	Tarjeta Butterworth: Diagrama Topológico	188
Figura E.4	Tarjeta Butterworth: Esquemático	189
Figura E.5	Ensamblaje Final de la Tarjeta de Filtros Activos Pasa Bajos Butterworth: Vista de Componentes	192
Figura E.6	Ensamblaje Final de la Tarjeta de Filtros Activos Pasa Bajos Butterworth: Vista de Interfaces de Entrada/Salida	193
Figura F.1	Esquema de Conexiones del Sistema Hermes	195

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Sensores utilizados por el Sistema NA-21	4
Tabla 1.2	Sensores Adicionales	4
Tabla 2.1	Requerimientos Funcionales del Sistema	26
Tabla 2.2	Requerimientos Suplementarios del Sistema	27
Tabla 2.3	Interfaces Externas e Internas del Sistema	28
Tabla 2.4	Especificación de la Interfaz IF-HER-01	31
Tabla 2.5	Resolución de las Señales de la Interfaz IF-HER-01	32
Tabla 2.6	Especificación de la Interfaz IF-HER-04	34
Tabla 2.7	Parámetros de Evaluación del Determinismo	38
Tabla 3.1	Niveles de Ruido en las Señales de Actitud	47
Tabla 3.2	Características del Ruido en las Señales de Actitud	52
Tabla 3.3	Características de la Señal Filtrada de Rumbo con el Filtro Butterworth de Cuarto Orden	67
Tabla 3.4	Características de las Señales Filtradas de Cabeceo y Balanceo con el Filtro de Segundo Orden	70
Tabla 4.1	Resolución de las Señales de Actitud Filtradas	91
Tabla 6.1	Conexiones del Cable HERMES-01	145
Tabla 6.2	Conexiones del Cable HERMES-02	147
Tabla 6.3	Conexiones del Cable HERMES-03	148
Tabla 6.4	Conexiones del Cable HERMES-04	151

Tabla 6.5	Conexiones del Cable HERMES-05	152
Tabla A.1	Especificación de Rumbo PL-41	170
Tabla A.2	Especificación de Cabeceo y Balanceo PL-41	170
Tabla A.3	Exactitud de PL-41 en Modo Girocompás	170
Tabla A.4	Exactitud de PL-41 en Modo Inercial	171
Tabla B.1	Distribución de Pines del Conector J1 FOG OTG-64	173
Tabla B.2	Distribución de Pines del Conector J2 FOG OTG-64	173
Tabla B.3	Tiempos de Alineación de la FOG OTG-64	174
Tabla D.1	Descripción de Pines del Conector J1 Tarjeta Butterworth (DB-9)	181
Tabla D.2	Descripción de Pines del Conector J2 Tarjeta Butterworth (AMP 2-174225-5)	183
Tabla D.3	Descripción de Pines del Bus ISA Tarjeta Butterworth	184
Tabla E.1	Tarjeta Butterworth: Lista de Materiales	191
Tabla F.1	Distribución de los Componentes en las Ranuras del Computador	196

INTRODUCCIÓN

La teoría del procesamiento de señales juega un rol creciente en el desarrollo de sistemas de telecomunicaciones modernos y sistemas de procesamiento de información, y tiene una amplia gama de aplicaciones en la tecnología multimedia, procesamiento de señales audiovisuales, comunicaciones celulares, sistemas de radar, patrones de análisis, procesamiento de señales médicas, sistemas de toma de decisiones, entre otros.

La teoría y aplicación del procesamiento digital de señales abarca la identificación, modelado, y uso de patrones y estructuras en un proceso que involucra señales. Las señales observadas frecuentemente son distorsionadas, incompletas o ruidosas. Por tanto, la reducción de ruido y la eliminación del canal de distorsión es una parte fundamental de un sistema de procesamiento digital de señales.

Los sistemas computacionales han experimentado un reciente auge de notables proporciones para su uso en la adaptación de señales y filtrado digital, gracias al incremento en su capacidad de procesamiento a precios asequibles, permitiendo así explotar sus beneficios.

En el presente trabajo se ha abordado el desarrollo de una solución tecnológica para mejorar las capacidades de la plataforma inercial comercial de fibra óptica FOG OTG-64 ha ser instalada en las Corbetas clase “Esmeraldas”, mediante el uso de técnicas de filtrado analógico y digital.

La solución tiene como objetivo la mejora de la precisión y el aumento en la resolución de los datos de actitud entregados por la plataforma FOG OTG-64, con el fin de que puedan ser utilizados por todos los sistemas usuario del buque sin limitar sus funciones de combate.

Un aspecto relevante de la arquitectura es el uso de un sistema operativo multitarea de tiempo real no crítico, como lo es Windows® 2000, junto con el subsistema de tiempo real crítico RTX® para lograr el determinismo del aplicativo.

La tesis en su capítulo 1 brinda una inducción sobre los sistemas que dependen de los datos de la plataforma inercial. Adicionalmente, se describen los diferentes tipos de plataformas inerciales y su tecnología. Al final del capítulo se expone la necesidad de adaptación de las plataformas de fibra óptica.

En el capítulo 2 se detalla la arquitectura y el diseño del sistema, describiendo los requerimientos funcionales y no funcionales, las interfaces de entrada/salida, los componentes, y la plataforma de despliegue de hardware y software.

En el capítulo 3 se describe el análisis de las señales provenientes de la plataforma FOG, el diseño del acondicionador de los datos de actitud y sus pruebas en laboratorio.

En el capítulo 4 se expone la arquitectura y las características del subsistema de tiempo real crítico RTX®. Así también, se describen los fundamentos teóricos tanto del filtro como del modelo empleado para el procesamiento digital de los datos de actitud.

En el capítulo 5 se muestra el análisis y diseño del componente de software del sistema, esto es, la especificación de casos de uso, modelos estáticos y dinámicos, y la interfaz gráfica de usuario.

En el capítulo 6 se detalla el despliegue, la configuración del sistema y los resultados de las pruebas finales a bordo de la Corbeta clase “Esmeraldas”. Finalmente se exponen las conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO 1

1 CONCEPTOS GENERALES DE LOS SISTEMAS A BORDO DE LAS CORBETAS CLASE “ESMERALDAS”

Las Corbetas Misileras clase “Esmeraldas” poseen numerosos sistemas y sensores que le permiten cumplir con sus funciones operativas. El sistema NA-21 es el sistema principal de armas de la corbeta.

El presente capítulo comienza describiendo los componentes y sensores asociados con el funcionamiento del Sistema de Armas NA-21. El sensor más importante es la plataforma inercial, la cual brinda los datos de actitud del buque. Estos datos son usados por el sistema de armas en el control de los radares, seguimiento de blancos y manejo del armamento.

Las siguientes secciones del capítulo describen los conceptos básicos involucrados en la operación de giros inerciales. Adicionalmente se exponen dos tipos modernos de sensores inerciales ampliamente usados. Al final del capítulo se detallan las características del giro OceanTools FOG OTG-64 y sus necesidades de adaptación en las Corbetas clase “Esmeraldas” de la Armada del Ecuador.

1.1. Sistema NA-21

El sistema NA-21 es el sistema de armas con que están equipadas las Corbetas clase “Esmeraldas” de la Armada del Ecuador. Está compuesto de dos centrales de tiro que controlan los radares de tiro de proa y popa. El objetivo primario de todo sistema de armas es detectar un blanco y batirlo en el menor tiempo posible.

Para su correcto funcionamiento se soporta en diversos subsistemas, componentes y sensores tales como subsistemas de armas, red de viento, sistema de estabilización, radares y consolas tácticas. En la figura 1.1 se muestran los componentes que integran y soportan al sistema de armas de la Corbeta.

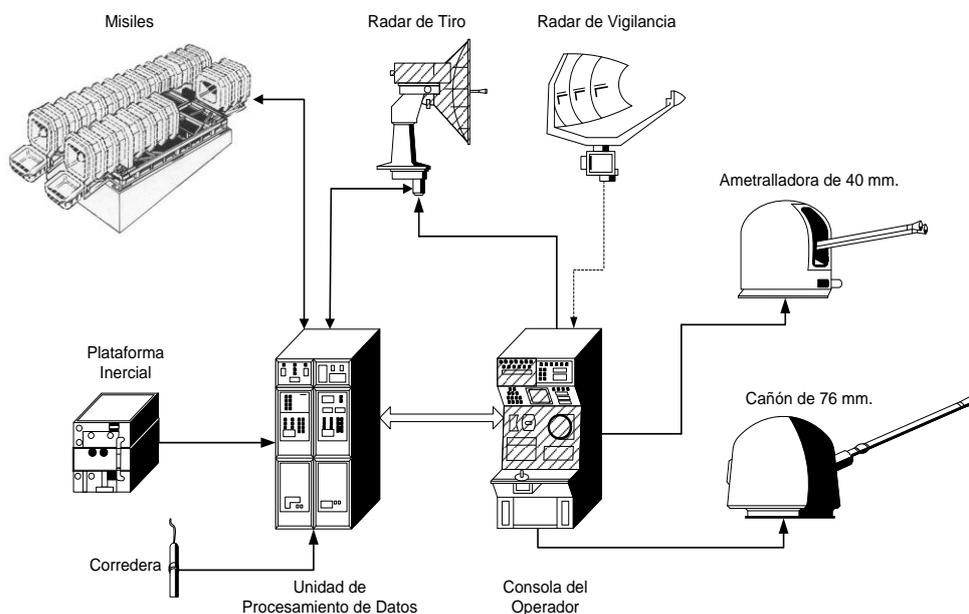


Figura 1.1 Diagrama de Componentes del Sistema NA-21

1.1.1. Componentes del Sistema NA-21

El sistema NA-21 está compuesto de cinco partes fundamentales: los sensores, las interfaces de entrada/salida, la lógica de control, las armas y el recurso humano.

Los sensores miden ciertos fenómenos físicos que son el punto de entrada de información del sistema. El sistema NA-21 para cumplir con sus capacidades necesita información de los sensores para ejecutar los cálculos de tiro, controlar los radares y las armas del buque. La tabla siguiente muestra los datos proporcionados por los sensores instalados en la corbeta.

Sensor	Dato	Unidad
Anemómetro	Dirección del viento.	Grados
	Intensidad del viento.	Nudos
Corredera	Velocidad del buque.	Nudos
Plataforma Inercial	Rumbo	Grados
	Cabeceo	Grados
	Balanceo	Grados

Tabla 1.1 Sensores utilizados por el Sistema NA-21

En la actualidad, los sistemas de armas cuentan (además de los sensores mencionados anteriormente) con la estación climática, el GPS y el ecosonda.

Sensor	Dato	Unidad
Estación Climática	Presión	Hecto Pascales (hPa)
	Temperatura	Grados Centígrados (oC)
	Humedad relativa	Porcentaje (%)
GPS	Latitud	Grados
	Longitud	Grados
Ecosonda	Profundidad	Metros (m)

Tabla 1.2 Sensores Adicionales

La consola de operación contiene las interfaces de entrada y salida del sistema. Todas las funciones del sistema se acceden mediante las dos consolas de operación instaladas en el CIC. La corbeta posee dos radares de tiro, uno ubicado en la proa y el segundo hacia la popa, y son controlados por las consolas de proa y popa, respectivamente. Los cañones y misiles están subordinados a la operación de las centrales de tiro y consolas tácticas del buque.

La lógica de funcionamiento encapsula el comportamiento del sistema. La lógica contiene el control de las armas y el radar de tiro basado en procesos retroalimentados de control, cálculos matemáticos y algoritmos de predicción, estabilización y desestabilización necesarios para la resolución del problema de tiro. La implementación de las funciones y cálculos se desarrollan en las interfaces de hardware y software, con tecnología digital y programas de control ejecutados en computadores básicos.

Las armas con que cuenta el sistema son:

- Misiles mar-mar.

- Cañón de Proa 76 mm.
- Cañón de Popa 40 mm.

La toma de decisiones la realiza el mando jerárquico dentro de la unidad y la operación del sistema requiere la acción de dos operadores, uno por consola.

1.2. Importancia de los sensores

La importancia de los sensores radica en la medida en que éstos sean indispensables para el correcto funcionamiento del sistema de armas del buque. Aunque todos los sensores tienen un objetivo para su inclusión, existen ciertas condiciones en que se puede prescindir de algunos de ellos. Una forma de clasificar a los sensores es de acuerdo a si sus datos pueden ser ingresados o no de forma manual al sistema de control de tiro.

Ciertos datos como los entregados por el anemómetro y la corredera pueden ser reemplazados por valores estándares sin afectar las capacidades operativas del sistema NA-21 y de combate de la corbeta.

Por otro lado, aquella información que necesariamente debe ser ingresada de forma automática y continua es de gran importancia ya que su ausencia limita las capacidades del sistema NA-21. Este es el caso de la plataforma inercial o giro, que brinda la posición del buque respecto del plano horizontal. Dicha información es indispensable para el control de antenas, el seguimiento de blancos y el control de las armas.

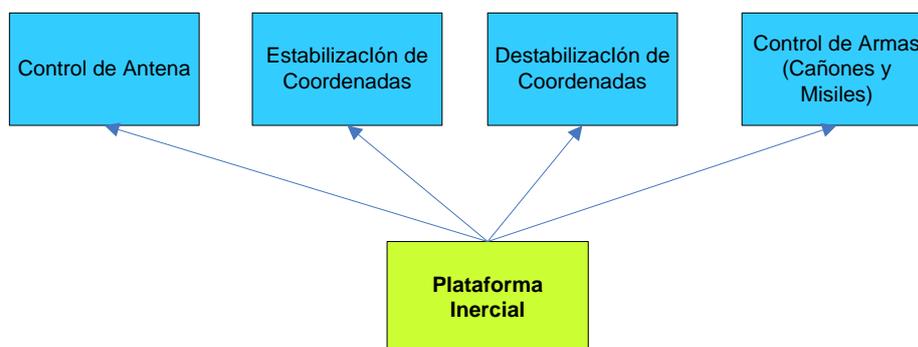


Figura 1.2 Procesos dependientes de la Plataforma Inercial.

Los datos de la plataforma inercial se emplean para aislar a los procesos de cálculo de las oscilaciones sufridas por el buque debido a las olas. El sistema NA-21 en caso de detectar la ausencia de los datos provenientes de la plataforma inercial inhibe el proceso de seguimiento y disparo a blancos, lo que supone la disminución de las funciones disuasivas y de combate del buque. La realización de un

disparo sin el ingreso de los datos de actitud produciría un apuntamiento de las armas errado e incluso peligroso.

1.3. Datos de Actitud

La posición de un buque respecto del plano horizontal (superficie del mar) viene dada por tres ángulos: rumbo, cabeceo y balanceo, también denominados, en su conjunto, como datos de actitud. El ingreso de estos ángulos es indispensable para el correcto funcionamiento del sistema de control de tiro.

Rumbo es el ángulo entre el plano vertical Norte-Sur, y el plano vertical que contiene el eje longitudinal del buque medido en el plano horizontal. Los ángulos son positivos si son medidos en sentido horario desde el Norte. El símbolo matemático estándar que representa el rumbo es Cq_0 .

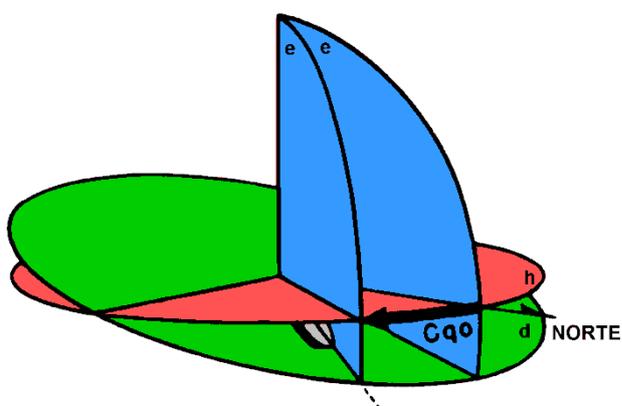


Figura 1.3 Representación del Rumbo (Cq_0)

Cabeceo es el ángulo entre el plano horizontal y el plano de inclinación, medido en el plano vertical que contiene al eje longitudinal del buque propio. Ángulos positivos son medidos por debajo del plano horizontal. El símbolo matemático estándar que representa el cabeceo es E_{io} .

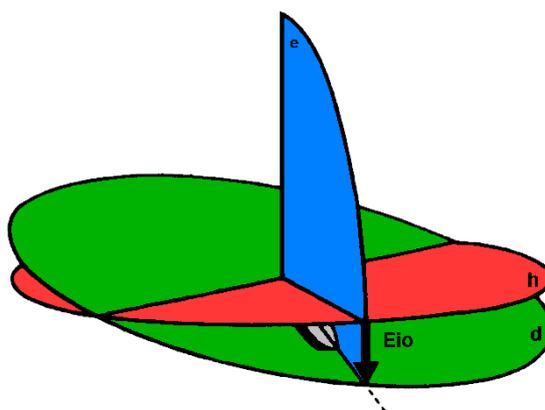


Figura 1.4 Representación del Cabeceo (E_{io})

Balanceo es el ángulo entre el plano vertical que contiene al eje longitudinal del buque propio, y el plano normal al plano de inclinación que contiene al eje longitudinal del buque propio, medido sobre el eje que es la intersección entre el plano vertical que contiene al eje longitudinal del buque propio y el plano de inclinación. La dirección es positiva en sentido horario cuando se está viendo desde el buque propio. El símbolo matemático que representa al balanceo es Z_o .

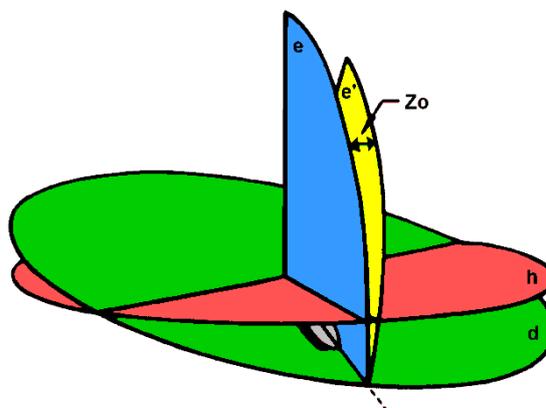


Figura 1.5 Representación del Balanceo (Z_0)

1.4. Tecnologías en Sistemas de Navegación Inerciales

Los sistemas de navegación inerciales fueron desarrollados gracias a la invención del giróscopo y han evolucionado con el pasar de las décadas. En la actualidad los SNI ya no emplean giróscopos para su funcionamiento. En su lugar, utilizan dispositivos sin partes móviles que explotan las propiedades de la luz para determinar los datos de actitud. A continuación se describen los diferentes tipos de tecnologías utilizadas en las plataformas inerciales.

1.4.1. Plataformas Inerciales de Giróscopos

Los primeros sistemas de navegación utilizaron los principios físicos de los giróscopos. Un giróscopo es un dispositivo que

posee una masa que gira velozmente alrededor de su eje de simetría, permitiendo mantener de forma constante su orientación respecto a un sistema de ejes de referencia.

Cualquier cuerpo sometido a un movimiento de rotación acusa propiedades giroscópicas. Las propiedades giroscópicas fundamentales son: rigidez en el espacio, precesión y nutación.

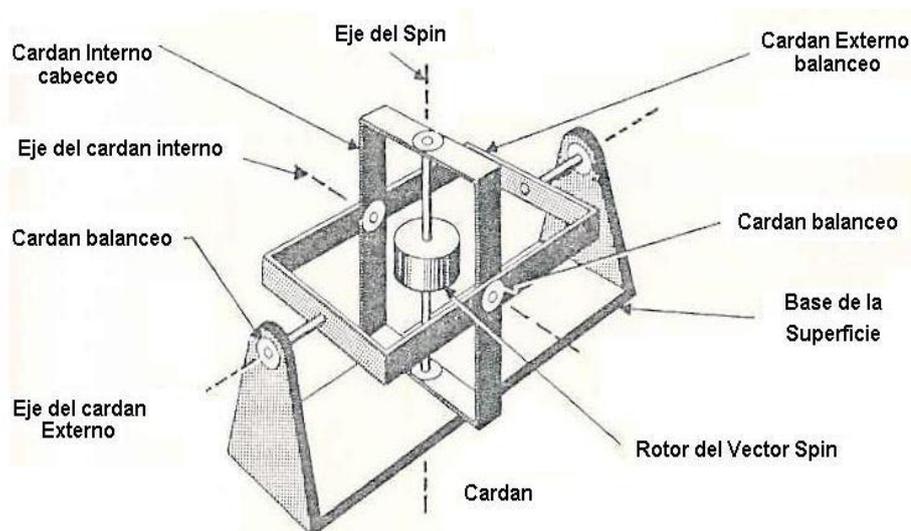


Figura 1.6 Estructura Interna de un Giroscopio de Masa Rotante

Los giróscopos constituyen una parte importante de los sistemas de navegación automática o guiado inercial en aviones, naves espaciales, misiles teledirigidos, cohetes, buques y submarinos.

Los sistemas de navegación basados en giróscopos poseen una buena precisión y resolución. Sin embargo, padecen de un tiempo de puesta en marcha elevado, alto consumo de energía y sus componentes mecánicos sufren desgastes debido a la fricción.

1.4.2. Plataformas de Fibra Óptica

Una plataforma o giro de fibra óptica es un dispositivo que utiliza la interferencia de la luz para detectar las rotaciones mecánicas. El sensor contiene una espiral de casi 5 Km. de fibra óptica donde dos haces de luz viajan en direcciones opuestas. Un sistema óptico con un divisor de haz dirige los haces de luz hacia un fotodetector o fotosensor. Debido al efecto Sagnac [1], el haz que viaja en sentido contrario a la rotación experimenta una ruta más corta que la del haz opuesto.

El desfase resultante afecta en cómo los haces de luz interfieren entre sí cuando son combinados. Cuando no hay rotación, la fase entre los dos haces luminosos es de 180 grados, cancelándose entre sí. La intensidad del haz combinado depende de la rotación del sensor. Al existir una rotación sobre

el eje de la espiral de fibra, la fase original se altera. Como resultado, la corriente del fotodetector responde al aumento de iluminación, incrementándose.

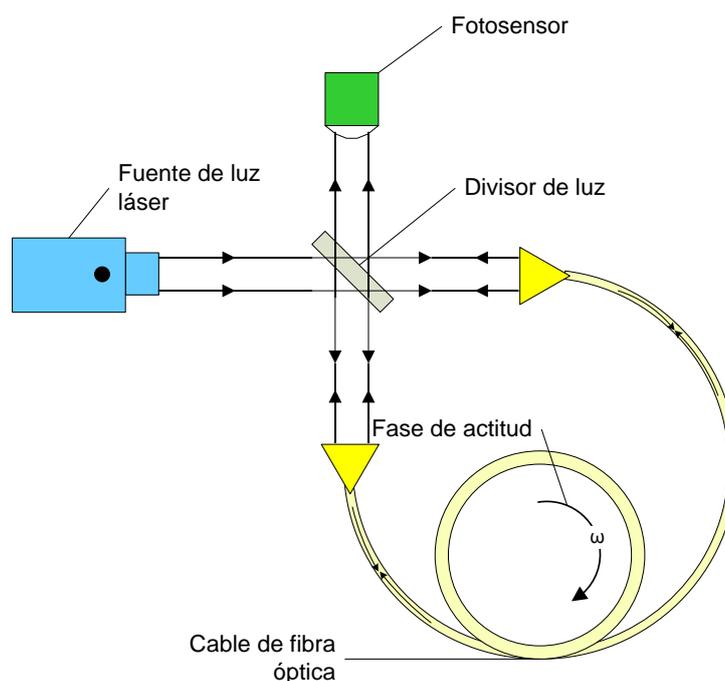


Figura 1.7 Esquema Interno del sensor de una Plataforma de Fibra Óptica

Una plataforma de fibra óptica provee información extremadamente precisa acerca de la rotación, en parte debido a la ausencia de sensibilidad sobre el eje a la vibración, aceleración y choque. A diferencia del giroscopio de masa rotante, la plataforma de fibra óptica virtualmente no tiene

partes móviles ni resistencia inercial al movimiento. Por lo general, muestra una mayor resolución que el giroscopio de anillo láser pero también una mayor desviación y peor factor de escala en rendimiento. Es usada en exploración de tierra, estabilización y navegación inercial.

1.4.3. Plataformas de Anillo Láser

Un giroscopio de anillo láser usa la interferencia de la luz láser dentro de un anillo óptico para detectar los cambios en la orientación y giro. Esta clase de plataforma es una de las aplicaciones del Interferómetro de Sagnac.

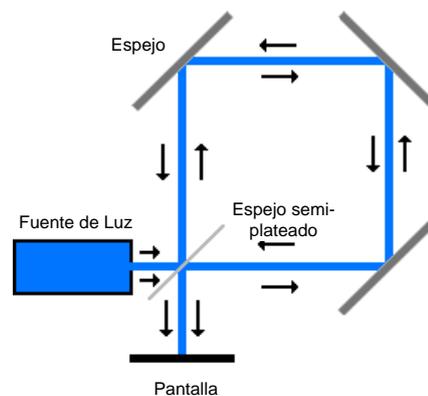


Figura 1.8 Esquema Interno del sensor de una Plataforma de Anillo Láser

La ventaja de la plataforma de anillo láser es que no posee partes móviles, lo que significa que no sufre de desviaciones debidas a la fricción. Es compacta, ligera en peso y virtualmente indestructible lo cual permite su uso en aeronaves. A diferencia de los giroscopios mecánicos, no presenta resistencia a los cambios de orientación. Está compuesta de segmentos de transmisión configurados en forma de cuadrado o triángulo con espejos en cada uno de los vértices. Uno de los espejos refleja parcialmente la luz permitiendo que ésta llegue a los detectores. Un láser es transmitido por ambos extremos de la ruta estableciendo una onda resonante. Cuando el sensor rota, la luz en un extremo viaja una distancia distinta a la del otro extremo, cambiando la fase y la frecuencia de resonancia respecto de la luz que viaja en sentido contrario, lo que genera un patrón de interferencia que lee el detector. La posición angular se mide contando las franjas de interferencia producidas.

Las principales aplicaciones de la plataforma de anillo láser incluyen sistemas de navegación en aerolíneas comerciales, buques y aeronaves, donde por lo general toma el nombre de Sistema de Referencia Inercial.

1.5. Sistema Litef PL41

La plataforma PL41 MK3 es el Sistema de Navegación Inercial (SNI) de características militares instalado en las Corbetas clase "Esmeraldas". Su principio de funcionamiento es electromecánico y emplea las propiedades físicas del giróscopo para determinar los datos de rumbo, cabeceo y balanceo.

La plataforma PL41 posee dos giróscopos: un giróscopo vertical que detecta el cabeceo y el balanceo; y un giroscopio direccional que detecta los cambios de rumbo. La altitud es detectada por un sensor barométrico. La velocidad a la que se producen esos cambios se determina mediante giróscopos de aceleración o acelerómetros. La combinación del desplazamiento (cuánto) y la velocidad a la que se produce (qué tan rápido) proporciona una indicación muy precisa de la respuesta necesaria. La figura 1.9 muestra la plataforma PL41.

La plataforma PL-41 es de suma importancia para la ejecución de los procesos de cálculo interno del Sistema de Armas NA-21.



Figura 1.9 Plataforma Inercial Litef PL-41

1.5.1. Especificaciones Técnicas

Las especificaciones técnicas de la plataforma Litef PL41 se detallan en el Anexo A.

1.6. Sistema OceanTools FOG OTG-64

La plataforma FOG OTG-64 es una plataforma de fibra óptica ensamblada por la compañía OceanTools. Posee tres sensores de fibra óptica dispuestos físicamente para determinar los datos de rumbo, cabeceo y balanceo. Los sensores de fibra óptica poseen un funcionamiento similar al mostrado en la figura 1.7.

1.6.1. Especificaciones Técnicas

Las especificaciones de la FOG OTG-64 se detallan en el Anexo B.

1.6.2. Componentes del Sistema

El sistema de FOG OTG-64 consta de dos componentes principales: el sensor FOG-S y la unidad de control OFIS.

El sensor FOG-S es un girocompás compacto para naves de superficie. Su funcionamiento se basa en tres compases de fibra óptica, un sensor de nivel preciso y el uso de técnicas inerciales. Todos sus componentes son de estado sólido sin partes móviles y posee un tiempo medio entre fallas de 25.000 horas.

La unidad de control OFIS es un computador que ejecuta el software de configuración WinFOG2000, el cual cumple las siguientes funcionalidades:

- ✓ Recibe y presenta los datos de actitud.
- ✓ Recibe los datos de posición del GPS.
- ✓ Transmite la latitud a la FOG.

- ✓ Configura el funcionamiento y las interfaces E/S de la FOG.
- ✓ Controla continuamente los parámetros de la FOG.
- ✓ Graba los datos de actitud.
- ✓ Consulta el estado de la FOG.

La unidad OFIS posee un receptor de GPS interno y necesita la conexión con una antena exterior. También puede recibir la entrada directa de un GPS externo mediante una interfaz RS-232. El OFIS funciona con una alimentación de 115V 60Hz y posee en su interior una fuente de +24 VDC que energiza al giro FOG-S una vez puesto en operación.

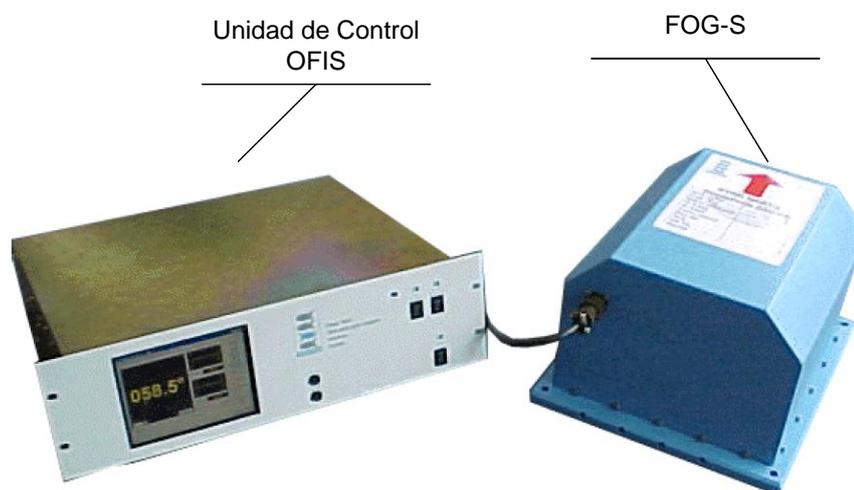


Figura 1.10 Giro de OceanTools FOG-S y la Unidad de Control OFIS

1.6.3. Interfaces de Salida

El sensor FOG-S posee dos interfaces de conexión. La primera, recepta las señales de comunicación serial de configuración y de alimentación de +24VDC generadas por el OFIS. La segunda, envía los datos de actitud en forma de señales analógicas. La descripción de pines de las dos interfaces de salida de la FOG-S se detalla en el Anexo C.

Adicionalmente a las señales analógicas, la unidad de control OFIS puede replicar los datos de actitud a través de una interfaz RS-232 en formato NMEA 0183.

1.7. Necesidad de Adaptación

1.7.1. Antecedentes

Los giróscopos de la plataforma PL41 con el pasar de los años han sufrido desgastes propios de su naturaleza electromecánica, originando la reducción paulatina en su precisión y la disminución progresiva de su Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF).

Debido a estos inconvenientes y con el fin de no disminuir las

capacidades de sus unidades navales, la Armada del Ecuador en el año 2004 adquiere las plataformas de fibra óptica FOG OTG-64 de la compañía OceanTools para su instalación en sus unidades navales.

El sistema FOG OTG-64 tienen un costo muy inferior al de sus similares de características militares, pudiendo llegar a costar de 4 a 8 veces menos dependiendo del fabricante. El costo de una plataforma militar oscila entre los \$200.000 a \$400.000, mientras que la plataforma FOG tiene un costo de \$50.000.

La plataforma FOG usa como componente esencial los sensores de movimiento fabricados por la compañía Litef, que es la compañía que fabrica su contraparte militar. Por esta razón fundamental, la Armada del Ecuador decide en el año 2005 el desarrollo de un sistema capaz de aprovechar la precisión interna de la plataforma FOG OTG-64 para su uso en las Corbetas clase “Esmeraldas”.

1.7.2. Consideraciones de Cambio

La plataforma FOG OTG-64 no cumple estándares militares de construcción, como el MIL-STD-810F [2], ni satisface las

especificaciones de resolución de los sistemas de armas.

Las Corbetas clase “Esmeraldas” cuentan con dos placas base distribuidas simétricamente a lo largo del eje transversal dentro de la Sala de Giro, lo que permite la implantación de redundancia con dos plataformas inerciales.

Físicamente, la FOG OTG-64 difiere de su similar PL41 en los puntos de apoyo para su instalación en la placa base. La FOG posee cuatro puntos de apoyo distribuidos en cada vértice de su base rectangular, mientras que la PL41 posee tres puntos de apoyo dispuestos en forma triangular.

Al emplear sensores de fibra óptica usados en plataformas militares, el sistema OTG-64 es muy preciso, sin embargo, su interfaz analógica de salida de datos posee ruido blanco y una resolución máxima de 12 bits. Adicionalmente, la interfaz analógica de la FOG no puede conectarse directamente a los Amplificadores Sincrónicos (SSA) de la Corbeta para la distribución de los datos de actitud debido a que los amplificadores requieren señales de tipo sincrónica.

En el siguiente capítulo se define el diseño arquitectónico del sistema que adapta las plataformas FOG OTG-64 para su uso en las Corbetas clase “Esmeraldas” de la Armada del Ecuador.

CAPÍTULO 2

2. ARQUITECTURA Y DISEÑO DEL SISTEMA PROPUESTO

El Sistema “Hermes” es el sistema tecnológico que adapta el sistema OceanTools FOG OTG-64 para su uso como sistema de navegación inercial en las Corbetas clase “Esmeraldas”.

Este capítulo aborda en su inicio el alcance del Sistema “Hermes”. A continuación, se detallan los requerimientos funcionales y suplementarios que debe cumplir el sistema. Las siguientes secciones desarrollan la arquitectura definiendo la plataforma de despliegue de hardware, las herramientas y los componentes de software a utilizar. El diseño preliminar es expuesto en la sección final.

2.1. Alcance del Sistema

El sistema “Hermes” tiene como objetivo principal la corrección, aumento en la resolución y generación de los datos de actitud en formato sincrónico para los sistemas usuarios de las Corbetas clase “Esmeraldas”.

El Sistema “Hermes” no incluye la adaptación física de la placa base ni cambios para que la plataforma FOG OTG-64 cumpla con estándares militares de construcción y ambiente.

El Sistema “Hermes” emplea el programa original WinFOG2000 para la inicialización, funcionamiento y configuración de la plataforma FOG OTG-64. “Hermes” no reemplaza ni incluye las funciones del programa WinFOG2000, el cual establece una comunicación directa para la puesta en marcha y funcionamiento continuo de la plataforma FOG.

2.2. Requerimientos Funcionales del Sistema

El Sistema “Hermes” posee dos modos de funcionamiento:

- Modo de Prueba, y
- Modo Operativo

El Sistema “Hermes” debe cumplir los siguientes requerimientos funcionales:

Código	Requerimiento	Modo
RF-01	Detectar y probar las interfaces de adquisición/generación de datos utilizadas en la plataforma de despliegue.	Prueba
RF-02	Reducir el ruido blanco presente en las señales de la interfaz analógica de la FOG que representan los datos de actitud.	Operativo
RF-03	Adquirir los datos de actitud provenientes a través de la interfaz analógica de la FOG.	Operativo
RF-04	Corregir las mediciones de los datos de actitud con un modelo acorde al movimiento sinusoidal del buque.	Operativo
RF-05	Generar los datos de actitud en formato sincrónico grueso-fino (24 bits) a los Amplificadores Sincrónicos SSA (Synchro-Servo Amplifiers).	Operativo

Tabla 2.1 Requerimientos Funcionales del Sistema.

2.3. Requerimientos Suplementarios del Sistema

El Sistema “Hermes” debe cumplir los siguientes requerimientos no funcionales o suplementarios:

Código	Requerimiento
RS-01	Procesar y generar los datos de actitud en tiempo real.
RS-02	Visualizar los datos de actitud en modo gráfico y texto.
RS-03	Adaptar los conectores comerciales de las tarjetas de comunicación a conectores de estándar industrial o superior.
RS-04	Eliminar el computador OFIS e incluir las conexiones de la instalación original del Sistema OceanTools (FOG y programa WinFOG2000).
RS-05	Tolerar cortes de energía hasta 30 minutos.

Tabla 2.2 Requerimientos Suplementarios del Sistema.

2.4. Especificación de Interfaces

El Sistema “Hermes” posee interfaces externas con el sistema FOG OTG-64 y los SSA. Adicionalmente, se incluyen las interfaces existentes entre el programa WinFOG2000 y la FOG OTG-64 como

parte del Sistema “Hermes” al tener una incidencia directa en su funcionamiento de acuerdo a la arquitectura utilizada y descrita en las siguientes secciones.

Las interfaces externas e internas del Sistema “Hermes” son:

Interfaz	Fuente	Destino	Dirección	Tipo
IF-HER-01	FOG	“Hermes”	→	Analógico
IF-HER-02	FOG	“Hermes”	↔	RS-232
IF-HER-03	GPS	“Hermes”	→	RS-232
IF-HER-04	“Hermes”	SSA	→	Sincrónico
IF-HER-05	“Hermes” HW Filtro	“Hermes” HW A/D SW	→	Analógico

Tabla 2.3 Interfaces Externas e Internas del Sistema

En la figura 2.1 se muestran las interfaces externas al sistema.

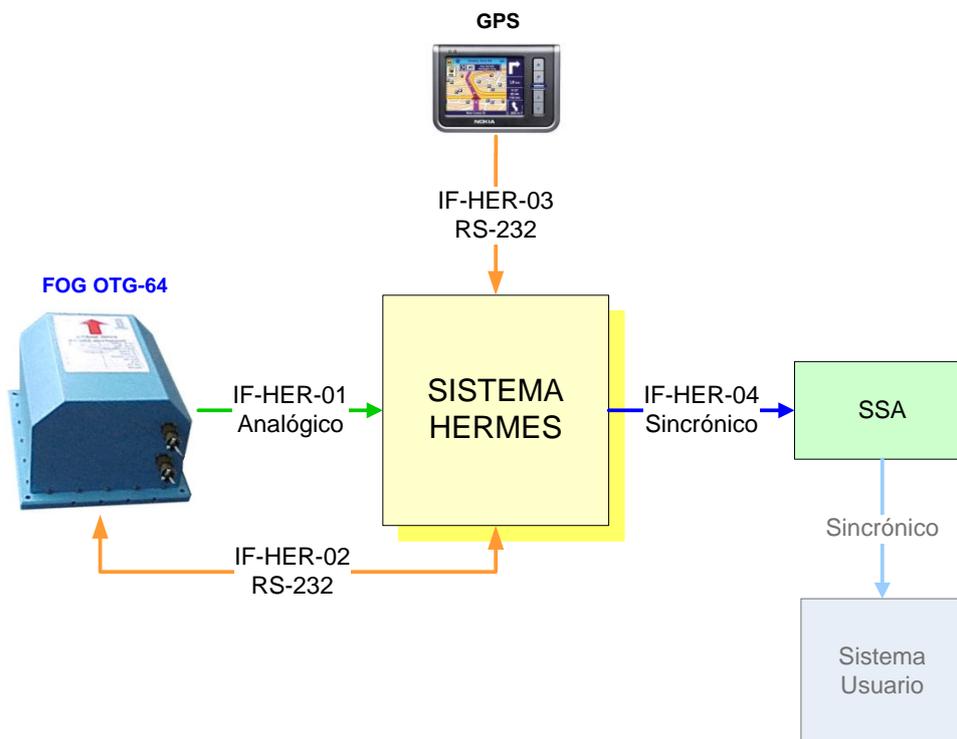


Figura 2.1 Interfaces Externas del Sistema "Hermes"

En la figura 2.2 se muestra la interfaz interna IF-HER-05, la cual permite el paso de las señales entre el hardware de filtrado y la tarjeta de adquisición A/D.

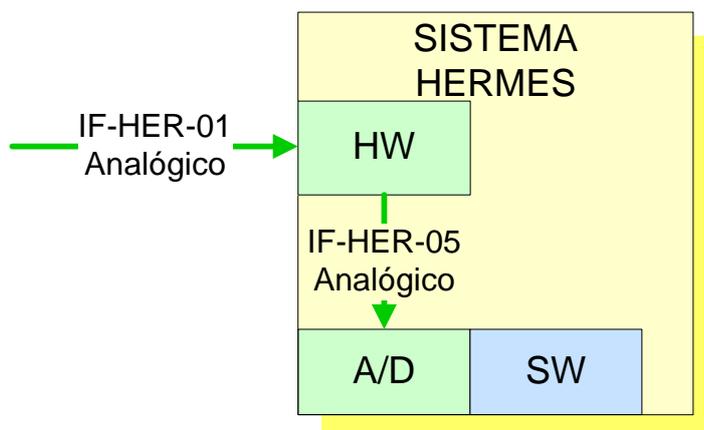


Figura 2.2 Interfaz Interna del Sistema “Hermes”

2.4.1. Interfaz IF-HER-01

La interfaz IF-HER-01 interconecta a la plataforma FOG OTG-64 con el Sistema “Hermes”. Esta interfaz transporta los datos de rumbo, cabeceo y balanceo en forma de señales analógicas de voltaje que pueden variar en un rango de -9.90 VDC a + 9.90 VDC. Cada señal representa el valor angular correspondiente a los datos de actitud dependiendo del factor de escala configurado en la plataforma FOG OTG-64.

Señal	Rango Voltaje [V]	Resolución [bits]	Rango Angular [grados]	Factor de Escala [V/grado]
Rumbo_1	0 a +9.90	12	0 a 360	0.0275

Rumbo_2	-9.90 a +9.90	12	-180 a +180	0.055
Cabeceo	-9.90 a +9.90	12	-30 a +30	0.33
Balanceo	-9.90 a +9.90	12	-30 a +30	0.33

Tabla 2.4 Especificación de la Interfaz IF-HER-01

El tamaño de paso o el peso del bit menos significativo en voltios viene dado por:

$$P_{LSB \text{ voltios}} = \frac{V_{FS}}{2^n - 1}$$

Donde,

$P_{LSB \text{ voltios}}$, *Peso del bit menos significativo en voltios*

V_{FS} , *Voltaje de escala completa*

n , *Número de bits*

El mínimo cambio angular o peso del bit menos significativo en arco minuto (1/60 de grado sexagesimal) viene dado por:

$$P_{LSB \text{ arc min}} = \frac{R_{Ang} \times 60}{2^n - 1}$$

Donde,

$P_{LSB \text{ min}}$, *Peso del bit menos significativo en arco minutos*

R_{Ang} , Rango angular en grados

n , Número de bits

Señal	P_{LSB} voltios [mV]	P_{LSB} arc min [arco minutos]
Rumbo_1	2.417	5.275
Rumbo_2	4.835	5.275
Cabeceo	4.835	0.88
Balanceo	4.835	0.88

Tabla 2.5 Resolución de las Señales de la Interfaz IF-HER-01

2.4.2. Interfaz IF-HER-02

La interfaz IF-HER-02 permite el intercambio de información entre el programa WinFOG2000 y el programa de control interno de la FOG OTG-64. La transmisión de datos es digital tipo RS-232 y el protocolo de comunicación es propietario de la compañía OceanTools.

2.4.3. Interfaz IF-HER-03

La interfaz IF-HER-03 transporta los datos de posición geográfica del GPS al programa WinFOG2000 por medio de la trama GGA del estándar NMEA0183. El medio de transmisión

es digital tipo RS-232. El programa WinFOG2000 procesa la trama GGA y transmite el dato de latitud por la interfaz IF-HER-02. La plataforma FOG OTG-64 recibe la latitud actualizada con el fin de mantenerse alineada y brindar los datos de actitud con precisión máxima.

2.4.4. Interfaz IF-HER-04

La interfaz IF-HER-04 transporta las señales de los datos de actitud previamente procesadas por el Sistema “Hermes” hacia los servo amplificadores. Las señales sincrónicas tienen las siguientes especificaciones:

Señal	Voltaje	Tiempo de Actualización
sincro_rumbo	90 V _{LL} 400 Hz 1x grueso, 36x fino	2.5 ms
sincro_cabeceo	90 V _{LL} 400 Hz 1x grueso, 18x fino	2.5 ms
sincro_balanceo	90 V _{LL} 400 Hz 1x grueso, 18x fino	2.5 ms

Tabla 2.6 Especificación de la Interfaz IF-HER-04

2.4.5. Interfaz IF-HER-05

La interfaz IF-HER-05 es la interfaz interna que transporta las señales acondicionadas por el hardware de filtrado a la tarjeta de adquisición A/D controlada por el componente de software del Sistema “Hermes”. Posee las mismas características que las descritas para la interfaz IF-HER-05 (ver sección 2.4.1).

2.5. Arquitectura del Sistema

El Sistema “Hermes” es un sistema computacional de procesamiento y generación de señales en tiempo real. Como todo sistema de procesamiento de señales, “Hermes” cumple las siguientes etapas para su funcionamiento:

1. Adquisición
2. Análisis
3. Presentación

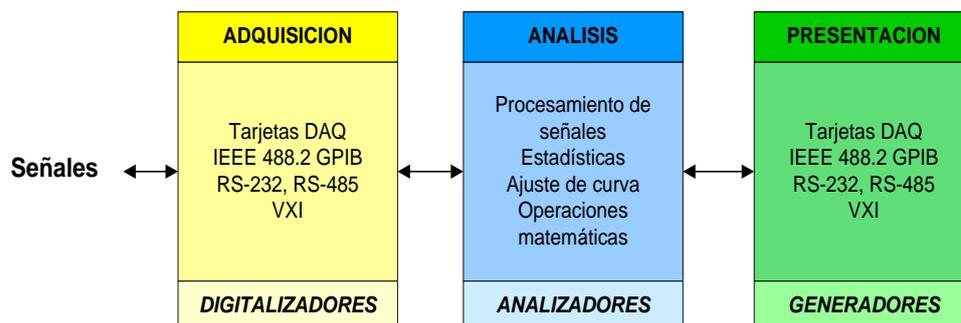


Figura 2.3 Etapas de un Sistema de Procesamiento de Señales

En la etapa de adquisición se reciben las señales que representan el fenómeno físico analizado. Esta etapa se divide a su vez en dos fases: la fase de acondicionamiento de señales y la fase de adquisición propiamente dicha.

La fase de acondicionamiento permite aislar las señales del sistema de medición y realizar un filtrado preliminar según se requiera. También, ésta etapa muchas veces transforma el tipo de señal empleada en el sensor o fuente de datos. Por ejemplo, en sistemas industriales donde las señales tienen que viajar largos recorridos de cable, las señales representadas por voltaje son transformadas a corriente, al presentar éstas últimas una mejor inmunidad al ruido.

En la fase de adquisición se muestrean y digitalizan las señales mediante una tarjeta de adquisición o tarjeta DAQ (Data Acquisition) para su uso en el computador o sistema digital de procesamiento.

Una vez completada la etapa de adquisición, los datos son procesados en la etapa de análisis donde se realizan operaciones matemáticas y filtros digitales.

La última etapa es la de presentación, donde, como su nombre lo indica se presenta o genera la información mediante interfaces de hardware y software que dependen del sistema o usuario final.

2.6. Plataforma de Despliegue

La plataforma de despliegue del Sistema “Hermes” está compuesta por elementos de hardware y software que poseen las características descritas en las siguientes secciones.

2.6.1. Hardware

Los componentes de hardware empleados son:

- 01 Computador Industrial
 - a. Procesador Pentium 4, 1.0GHz, FSB 133MHz
 - b. Memoria 256 MB DDR 400MHz
 - c. Backplane con 04 buses PCI y 03 buses ISA
- 01 Tarjeta DAQ National Instruments PCI-6221

- 03 Tarjetas D/S North Atlantic 76CS1

2.6.2. Software

La plataforma de software del sistema emplea los siguientes componentes de software:

- Sistema Operativo Windows® 2000 SP4
- Venturcom RTX® SDK y Runtime 6.1 Build 4505
- Controlador para tarjeta NI PCI-6221
- Librería VISA para Tarjetas M-Series
- Controlador RTX tarjeta 76CS1

“Hermes” usa el sistema operativo Windows® 2000 SP4 y el subsistema de Tiempo Real RTX® Runtime de Venturcom versión 6.1 para asegurar el determinismo de la plataforma de software.

El componente de software usa el lenguaje programación C++, las librerías, compilador y API de Microsoft Visual Studio C++ 7.1 junto con la API de subsistema RTX.

2.6.3. Determinismo

La plataforma de despliegue cumple los siguientes parámetros de tiempo:

Parámetro	Valor
Latencia de Cambio de Contexto	<5us
Latencia de Respuesta de temporizador	<20us
Tiempo de Ejecución de las Funciones sobre Objetos de Sincronización del Sistema Operativo	<2us

Tabla 2.7 Parámetros de Evaluación de Determinismo

Las mediciones de los parámetros descritos en la tabla 2.7 se realizan con el programa “Platform Evaluator” incluido en el RTX® SDK versión 6.1. Todas las mediciones se ejecutan con la opción “carga de video” habilitada.

2.7. Componentes del Sistema

El Sistema “Hermes” está integrado por cuatro componentes que implementan cada etapa del sistema: el acondicionador de señales, la tarjeta de adquisición, las tarjetas de generación sincrónica y el software de presentación, lógica, control y procesamiento.

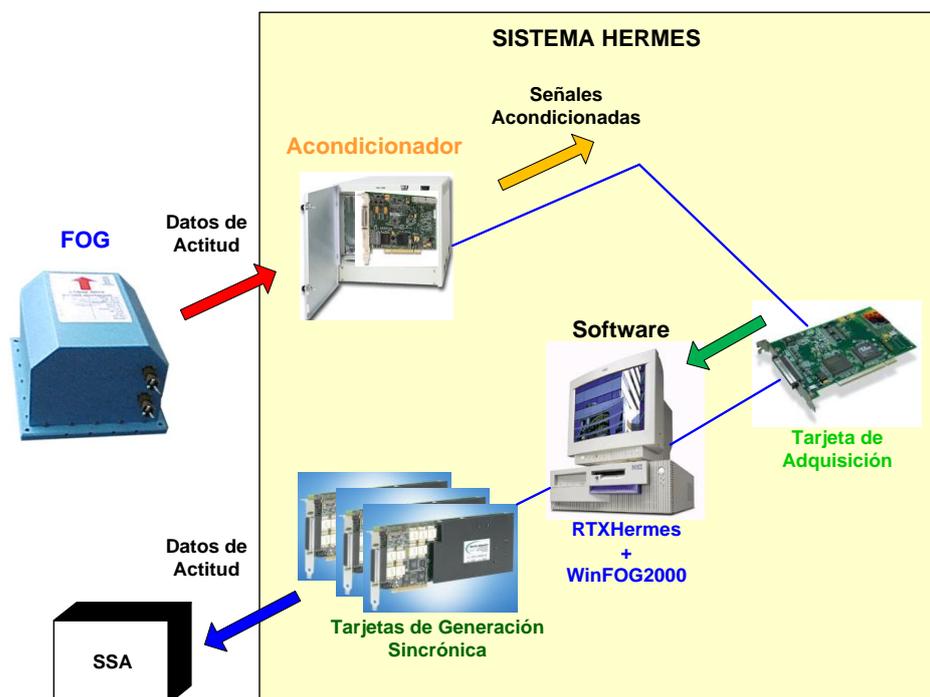


Figura 2.4 Diagrama de Componentes del Sistema "Hermes"

El componente de acondicionamiento elimina el ruido blanco presente en las señales de actitud. Una vez realizada esta fase, se emplea la tarjeta DAQ capaz de convertir las señales de voltaje DC en datos digitales.

Las interfaces sincrónicas implementan la etapa de presentación y su función es generar los datos de actitud para su distribución posterior a los sistemas usuarios.

El software de la solución está conformado por el programa

WinFOG2000 y el componente de tiempo real RTXHermes. La aplicación WinFOG2000 inicializa, configura y mantiene el funcionamiento continuo de la plataforma FOG OTG-64. El componente RTXHermes controla la interfaz de adquisición, realiza los cálculos matemáticos sobre los datos recibidos y genera de los datos de actitud corregidos mediante las interfaces sincrónicas. Con excepción del acondicionador de señales, todos los componentes son controlados por medio del componente de software RTXHermes.

La arquitectura del sistema contempla el despliegue de los componentes de hardware en el interior del computador. Cada componente permite la implementación de las diferentes etapas del sistema. La figura 2.5 muestra la distribución de los componentes según su rol en cada etapa.

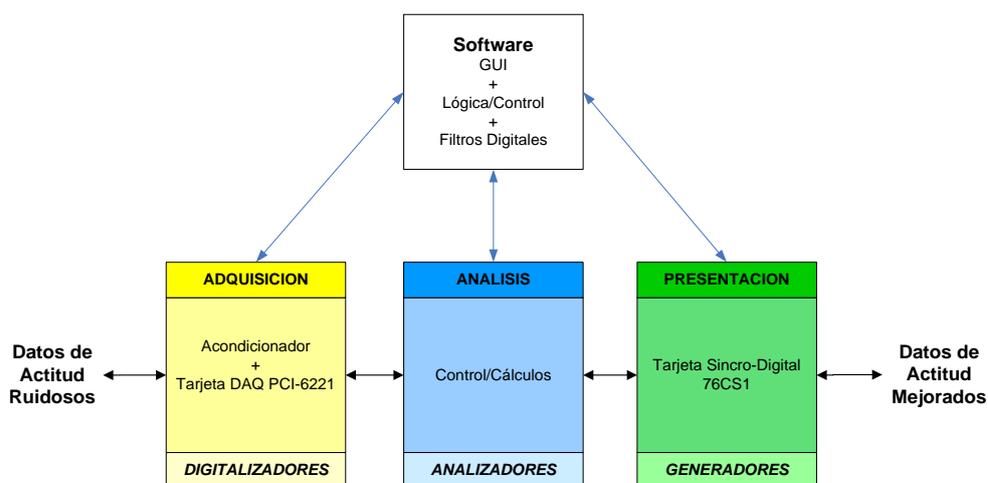


Figura 2.5 Componentes según la Etapa del Procesamiento

2.8. Decisiones Generales de Diseño

Para el desarrollo se toman en cuenta las siguientes decisiones generales de diseño:

1. El acondicionador de señales se implementa por medio de filtros activos en hardware.
2. El acondicionador se energiza por medio de una de las ranuras ISA que posee el computador de despliegue.
3. El acondicionador debe añadir un retardo de señal menor o igual a 20 ms.
4. El filtro activo empleado en el acondicionador debe tener un retardo de fase cercano a un comportamiento lineal.
5. El programa WinFOG2000 se ejecuta de forma paralela e independiente del componente RTXHermes.
6. El programa WinFOG2000 controla las interfaces IF-HER-02 y IF-HER-03.
7. El componente RTXHermes controla las interfaces IF-HER-01 y IF-HER-04.

El Sistema "Hermes" requiere la construcción del acondicionador de señales y el desarrollo del software de control RTXHermes junto con

el empleo de la tarjeta de adquisición analógica-digital A/D y las tarjetas de generación de señales sincrónicas D/S.

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS Y DISEÑO DEL ACONDICIONADOR DE SEÑALES

El acondicionador de señales implementa la fase de acondicionamiento durante la etapa de adquisición de las señales analógicas que representan los datos de actitud provenientes de la plataforma FOG OTG-64.

El presente capítulo desarrolla en su inicio el análisis del ruido en las señales analógicas. Para el diseño de la tarjeta acondicionadora se toman en consideración posibles filtros activos pasa bajos detallando sus ventajas y desventajas. El diseño es diagramado y simulado en la herramienta de desarrollo, para luego ser probado mediante prototipo antes de su construcción definitiva. Al final del capítulo se muestran los resultados de la reducción efectiva del ruido empleando las señales

reales provenientes de la plataforma FOG OTG-64.

3.1. Descripción de las Señales de Actitud

La plataforma FOG OTG-64 posee una interfaz analógica que permite la transmisión de hasta cuatro datos representados por señales de voltaje DC de la interfaz IF-HER-01. Los datos que procesa y pueden ser transmitidos por la plataforma FOG OTG-64 son:

- Rumbo -180° a $+180^{\circ}$
- Rumbo 0° a 360°
- Cabeceo
- Balanceo
- Velocidad Eje X
- Velocidad Eje Y
- Velocidad Eje Z

La plataforma FOG OTG-64 usa una tarjeta digital analógica RUBY MM (D/A) de 12 bits en su interior para generar las señales de voltaje. Los datos transmitidos se escogen mediante el programa WinFOG2000. Cada dato puede ser representado mediante una señal de voltaje DC cuyo rango puede variar entre $-10V$ a $+10V$ y de 0 a $+10V$ DC dependiendo del tipo de dato.

Las señales de voltaje generadas por la tarjeta D/A poseen ruido blanco [3]. El ruido presente en la adquisición de datos es un problema común en sistemas de procesamiento de señales. En el caso de la FOG, el ruido origina la adquisición de falsas vibraciones en los ángulos de actitud del buque y depende de las características propias de la tarjeta digital analógica de 12 bits.

Las mediciones de ruido se realizan para los datos de rumbo, cabeceo y balanceo, es decir, las estrictamente necesarias para los usuarios de la Corbeta clase "Esmeraldas". El ruido es analizado para determinar el filtro activo adecuado para su reducción efectiva.

3.2. Medición de las Señales de Actitud

Para la medición del nivel de ruido presente en las señales de rumbo, cabeceo y balanceo se emplean los siguientes equipos de hardware y componentes de software:

- ✓ Osciloscopio Tektronix TDS3014
- ✓ Puntas de Prueba
- ✓ Fuente de 24 VDC
- ✓ Bornera de Expansión SCB-68

- ✓ Tarjeta National Instruments PCI-6221
- ✓ Computador de Pruebas.
- ✓ Measurement Automation eXplorer (MAX)
- ✓ Controladores de la tarjeta PCI-6221

La plataforma FOG se energiza con la fuente de 24VDC. Los datos de la interfaz IF-HER-01 se distribuyen mediante la bornera de expansión SCB-68. Para la medición de los niveles de ruido se emplean 2 dispositivos de adquisición: el osciloscopio Tektronix y la tarjeta DAQ PCI-6221. Las señales se digitalizan y registran en el computador mediante el uso de la tarjeta PCI-6221 y el Measurement Automation eXplorer (MAX) para su análisis posterior.

La infraestructura del ambiente de medición de las señales ruidosas se muestra en la figura 3.1.

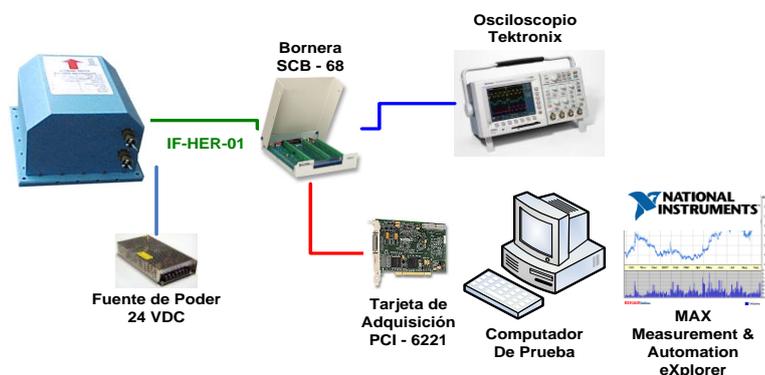


Figura 3.1 Equipos del Ambiente de Prueba de Medición de Ruido

3.2.1. Niveles de Ruido

Los niveles de ruidos encontrados en las señales analógicas de la interfaz IF-HER-01 se detallan en la tabla siguiente.

Señal	Vpp [mV]	Frecuencia [Hz]	Rango Ruido [grados]
rumbo_1	44	50 a 60	1.613
rumbo_2	43	50 a 60	0.777
cabeceo	45	50 a 60	0.136
balanceo	40	50 a 60	0.123

Tabla 3.1 Niveles de Ruido en las Señales de Actitud

Debido que la señal rumbo_1 usa sólo la mitad del rango máximo de voltaje para representar el valor angular, el nivel de ruido en grados es el doble que el observado en la señal rumbo_2.

Todas las señales se muestrean a una tasa de 2.5 ms durante 4 segundos con la tarjeta DAQ PCI-6221 de 16 bits.

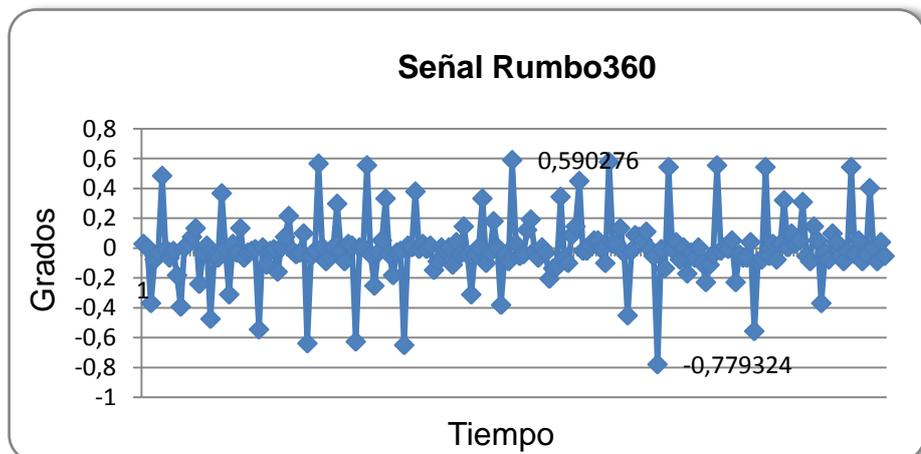


Figura 3.2 Mediciones de la Señal Rumbo_1

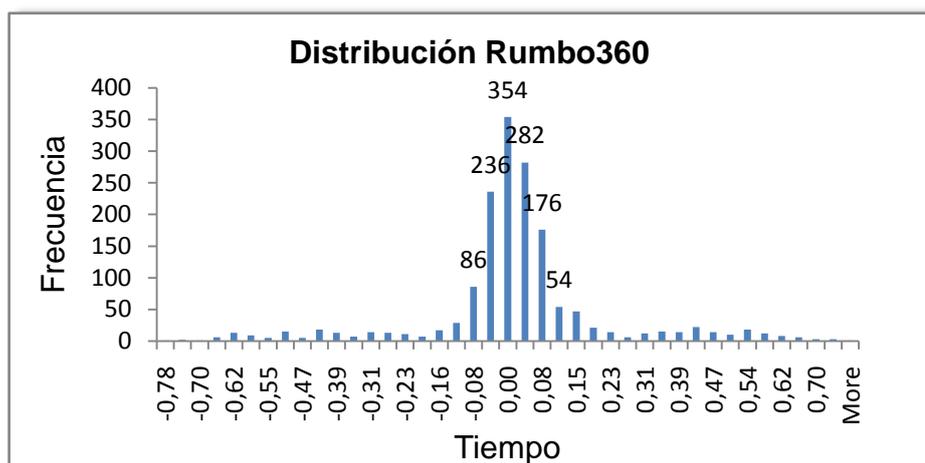


Figura 3.3 Distribución de las Mediciones de la Señal Rumbo_1

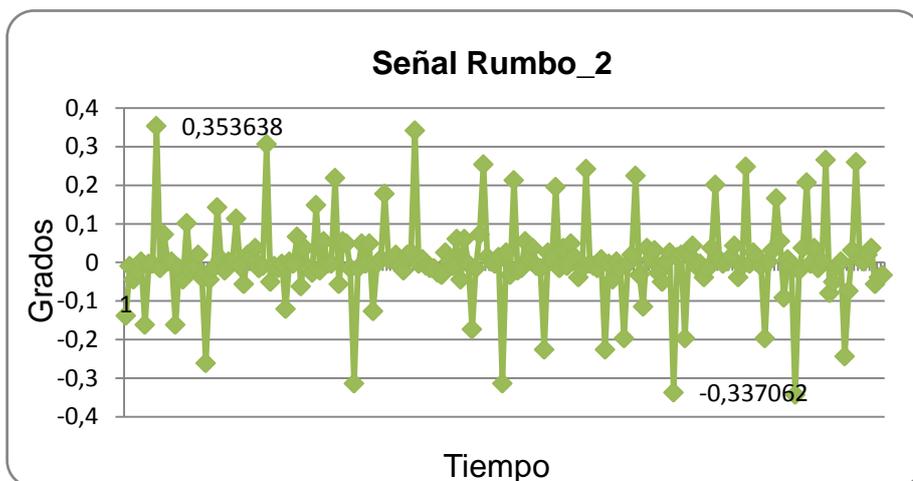


Figura 3.4 Mediciones de la Señal Rumbo_2

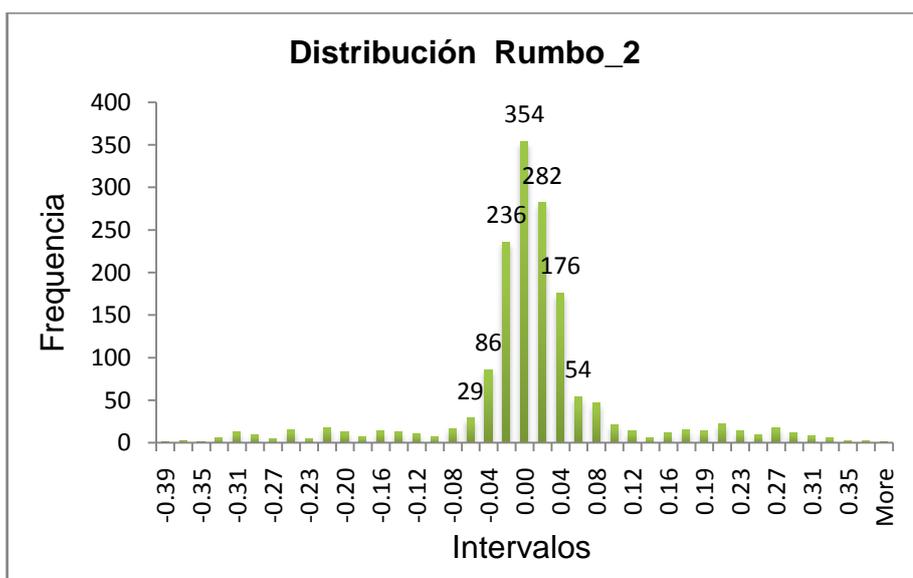


Figura 3.5 Distribución de las Mediciones de la Señal Rumbo_2

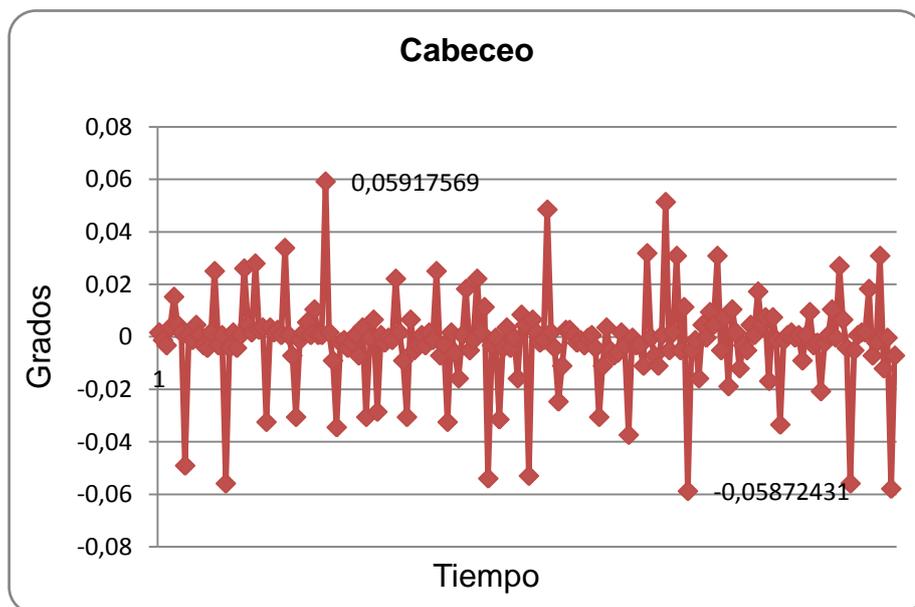


Figura 3.6 Mediciones de la Señal Cabeceo

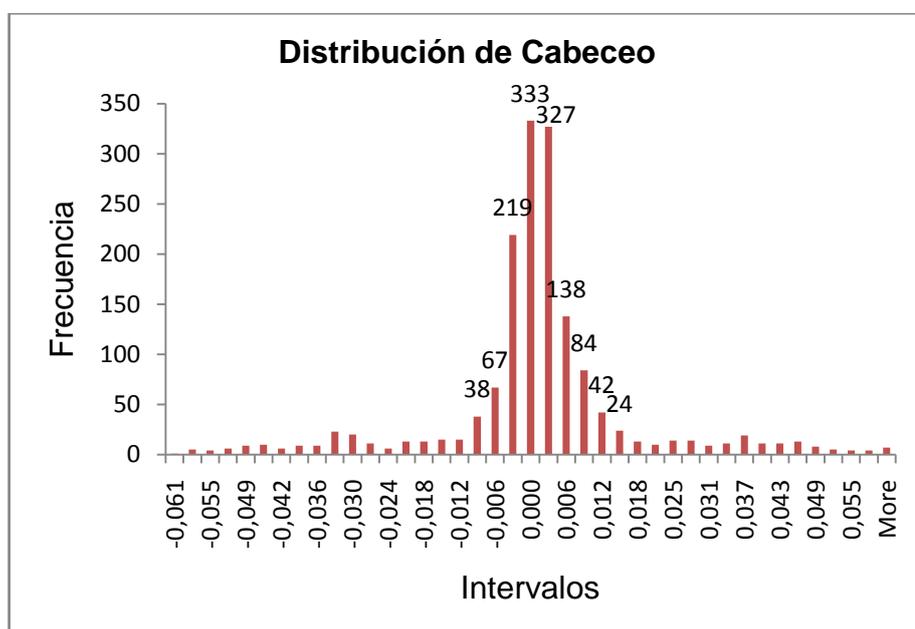


Figura 3.7 Distribución de las Mediciones de la Señal Cabeceo

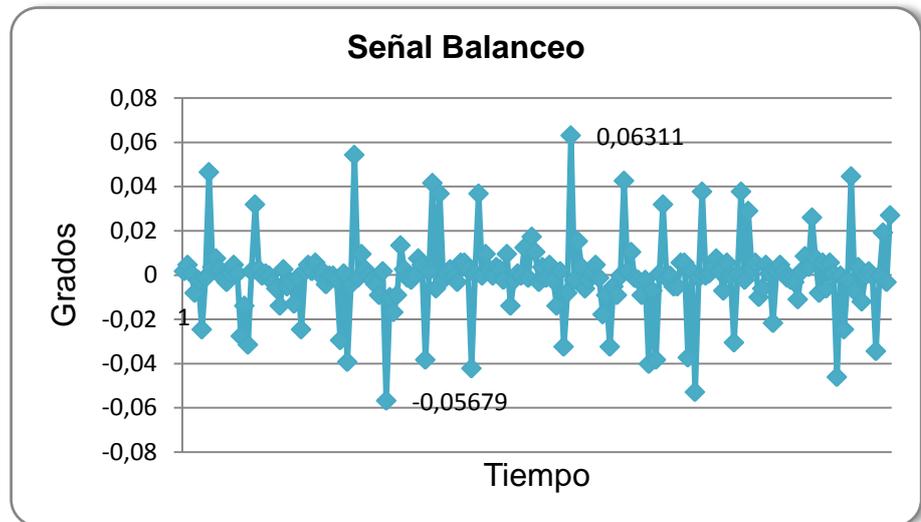


Figura 3.8 Mediciones de la Señal Balanceo

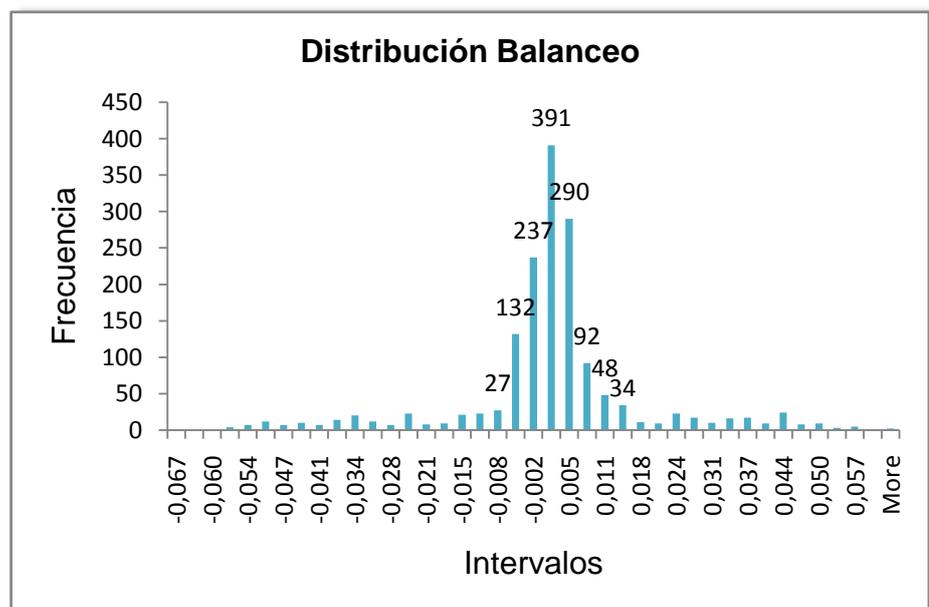


Figura 3.9 Distribución de las Mediciones de la Señal Balanceo

El análisis estadístico arroja los siguientes resultados:

Parámetro	Rumbo_1	Rumbo_2	Cabeceo	Balanceo
Media	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Error típico	0.0026	0.0026	0.00042	0.00042
Mediana	-0.0034	-0.0034	-0.00032	-0.00029
Desviación Estándar	0.1036	0.1037	0.01676	0.01679
Varianza	0.0107	0.0107	0.00028	0.00028
Rango	0.7784	0.7785	0.12180	0.12970
Número de Muestras	1600	1600	1600	1600

Tabla 3.2 Características del Ruido en las Señales de Actitud

Las señales muestreadas se ajustan una distribución de Gauss con media aritmética igual a cero, por tanto, el ruido presente es blanco gaussiano.

De acuerdo a los niveles de ruido y la frecuencia del mismo, es necesario un filtro que elimine eficaz y efectivamente el ruido blanco de las señales de la interfaz IF-HER-01.

3.3. Filtros Activos

Para el diseño del acondicionador existen varias opciones de filtros

activos pasa bajos para la reducción de ruido, como Butterworth, Chevyshev y Bessel [4].

Filtro de Butteworth

Ventajas

- ✓ La respuesta en amplitud cae de forma monotónica.
- ✓ Mantiene su forma para filtros de orden superior.

Desventajas

- Requiere un orden superior para los mismos requerimientos en comparación con otros.
- La respuesta en fase no es lineal.

Filtro de Chevyshev

Ventajas

- ✓ Zona de transición abrupta entre la banda de paso y de atenuación.
- ✓ La atenuación aumenta de forma monotónica.

Desventajas

- Presencia de ondulación o rizado de amplitud en la banda pasante.

- La respuesta en fase no es lineal y es mucho mayor que las de los filtros Butterworth.

Filtro de Bessel

Ventajas

- ✓ Comportamiento lineal en las bandas pasantes.

Desventajas

- Mayor zona de transición entre las bandas pasantes y no pasantes.

3.4. Diseño del Acondicionador

El acondicionador se compone de filtros tipo Butterworth pasa bajos. El filtro Butterworth tiene un comportamiento casi lineal del retardo de fase y una muy buena atenuación para las frecuencias no pasantes. Estas características hacen ideal su uso al brindar atenuación sin distorsionar de manera significativa la fase de las componentes de frecuencia no pasantes de la señal procesada.

El acondicionador tiene cuatro filtros Butterworth. Para las dos señales de rumbo (rumbo_1 y rumbo_2) se utiliza un filtro de cuarto orden. Las señales de cabeceo y balanceo se filtran con un filtro de

segundo orden.

Un filtro de Butterworth de orden superior supone una mayor pendiente, y por ende, mejor atenuación a partir de la frecuencia de corte con la desventaja de un aumento en el retardo o añejamiento de la señal. Las señales de rumbo se procesan con un filtro de cuarto orden debido a que el retardo inducido no afecta a los cambios lentos del rumbo del buque. Para las señales de cabeceo y balanceo se cuenta con un filtro de segundo orden que si bien posee una menor pendiente de atenuación, no genera un retardo excesivo que afecte los cambios rápidos del cabeceo y balanceo.

Físicamente, el acondicionador cuenta con una interfaz ISA que permite la instalación de la tarjeta dentro del computador de despliegue y a la vez energiza los componentes del filtro para su funcionamiento. La tarjeta recibe los datos de actitud de la interfaz IF-HER-01 por medio del conector P1 y transmite las señales acondicionadas por el conector J1 a la tarjeta de adquisición PCI-6221 mediante la interfaz IF-HER-05.

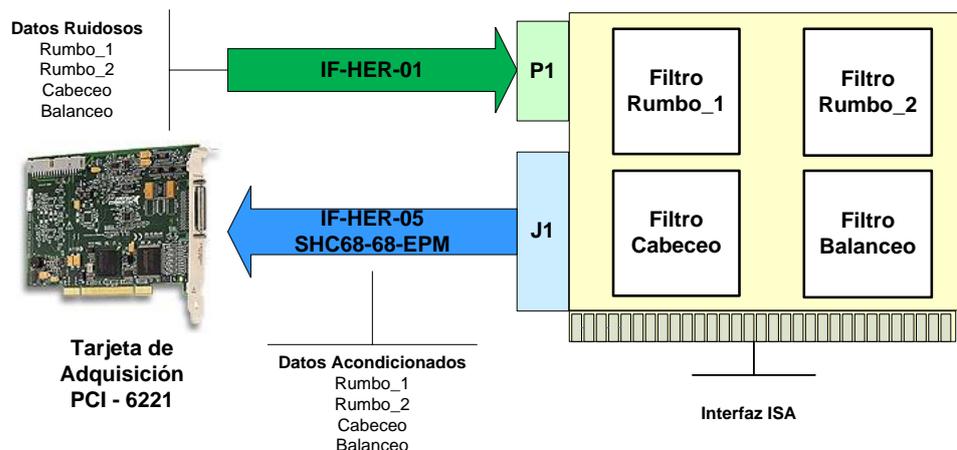


Figura 3.10 Interfaces y Componentes del Acondicionador de Señales

El contenedor metálico del computador protege a la tarjeta del ruido ambiental e interferencias electromagnéticas (EMI). Los filtros activos usan las líneas de alimentación de +12 y -12 VDC, y la tierra (GND) de la ranura ISA. Es decir, los filtros se energizan directamente de la fuente de poder con protección de armónicos del computador, estableciendo una alimentación regulada y una puesta a tierra única en todo el sistema. De esta manera, tanto el sensor, la tarjeta acondicionadora y la tarjeta de adquisición poseen una misma referencia, condición indispensable para adquirir los datos de manera precisa y sin inducción de ruido.

3.4.1. Diseño del Filtro Butterworth de Cuarto Orden

El filtro Butterworth de cuarto orden para la señal rumbo_1 y

rumbo_2 se muestra en la figura 3.11.

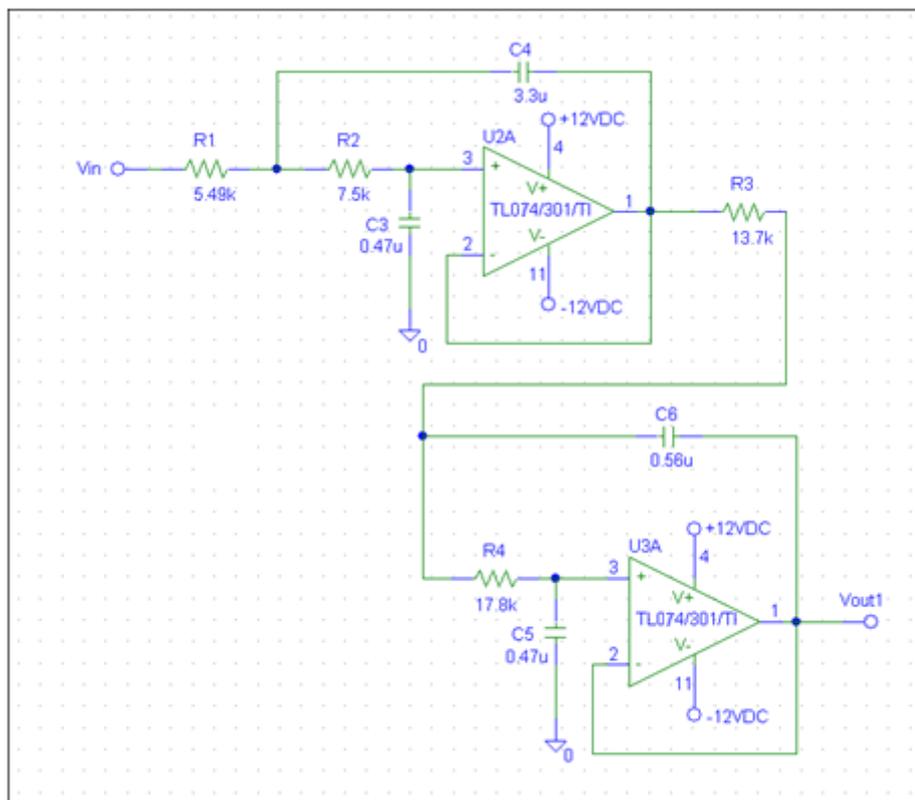


Figura 3.11 Diagrama del Filtro Butterworth de Cuarto Orden

El filtro posee una ganancia unitaria ($G = 1$) con frecuencia de corte de 20 Hz. El filtro emplea amplificadores operacionales TL074CN que son energizados con +12 V DC y -12 V DC. La respuesta del filtro en magnitud es lineal con una pendiente de atenuación de -56 dB/década y su respuesta en fase es no lineal, como se muestra en la figura 3.12.

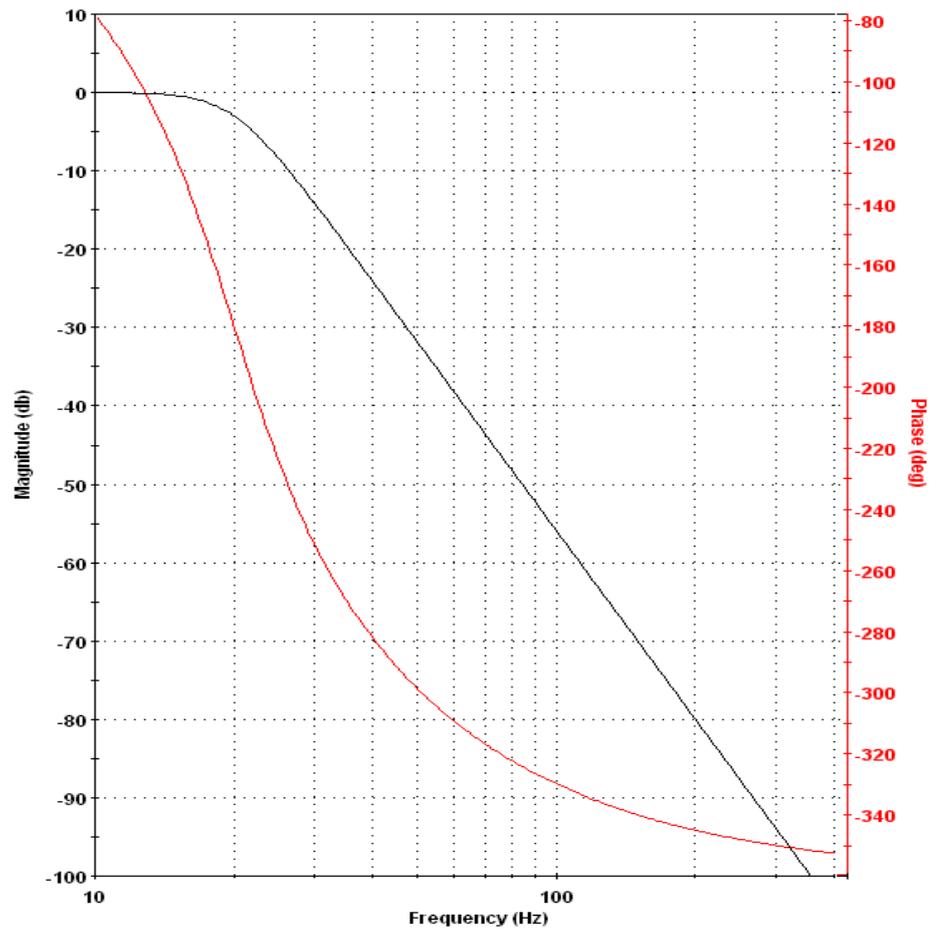


Figura 3.12 Respuesta de Atenuación y Desfase de Filtro Butterworth de Cuarto Orden

La atenuación teórica se obtiene con la simulación de la entrada de ruido blanco representado mediante una señal de 40 mV pico a pico con una frecuencia de 60Hz. La atenuación teórica observada es de 82 veces en amplitud aproximadamente. La figura 3.13 muestra la comparación entre la entrada de ruido blanco simulado y la señal de salida del filtro de cuarto orden.



Figura 3.13 Atenuación del Ruido de 60 Hz del Filtro

Butterworth de Cuarto Orden.

El filtro de cuarto orden introduce un retardo de 21 ms en la señal original. La figura 3.14 compara la entrada de una señal ideal sin ruido de amplitud 10 V con una frecuencia de 1 Hz y la señal de salida del filtro.

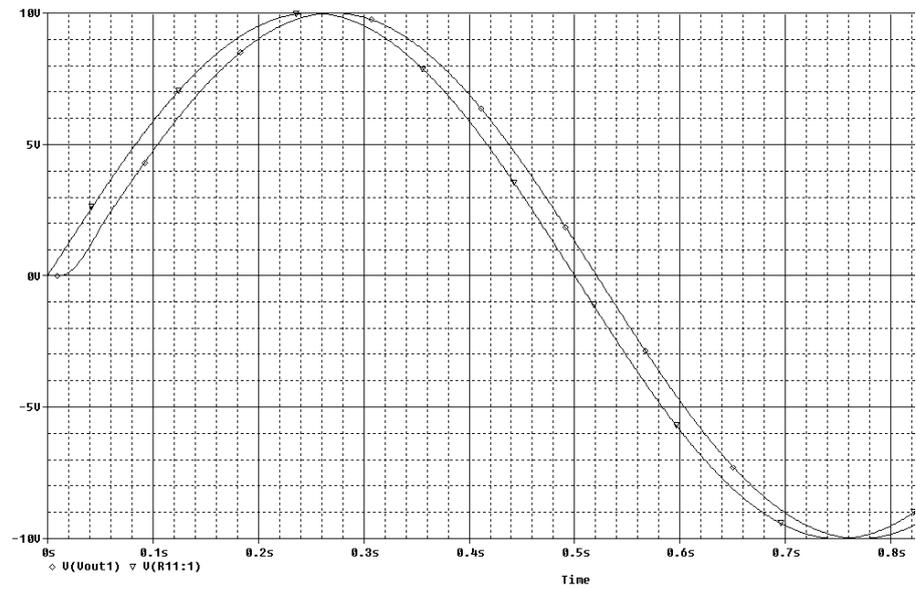


Figura 3.14 Retardo del Filtro Butterworth de Cuarto Orden

3.4.2. Diseño del Filtro Butterworth de Segundo Orden

El esquema del filtro Butterworth de segundo orden usado para acondicionar las señales de cabeceo y balanceo se muestra en la figura 3.15.

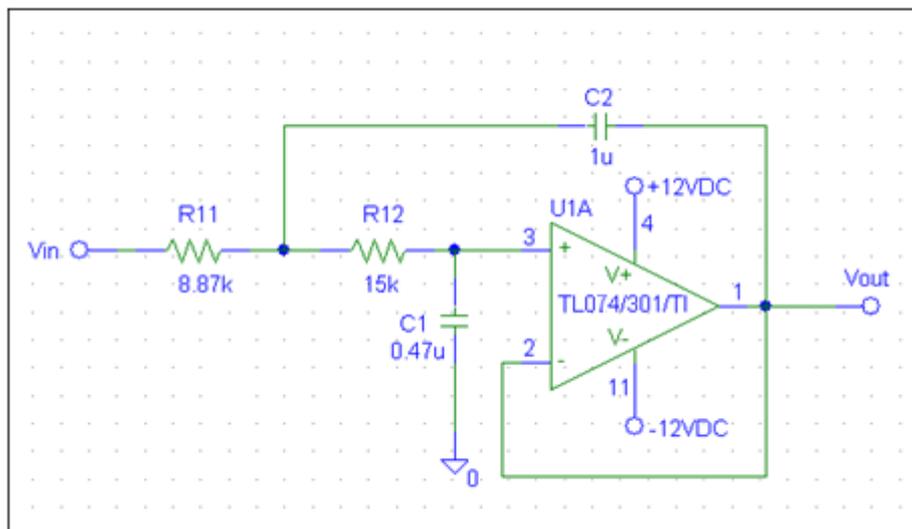


Figura 3.15 Diagrama del Filtro Butterworth de Segundo Orden.

El filtro de segundo orden posee una ganancia unitaria ($G = 1$) con frecuencia de corte de 20Hz. El filtro emplea amplificadores operacionales TL074CN que son energizados con +12 V DC y -12 V DC. La respuesta del filtro en magnitud es lineal con una pendiente de atenuación de -28 dB/década y su respuesta en fase es no lineal, como se muestra en la figura 3.16.

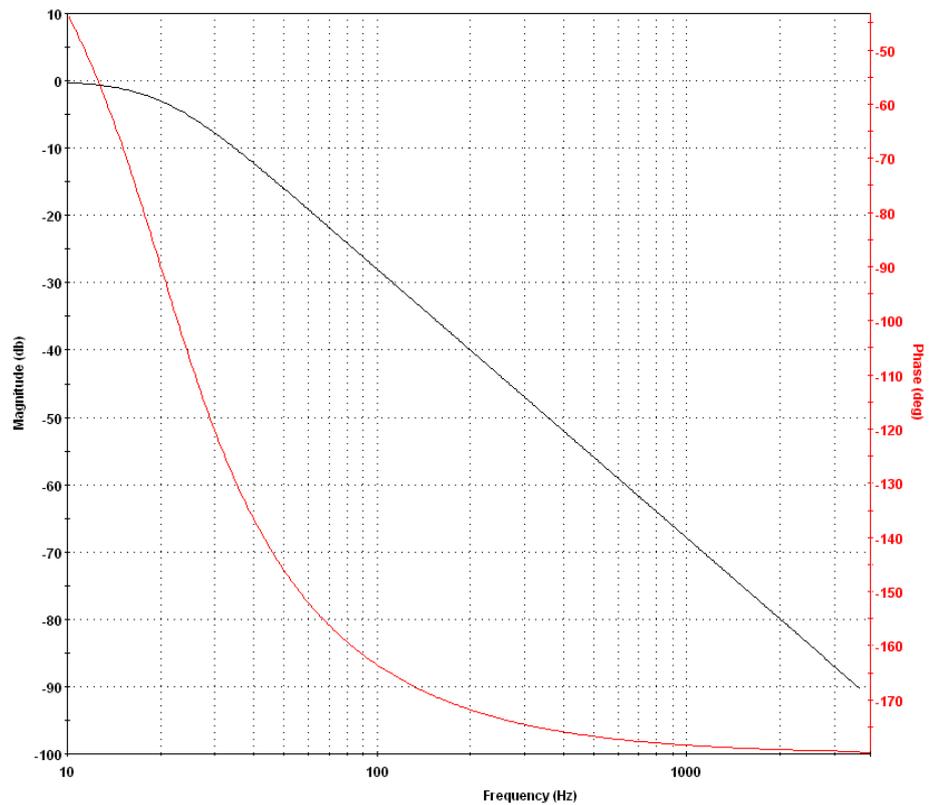


Figura 3.16 Respuesta de Atenuación y Desfase del Filtro Butterworth de Segundo Orden.

La atenuación teórica del filtro se obtiene con la simulación de ruido blanco representado con una señal de 40 mV pico a pico con una frecuencia de 60Hz. La atenuación teórica observada es de 9 veces en amplitud. La figura 3.17 muestra la atenuación comparando el ruido blanco de entrada y la señal de salida del filtro de segundo orden.

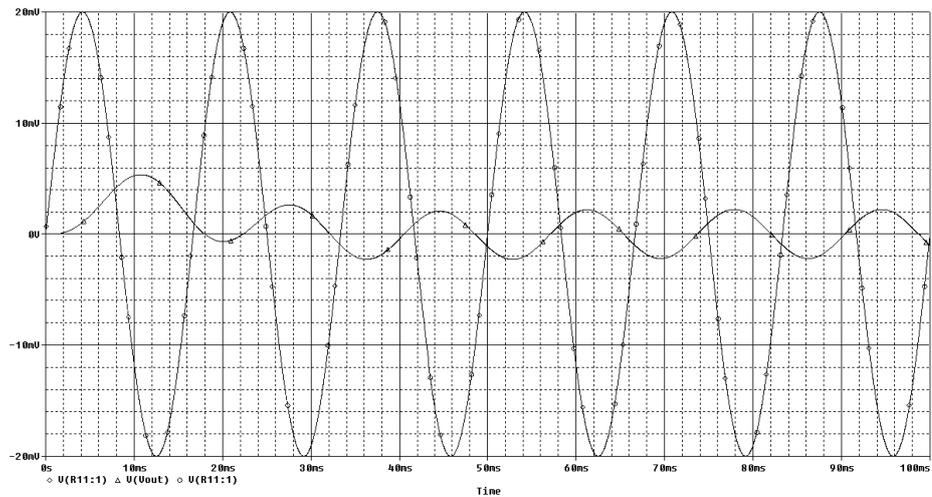


Figura 3.17 Simulación de Atenuación de Ruido de 60 Hz del Filtro Butterworth de Segundo Orden.

El filtro de segundo orden introduce un retardo de 11 ms en la señal original. La figura 3.18 compara la entrada de una señal ideal sin ruido de amplitud 10 V con una frecuencia de 1 Hz y la señal de salida del filtro.

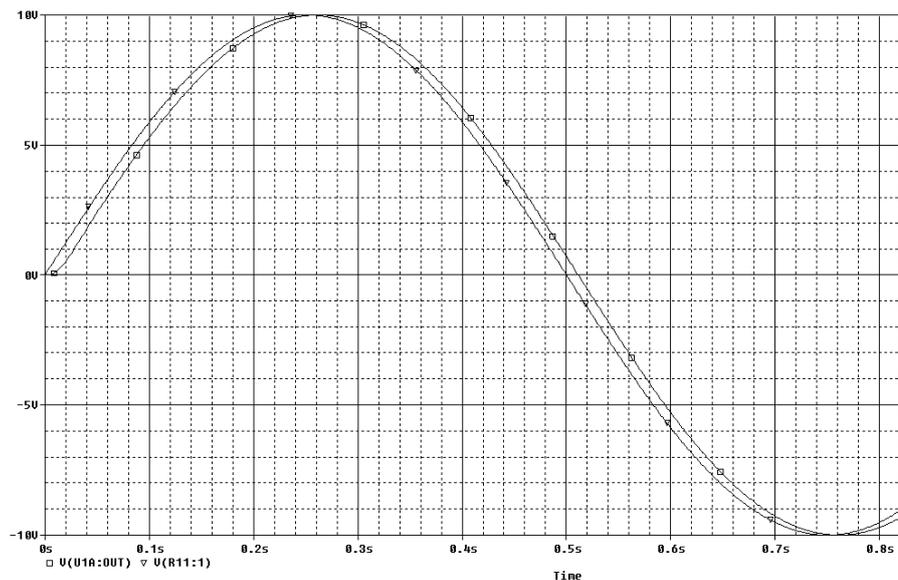


Figura 3.18 Retardo del Filtro Butterworth de Segundo Orden

3.4.3. Distribución de Señales en las Interfaces

La descripción de pines de las interfaces P1, J1 e ISA se detallan en el Anexo D.

3.5. Producto Final

Los esquemáticos, diagrama topológico y red de pistas se encuentran en el Anexo E.

3.6. Pruebas del Acondicionador

3.6.1. Ambiente de Prueba

La prueba de la tarjeta acondicionadora se ejecuta con el mismo ambiente de pruebas utilizado para el análisis de ruido

descrito en la sección 3.2.

3.6.2. Respuesta del Filtro Butterworth de Cuarto Orden

El filtro Butterworth de cuarto orden acondiciona las señales rumbo_1 y rumbo_2, disminuyendo el ruido blanco en las mismas.

Para verificar la atenuación del ruido blanco se conecta la señal analógica del rumbo al acondicionador y se adquiere la señal filtrada a una tasa de 2.5 ms con la tarjeta NI PCI-6221. Las mediciones son almacenadas con el uso del Measurement Automation eXplorer y posteriormente analizadas con Excel.

El filtro atenúa la señal ruidosa eficazmente, reduciendo la desviación estándar en 27 veces respecto de la señal original de rumbo original. La figura 3.19 muestra la señal filtrada de rumbo referida a cero.

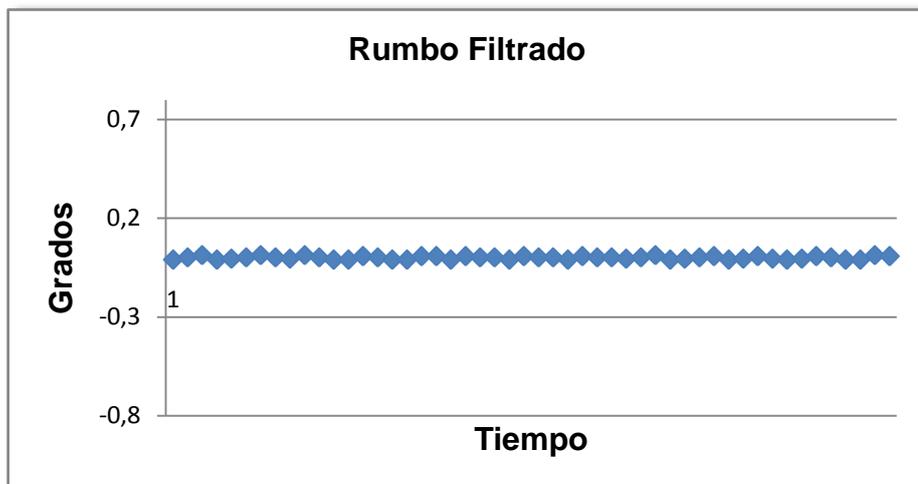


Figura 3.19 Señal de Rumbo Filtrado

Las mediciones poseen una menor dispersión según se aprecia en el histograma de la figura 3.20.

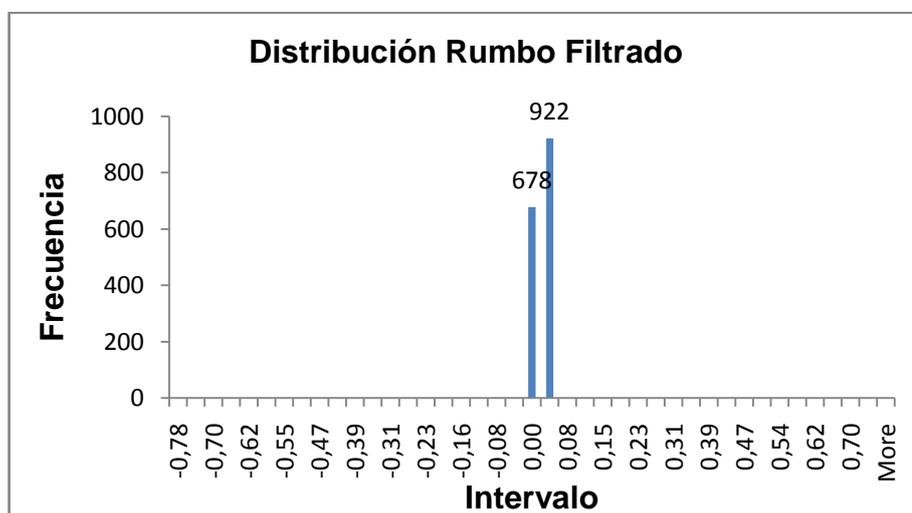


Figura 3.20 Distribución del Rumbo Filtrado

La señal filtrada posee un menor error típico y desviación estándar. La tabla muestra los resultados obtenidos.

Parámetro	Rumbo_1	Rumbo_2
Media	0.0000	0.0000
Error típico	0.00019	0.00019
Mediana	0.00197	0.00195
Desviación Estándar	0.00746	0.00746
Varianza	0.00006	0.00006
Rango	0.03510	0.036
Número de Muestras	1600	1600

Tabla 3.3 Características de la Señal de Rumbo Filtrada con el Filtro Butterworth de Cuarto Orden

3.6.3. Respuesta del Filtro Butterworth de Segundo Orden

El filtro Butterworth de segundo orden disminuye las componentes del ruido blanco existentes en las señales analógicas de cabeceo y balanceo.

Para analizar el comportamiento real del filtro se conecta la señal de cabeceo y/o balanceo a la entrada del acondicionador. Luego se adquiere la señal filtrada de salida muestreada cada

2.5 ms mediante el Measurement Automation eXplorer y la tarjeta NI PCI-6221. Los datos son analizados mediante Excel.

La señal filtrada presenta una atenuación efectiva del ruido presente en las señales de cabeceo y balanceo provenientes de la plataforma FOG OTG-64. La desviación estándar de los datos en la señal disminuye en 16 veces respecto de la señal ruidosa original. La figura 3.21 muestra la señal filtrada de cabeceo referenciada a cero para fines de visualización.

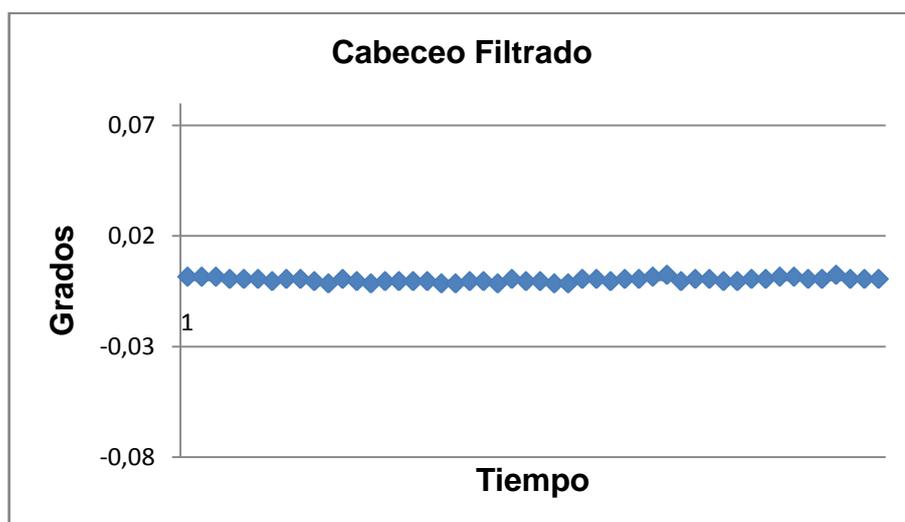


Figura 3.21 Señal de Cabeceo Filtrado

También la dispersión de los datos disminuye como se aprecia en la figura 3.22.

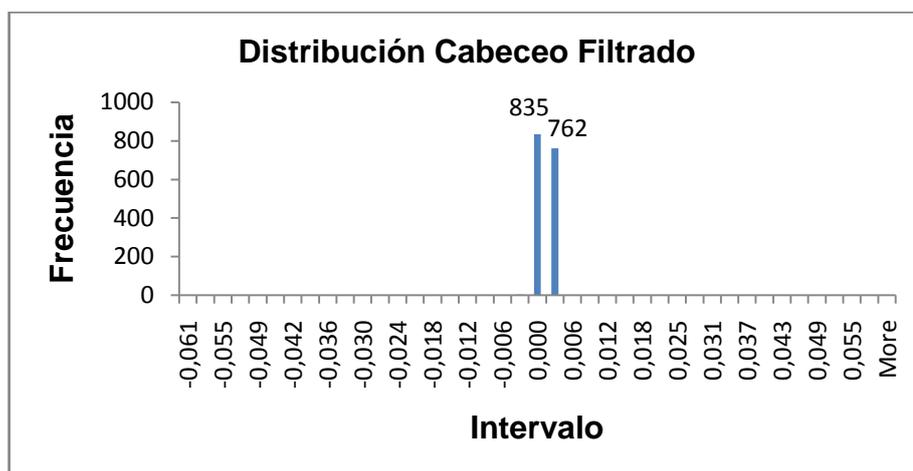


Figura 3.22 Distribución del Cabeceo Filtrado

Igual atenuación se logra en la señal de cabeceo, debido a que posee las mismas características y emplea el mismo tipo de filtro Butterworth. La señal filtrada posee una menor desviación estándar, aproximadamente 16 veces menor respecto de la señal ruidosa original. La tabla 3.4 muestra los resultados obtenidos.

Parámetro	Cabeceo	Balanceo
Media	0.0000	0.0000
Error típico	0.00003	0.00003

Mediana	-0.00046	-0.00015
Desviación Estándar	0.00103	0.00106
Varianza	0.0000011	0.000011
Rango	0.00580	0.00590
Número de Muestras	1600	1600

Tabla 3.4 Características de las Señales de Cabeceo y
Balanceo Filtradas con el Filtro de Segundo Orden

CAPÍTULO 4

4. COMPONENTES INHERENTES AL DESARROLLO DEL SOFTWARE: SUBSISTEMA DE TIEMPO REAL RTX, FILTRO KALMAN Y MODELO LAX-WENDROFF

El presente capítulo abarca la descripción del subsistema de tiempo real RTX empleado como parte de la plataforma de despliegue para lograr el determinismo del aplicativo. De manera adicional se muestra la teoría del filtro Kalman y el modelo LaxWendroff. Ambos componentes son empleados para suavizar y corregir digitalmente los datos de actitud de la FOG mediante el uso del computador.

4.1. Subsistema de Tiempo Real RTX

El subsistema de tiempo real RTX permite el uso de Windows® 2000

y Windows® XP como plataforma de tiempo real estricto. Por definición se entiende como “tiempo real estricto” al cumplimiento de límites operacionales de tiempo de eventos de un sistema. Mediante el subsistema RTX tanto las aplicaciones o módulos que requieren un comportamiento determinístico y una respuesta rápida en tiempo, así como los programas comunes, pueden trabajar en conjunto bajo un mismo sistema operativo.

En contraste con sistemas empotrados de tiempo real, al integrar RTX con Windows® se puede emplear un sistema de bajo costo y de amplio uso para cumplir los requerimientos y capacidades de un sistema de tiempo real estricto.

4.1.1. Arquitectura del Subsistema RTX

RTX añade un subsistema de tiempo real a Windows® denominado RTSS (Real Time SubSystem, por sus siglas en inglés). RTSS conceptualmente es similar a otros subsistemas tales como Win32, POSIX, WOW y DOS) en el sentido que soporta su propio ambiente de ejecución y posee su propia interfaz de programación de aplicación o API (Application Programming Interface).

RTSS se diferencia de otros subsistemas en dos aspectos importantes. En primer lugar, RTSS no emplea el planificador de tareas de Windows®. RTSS emplea su propio planificador de tareas de tiempo real. En segundo lugar, en un ambiente monoprocesador, toda la planificación de tarea de RTSS se procesa antes de la planificación de Windows®, incluso el manejo de interrupciones y las llamadas a procedimiento demorado (DPC).

La figura 4.1 muestra los componentes que permiten trabajar a Windows® y RTX en conjunto.

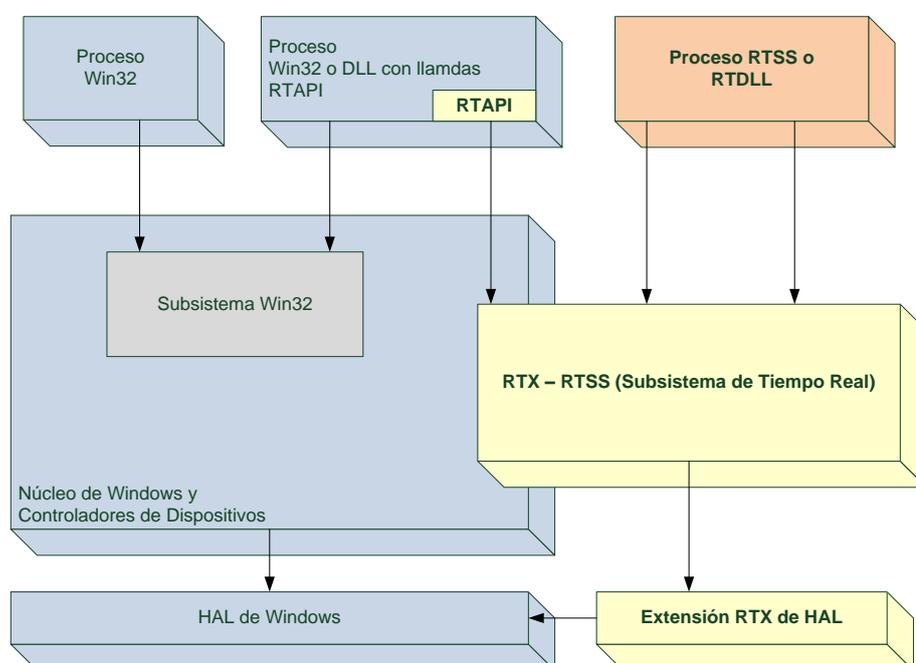


Figura 4.1 Arquitectura de Win32 y RTX

RTSS soporta la comunicación entre procesos o IPC mediante objetos de sincronización que pueden ser usados tanto por procesos Win32 o RTSS. Esta capacidad permite la implementación de una comunicación estándar entre programas de tiempo real estricto y programas que no son de tiempo real. Adicionalmente, RTSS expone servicios de temporización y de reloj, además de manejo de interrupciones exclusivamente para procesos RTSS.

RTSS administra el hardware mediante una extensión de la capa de abstracción de hardware o HAL (Hardware Abstraction Layer). Esta extensión aísla el manejo de interrupciones entre Win32 y RTX. Windows® no puede enmascarar interrupciones manejadas por el RTSS. Así también, la extensión de HAL del RTSS soporta tanto los relojes de alta resolución y temporizadores de tiempo real, y los temporizadores y relojes de Windows®.

4.1.2. Interfaz de Programación de Aplicación

La interfaz de programación de aplicación de RTX se basa en la API de Windows®. El API de RTX está disponible para los

procesos Win32 y RTSS, pero con la diferencia inherente en respuesta y rendimiento.

El subsistema RTX soporta un subconjunto de funciones de la API de Win32 más un conjunto especial de funciones de tiempo real denominado RTAPI (Real-Time API). Las funciones de la RTAPI están definidas por el prefijo "Rt" en sus nombres. Algunas funciones son semánticamente similares a su contraparte en Win32 como los objetos de sincronización. Sin embargo, existen ciertas funciones únicas del ambiente RTX como el manejo de interrupciones.

RTX no incluye ninguna función de Win32 relacionada con el manejo de interfaces gráficas usadas por los componentes menos críticos de un programa. Por este motivo, todo diseño de un sistema que emplee RTX como base para su implementación debe considerar el uso de al menos dos procesos que trabajen de manera simultánea. El primero basado en Win32, que explote las características gráficas y otros servicios de Windows® e implemente las funciones no críticas. Y el segundo basado en RTSS, que ejecute el procesamiento de tiempo real estricto.

4.1.3. Tipos de Componentes Ejecutables RTX

El ambiente RTX permite la creación de tres tipos de componentes ejecutables:

- Aplicación RTSS
- RTSS DLL
- RTDLL

Una aplicación RTSS es el equivalente en tiempo real de un programa en Win32. Una RTSS DLL es una aplicación RTSS que ha sido enlazada para generar una librería exportable cuyas funciones pueden ser usadas por un proceso RTSS. Este tipo de componente es análogo a las librerías dinámicas implícitas de Win32. Debido a que son esencialmente procesos RTSS, una librería RTSS DLL debe ser ejecutada de forma manual antes de ser usada por un proceso RTSS. Una RTDLL es un contenedor pasivo de código, funcionalmente similar a un RTSS DLL, con la diferencia que debe ser cargada y descargada de forma explícita por el proceso que la invoca.

4.1.4. Servicios de RTX

RTX soporta los siguientes servicios:

- Manejo de Procesos e Hilos
 - Procesos e Hilos
 - Sistema de Administración de Memoria
 - Memoria Determinística
 - Relojes y Temporizadores
- Comunicación entre Procesos
 - Memoria Compartida
 - Semáforos
 - Eventos
 - Mutex
- Administración de Dispositivos
 - Interrupciones
 - E/S Puerto
 - Mapeo Físico de Memoria
 - E/S Bus

4.2. Filtro Kalman

El filtro Kalman es un filtro recursivo eficiente que estima el estado de un sistema dinámico de una serie de mediciones incompletas y

ruidosas [5]. Fue desarrollado por el matemático americano-húngaro Rudolf Kalman en 1960.

El filtro Kalman por definición es un estimador recursivo [6]. Esto quiere decir que únicamente el estado estimado de la etapa anterior y los datos actuales son necesarios para calcular la estimación del estado actual. A diferencia de otras técnicas de estimación, el filtro Kalman, no requiere un historial de las observaciones y/o estimados. Otra característica de este filtro es su habilidad de auto adaptarse a ambientes no estacionarios.

El filtro Kalman también puede ser visto como un estimador secuencial de mínimos cuadrados de una señal con ruido aditivo [7]. Si el ruido de la señal es gaussiano, el filtro Kalman es óptimo al minimizar la pérdida cuadrática. Si el ruido no es gaussiano, el filtro Kalman es el mejor estimador lineal.

4.2.1. Definición Matemática

El filtro Kalman da solución al problema de estimación del estado X , del sistema en tiempo discreto definido por:

$$X_n = \Phi_{n|n-1} X_{n-1} + G_{n-1} W_{n-1} \quad (4.2.1)$$

a partir de mediciones ruidosas Z , de la forma:

$$Z_n = H_n X_n + V_n \quad (4.2.2)$$

Se asume que W_n y V_n son procesos aleatorios independientes con distribución de probabilidad de Gauss; es decir:

Ruido del Sistema (Media Cero y varianza Q)

$$W_n = N(0, Q) \quad (4.2.3)$$

Ruido de las Mediciones (Media Cero y varianza R)

$$V_n = N(0, R) \quad (4.2.4)$$

Se define además:

$\Phi_{n n-1}$	Matriz transición de estado
G_{n-1}	Matriz control del ruido aleatorio del sistema.
H_n	Matriz de medida

Es posible configurar el filtro Kalman para encontrar la estimación de estados pasados (alisado), presentes (filtrado) y futuros (predicción).

4.2.2. Descripción Funcional

Se designa con $\hat{X}_{n|n-1}$ a la estimación anticipada del vector de estados en el paso n basado en el conocimiento del proceso anterior n-1, y con $\hat{X}_{n|n}$ a la estimación posterior del estado en el paso n dada la medición Z_n . Entonces se define los errores de la estimación anticipada y posterior como:

$$e_{n|n-1} = X_n - \hat{X}_{n|n-1} \quad (4.2.5)$$

$$e_{n|n} = X_n - \hat{X}_{n|n} \quad (4.2.6)$$

y las correspondientes matrices de covarianzas de estos

errores,

$$P_{n|n-1} = E \left[e_{n|n-1} e_{n|n-1}^T \right] \quad (4.2.7)$$

$$P_{n|n} = E \left[e_{n|n} e_{n|n}^T \right] \quad (4.2.8)$$

Para obtener las ecuaciones del filtro, se parte del objetivo de encontrar una ecuación que calcule una estimación posterior del estado $\hat{X}_{n|n}$, como una combinación lineal de una estimación anticipada y una diferencia ponderada entre la medición presente Z_n y una predicción de la medición $H_n \hat{X}_{n|n-1}$, es decir:

$$\hat{X}_{n|n} = \hat{X}_{n|n-1} + K_n (Z_n - H_n \hat{X}_{n|n-1}) \quad (4.2.9)$$

A la diferencia $Z_n - H_n \hat{X}_{n|n-1}$ se la denomina innovación de la medición o residuo, v_n . Refleja la discrepancia entre la medición predicha y la medición real. La matriz de peso K_n se elige tal que minimice la covarianza del error posterior $P_{n|n}$. Reemplazando la ecuación 4.2.8 en la expresión del error $e_{n|n}$ en la ecuación 4.2.5 y luego en 4.2.7, y tomando la derivada

respecto a K , e igualando a cero resulta:

$$K_n = P_{n|n-1} H_n^T \left[H_n P_{n|n-1} H_n^T + R_n \right]^{-1} \quad (4.2.10)$$

$$K_n = \frac{P_{n|n-1} H_n^T}{H_n P_{n|n-1} H_n^T + R_n} \quad (\text{Uso escalar}) \quad (4.2.11)$$

Se observa en la ecuación 4.2.11 que cuando la covarianza del ruido de medición R_n tiende a cero, la ganancia K pesa a los residuos más fuertemente. Específicamente:

$$\lim_{R_n \rightarrow 0} K_n = H_n^{-1} \quad (4.2.12)$$

Por otra parte, cuando la covarianza $P_{n|n-1}$ del error de la estimación anticipada tiende a cero, la ganancia K pesa a los residuos más levemente. Específicamente:

$$\lim_{P_{n|n-1} \rightarrow 0} K_n = 0 \quad (4.2.13)$$

En otras palabras, a medida que la covarianza del error de medición R_n se aproxima a cero, se confía más en las mediciones reales Z_n , mientras que se confía menos en la predicción $H_n \hat{X}_{n|n-1}$ de la medición. Por otra parte, a medida que la covarianza $P_{n|n-1}$ del error de la estimación anticipada se aproxima a cero, se confía cada vez menos en la medición real Z_n , y cada vez más en la predicción $H_n \hat{X}_{n|n-1}$ de la medición.

4.2.3. Algoritmo del Filtro Kalman

Las ecuaciones del filtro Kalman pueden dividirse en dos grupos bien definidos: Las ecuaciones de predicción y las ecuaciones de corrección.

En la predicción se proyecta hacia delante (en el tiempo) la estimación del estado presente y de la covarianza del error para obtener una estimación anticipada para la próxima iteración.

Las ecuaciones son:

- Proyecta el estado hacia delante:

$$\hat{X}_{n|n-1} = \Phi_{n|n-1} \hat{X}_{n-1|n-1} \quad (4.2.14)$$

- Proyecta covarianza error adelante

$$P_{n|n-1} = \Phi_{n|n-1} P_{n-1|n-1} \Phi_{n|n-1}^T + G_{n-1} Q_{n-1} G_{n|n-1}^T \quad (4.2.15)$$

Las ecuaciones de corrección incorporan una nueva medición en la estimación anticipada para obtener una estimación posterior mejorada. Las ecuaciones son:

- Determina el residual o innovación

$$v_n = Z_n - H_n \hat{X}_{n|n-1} \quad (4.2.16)$$

- Determina la covarianza del residual

$$S_n = H_n P_{n|n-1} H_n^T + R_n \quad (4.2.17)$$

- Calcula la ganancia de Kalman

$$K_n = P_{n|n-1} H_n^T + S_n^{-1} \quad (4.2.18)$$

- Actualiza (filtra) la estimación con la medida (residual)

$$\hat{X}_{n|n} = \hat{X}_{n|n-1} + K_n v_n \quad (4.2.19)$$

- Actualiza covarianza del error

$$P_{n|n} = (I - K_n H_n) P_{n|n-1} \quad (4.2.20)$$

4.2.4. Diagrama de Flujo

Implementación del filtro Kalman.

Modelo:

$$Z_n = H_n X_n + V_n$$

$$X_n = \Phi_{n|n-1} X_{n-1} + G_{n-1} W_{n-1}$$

Matriz covarianza ruido de las mediciones u observaciones:

$$R_n = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z^2 \end{pmatrix}$$

Matriz covarianza ruido del sistema:

$$Q_n = \begin{pmatrix} q_x^2 & 0 & 0 \\ 0 & q_y^2 & 0 \\ 0 & 0 & q_z^2 \end{pmatrix}$$

Donde σ_x^2 y q_x^2 se definen como la varianza de las mediciones y de los datos, respectivamente.

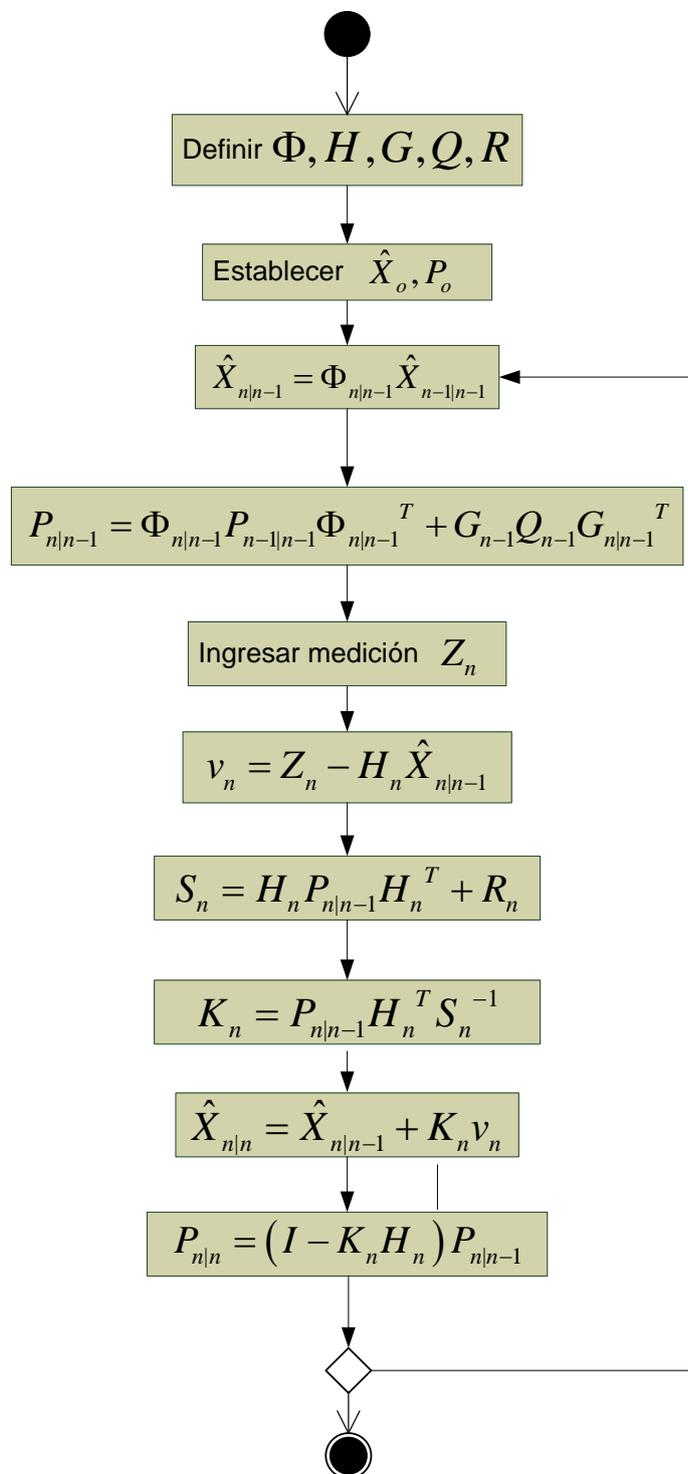


Figura 4.2 Diagrama de flujo del filtro Kalman

4.3. Esquema Lax-Wendroff

El modelo Lax-Wendroff es un método numérico de segundo orden basado en la expansión de las Series de Taylor. Emplea los tres primeros términos de la expansión en tiempo donde las derivadas en tiempo son reemplazadas por derivadas espaciales. Luego las derivadas espaciales son aproximadas mediante el uso de diferencias centralizadas.

4.3.1. Definición Matemática

Si se tiene una señal dada por la función $f(x, t)$ en una sola dimensión que cumple la ecuación de conservación de energía

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mu \frac{\partial f}{\partial x} = 0 \quad (4.3.1)$$

Donde $x = \mu t$, siendo μ la velocidad de propagación de la señal.

Se expande el valor de la función en el punto $t + \Delta t$ mediante la serie de Taylor de segundo orden

$$f_{x_j}^{t+\Delta t} = f_{x_j}^t + \Delta t \frac{\partial f}{\partial t} \Big|_{x_j} + \frac{\Delta t^2}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} \Big|_{x_j} \quad (4.3.2)$$

Se aplica la transformación a derivadas espaciales mediante la

ecuación 4.3.1 y aplicando diferencias centralizadas para las derivadas de primer 4.3.3 y segundo orden 4.3.4, se obtiene

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f_{j+1}^t - f_{j-1}^t}{2\Delta x} \quad (4.3.3)$$

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{f_{j+1}^t - 2f_j^t + f_{j-1}^t}{\Delta x^2} \quad (4.3.4)$$

$$f_j^{t+\Delta t} = f_j^t - \beta (f_{j+1}^t - f_{j-1}^t) + \frac{\beta^2}{2} (f_{j+1}^t - 2f_j^t + f_{j-1}^t) \quad (4.3.5)$$

Donde $\beta = \mu \frac{\Delta t}{\Delta x}$

La ecuación 4.3.5 es la fórmula de ajuste en función de los valores de la señal para calcular su valor futuro en $t + \Delta t$.

4.3.2. Diagrama de Flujo

Para una función de señal en el tiempo $f(x, t)$ con n valores para la señal.

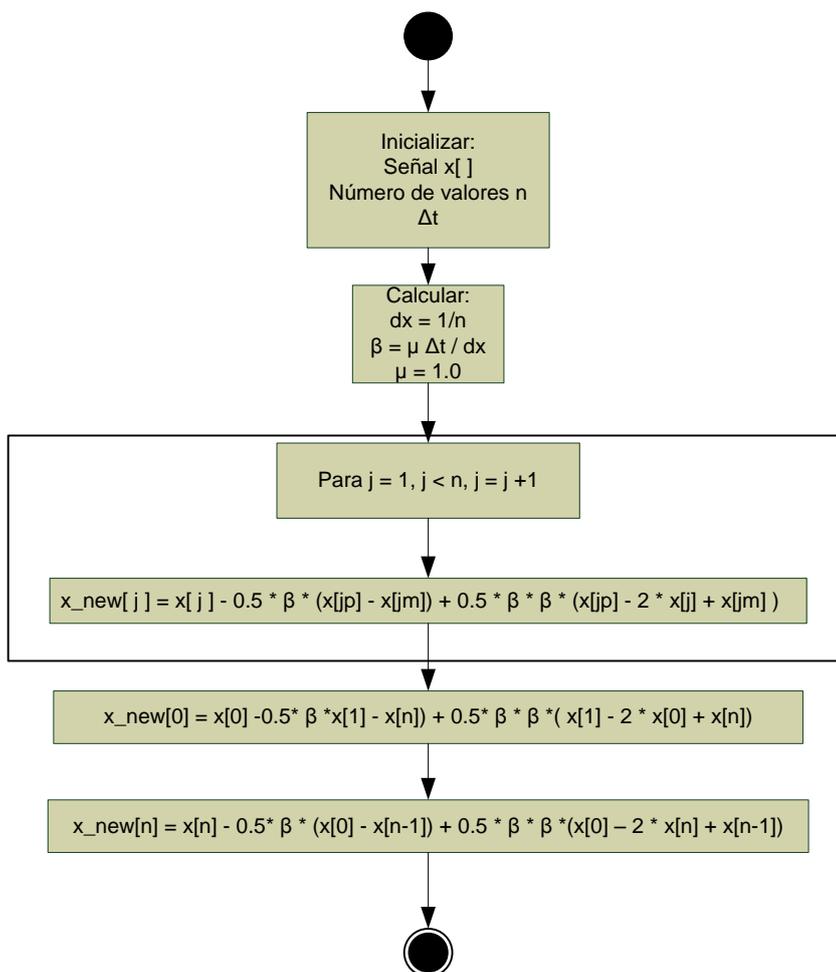


Figura 4.3 Diagrama de flujo del Modelo Lax-Wendroff

4.4. Personalización del Filtro Kalman y el Modelo Lax-Wendroff para las Señales del Sistema FOG OTG-64.

Si bien el Filtro Kalman permite la corrección, ajuste o predicción (según se lo configure) del comportamiento de un sistema, su definición no se encuentra condicionada a un sistema en particular. Como se puede apreciar en las secciones anteriores no se define una matriz de transición específica para su funcionamiento. Sin embargo,

su utilidad depende que tan bien el modelo se ajuste al fenómeno observado. En otras palabras, el Filtro Kalman opera de manera adecuada si el modelo de ajuste del sistema es el correcto o se asemeje bastante a la realidad del aplicativo. El modelo es un componente esencial en el proceso de proyección de estados y de la covarianza del sistema. En caso de no modelar correctamente el sistema, el filtro Kalman diverge, traduciéndose esto en un crecimiento de los valores en la matriz de control de ruido \mathbf{G}_{n-1} .

Con el fin de procesar digitalmente las señales de actitud, se emplea el modelo Lax-Wendroff en conjunto con el filtro Kalman [8]. El Modelo Lax-Wendroff asume tres señales de una dimensión que varían respecto al tiempo con velocidad constante. Como no existe una dependencia cruzada entre las señales de actitud, se emplean tres filtros Kalman independientes.

Cada filtro Kalman es configurado para operar con cuatro datos de la señal o estados y un dato observable o medición. La matriz de covarianza del ruido \mathbf{Q}_n , se inicializa con el valor esperado de ruido del sistema. El ruido máximo esperado es +/- 1 arco minuto (1/60 de grado sexagesimal). Para la matriz \mathbf{R}_n se emplean los valores de precisión de la plataforma FOG debido a que la varianza de los datos

luego de ser filtrados por el filtro activo Butterworth es despreciable. La precisión de la FOG viene determinada por la precisión de la tarjeta D/A que emplea internamente para generar las señales de actitud. Dicha tarjeta posee una resolución de 12 bits con una exactitud de +/- 1 bit menos significativo (LSB).

Señal	Resolución Actual [grados]	Resolución Actual*2 +/-1 LSB [V]	Resolución Esperada*2 +/- 1 arc min [V]
Rumbo_1	0.088	0.004835	0.000916
Rumbo_2	0.088	0.00967	0.00183
Cabeceo	0.014667	0.00968	0.011
Balanceo	0.014667	0.00968	0.011

Tabla 4.1 Resolución de las Señales de Actitud Filtradas

Según la tabla 4.1, se aprecia que la resolución esperada para la señal Rumbo_1 y Rumbo_2 es aproximadamente 5 veces menor que la resolución propia de la FOG. Por otro lado, las señales de cabeceo y balanceo una vez filtradas mediante hardware poseen una resolución ideal para el sistema. El filtro Kalman suaviza y corrige las señales de actitud de acuerdo con los parámetros especificados de

resolución y comportamiento regido por el modelo Lax-Wendroff, aumentando su resolución y exactitud.

CAPÍTULO 5

5. DISEÑO DEL COMPONENTE DE SOFTWARE DE PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

Una parte esencial del sistema lo conforman los procesos de adquisición, procesamiento digital de los datos de actitud y generación de las señales sincrónicas para su distribución a todos los sistemas usuario de la Corbeta. Estas tareas del Sistema Hermes las realiza el componente de software de tiempo real RTXHerмес.

El presente capítulo detalla el diseño del software de adquisición, predicción y generación de señales en tiempo real. Al inicio se describe la arquitectura del software mostrando los componentes principales y su rol dentro del sistema. Se aborda el análisis con la descripción de casos de uso, que detallan las interacciones entre el usuario y el sistema. Luego se presenta el diseño estático y dinámico, cuyos modelos

describen el funcionamiento interno del sistema. Para finalizar se aborda el diseño de la interfaz gráfica del usuario.

5.1. Arquitectura del Software

El componente de software RTXHerмес posee cuatro componentes principales. El primer componente implementa el punto de entrada del usuario, la adquisición de las señales analógicas y la visualización de las señales procesadas digitalmente, y de ahora en adelante se denominará proceso_gui.

El componente proceso_gui es un proceso que se ejecuta bajo el núcleo de Windows. Para lograr una menor latencia en la temporización de sus tareas internas, el proceso hace uso de los temporizadores del subsistema de tiempo real RTX. El subsistema RTX permite añadir determinismo a los procesos de Windows al exponer sus temporizadores de tiempo real. El proceso_gui implementa la fase de adquisición y presentación de datos en pantalla. Para lograr esto, controla la tarjeta A/D PCI-6221 y la interacción con el operador.

El segundo componente implementa el procesamiento digital y comanda la generación de las señales sincrónicas de los datos de

actitud en el subsistema de tiempo real, y de ahora en adelante se llamará proceso_dsp. El proceso_dsp es un componente de tiempo real y se ejecuta dentro del núcleo del subsistema RTX. Es decir, emplea la interfaz de programación de tiempo real estricto y el núcleo de tiempo real, logrando así una respuesta determinística.

El tercer componente permite la intercomunicación entre el proceso_gui y el proceso_dsp permitiendo el traspaso de datos, y se denominará en adelante como memoria_compartida. El componente memoria_compartida es un objeto del sistema operativo que representa una región de memoria física que puede ser accedida por cualquier proceso, ya sea de Win32 o de RTX.

El cuarto y último componente es la librería que expone todas las funciones de la tarjeta sincrónica D/S NAlI 76CS1. La librería es utilizada por el proceso_dsp para verificar el estado de las tarjetas sincrónicas y generar las señales de actitud hacia los amplificadores sincrónicos (SSA) de la Corbeta. El proceso_dsp accede a las funciones de la tarjeta D/S NAlI 76CS1 a nivel de registro, logrando así un acceso directo y rápido en tiempo real.

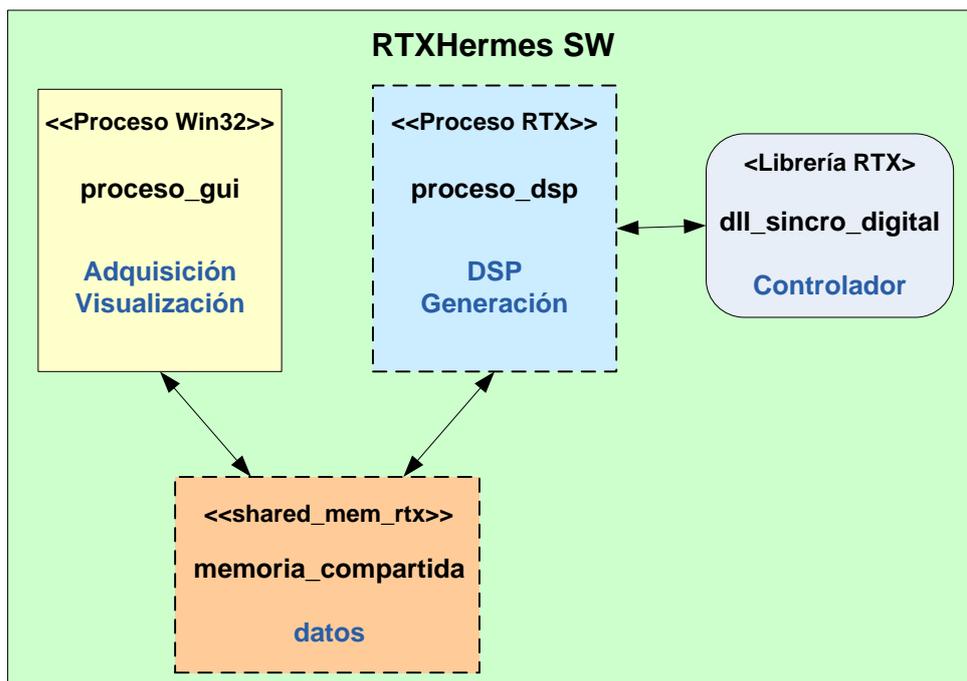


Figura 5.1 Componentes del Software RTXHermeS

El software posee 4 estados de funcionamiento:

- Estado de Prueba.
- Estado en Espera.
- Estado Operativo.
- Estado Apagado.

En el estado de prueba el sistema realiza una prueba de presencia de las interfaces de hardware instaladas en el computador de despliegue. La prueba tiene como objetivo la detección de la tarjeta

A/D NI PCI-6221 y las tarjetas D/S NAI 76CS1.

El estado en espera se logra luego del estado de prueba. En dicho estado, el sistema espera que el operador inicie la operación del mismo.

En el estado operativo el sistema se encuentra en el estado operacional completo, es decir, se realizan las operaciones de adquisición, procesamiento y generación de los datos de actitud.

En el estado apagado el sistema no realiza ninguna actividad.

5.2. Modelo de Casos de Uso

El software es modelado en su etapa de análisis mediante casos de uso. Cada caso de uso expone una o varias funcionalidades y está ligado a uno o más requerimientos del sistema. La figura 5.2 muestra el diagrama de casos de uso del software.

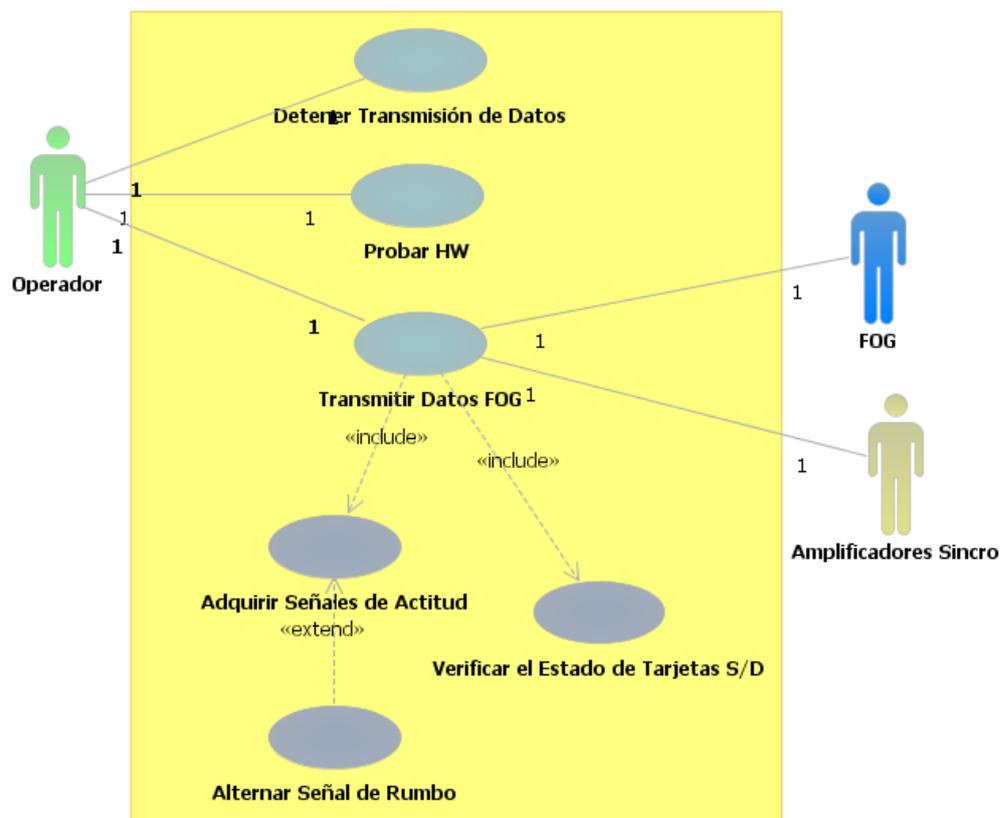


Figura 5.2 Diagrama de Casos de Uso

5.2.1. Caso de Uso: Transmitir Datos FOG

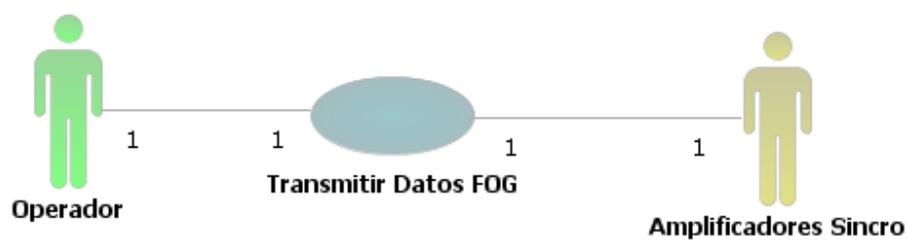


Figura 5.3 Caso de Uso: Transmitir Datos FOG

El caso de uso comienza cuando el sistema está en el estado de espera con la ventana principal en pantalla. El usuario presiona el botón "Iniciar Tx". El sistema adquiere las señales, las procesa y envía a los amplificadores del buque para su distribución a todos los usuarios del buque. El sistema presenta los datos de actitud y el estado de las tarjetas D/S.

Precondiciones:

- La FOG está encendida.
- El programa WinFOG2000 está en ejecución y recibiendo la señal de GPS.
- La interfaz IF-HER-01 está conectada al filtro analógico.
- El filtro analógico está conectado a la tarjeta A/D.
- El sistema está conectado a los amplificadores sincrónicos con la interfaz IF-HER-04.

Curso Normal de Eventos:

- 1 El operador presiona el botón "Iniciar Tx" en la pantalla principal.
- 2 El sistema detecta la tarjeta A/D.
- 3 El sistema detecta las tarjetas D/S.
- 4 El sistema inicia la tarea de verificación de las tarjetas

NAII 76CS1. Ver [Verificar el Estado de Tarjetas D/S].

- 5 El sistema inicia la tarea de adquisición de las señales analógicas de la interfaz IF-HER-01. Ver [Adquirir Señales].
- 6 El sistema filtra digitalmente los datos de actitud.
- 7 El sistema genera las señales: rumbo, cabeceo y balanceo con las tarjetas D/S NAI 76CS1.
- 8 El sistema presenta los datos de actitud generados en los controles de visualización.
- 9 El sistema deshabilita el botón "Iniciar Tx" y habilita el botón "Detener Tx".
- 10 Las tareas 4, 5, 6, 7 y 8 continúan hasta que el operador presione el botón "Detener Tx".

Cursos Alternativos:

Línea 2: Si no se detecta la tarjeta A/D se presenta el error en pantalla, no se inicia la adquisición, se cancela la generación de señales y se presentan los datos de actitud en cero.

Línea 3: Si no se detectan las tarjetas D/S, se presenta el error en pantalla, se cancela la generación de las señales y se presentan los datos filtrados en los controles gráficos.

Pos condiciones:

- El sistema está en estado operativo.

Referencias Cruzadas:

RF-03, RF-04, RF-05, RS-01, RS-02.

5.2.2. Caso de Uso: <inclusión>Adquirir Señales de Actitud

Figura 5.4 Caso de Uso: Adquirir Señales de Actitud

Este caso de uso es incluido en el caso “Transmitir Datos FOG”. El sistema en estado operativo inicia la tarea de adquisición de datos multicanal para las señales de la interfaz IF-HER-01. El sistema configura y controla la adquisición de señales con la tarjeta A/D NI PCI-6221.

Precondiciones:

- El sistema ha detectado correctamente la tarjeta A/D.

- El sistema está en estado operativo.

Curso Normal de Eventos:

- 1 El sistema configura los canales de la tarjeta A/D.
- 2 El sistema configura la adquisición por software y la cola de adquisición.
- 3 Se leen los 4 primeros canales de la tarjeta a una frecuencia de 2.5 ms correspondientes en orden a las señales: rumbo_1, rumbo_2, cabeceo y balanceo.
- 4 Se pasan los datos filtrados al generador de señales sincrónicas. Extensión [Alternar Señal de Rumbo].

5.2.3. Caso de Uso: <inclusión>Verificar el Estado de Tarjetas D/S



Figura 5.5 Caso de Uso: Verificar el Estado de Tarjetas D/S

El caso de uso está incluido en la “Transmisión Datos FOG”. Cuando el operador inicia la generación de datos, el sistema habilita la prueba D2 de las tarjetas D/S. Se lee cada 2

segundos el estado de los registros de: ejecución de la prueba, precisión, referencia 115 V/400 Hz y presencia de señal. La prueba es un proceso automático interno en segundo plano de la tarjeta D/S

Precondiciones:

- El sistema ha detectado correctamente las tarjetas D/S.
- El operador ha iniciado la generación de señales.

Curso Normal de Eventos:

- 1 El sistema habilita la prueba D2 en la tarjeta D/S. Se escribe un valor de "1" en el registro que habilita la prueba D0.
- 2 El sistema verifica si la prueba está en funcionamiento. Leer el registro de actividad de la prueba D2 de cada canal activo. Si la prueba está activa se obtiene un valor de 0x55 de lo contrario se obtiene 0X00.
- 3 El sistema verifica si los canales tienen una precisión menor a 0.05 grados. Se lee el registro de resultado de la prueba D2 por cada canal activo.
- 4 El sistema revisa la presencia de referencia de 115V/400Hz de los canales. Se lee el registro de estado

de la referencia de cada canal activo.

- 5 El sistema revisa la presencia de señales en los canales. Se lee el registro de estado de la señal por cada canal activo.
- 6 El estado de los registros se muestran en pantalla. Si la prueba es fallida se muestra el estado en color rojo y si la prueba es correcta se muestra el estado en color verde.
- 7 Las acciones 2, 3, 4 y 5 se repiten cada 2 segundos.

5.2.4. Caso de Uso: <extensión>Alternar Señal de Rumbo



Figura 5.6 Caso de Uso: Alternar Señal de Rumbo

Cuando la señal de rumbo_1 está en el rango de 160 a 200 grados, el sistema alterna de forma automática la señal de rumbo generada por el dato de la señal rumbo_2.

Precondiciones:

- La señal de rumbo_1 está en la zona de discontinuidad

(160 a 200 grados).

Curso Normal de Eventos:

- 1 El sistema detecta que la señal de rumbo_1 está en el rango de 160 a 200 grados.
- 2 El sistema actualiza el valor de rumbo por el valor filtrado de la señal rumbo_2.
- 3 Si el rumbo no se encuentra en la zona de 160 a 200 grados se utiliza nuevamente el valor filtrado de la señal rumbo_1.

5.2.5. Caso de Uso: Detener la Transmisión de Datos

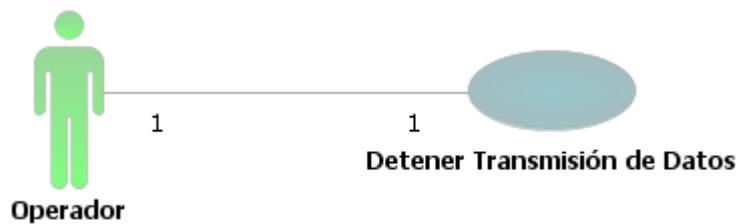


Figura 5.7 Caso de Uso: Detener Transmisión de Datos

El caso de uso comienza cuando el operador presiona el botón de "Detener Tx". El sistema confirma la decisión del operador con una ventana de advertencia. El operador autoriza la

operación de detener la transmisión. El sistema detiene las tareas de adquisición, filtrado y generación de las señales.

Precondiciones:

- El sistema está en estado operativo y transmitiendo los datos de actitud a los amplificadores.

Curso Normal de Eventos:

- 1 El operador presiona el botón "Detener Tx".
- 2 El sistema confirma la operación con una ventana de decisión. El operador confirma la detención de transmisión.
- 3 El sistema detiene la tarea de adquisición.
- 4 El sistema detiene la tarea de filtrado y generación de señales.
- 5 El sistema habilita el botón "Iniciar Tx".

Pos condiciones:

El sistema pasa al estado en espera.

Cursos Alternativos:

Línea 2: El operador cancela la operación. El sistema continúa

en modo operativo generando las señales de actitud a los amplificadores.

5.2.6. Caso de Uso: Probar Hardware

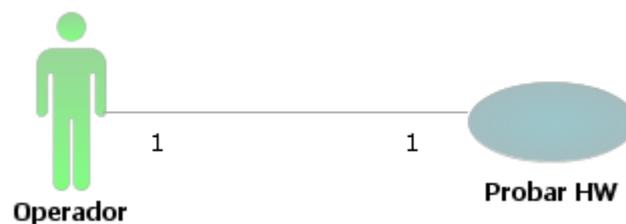


Figura 5.8 Caso de Uso: Probar Hardware

El caso de uso comienza cuando el sistema es ejecutado por el usuario. El sistema muestra la opción de realizar la prueba de HW o continuar a la ventana principal. El usuario elige realizar la prueba de HW. El sistema inicia la prueba y una vez finalizada muestra los resultados en pantalla. El operador puede realizar nuevamente la prueba o continuar con la ejecución del programa.

Precondiciones:

- El operador ha encendido el sistema.
- El sistema no está conectado a los amplificadores

sincrónicos.

Curso Normal de Eventos:

- 1 El sistema muestra en pantalla la opción de realizar la prueba de HW.
- 2 El operador acepta realizar la prueba de hardware presionando el botón "Realizar Prueba HW".
- 3 El sistema comprueba la presencia de la tarjeta de adquisición A/D.
- 4 El sistema comprueba la presencia de las tarjetas D/S.
- 5 El sistema revisa la presencia de referencia de 115 V/400 Hz en los canales sincrónicos.
- 6 El sistema verifica los transformadores sincrónicos con la prueba D3.
- 7 El sistema presenta el reporte de las pruebas realizadas.
- 8 El operador puede continuar a la ventana principal del sistema o ejecutar la prueba nuevamente.

Cursos Alternativos:

Línea 3: Si el operador detiene la prueba, el sistema pasa a la línea 7.

Línea 4: Si no se detectan las tarjetas D/S, no se realizan las

pruebas referidas en 5 y 6. Si el operador detiene la prueba, el sistema pasa a la línea 7.

Línea 5: Si no se tiene referencia en los canales no se realiza la prueba referida en la línea 6. Si el operador detiene la prueba, se pasa a la línea 7.

Pos condiciones:

El sistema espera por la acción del usuario para continuar la ejecución.

5.3. Modelo Estático

El modelo estático define las clases de objetos en el sistema, los atributos de las clases, las relaciones entre clases y las operaciones de cada clase. Las clases se agrupan de acuerdo a los siguientes componentes funcionales:

- Interfaz gráfica de usuario.
- Adquisición de datos.
- Filtrado digital.
- Sincronización.
- Filtro Kalman
- Proceso RT

- Librería de las tarjetas D/S 76CS1

5.3.1. Clases de la Interfaz Gráfica de Usuario

El proceso_gui se implementa como una aplicación de diálogo en Win32 y es el punto de entrada de las acciones del operador.

La interfaz con el usuario es implementada por las siguientes clases de objetos:

- CFOG2005WinApp
- CFOG2005WinDlg
- CDlgSNI
- CDlgSincroStatus
- CDlgAbout



Figura 5.9 Clases de la Interfaz Gráfica de Usuario

CF0G2005WinApp

Clase que es la aplicación principal. Es el punto de entrada del programa al instanciar el diálogo principal CF0G2005WinDlg.

CF0G2005WinDlg

Es el diálogo principal de la aplicación. Y contiene a los diálogos de presentación CDlgSNI, CDlgSincroStatus y CDlgAbout.

CDlgSNI

Es el diálogo que presenta los datos del Sistema de Navegación Inercial FOG.

CDlgSincroStatus

Diálogo que visualiza el estado de los canales, referencia y prueba de precisión de las tarjetas D/S NAI 76CS1.

CDlgAbout

Clase de diálogo que muestra la información relativa al software del sistema, esto es, versión, autor y corbeta de despliegue.

5.3.2. Clases de Adquisición de Datos

La primera fase del software adquiere los datos de actitud en la forma de señales de voltaje analógico. Las clases que permiten la configuración de la tarjeta A/D PCI-6221 y la ejecución el proceso de adquisición son:

- CPlataformaFOG
- CTarjetaAI
- CDAQHardwareTimed
- CDAQOnDemand

- CDAQDummy

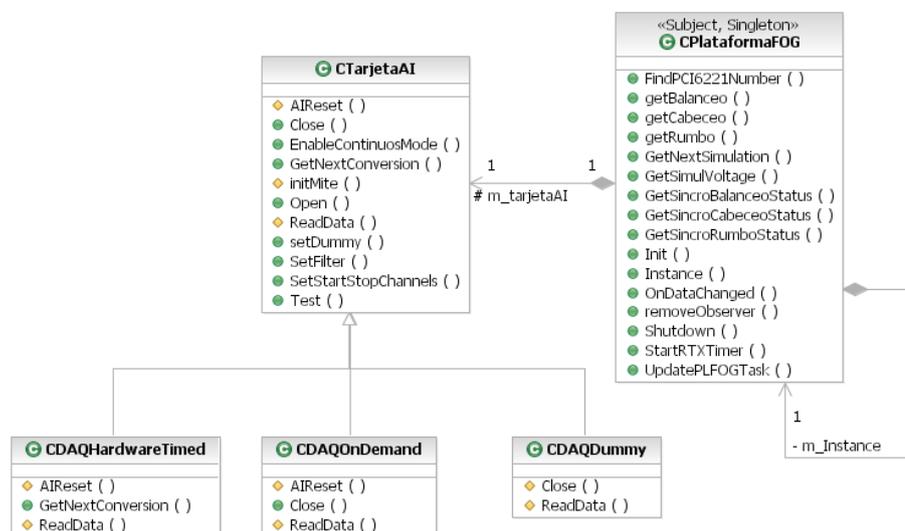


Figura 5.10 Clases de la Adquisición de Datos

CPlataformaFOG

La clase modela la plataforma física de la vida real FOG. Permite la adquisición de los datos de actitud y su posterior envío al proceso de tiempo real que genera las señales sincrónicas. Esta clase accede directamente a la memoria compartida para compartir los datos de actitud con el proceso_rtx. La clase CPlataformaFOG implementa la interfaz “Sujeto” del patrón Sujeto-Observador, así también, implementa el patrón de instancia única o “Singleton”. Al ser de tipo “Sujeto” notifica a los observadores registrados de cualquier cambio

ocurrido en los datos de actitud. Al ser de tipo “Singleton” se asegura que sólo exista un objeto CPlataformaFOG y se provee un punto global de acceso al mismo.

CTarjetaAI

Esta clase encapsula el comportamiento de la Tarjeta A/D NI PCI-6221. Expone las funciones básicas para su configuración y adquisición de señales analógicas. Es la clase padre del patrón de diseño “Estrategia” para soportar los 2 modos de adquisición: vía hardware ó vía software.

CDAQHardwareTimed

La clase implementa el proceso de adquisición de datos mediante el uso de los temporizadores y relojes internos de la tarjeta A/D NI PCI-6221, es decir, la adquisición es sincronizada por el hardware.

CDAQOnDemand

Esta clase realiza el proceso de adquisición de datos con la tarjeta A/D NI PCI-6221 mediante el uso de interrupciones manejadas por software, es decir, sin el uso directo de los componentes de hardware de la tarjeta.

CDAQDummy

La clase implementa el modo de adquisición simulado. Es una tarjeta de adquisición virtual que permite ejecutar el programa en modo simulación sin tener necesariamente conectada la tarjeta A/D NI PCI-6221 en el computador.

5.3.3. Clases de Filtrado Digital

Para la adquisición de datos se emplean filtros digitales que son aplicados a los datos adquiridos mediante la tarjeta A/D NI PCI-6221. Las clases que implementan los filtros digitales son:

- CFiltroDigital
- CMediaAritmetica
- CMovingAverage
- CNullFilter

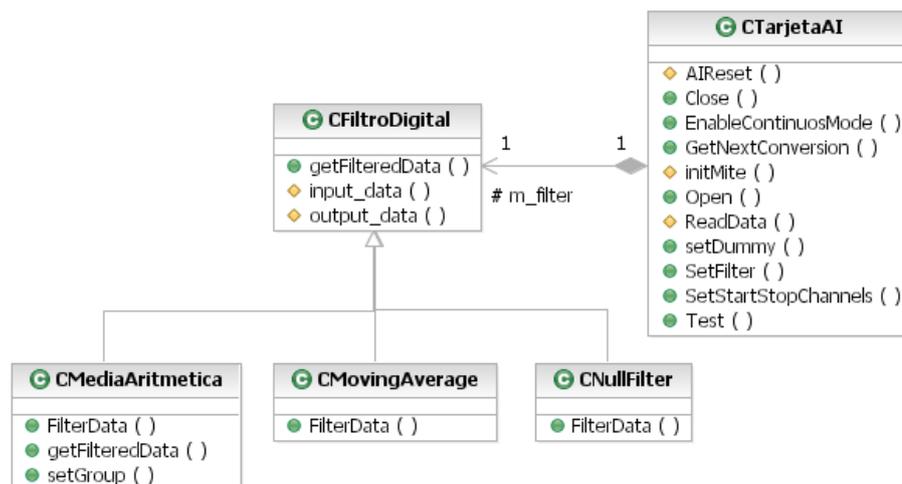


Figura 5.11 Clases de Filtrado Digital

CFiltroDigital

Implementa el comportamiento y las operaciones comunes de los filtros digitales. Define de manera general un filtro digital permitiendo la implementación de nuevos algoritmos. Es la clase padre del patrón de diseño “Estrategia”.

CMediaAritmetica

Esta clase implementa el filtro digital de media aritmética a un grupo de datos. La frecuencia de salida de datos depende del número de datos escogido y es menor que la frecuencia de adquisición para un grupo de datos de dos o más muestras.

CMovingAverage

Esta clase implementa el algoritmo de media de desplazamiento. Provee una media de los datos de forma continua a la misma frecuencia de adquisición de datos.

CNullFilter

Clase que implementa un filtro nulo. Sirve para usar directamente los datos de la plataforma FOG sin ningún tipo de procesamiento digital.

5.3.4. Clases de Sincronización

Los datos de rumbo, cabeceo y balanceo deben ser actualizados de forma simultánea y atómica por las tareas de adquisición, filtrado y generación. Debido a que el proceso_gui y el proceso_dsp compiten por la actualización y lectura de los datos de actitud, es necesario sincronizar dicho acceso entre los dos procesos. Para esto, se implementa la solución al problema de múltiples lectores y escritores sin languidez de los escritores mediante las siguientes clases:

- CMutexRWRtx
- CObjRWRtx
- SharedMemory

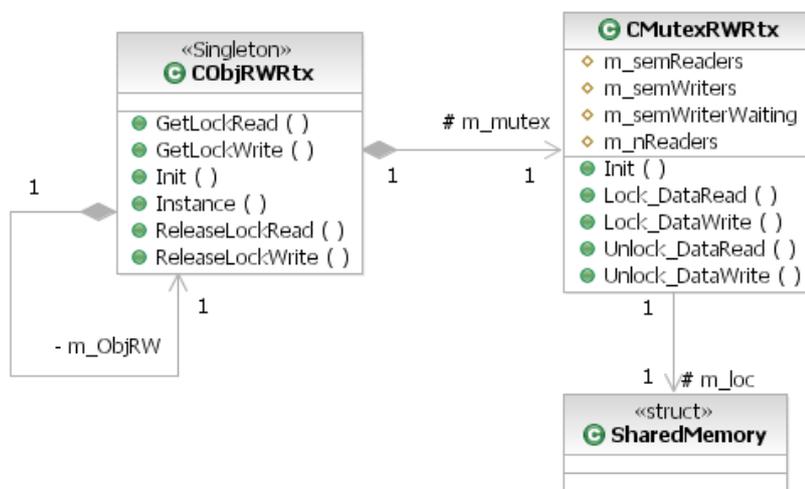


Figura 5.12 Clases de Sincronización

CMutexRWRtx

Esta clase implementa la sincronización en Win32 de los datos contenidos en la memoria compartida con el algoritmo de múltiples lectores y escritores mediante semáforos sin el bloqueo de los escritores.

CObjRWRtx

La clase `CObjRWRtx` es la fachada para que la clase de sincronización `CMutexRWRtx` sea utilizada por los procesos de Win32. Al ser una clase de tipo "Singleton" permite que la sincronización se realice con una única instancia que puede ser llamada globalmente. Como la memoria compartida es accedida

de forma permanente, el empleo del patrón “Singleton” aumenta el rendimiento al no tener que instanciar la clase CObjRWRtx cada vez que se necesite un acceso sincrónico.

SharedMemory

Es la estructura que define los datos expuestos en la memoria compartida para el proceso_gui y el proceso_dsp. El acceso sincrónico de los datos para el procesos_gui es implementado por la clase CObjRWRtx.

5.3.5. Clases del Filtro Kalman

El filtro predictivo de las señales de actitud es el filtro Kalman y su implementación se plasma en las siguientes clases:

- Kalman
- Dynamics
- Lax-Wendroff1

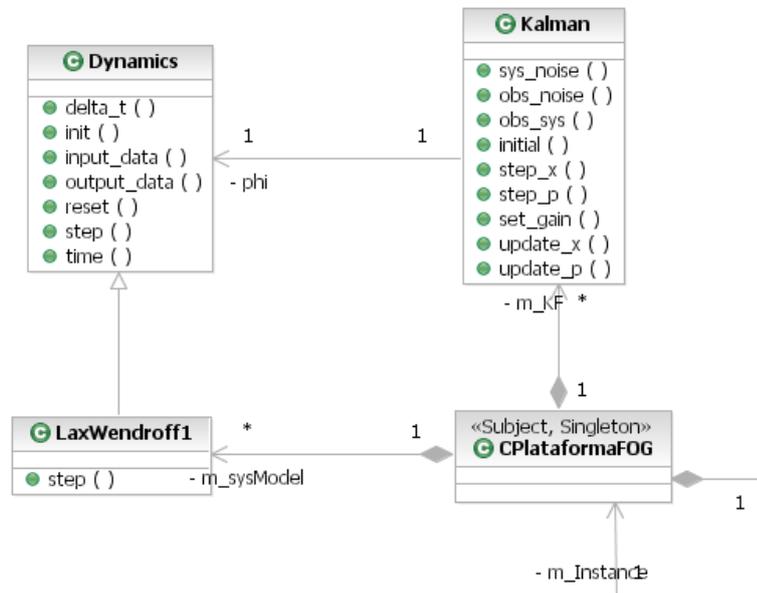


Figura 5.13 Clases del Filtro Kalman

Kalman

La clase Kalman implementa las funciones del filtro de predicción Kalman. Posee una referencia al modelo matemático que ajusta los datos de actitud.

Dynamics

Interfaz que define e implementa las funciones básicas de un modelo matemático.

LaxWendroff1

Clase hija de la clase Dynamics que implementa el modelo de

ajuste de datos de segundo orden LaxWendroff.

5.3.6. Clases del Proceso RT

El subsistema de RTX se programa de forma estructurada mediante el lenguaje C y por tanto no se poseen las características de un lenguaje orientado a objetos. Sin embargo, se emplea una técnica que asemeja la creación de objetos a partir de estructuras de datos, de esta forma se simplifica la lógica de programación al elevar el nivel de abstracción. Las estructuras que se emplean en la implementación del proceso_dsp en tiempo real son:

- SharedMemory
- RTSNIRceiver

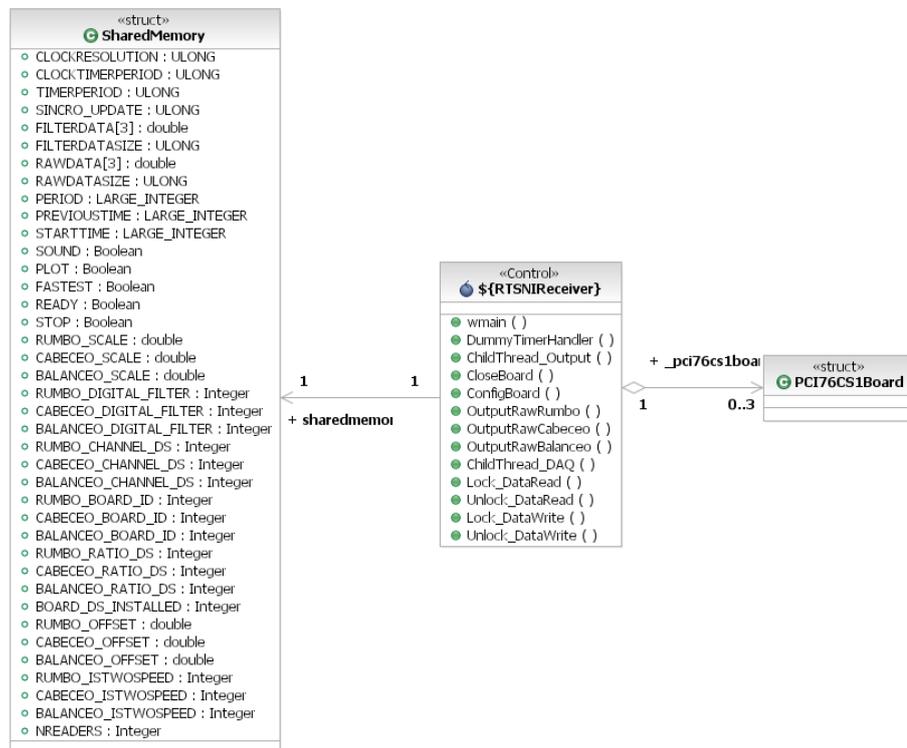


Figura 5.14 Clases del Generador de Señales RTX

SharedMemory

Es la estructura que contiene la definición de los datos contenidos en la memoria compartida tanto para el proceso_gui como para el proceso_dsp. La sincronización de la memoria para el proceso_dsp la realiza el componente RTXSNIRReceiver.

RTXSNIRReceiver

Este componente es el programa principal del proceso_dsp en tiempo real. Implementa la adquisición de señales, el

procesamiento digital y la generación de señales sincrónicas.

Posee tres hilos de procesamiento:

- Hilo de ingreso de muestras.
- Hilo de estado de las tarjetas D/S.
- Hilo de generación de señales.

El hilo de ingreso de muestras se comunica con el proceso de adquisición de señales en Win32 para ingresar las muestras al filtro digital. Es implementado en la rutina ChildThread_DAQ. El hilo de estado de las tarjetas D/S revisa continuamente el estado de la referencia, precisión y presencia de señal de cada canal sincrónico de las tarjetas 76CS1. Es implementado en la rutina ChildThread_Status. El hilo de generación accede a las tarjetas 76CS1 para generar las señales de rumbo, cabeceo y balanceo a los amplificadores. Es implementado en la rutina ChildThread_Output y usa las funciones de la librería D/S.

Para terminar la ejecución del proceso_dsp se emplea un temporizador que revisa el envío del mensaje de terminación desde el proceso_gui. Es implementado por la rutina DummyTimerHandler.

5.3.7. Clases de la Librería de las Tarjetas D/S 76CS1

La librería de la tarjeta D/S es un componente que expone las funciones para generar y verificar el estado de las tarjetas sincrónicas PCI76CS1. La implementación de la librería emplea estructuras de datos que simulan clases, elevando el nivel de abstracción a una programación orientada a objetos. La librería está formada por las siguientes estructuras o entidades:

- RTSSDIISincro
- PCI76CS1BoardManager
- PCI76CS1Board

RTSSDIISincro

Este componente expone todas las funciones de la tarjeta PCI-76CS1 de forma global. Es una librería dinámica de tiempo real similar a una librería dinámica en Win32. Básicamente es un proceso que al iniciar se suspende así mismo y espera por llamadas externas de otros componentes de tiempo real que necesiten acceder a las tarjetas D/S PCI-76CS1.

PCI76CS1BoardManager

Esta estructura tiene por objetivo guardar las referencias de las tarjetas D/S 76CS1 accedidas y así poder administrar su creación y destrucción dinámica.

PCI76CS1Board

La estructura PCI76CS1 posee los datos de una tarjeta D/S en particular creada, entre los cuales tenemos: la dirección base física y virtual, el número de tarjeta, su estado, número de serie, entre otros. Con esta estructura es posible referenciar a cada tarjeta y de esta forma acceder a sus funciones.

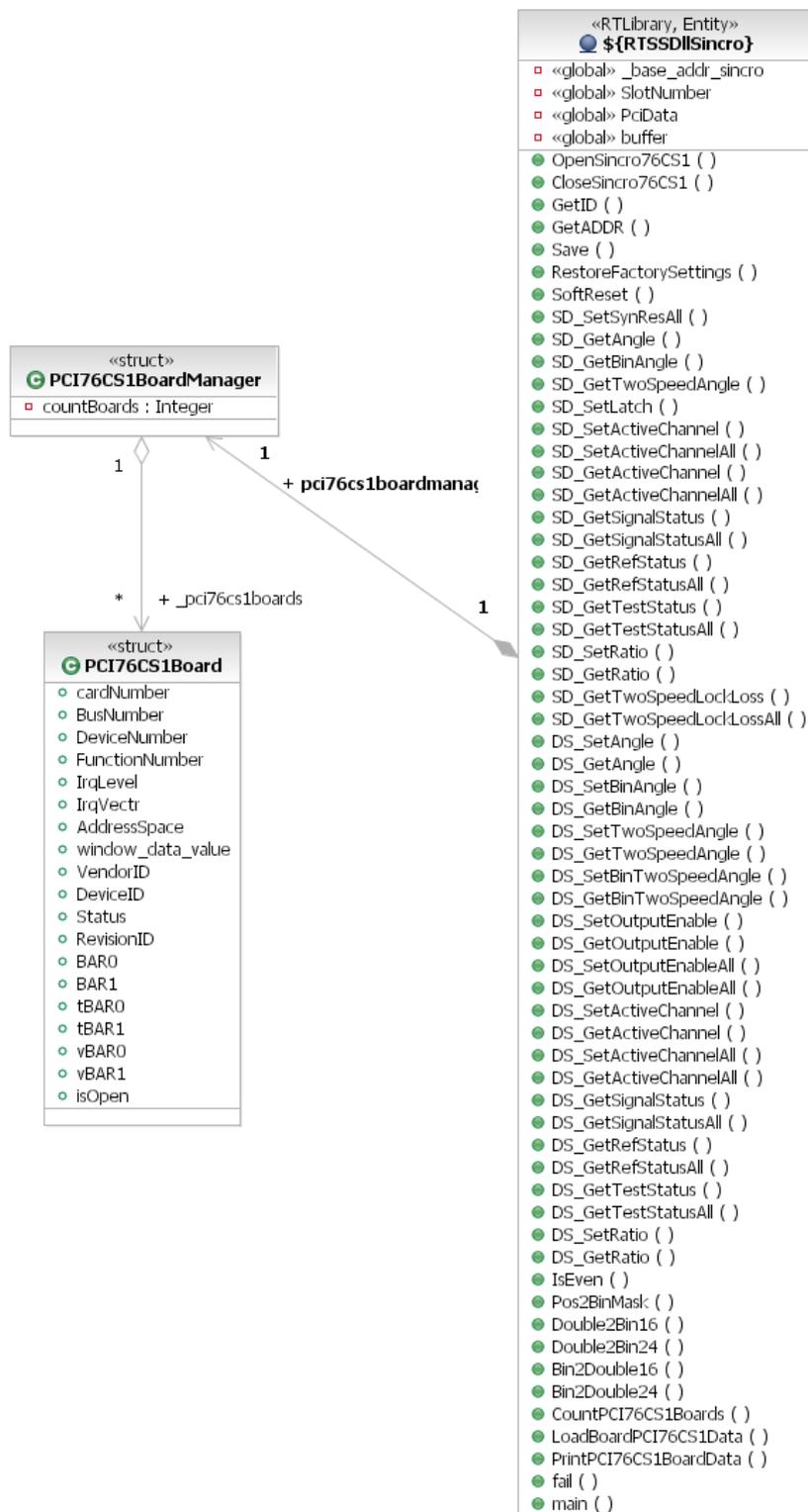


Figura 5.13 Estructuras y Componentes de la Librería D/S 76CS1

5.4. Modelado Dinámico

El modelado dinámico captura el comportamiento del sistema mediante modelos de interacción que describen las interrelaciones de objetos en tiempo de ejecución. Para cada caso de uso se detallan los objetos participantes que satisfacen las funcionalidades descritas en los mismos. Las interacciones se describen por medio de diagramas de secuencia.

5.4.1. Tareas del Proceso Win32

El proceso_gui es una aplicación de diálogo y maneja los eventos del operador. Dicha aplicación ejecuta las tareas de adquisición, traspaso de datos al proceso_dsp y presentación de datos en la interfaz gráfica de usuario.

La tarea de adquisición está controlada por una función de temporización en Win32 que emplea un temporizador de RTX. La función es parte de la clase CPlataformaFOG y ejecuta los pasos para realizar la conversión analógica digital de los datos de actitud con la tarjeta A/D PCI-6221. La adquisición se dispara mediante software y los datos una vez digitalizados se almacenan en la pila interna de la tarjeta.

En cada conversión se copian los datos de actitud a la memoria compartida para que sean accedidos y posteriormente analizados por el proceso_dsp.

La clase CPlataformaFOG notifica los cambios en los datos de actitud a los controles gráficos registrados mediante el patrón Sujeto-Observador. La tasa de actualización de los gráficos es treinta veces menor a la tasa de adquisición de las señales.

5.4.2. Tareas del Proceso RTX

El proceso_dsp realiza las tareas de filtrado digital y generación de las señales sincrónicas. Existen cuatro tareas básicas en este proceso: la lectura de los datos de actitud en la memoria compartida, el procesamiento digital, la generación de datos sincrónicos y el chequeo de las tarjetas D/S.

La lectura de los datos en la memoria compartida la realiza el hilo ChildThread_DAQ, la cual es activada al ser lanzado el evento de actualización de los datos.

El hilo ChildThread_Output realiza el filtrado y la generación de los datos de actitud. Este hilo opera continuamente a una tasa

de 2.5 ms y está sincronizado con el hilo ChildThread_DAQ para no leer datos que se estén actualizando. La generación de datos se logra al invocar las operaciones de la tarjeta D/S 76Cs1 incluidas en la librería de tiempo real DII_Sincro.

El hilo ChildThread_Status verifica el funcionamiento de las tarjetas D/S mediante la comprobación de:

- Presencia de señal sincrónica en los canales de salida.
- Correcta representación de la señal en modo grueso-fino.
- Presencia de referencia de 115V/400Hz en cada canal.

5.4.3. Secuencia Transmitir Datos FOG

La transmisión de los datos consta de cuatro etapas: la adquisición de las señales, el traspaso y filtrado en tiempo real, la verificación y generación de las señales sincrónicas en tiempo real.

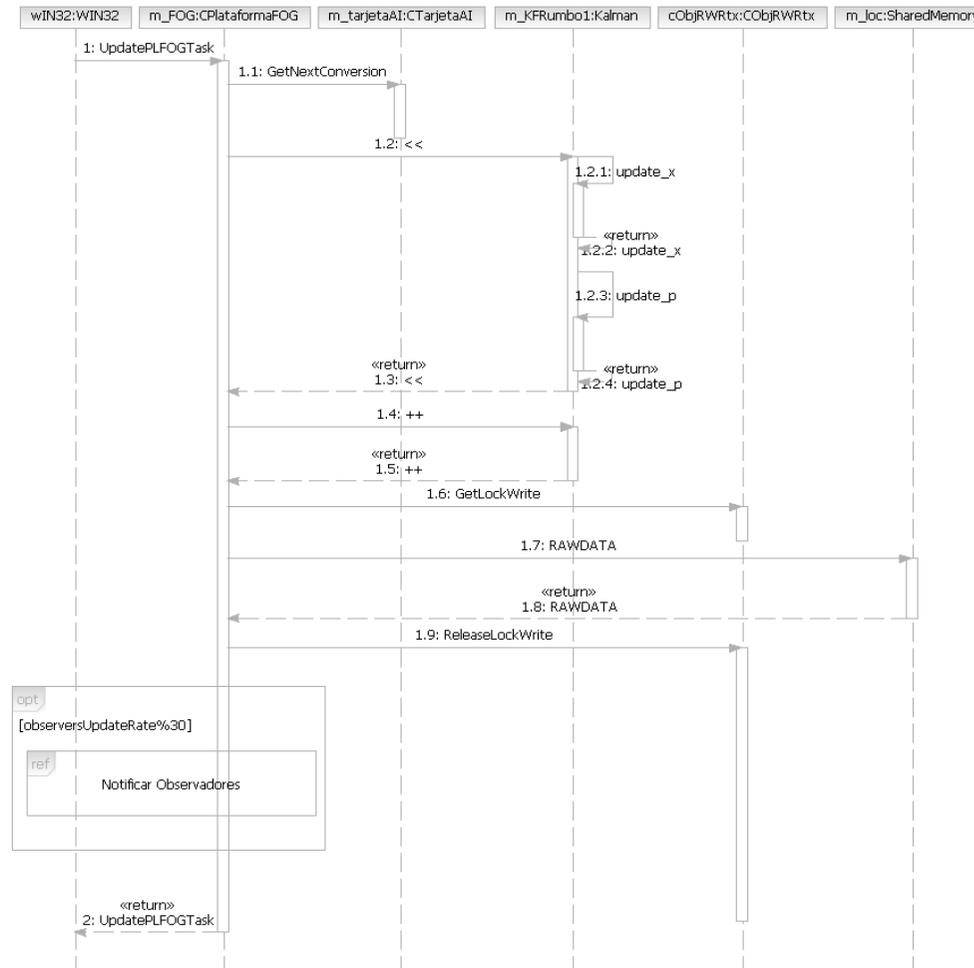


Figura 5.14 Secuencia: Adquisición de Señales en Win32

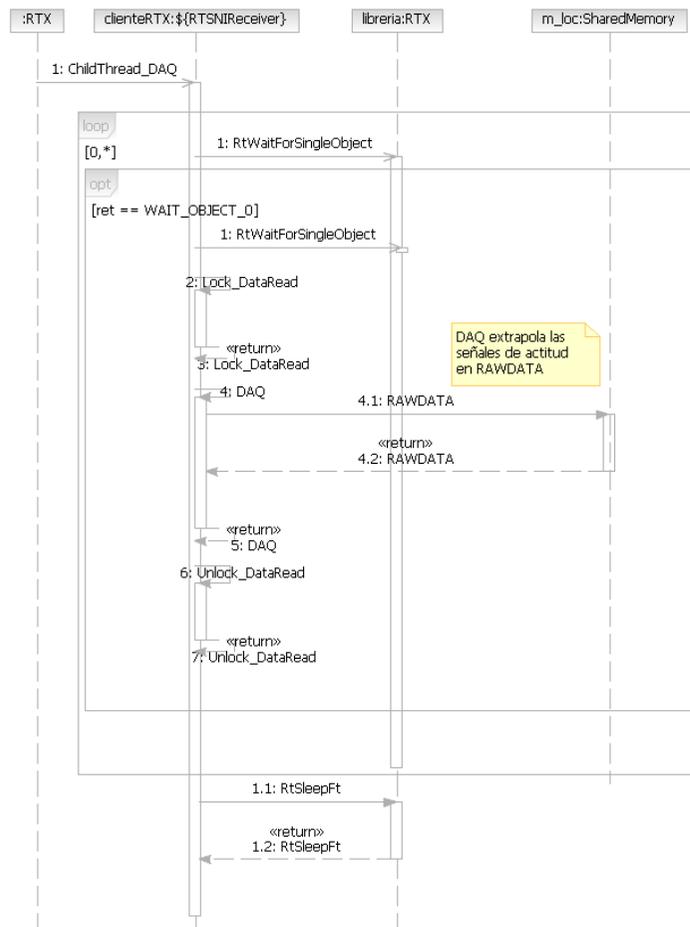


Figura 5.15 Secuencia: Traspaso de Datos de Actitud de Win32 a RTX

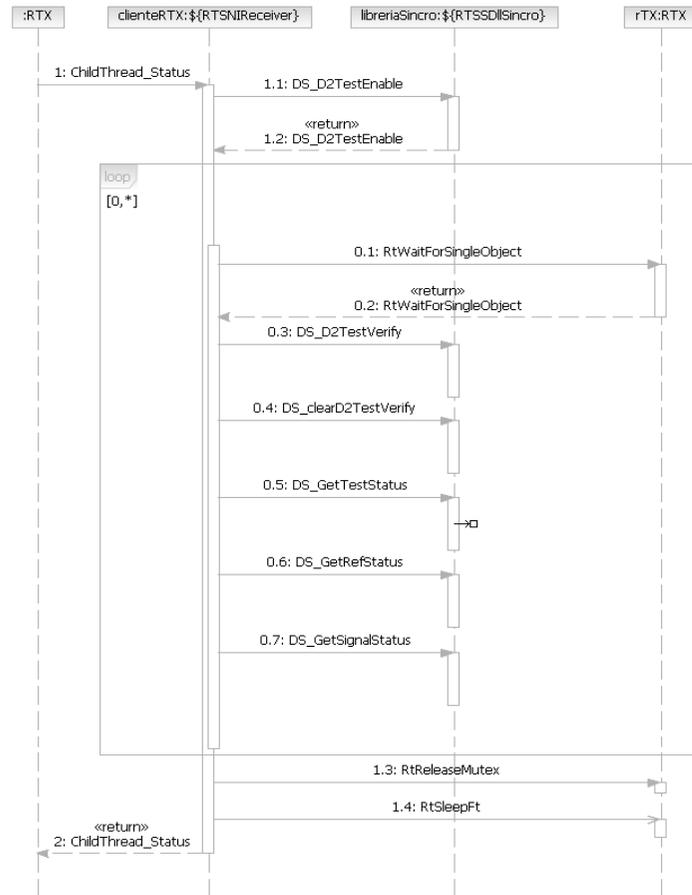


Figura 5.16 Secuencia: Verificar el Estado de las Tarjetas D/S

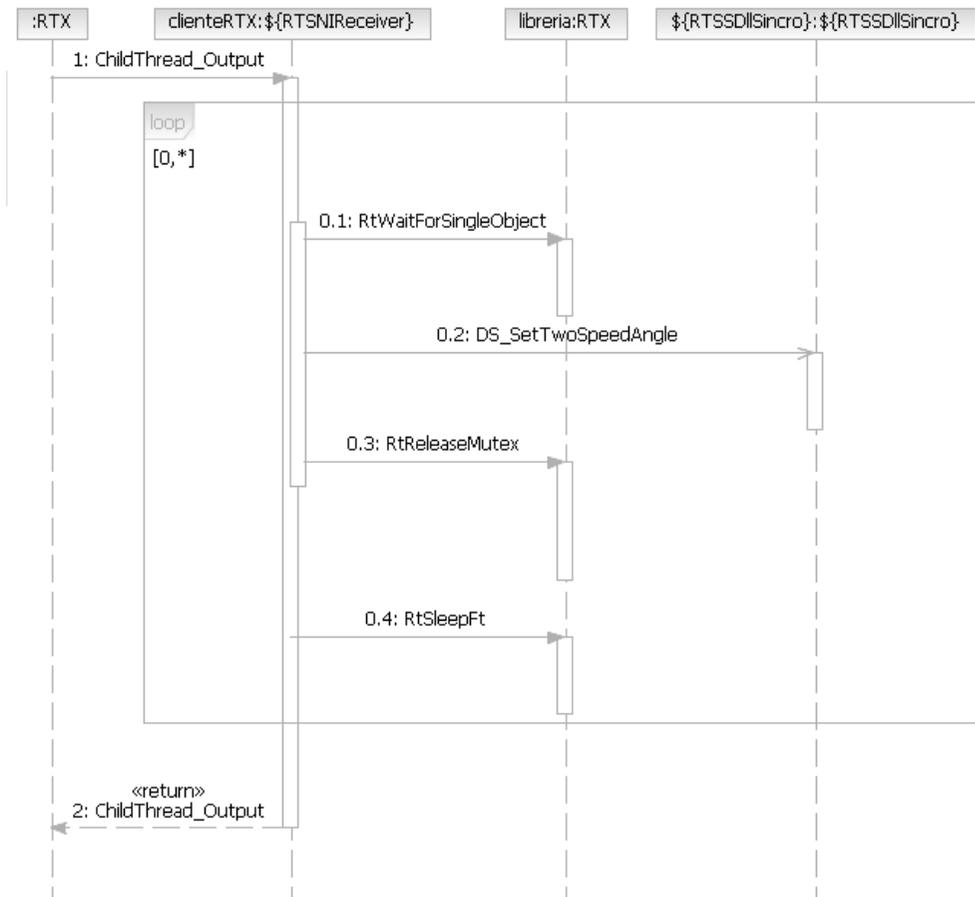


Figura 5.17 Secuencia: Generar las Señales Sincrónicas

5.4.4. Secuencia Probar Hardware

La prueba de hardware comprende la detección de la tarjeta A/D PCI-6221 de National Instruments y la tarjeta D/S 76CS1 de North Atlantic. La tarjeta PCI-6221 es detectada mediante el uso de su librería para Win32. En cambio, la tarjeta D/S 76CS1 es detectada mediante la librería D/S en RTX.

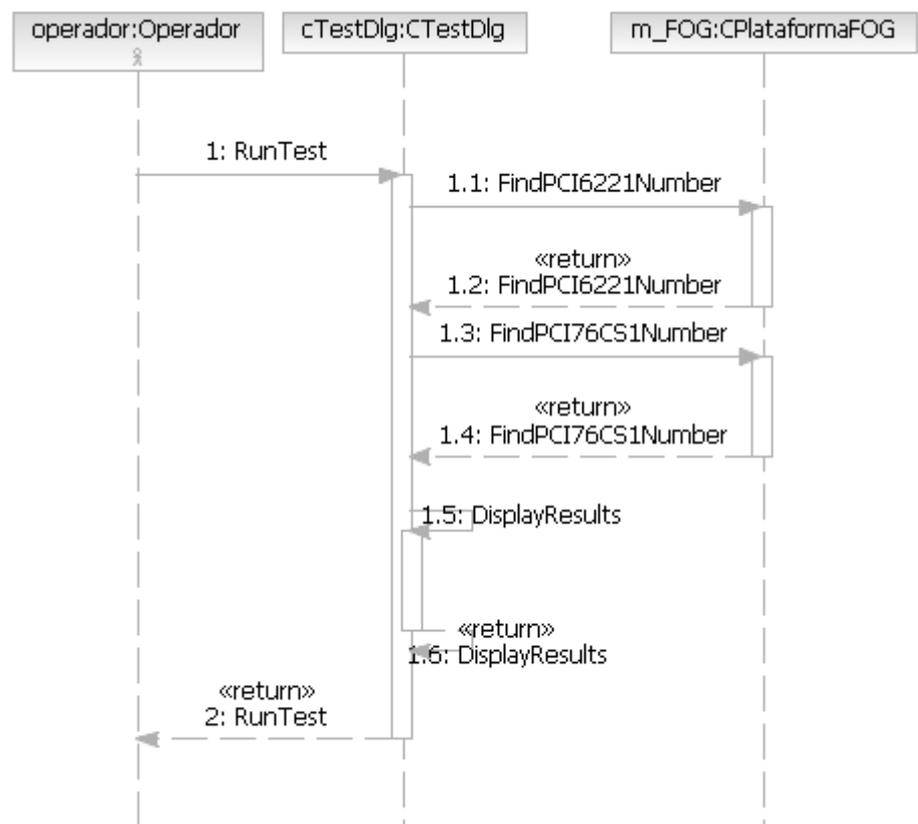


Figura 5.18 Secuencia: Detectar Tarjeta A/D PCI-6221

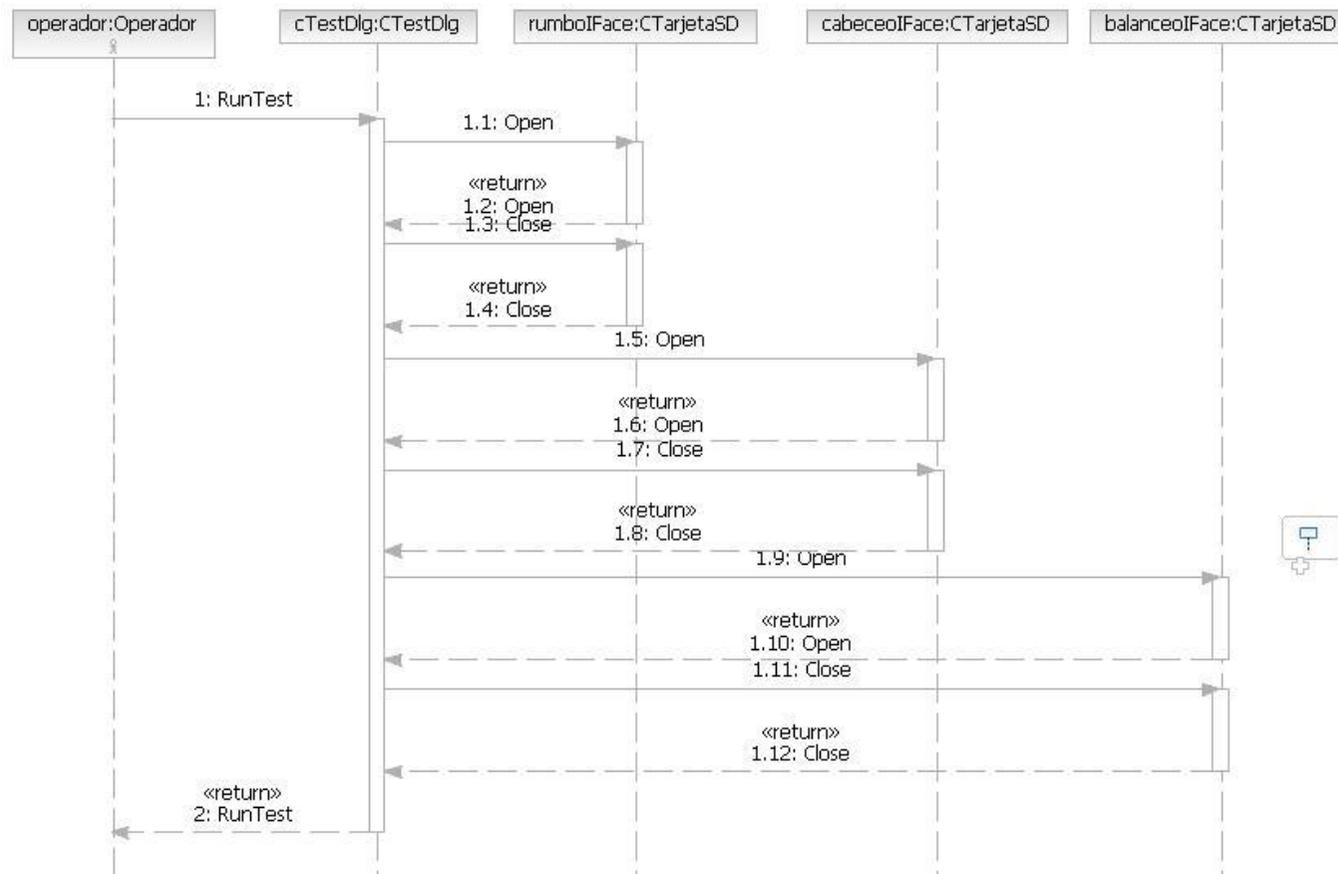


Figura 5.19 Secuencia: Detectar Tarjeta D/S 76CS1

5.4.5. Secuencia Detener Transmisión de Datos

Cuando el operador ordena la detención de transmisión de datos, el sistema detiene los procesos de adquisición, filtrado y generación de señales.

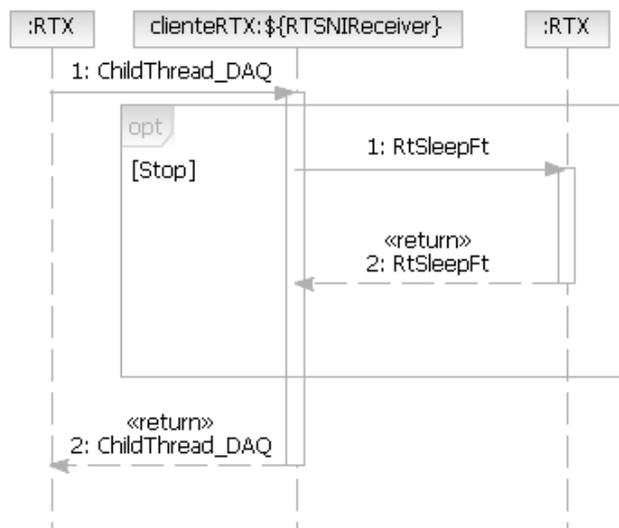


Figura 5.20 Secuencia: Detener Receptor de Datos.

Todos los procesos siguen la misma secuencia para su culminación, la cual es gobernada por el cambio en el valor de la variable "Stop". La figura 5.20 muestra el proceso para el hilo ChildThread_DAQ que lee los datos de actitud de la memoria compartida en RTX.

5.5. Interfaz Gráfica de Usuario

La interfaz gráfica de usuario está conformada por los controles de las funciones principales, los controles de visualización de los datos de actitud y los controles de presentación de estado de las tarjetas D/S.

La ventana principal se muestra en la figura 5.21. Posee tres pestañas dentro del diálogo principal. La primera muestra los datos de actitud procesados y permite la ejecución de las operaciones por parte del operador. La segunda pestaña muestra el estado de las tarjetas D/S. Por último, la pestaña de información muestra los datos del programa, autor y el buque de despliegue.

El operador puede iniciar y detener la transmisión de datos, y verificar de forma continua el funcionamiento de las tarjetas D/S 76CS1.

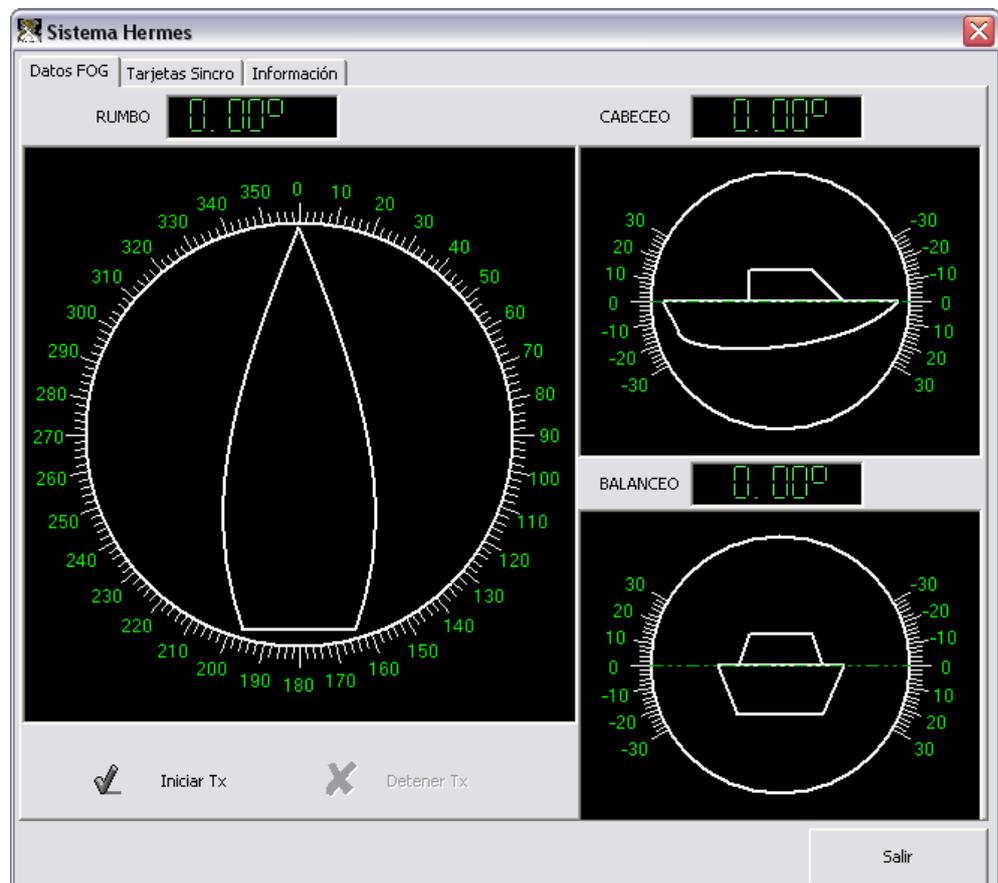


Figura 5.21 Ventana Principal: Pestaña de Datos FOG

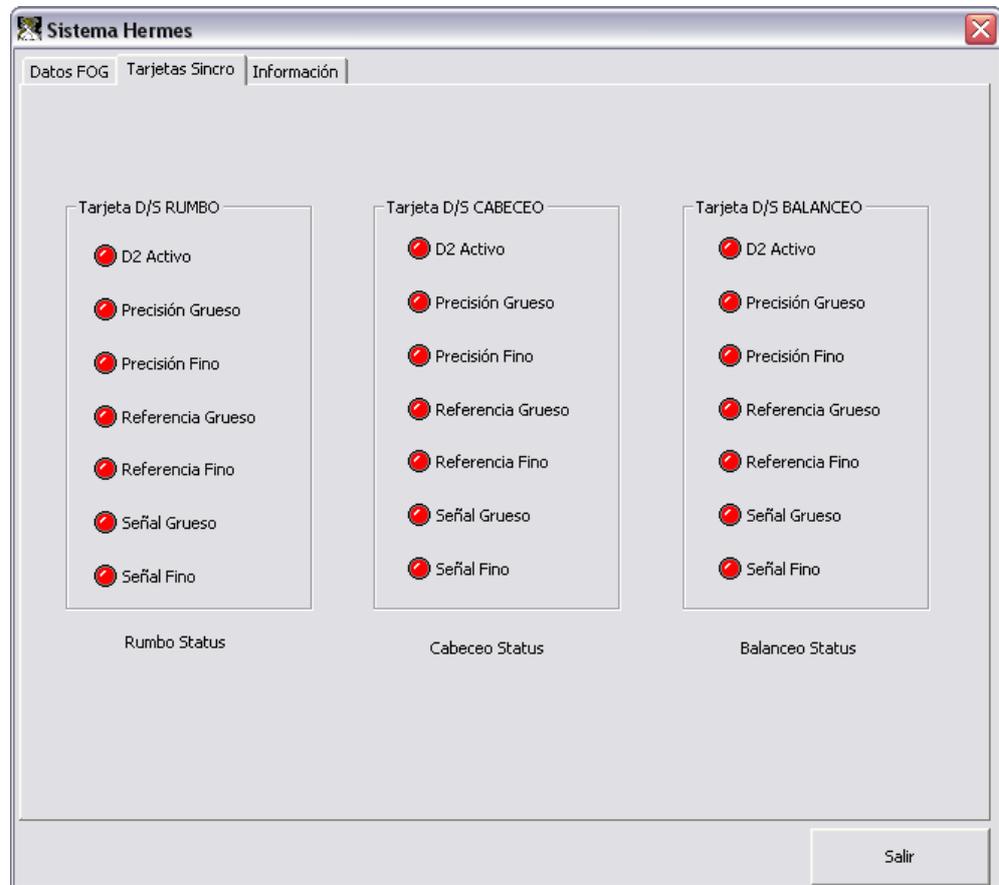


Figura 5.22 Ventana Principal: Pestaña Tarjetas Sincro

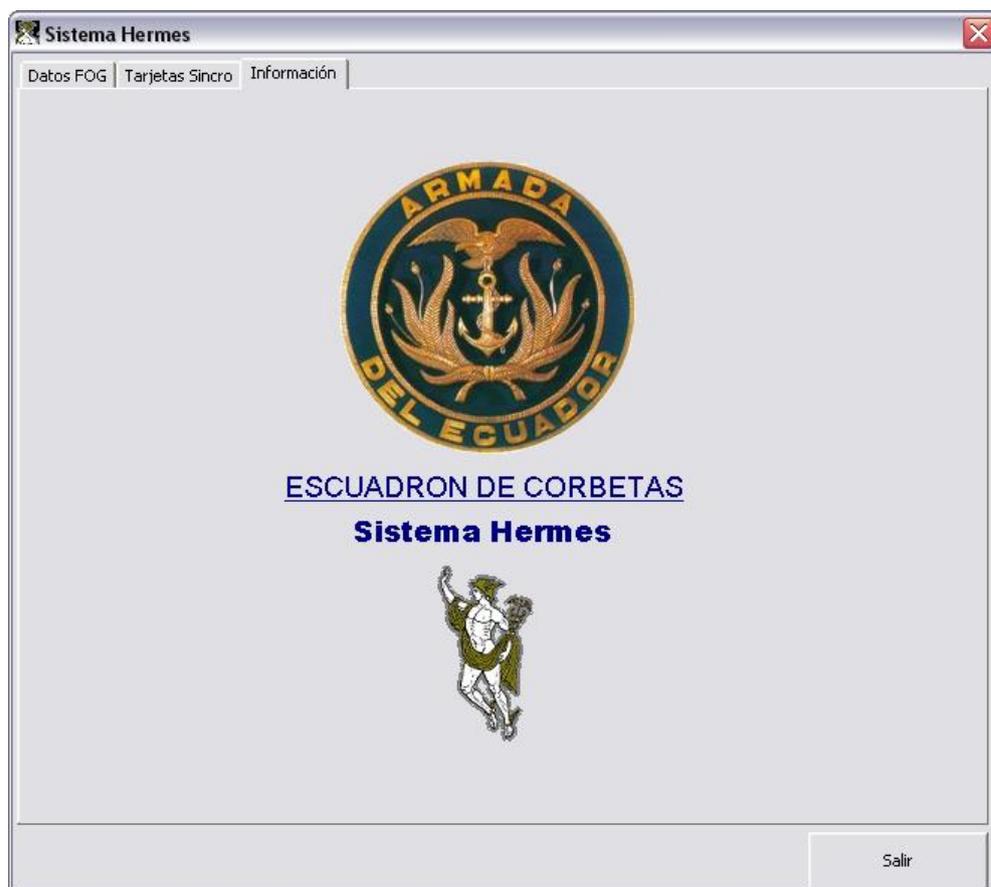


Figura 5.23 Ventana Principal: Pestaña de Información

CAPÍTULO 6

6. DESPLIEGUE, CONFIGURACIÓN Y PRUEBAS DEL SISTEMA

La fase final del proyecto comprende el despliegue y la configuración de los componentes del sistema. El presente capítulo abarca el despliegue y configuración de los componentes de hardware y software. En su parte final se describen las pruebas en la mar realizadas al sistema.

6.1. Despliegue y Configuración de Hardware

La instalación de los componentes de hardware se la realiza en la sala de giro de la Corbeta. La sala posee la facilidad de instalar dos sistemas de navegación inerciales. La plataforma inercial PL41 emplea la placa base #1. La plataforma FOG-OTG-64 se instala en la placa base #2. El computador que encapsula a la tarjeta de filtros Butterworth y ejecuta el programa RTXHermes se instala por sobre la

plataforma FOG.

La disposición física de los componentes en la sala de giro de la Corbeta clase “Esmeraldas” se muestra en la figura 6.1.

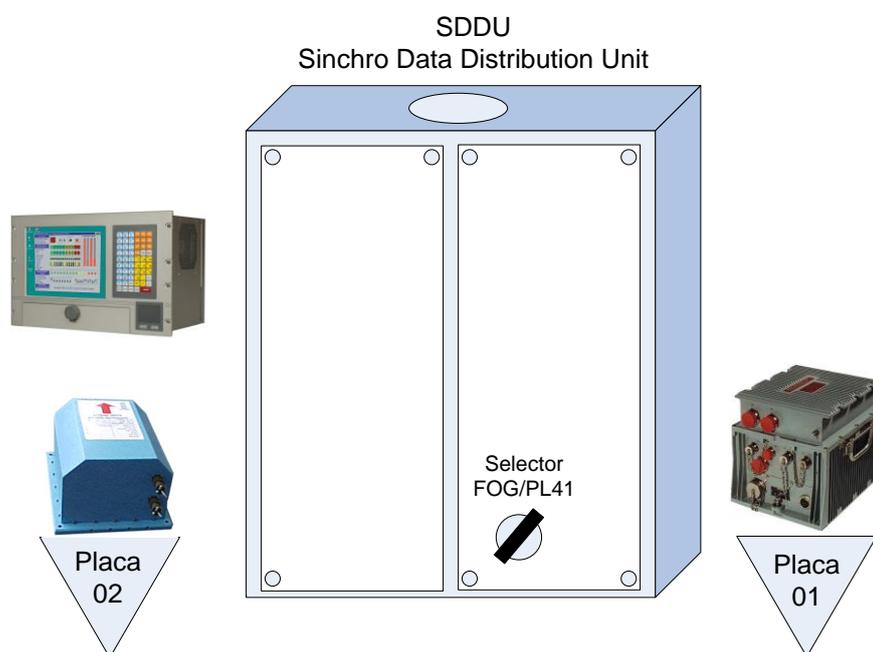


Figura 6.1 Disposición Física del Sistema Hermes en la Sala de Giro.

El despliegue de las interfaces internas y externas del sistema se muestran en la figura 6.2.

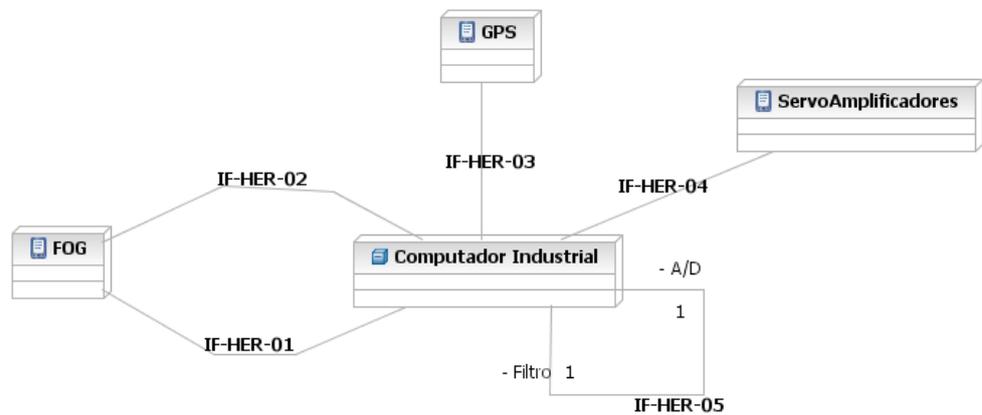


Figura 6.2 Despliegue de las Interfaces.

Dentro del computador las tarjetas de adquisición y generación se disponen según la figura 6.3.

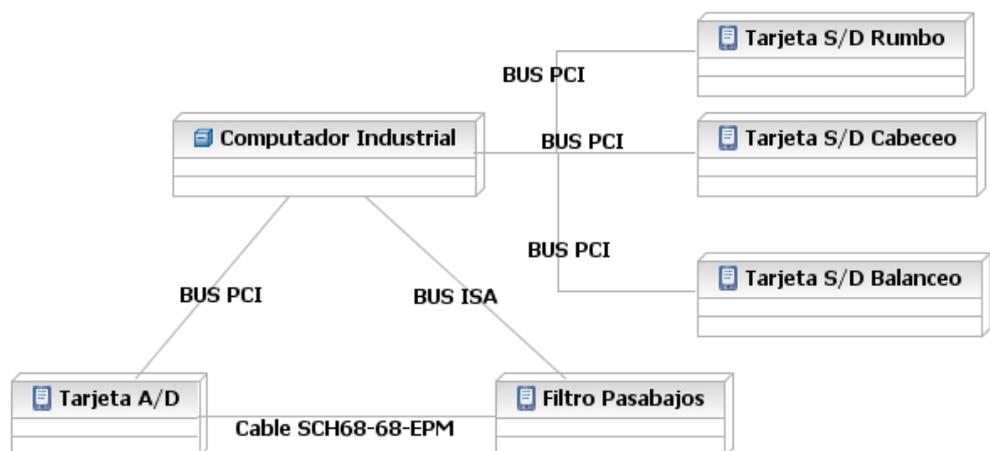


Figura 6.3 Despliegue de las Tarjetas en el Computador.

El diagrama de conexiones del sistema se presenta en el Anexo F.

6.1.1. Componentes de Hardware

Los componentes de hardware del sistema son:

1. Estación de trabajo tipo Industrial marca ICP Electronics
 - LCD de 12"
 - SBC Rocky – 4783EV
 - Procesador Pentium 4 2.8GHz
 - Memoria SDRAM 256MB
 - Disco Duro 40 GB 7200RPM
 - Teclado y ratón integrados al computador.
2. Fuente de Poder de 24VDC
3. Sistema de Navegación Inercial FOG OTG-64
4. Cables de Conexión
 - Cable HERMES-01
 - Cable HERMES-02
 - Cable HERMES-03
 - Cable HERMES-04
 - Cable HERMES-05

6.1.2. Descripción del Cableado

El cable Hermes-01 transporta las señales analógicas que

representan los datos de actitud de salida de la plataforma FOG OTG-64. Va desde el conector J2 de la FOG hacia el conector P1 de la tarjeta de Filtros Butterworth.

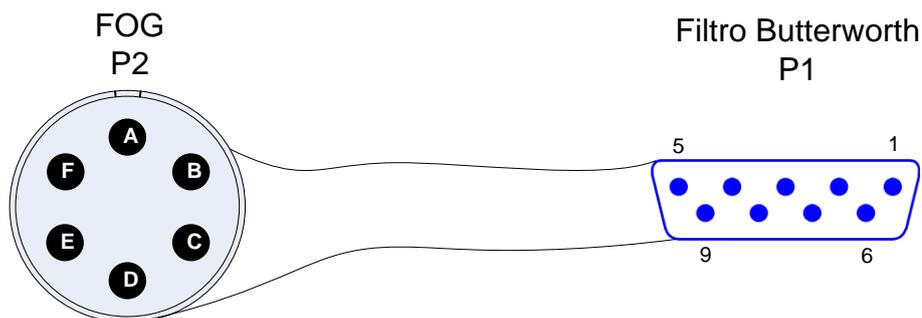


Figura 6.4 Cable HERMES-01

Desde		Cable HERMES-01	Hacia	
Conector	Pin		Conector	pin
FOG		Descripción	Tarjeta Butterworth	
P2	A		P1	1
P2	B	Rumbo_360	P1	2
P2	C	Cabeceo	P1	3
P2	D	Balanceo	P1	4
P2	E	GND	P1	5
P2	F	NC	-	-

Tabla 6.1 Conexiones del cable HERMES-01

El cable HERMES-02 transporta la señal de alimentación para el encendido de la FOG-OTG-64 y las señales de comunicación serial entre el programa interno de la FOG y el programa WinFOG2000. El cable va desde la FOG y se divide en dos conectores. El primero va hacia la fuente de poder de 24 VDC y el otro hacia el puerto serial COM1 de la estación de trabajo industrial.

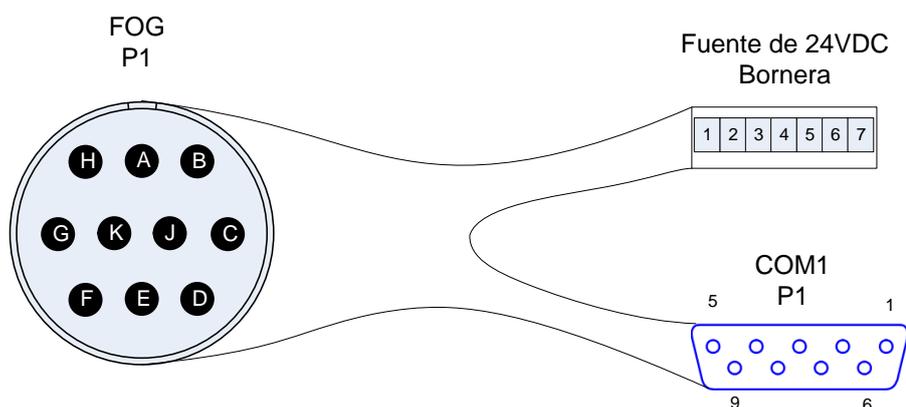


Figura 6.5 Cable HERMES-02

Desde		Cable HERMES-02	Hacia	
Conector	Pin		Descripción	
FOG			COM1	Fuente
P1	A		P1	Bornera
P1	A	+24V	-	7
P1	B	0V	-	5

P1	C	Tx_fog	2	-
P1	D	Rx_fog	3	-
P1	E	GND	-	3
P1	F	NC	-	-
P1	G	NC	-	-
P1	H	NC	-	-
P1	J	NC	-	-
P1	K	NC	-	-

Tabla 6.2 Conexiones del cable HERMES-02

El cable HERMES-03 transporta los datos seriales entre el GPS y el programa WinFOG2000. El cable va desde el conector NMEA1 del GPS al puerto serial COM2 de la estación de trabajo industrial.

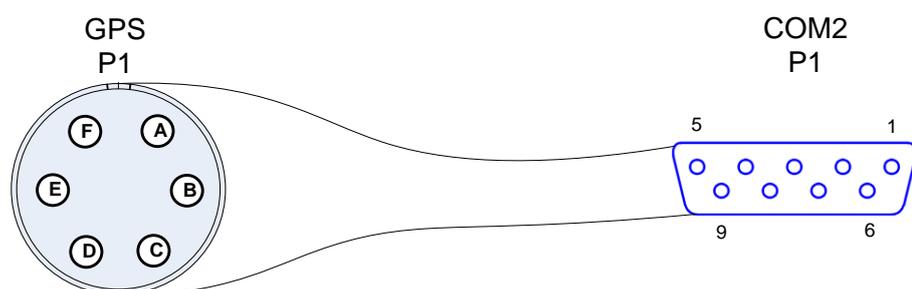


Figura 6.6 Cable HERMES-03

Desde		Cable HERMES-03	Hacia	
GPS		Descripción	COM2	
Conector	Pin		Conector	pin
P1	1	Tx_gps	P1	2
P1	2	GND	P1	5
P1	3	NC	-	-
P1	4	NC	-	-
P1	5	NC	-	-
P1	6	NC	-	-

Tabla 6.3 Conexiones del cable HERMES-03

El cable HERMES-04 transporta las señales sincrónicas que representan los datos de actitud corregidos por el Sistema “Hermes”. El cable va desde el conector P1 de las tarjetas D/S 76CS1 hacia las borneras del gabinete de distribución SDDU.

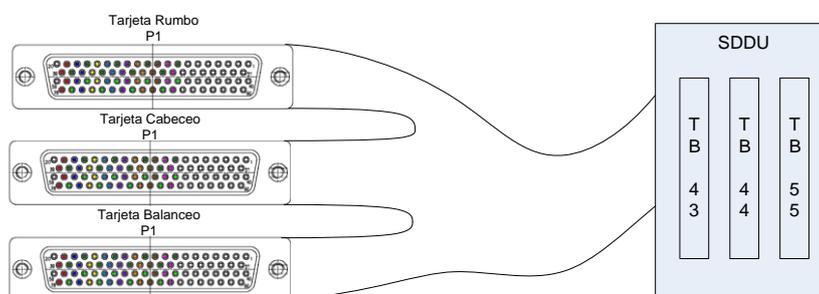


Figura 6.7 Cable HERMES-04

Desde			Cable HERMES- 04	Hacia	
Tarjetas D/S			Descripción	SDDU	
Tarjeta	Conector	Pin		TB	TERM
Rumbo	P1	26	R1_rumbo_1x	55	1
Rumbo	P1	65	R2_rumbo_1x	55	8
Rumbo	P1	27	S1_rumbo_1x	43	1
Rumbo	P1	46	S2_rumbo_1x	43	2
Rumbo	P1	66	S3_rumbo_1x	43	3
Rumbo	P1	5	R1_rumbo_36x	55	2
Rumbo	P1	44	R1_rumbo_36x	55	9
Rumbo	P1	6	S1_rumbo_36x	43	5
Rumbo	P1	64	S2_rumbo_36x	43	6
Rumbo	P1	45	S3_rumbo_36x	43	7
Rumbo	P1	1	Chasis	-	-
Rumbo	P1	40	Chasis	-	-
Cabeceo	P1	26	R1_cabeceo_1x	55	3
Cabeceo	P1	65	R2_cabeceo_1x	55	10
Cabeceo	P1	27	S1_cabeceo_1x	43	9
Cabeceo	P1	46	S2_cabeceo_1x	43	10

Cabeceo	P1	66	S3_cabeceo_1x	43	11
Cabeceo	P1	5	R1_cabeceo_36x	55	4
Cabeceo	P1	44	R2_cabeceo_36x	55	11
Cabeceo	P1	6	S1_cabeceo_36x	43	13
Cabeceo	P1	64	S2_cabeceo_36x	43	14
Cabeceo	P1	45	S3_cabeceo_36x	43	15
Cabeceo	P1	1	Chasis	-	-
Cabeceo	P1	40	Chasis	-	-
Balanceo	P1	26	R1_balanceo_1x	55	5
Balanceo	P1	65	R1_balanceo_1x	55	12
Balanceo	P1	27	S1_balanceo_1x	44	1
Balanceo	P1	46	S2_balanceo_1x	44	2
Balanceo	P1	66	S3_balanceo_1x	44	3
Balanceo	P1	5	R1_balanceo_36 x	55	6
Balanceo	P1	44	R2_balanceo_36 x	55	13
Balanceo	P1	6	S1_balanceo_36 x	44	5
Balanceo	P1	64	S2_balanceo_36 x	44	6

Balanceo	P1	45	S3_balanceo_36 x	44	7
Balanceo	P1	1	Chasis	-	-
Balanceo	P1	40	Chasis	-	-

Tabla 6.4 Conexiones del cable HERMES-04

El cable HERMES-05 permite la comunicación de las señales filtradas por el hardware hacia el componente de adquisición. El cable une el conector J2 de la tarjeta de filtros Butterworth con el conector VHDCI de 68 pines de la tarjeta A/D PCI-6221.

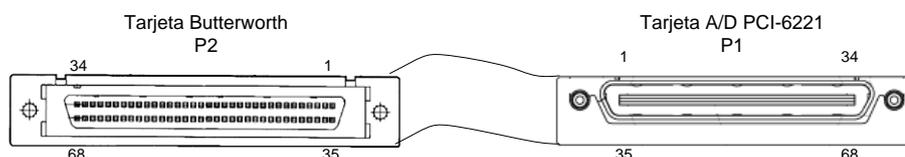


Figura 6.8 Cable HERMES-05

Desde		Cable HERMES-05	Hacia	
Filtros Butterworth		Descripción	PCI-6221	
Conector	Pin		Conector	pin
P2	1 - 23	NC	P1	1-23
P2	24	GND	P1	24
P2	25	NC	P1	25

P2	26	NC	P1	26
P2	27	GND	P1	27
P2	28	NC	P1	28
P2	29	GND	P1	29
P2	30	balanceo	P1	30
P2	31	NC	P1	31
P2	32	GND	P1	32
P2	33	rumbo_180	P1	33
P2	34 - 56	NC	P1	34 - 56
P2	57	GND	P1	57
P2	58	NC	P1	58
P2	59	GND	P1	59
P2	60 - 63	NC	P1	60-63
P2	64	GND	P1	64
P2	65	cabeceo	P1	65
P2	66	NC	P1	66
P2	67	GND	P1	67
P2	68	rumbo_360	P1	68

Tabla 6.5 Conexiones del cable HERMES-05

6.2. Despliegue y Configuración de SW

El componente de software RTXHerмес está compuesto por dos

programas: WinHermes.exe y RTXClient.rtss.

El programa WinHermes.exe es el aplicativo que se ejecuta sobre la plataforma Win32 e implementa las funciones del proceso_gui (ver sección 5.1). Es decir, expone las opciones del sistema al usuario, presenta gráficamente los datos de actitud y muestra el estado de las tarjetas S/D.

El programa RTXAppClient.rtss es el aplicativo que implementa el proceso_dsp (ver sección 5.1) y se ejecuta sobre la plataforma RTX. Realiza las tareas de filtrado digital y generación de los datos de actitud en formato sincrónico en tiempo real.

6.2.1. Componentes de Instalación

Para la ejecución del software del sistema, la estación de trabajo industrial necesita tener instalado los siguientes componentes:

- ✓ Sistema Operativo Windows® 2000 SP4
- ✓ Controladores de la SBC Rocky - 4783EV
- ✓ RTX® RunTime 6.1.
- ✓ Librería VISA de National Instruments

- ✓ Controladores de la Tarjeta A/D PCI - 6221
- ✓ Controladores de la tarjeta S/D 76CS1

Las dependencias de los componentes de software se muestran en la figura 6.9.

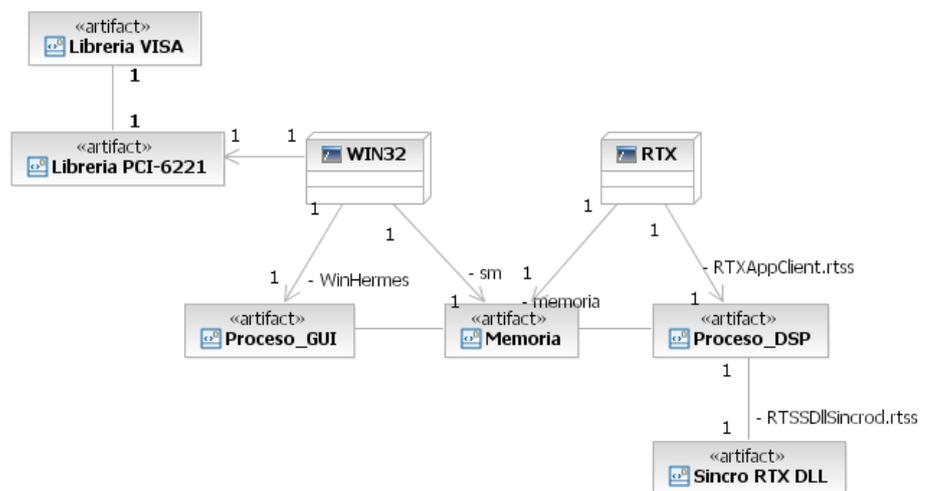


Figura 6.9 Despliegue de los Componentes de Software.

6.2.2. Configuración del Aplicativo

El componente de software puede ser configurado mediante la modificación de los parámetros contenidos en el archivo de configuración “Hermes.propiedades”.

El archivo de configuración permite alterar el comportamiento de las siguientes funciones internas del software:

1. Cambio del modo de operación: normal o prueba.
2. Modificación del proceso de adquisición y generación de datos.
3. Configuración de la tarjeta A/D PCI-6221.
4. Cambio del factor de conversión de las señales analógicas.
5. Configuración de las tarjetas D/S 76CS1.
6. Ingreso de la relación grueso-fino de las señales sincrónicas.
7. Personalización del filtro Kalman.
8. Configuración del proceso de verificación del estado de las tarjetas D/S 76CS1.

6.2.3. Instalación del Aplicativo

Para que el componente de software pueda ser desplegado en el computador industrial se deben realizar los siguientes pasos:

1. Instalar la librería VISA para la tarjeta PCI-6221.
2. Instalar el controlador de la tarjeta D/S 76CS1.
3. Instalar RTX® Runtime 6.1
4. Crear el directorio contenedor, por ejemplo: "C:\hermes"

5. Copiar en el directorio contenedor los archivos:

- WinHermes.exe
- RTSSDIISincrod.rtss
- RTXClient.rtss
- Hermes.propiedades

6.3. Prueba del Sistema en la Mar

6.3.1. Datos Generales de la Prueba

El Sistema “Hermes” fue validado a bordo de la Corbeta Misilera “Los Ríos” durante los días 15, 16 y 17 de abril del 2007. El equipo participante en la realización de las pruebas estuvo conformado por el desarrollador de la tesis, los operarios del buque y los técnicos del sistema de navegación inercial de Talleres de DIECAR.

6.3.2. Asignación de Requisitos

Para la prueba del sistema se tienen los siguientes requisitos:

- ✓ El Sistema NA-21 debe estar encendido y operativo.
- ✓ Los Radares de Tiro Orión encendidos y operativos.
- ✓ El GPS debe estar encendido y transmitiendo las tramas GGA.

- ✓ La plataforma FOG OTG-64 debe estar encendida y transmitiendo datos válidos.
- ✓ Contar con blancos de oportunidad o simulados de tipo aéreo y de superficie.

6.3.3. Equipos y Herramientas Habilitantes

- ✓ Sistema "Hermes"
 - 01 Computador Industrial
 - 01 Tarjeta A/D PCI-6221
 - 03 Tarjetas D/S 76CS1
 - Cables de Interconexión
 - Fuente de 24 VDC
- ✓ Plataforma FOG OTG-64
- ✓ Multímetro Digital Fluke 79III

6.3.4. Condiciones de Pre-Requisito

La interfaz del GPS de transmisión de datos RS-232 debe estar configurada de la siguiente manera:

- Velocidad de Transmisión: 4800
- Bits de Datos: 8
- Paridad: Ninguna

- Bits de Parada: 1
- Control de Flujo: Ninguno

6.3.5. Entradas para la Prueba

El Sistema “Hermes” recibe las señales de actitud de la plataforma FOG OTG-64. Las señales generadas son transmitidas al habilitar la distribución mediante el selector “FOG/PL41” del gabinete SDDU.

6.3.6. Resultados Esperados

El Sistema “Hermes” debe permitir la correcta ejecución de las siguientes funciones del Sistema de Tiro NA-21.

- Dar conformidad de correcta señal de giro en las dos consolas.
- Realizar movimiento libre estabilizado del radar de tiro.
- Ejecutar el modo de vigilancia sectorizada con el radar de tiro.
- Mantener la posición de un blanco de superficie.
- Asignar y disparar a un blanco de superficie con los cañones de proa y popa.
- Seguir continuamente a un blanco aéreo.

El Sistema “Hermes” debe asistir a la navegación y a la acciones de combate del buque al generar las señales de actitud a todos los sistemas usuario del buque.

6.3.7. Procedimiento de Prueba

Para probar el Sistema “Hermes” se siguen los pasos siguientes:

1. Energizar a la FOG OTG-64.
2. Encender el computador industrial.
3. Ejecutar el programa WinFOG2000 y esperar a que la FOG OTG-64 comience a transmitir datos válidos.
4. Ejecutar el programa WinHermes.exe.
 - a. Ejecutar el proceso de generación pulsando el botón “Ejecutar” en la ventana principal.
5. Ubicar el Selector FOG/PL41 en posición FOG.
6. Encender el Sistema NA-21.
7. Verificar el estado de alarma de “giro con problemas” en las dos consolas de tiro.
 - a. Resultado: El indicador “giro con problemas” se encuentra apagado.

8. Realizar el movimiento estabilizado de la antena de tiro.
 - a. Resultado: Se mantiene la posición estabilizada de los movimientos de la antena de tiro Orión.
9. Adquirir y seguir un blanco de superficie al alcance medio de los cañones de proa y popa.
 - a. Resultado: Se mantiene el seguimiento del blanco de superficie. Las señales de actitud no disparan la señal de falla en las consolas de tiro.
10. Disparar con los cañones de proa y popa al blanco de superficie adquirido.
 - a. Resultado: Se dispara efectivamente con los cañones de proa y popa. No se inhibe el disparo ni se dispara la señal de falla en las consolas de tiro.
11. Realizar un seguimiento a un blanco aéreo.
 - a. Resultado: Se mantiene el seguimiento del blanco aéreo. No se aborta el seguimiento ni se dispara la señal de falla en las consolas de tiro.

6.3.8. Supuestos y Limitaciones

- La placa base de instalación de la FOG OTG-64 se encuentra alineada correctamente.

- Al no contar con un blanco aéreo simulado, no es posible realizar un disparo a este tipo de blanco. Las pruebas de seguimiento de un blanco aéreo se realizan con blancos de oportunidad o con unidades aéreas que participen en los ejercicios navales.
- El seguimiento continuo de blancos, a más de los datos de actitud de la plataforma inercial, depende: de los algoritmos internos del sistema NA-21, de las características de detección y movimiento del radar de tiro, y de las maniobras ejecutadas por el blanco.

CONCLUSIONES

1. El acondicionamiento de las señales analógicas de la plataforma FOG OTG-64 mediante el uso de filtros activos pasa bajos Butterworth anula el ruido blanco presente sin alterar la forma de las señales substancialmente debido a la respuesta en fase casi lineal de los filtros.
2. El uso del Subsistema de Tiempo Real RTX® junto con el Sistema Operativo Windows® 2000 permite la ejecución de procesos determinísticos. El cumplimiento de los requerimientos de latencia, procesamiento de interrupciones y sobrecarga de los procesos dependen de la plataforma de hardware/software empleada, la cual puede ser analizada con la herramienta de Evaluación de la Plataforma de Despliegue incluida en el paquete de instalación de RTX®.
3. La Arquitectura del Software del Sistema “Hermes” permite lograr un balance entre las tareas de la interfaz gráfica de usuario y las tareas de adquisición y generación de señales en tiempo real.
4. El Sistema “Hermes” acondiciona, filtra y genera las señales de actitud de forma suave y continua en formato sincrónico a los usuarios del buque. A

su vez, posee la precisión requerida para habilitar todas las funciones del Sistema de Tiro NA-21 de las Corbetas Misileras clase “Esmeraldas”, entre las cuales se incluye el seguimiento de blancos aéreos y de superficie con el radar de tiro “Orión”, y el disparo a blancos de superficie con los cañones de proa y popa.

RECOMENDACIONES

1. Como todo filtro activo compuesto de componentes analógicos, la tarjeta de filtros Butterworth debe ser calibrada anualmente respetando las tolerancias máximas de cada componente.
2. En caso de requerir una mayor precisión en la señal de rumbo se debe analizar el cambio de la tarjeta D/A interna que posee la FOG. Sin embargo, esto supone un cambio adicional en su programa de control interno.
3. Para el desarrollo de sistemas de procesamiento de señales es de suma importancia el análisis de las características de las señales involucradas. En el caso de reducción de ruido se pueden emplear filtros digitales ó analógicos e incluso la combinación de ambos tipos.
4. En la elección de filtros analógicos activos se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos fundamentales: el tipo de filtro, su orden, añejamiento de la señal de salida, desfase de la señal, tipos de componentes usados y precisión requerida. En filtros digitales se debe

considerar el tipo de filtro, añejamiento de la señal, la frecuencia de muestreo y el procesador digital de señales (DSP) a emplear.

5. Los filtros usados en sistemas de procesamiento de señales, ya sean éstos analógicos o digitales, no deben deformar significativamente la fase de las frecuencias fundamentales de la señal a filtrar. Esto se determina mediante el comportamiento lineal o no del retardo fase del filtro. Un comportamiento lineal en fase supone la conservación de la fase de las componentes de frecuencia de la señal.

6. El determinismo de un sistema recae en la correcta elección de la plataforma de despliegue tanto de hardware y como de software. La plataforma en su conjunto se puede evaluar objetivamente mediante el uso de las herramientas incluidas en el Subsistema de Tiempo Real RTX®. Así también, el determinismo y la planificación de tareas del software depende de las librerías usadas, el método de acceso a la capa de abstracción del hardware (HAL) y el uso eficiente de los recursos de máquina en la programación del sistema tales como los registros del procesador y la memoria.

ANEXOS

Anexo A

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA PLATAFORMA

LITEF PL-41

Precisión de la Plataforma Inercial PL-41

El equipo PL-41 brinda una salida digital serial de 17 bits.

Rumbo

Precisión Estática	1 mrad r.m.s.
Precisión Dinámica (movimiento +/-10° periodo 12 s)	0.4 mrad/s

Tabla A.1 Especificación de Rumbo PL-41

Cabeceo, Balanceo

Precisión Estática	1 mrad r.m.s.
Precisión Dinámica (movimiento +/-10° periodo 6 s)	0.2 mrad/s

Tabla A.2 Especificación de Cabeceo y Balanceo PL-41

Exactitud en Modo Girocompás

Rumbo	3.5 arcmin
Cabeceo, Balanceo	0.6 arcmin
Posición	0.1 nm/h
Condiciones	Bias Corredera <= 3.0 nudos Ruido Corredera +- 0.1 nudo

Tabla A.3 Exactitud de PL-41 en Modo Girocompás

Exactitud en Modo Inercial

Rumbo	3.5 arcmin +- 1 arcmin/h
Cabeceo, Balanceo	0.6 arcmin
Posición	1.0 nm/h
Condiciones	30 minutos de alineación

Tabla A.4 Exactitud de PL-41 en Modo Inercial

Anexo B

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA PLATAFORMA

OCEANTOOLS FOG OTG-64

Exactitud

Rumbo

Exactitud típica dinámica o estática	0.2° - 0.3° x Secante Latitud
Peor caso	0.7 x Secante Latitud
Resolución	0.1°
Latitud Máxima	75° Norte y Sur

Tabla B.1 Exactitud Rumbo FOG OTG-64

Cabeceo, Balanceo

Exactitud típica	$\leq 0.02^\circ$
Peor Caso	0.2°
Resolución	0.01°
Rango	+45°

Tabla B.2 Exactitud del Cabeceo y Balanceo FOG OTG-64

Tiempo de Puesta en Marcha

Tiempo para su uso	3 a 5 minutos
Peor caso estático	20 minutos
Peor caso dinámico	30 minutos

Tabla B.3 Tiempos de Alineación de la FOG OTG-64

Anexo C

**DESCRIPCIÓN DE LOS CONECTORES DE LA
PLATAFORMA OCEANTOOLS FOG OTG-64**

Ubicación de los conectores de entrada/salida de la Plataforma OceanTools FOG OTG-64.

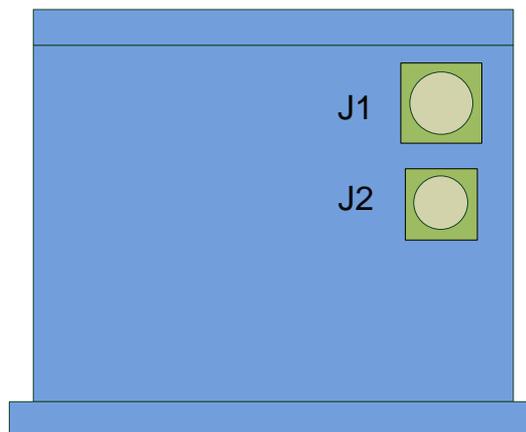


Figura C.1 Vista Posterior de la Plataforma FOG OTG-64

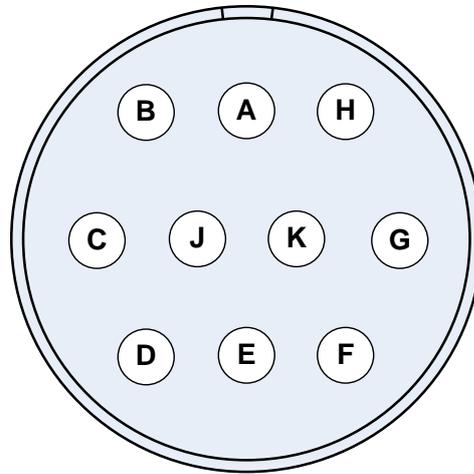


Figura C.2 Conector J1 AB05 2100 12 10 SN00 – Vista Frontal

Conector	Pin	Descripción
J1	A	24 V
J1	B	0V (24V)
J1	C	Tx
J1	D	Rx
J1	E	GND
J1	F	NC
J1	G	NC
J1	H	NC
J1	J	NC
J1	K	NC

Tabla C.1 Distribución de Pines del Conector J1 FOG OTG-64

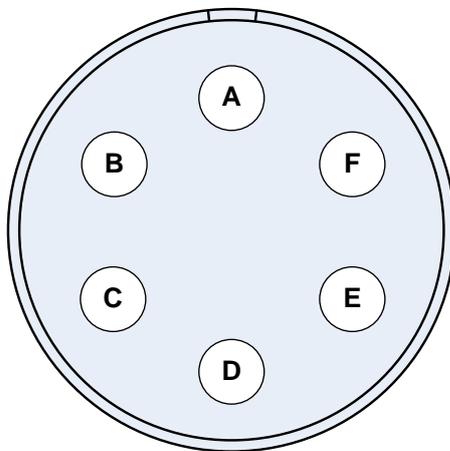


Figura C.3 Conector J2 AB05 2100 10 06 SN00 – Vista Frontal

Conector	Pin	Descripción
J2	A	Rumbo_1
J2	B	Rumbo_2
J2	C	Cabeceo
J2	D	Balanceo
J2	E	GND
J2	F	NC

Tabla C.2 Distribución de Pines del Conector J2 FOG OTG-64

Anexo D

**DESCRIPCIÓN DE LOS CONECTORES DE LA
TARJETA DE FILTROS PASA BAJOS BUTTERWORTH**

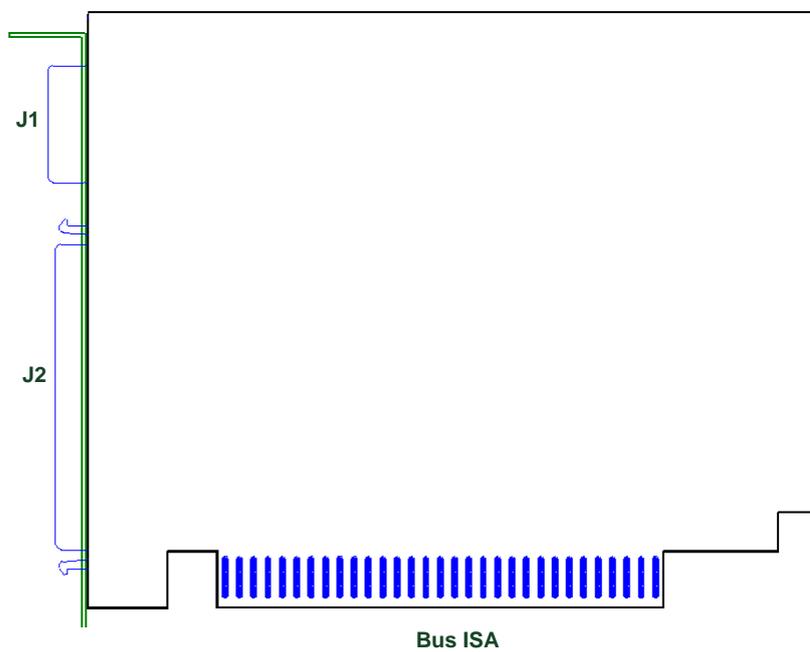


Figura D.1 Vista Superior Tarjeta de Filtros Pasa Bajos Butterworth

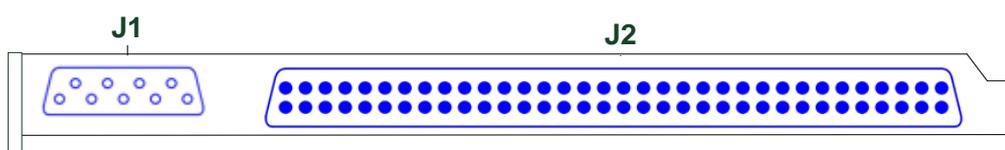


Figura D.2 Vista Lateral de la Tarjeta de Filtros Pasa Bajos Butterworth

J1	
Pin	Descripción
1	Rumbo_180
2	Rumbo_360
3	Cabeceo
4	Balanceo
5	GND
6	NC
7	NC
8	NC
9	NC
Carcasa	GND

Tabla D.1 Descripción de Pines del Conector J1 Tarjeta Butterworth (DB-9)

J2	
Pin	Descripción
1	NC
2	NC
3	NC
4	NC
5	NC
6	NC
7	NC
8	NC
9	NC
10	NC
11	NC
12	NC
13	NC
14	NC
15	NC
16	NC
17	NC
18	NC
19	NC
20	NC
21	NC
22	NC
23	NC
24	GND
25	NC
26	NC
27	GND
28	NC
29	GND
30	Balanceo
31	NC
32	GND
33	Rumbo_180
34	NC
35	NC
36	NC
37	NC
38	NC
39	NC

40	NC
41	NC
42	NC
43	NC
44	NC
45	NC
46	NC
47	NC
48	NC
49	NC
50	NC
51	NC
52	NC
53	NC
54	NC
55	NC
56	NC
57	GND
58	NC
59	GND
60	NC
61	NC
62	NC
63	NC
64	GND
65	Cabeceo
66	NC
67	GND
68	Rumbo_360
Carcasa	GND

Tabla D.2 Descripción de Pines del Conector J2 Tarjeta Butterworth (AMP 2-

174225-5)

Bus ISA	
Pin	Descripción
A1 - A31	NC
B1	GND
B2	NC
B3	NC
B4	NC
B5	NC
B6	NC
B7	-Vcc
B8	NC
B9	+Vcc
B10	GND
B11	NC
B12	NC
B13	NC
B14	NC
B15	NC
B16	NC
B17	NC
B18	NC
B19	NC
B20	NC
B21	NC
B22	NC
B23	NC
B24	NC
B25	NC
B26	NC
B27	NC
B28	NC
B29	NC
B30	NC
B31	GND

Tabla D.3 Descripción de Pines del Bus ISA Tarjeta Butterworth

Anexo E

**DIAGRAMA TOPOLÓGICO, ESQUEMÁTICO, LISTA DE
MATERIALES Y FOTOS DE LA TARJETA DE FILTROS
PASA BAJOS BUTTERWORTH**

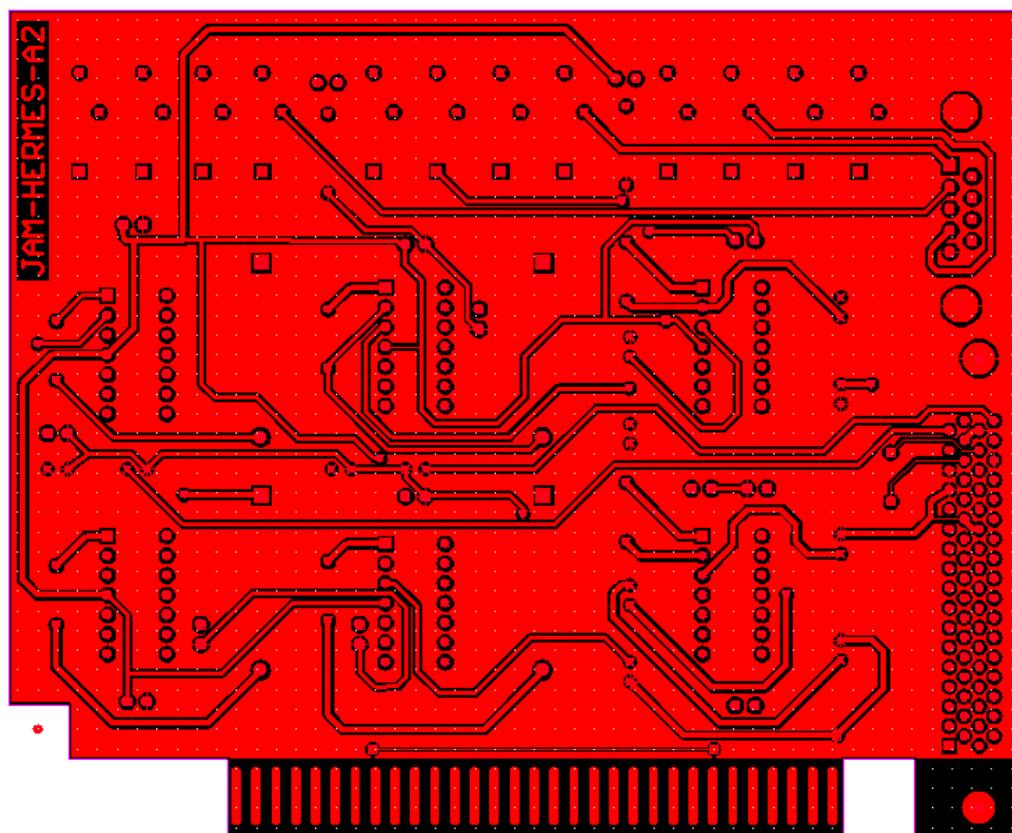


Figura E.1 Tarjeta Butterworth: Capa Superior

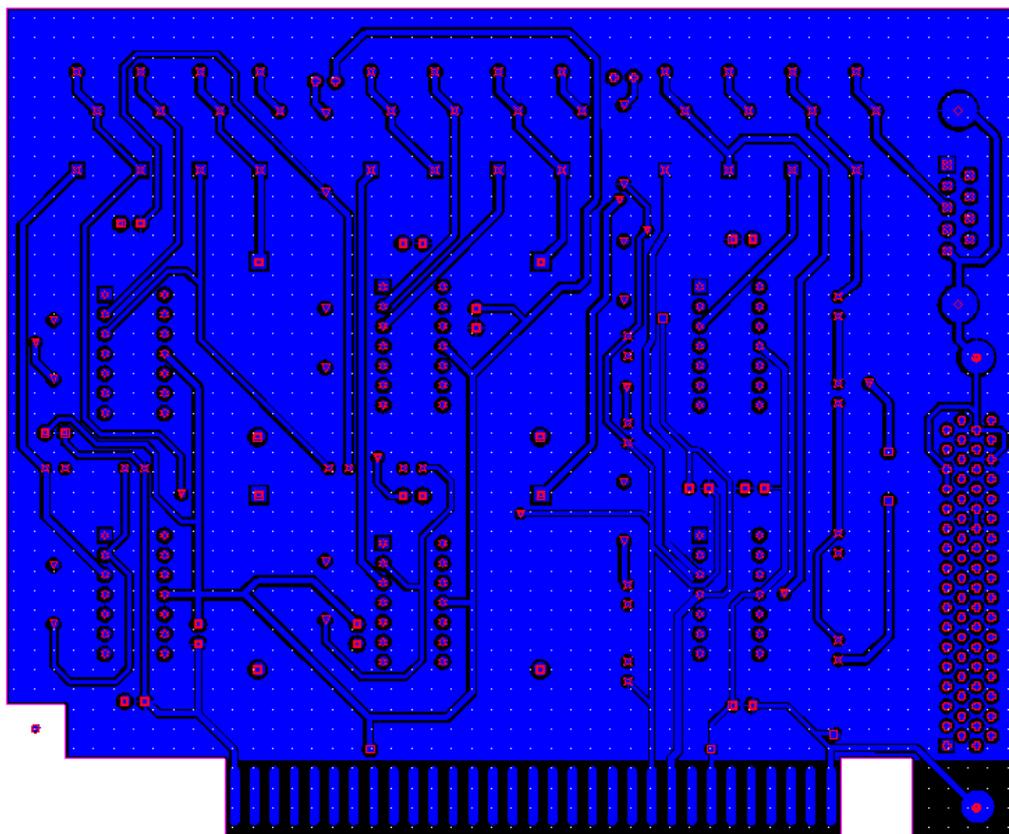


Figura E.2 Tarjeta Butterworth: Capa Inferior

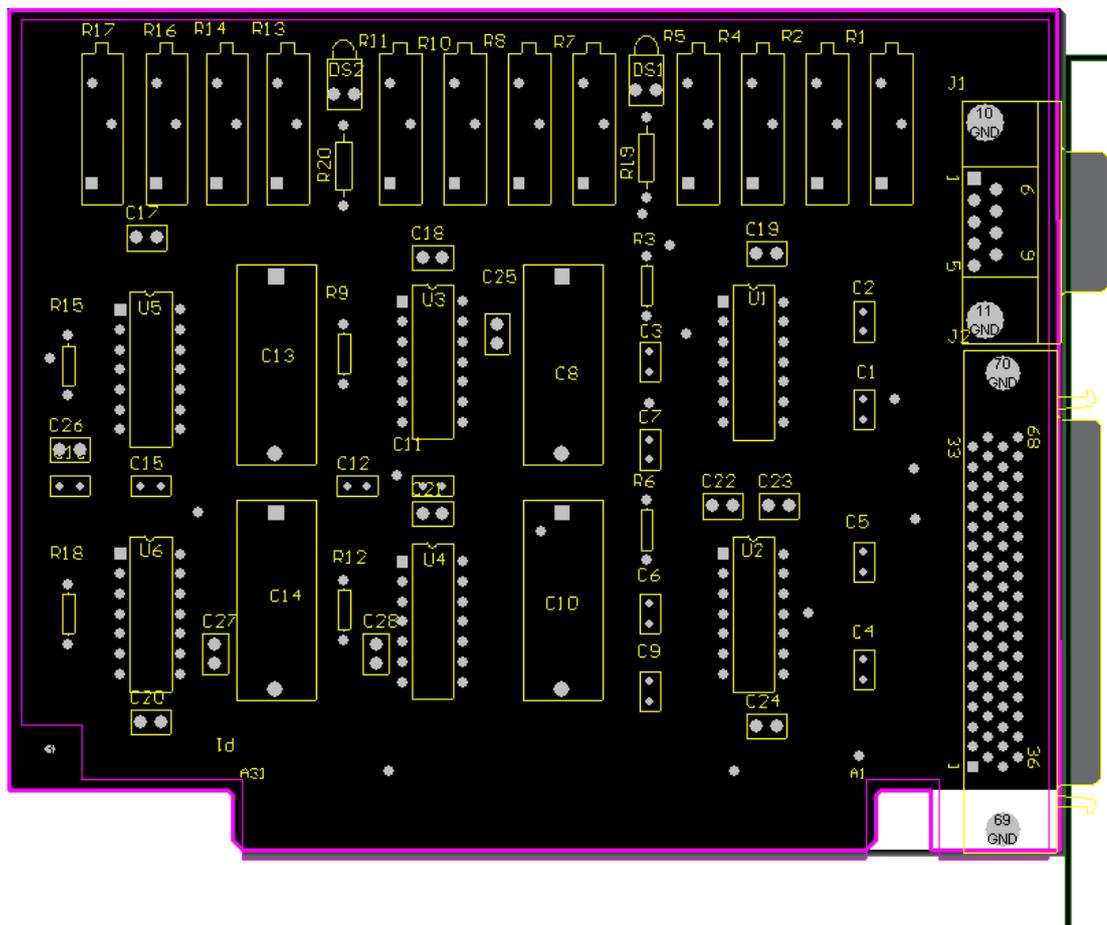


Figura E.3 Tarjeta Butterworth: Diagrama Topológico

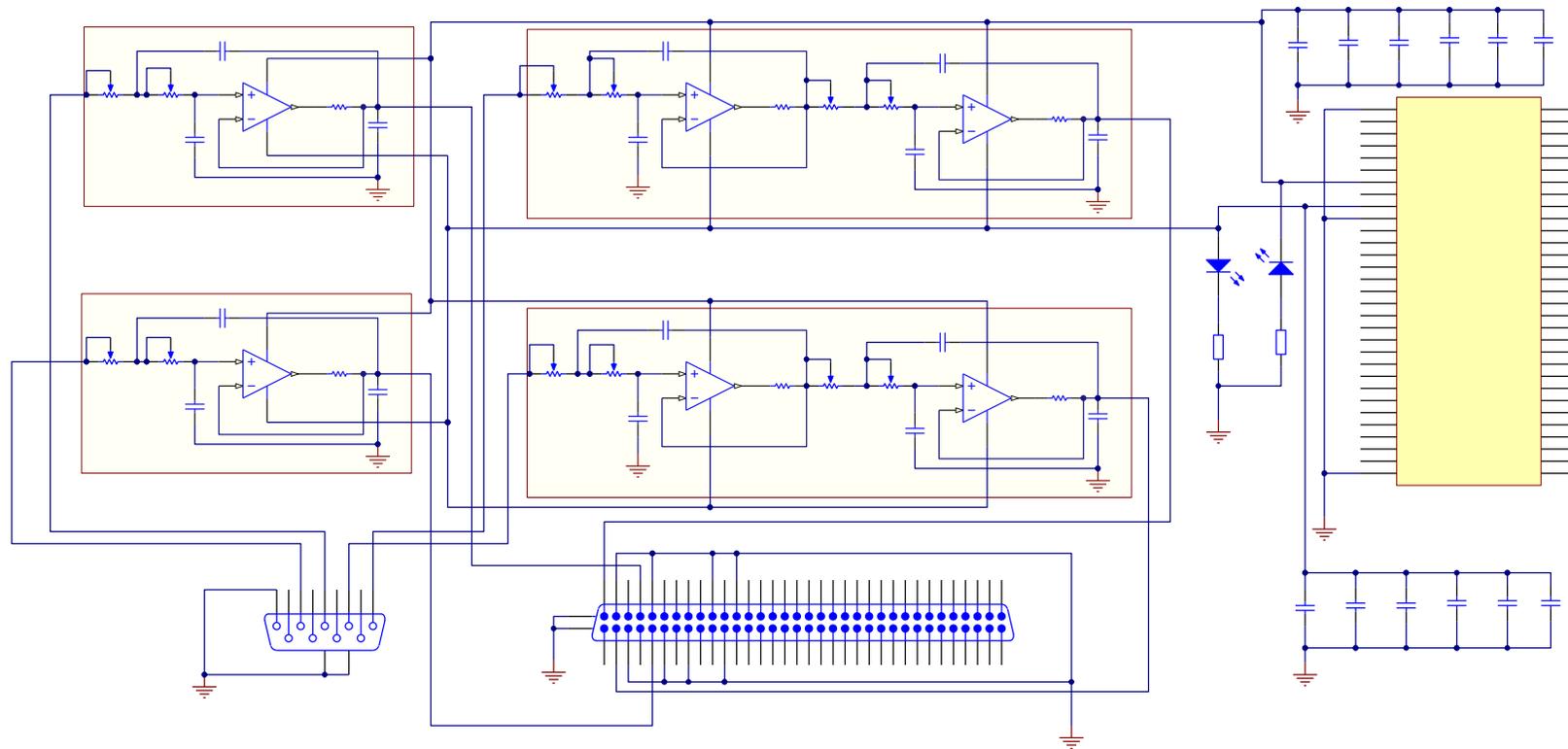


Figura E.4 Tarjeta Butterworth: Esquemático

Descripción	Identificador	Valor
Capacitor	C1	0.22 μ F
Capacitor	C2	1 μ F
Capacitor	C3	0.47 μ F
Capacitor	C4	0.22 μ F
Capacitor	C5	0.47 μ F
Capacitor	C6	1 μ F
Capacitor	C7	0.47 μ F
Capacitor	C8	3.3 μ F
Capacitor	C9	0.47 μ F
Capacitor	C10	0.56 μ F
Capacitor	C11	0.22 μ F
Capacitor	C12	0.47 μ F
Capacitor	C13	3.3 μ F
Capacitor	C14	0.56 μ F
Capacitor	C15	0.22 μ F
Capacitor	C16	0.47 μ F
Capacitor	C17	100 μ F
Capacitor	C18	100 μ F
Capacitor	C19	100 μ F
Capacitor	C20	100 μ F
Capacitor	C21	100 μ F
Capacitor	C22	100 μ F
Capacitor	C23	100 μ F
Capacitor	C24	100 μ F
Capacitor	C25	100 μ F
Capacitor	C26	100 μ F
Capacitor	C27	100 μ F
Capacitor	C28	100 μ F
LED	DS1	-
LED	DS2	-
Potenciómetro	R1	8.87 K Ω
Potenciómetro	R2	15.0 K Ω
Resistencia	R3	0.5 K Ω
Potenciómetro	R4	8.87 K Ω
Potenciómetro	R5	15.0 K Ω
Resistencia	R6	0.5 K Ω
Potenciómetro	R7	5.49 K Ω
Potenciómetro	R8	7.5 K Ω

Resistencia	R9	0.5 K Ω
Potenci3metro	R10	13.7 K Ω
Potenci3metro	R11	17.8 K Ω
Resistencia	R12	0.5 K Ω
Potenci3metro	R13	5.49 K Ω
Potenci3metro	R14	7.5 K Ω
Resistencia	R15	0.5 K Ω
Potenci3metro	R16	13.7 K Ω
Potenci3metro	R17	17.8 K Ω
Resistencia	R18	0.5 K Ω
Resistencia	R19	1 K Ω
Resistencia	R20	1 K Ω
Amplificador Operacional TL074CN	U1	-
Amplificador Operacional TL074CN	U2	-
Amplificador Operacional TL074CN	U3	-
Amplificador Operacional TL074CN	U4	-
Amplificador Operacional TL074CN	U5	-
Amplificador Operacional TL074CN	U6	-
Recept3culo de 9 pines en 3ngulo recto (DB-9)	J1	-
Conector Tipo D 0.05 Series II 68 pines (AMP 2-174225-5)	J2	-

Tabla E.1 Tarjeta Butterworth: Lista de Materiales

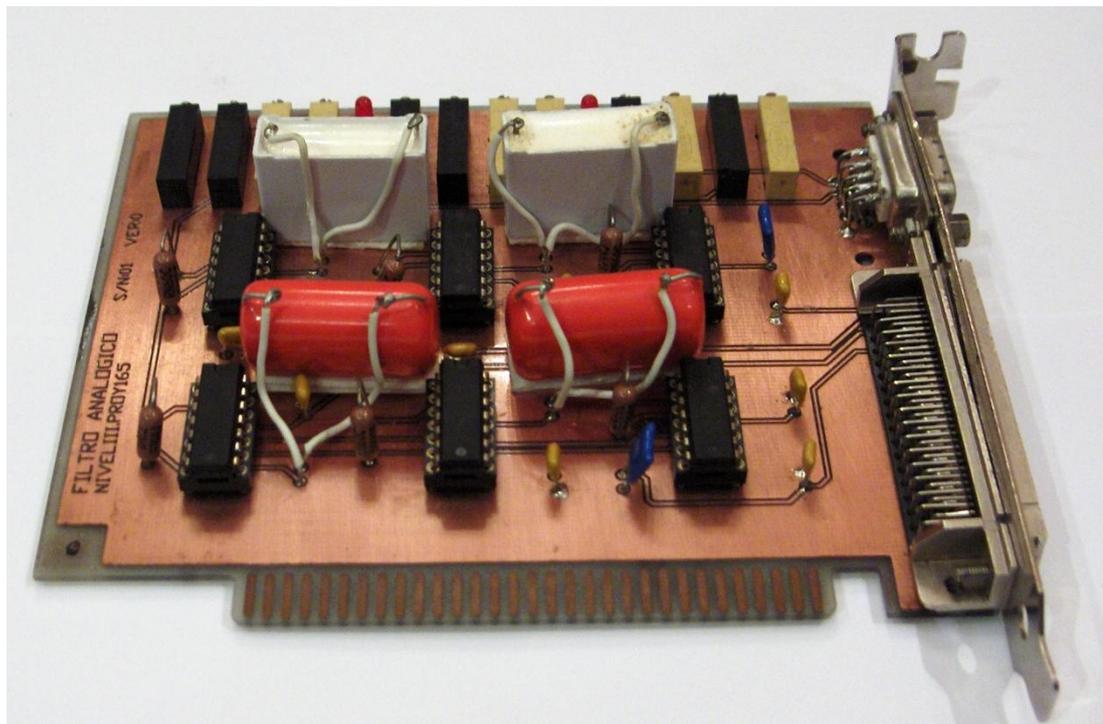


Figura E.5 Ensamblaje Final de la Tarjeta de Filtros Activos Pasa Bajos Butterworth: Vista de Componentes.

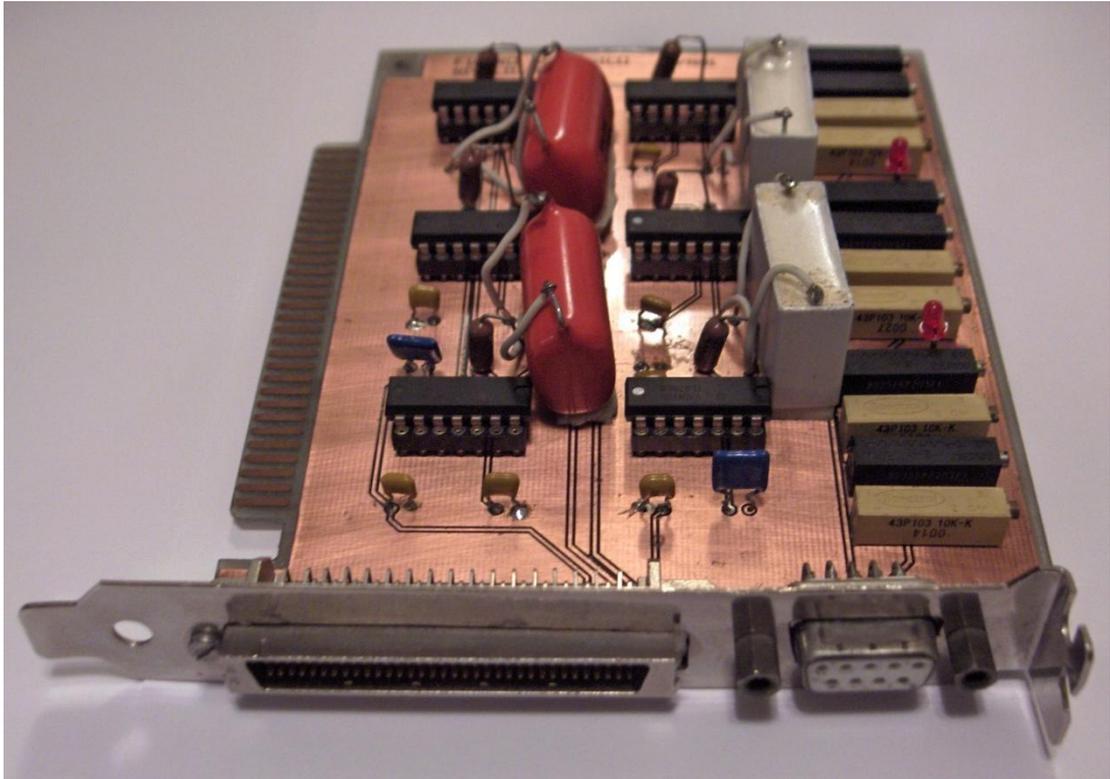
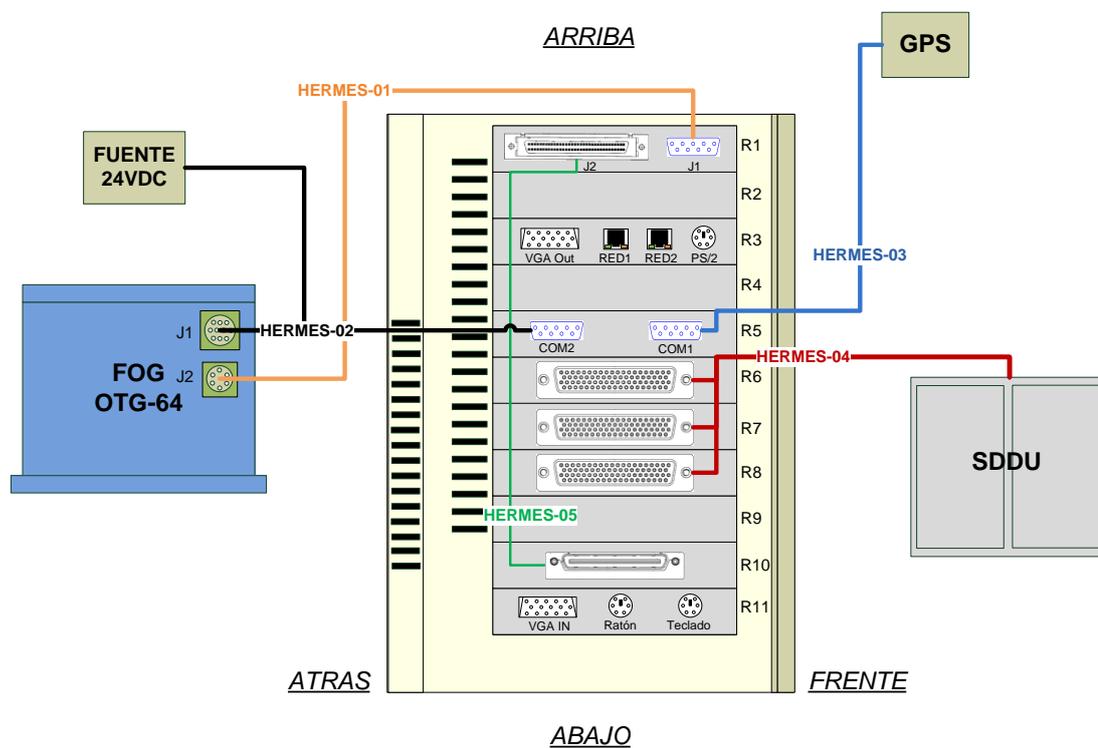


Figura E.6 Ensamblaje Final de la Tarjeta de Filtros Activos Pasa Bajos Butterworth: Vista de Interfaces de Entrada/Salida.

Anexo F

DIAGRAMA GENERAL DE CONEXIONES DEL SISTEMA “HERMES”



VISTA LATERAL IZQUIERDA
DEL COMPUTADOR

Figura F.1 Esquema de Conexiones del Sistema Hermes

Ranura	Componente
R1	Tarjeta de Filtros Pasa Bajos Butterworth
R2	Disponible
R3	SBC
R4	Disponible
R5	Puertos seriales 1 y 2.
R6	Tarjeta 76CS1 D/S Balanceo
R7	Tarjeta 76CS1 D/S Cabeceo
R8	Tarjeta 76CS1 D/S Rumbo
R9	Disponible
R10	Tarjeta NI PCI-6221
R11	Conectores vídeo, teclado externo y ratón.

Tabla F.1 Distribución de los Componentes en las Ranuras del Computador

BIBLIOGRAFÍA

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Sagnac_effect
- [2] <http://www.dtc.army.mil/navigator>
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/White_noise
- [4] Microchip Webseminars, "Filter Now, Later or Never", 2004
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter
- [6] Maybeck, P., "Stochastic models, estimation and control", Volume 1, Academic Press, New York, 1979.
- [7] Nowak, R., Scott, C., "Kalman Filters" Version 1.7, Connexions Project, 2004
- [8] Laurien, E., "Lax-Wendroff Verfahren", Universität Stuttgart, 2003