

Índice

1	Introducción	1
1.1	Introducción General	1
1.2	Estado del Arte	1
1.2.1	Tipos de robots submarinos	2
1.2.2	Tipos de propulsores	4
1.2.3	Tipos de materiales y geometrías utilizadas en la fabricación	9
1.2.4	Fuentes de energía	11
1.2.5	Sensores	13
1.2.6	Técnicas de control	15
1.3	Discusiones bibliográficas	21
1.4	Objetivos	23
1.4.1	Objetivo General	23
1.4.2	Objetivos Específicos	23
1.5	Alcances y Limitaciones	23
1.5.1	Alcances	23
1.5.2	Limitaciones	23
1.6	Metodología	24
1.6.1	Análisis del modelo matemático de un vehículo submarino	24
1.6.2	Dimensionamiento de empuje y potencia requerida	24
1.6.3	Diseño en CAD y fabricación	24
1.6.4	Integración de componentes electrónicos	24
1.6.5	Simulación de la Estrategia de Control	24
2	Sistema de propulsión	25
2.1	Empuje y potencia requerida	25
2.1.1	Empuje	25
2.1.2	Potencia requerida	27
2.2	Diseño hélice	29
2.3	Diseño sistema propulsor	36
2.4	Diseño de timón	37
2.5	Tipos de timones	37
2.6	Selección timón	38
2.7	Diseño timón	38
2.8	Ensamble sistema timón	40
3	Diseño y fabricación de la estructura	43
3.1	Diseño en CAD	43
3.2	Fabricación de molde	44
3.3	Proceso de fabricación: Infusión al vacío con fibra de vidrio y resina	46
3.4	Fabricación de carcasa	48
3.5	Mecanizado de carcasa	50
3.6	Encamisado agujeros de carcasa	51
3.7	Impresión 3D piezas	52
3.8	Ensamble	53

3.9	Sellado y permeabilidad	54
3.9.1	Sellado entre carcásas	55
3.9.2	Sellado carcása-encamisado	56
3.9.3	Sellado cableado-interior	57
4	Componentes y dispositivos electrónicos	58
4.1	Dispositivo de control	58
4.2	Drivers motor	59
4.3	Sensor	60
4.4	Conector impermeable interior-exterior	61
4.5	Alimentación	62
4.5.1	Consumo eléctrico	62
4.5.2	Selección de batería	63
4.6	Conexión e integración	65
5	Modelamiento de un vehículo submarino	69
5.1	Introducción	69
5.2	Marco teórico	69
5.2.1	Marcos de referencia	69
5.2.2	Flotación	70
5.3	Modelado del sistema	71
5.3.1	Modelado cinemático de robots submarinos	71
5.3.2	Modelado dinámico de robots submarinos	72
5.3.3	Fuerzas inerciales	73
5.3.4	Fuerzas hidrodinámicas	75
5.3.5	Fuerzas de restitución	76
5.3.6	Fuerzas de propulsión	77
5.4	Discusión y Conclusiones	80
6	Control de posición	81
6.1	Variables del vehículo	81
6.2	Identificación del problema de control	85
6.3	Estrategia de control	86
6.3.1	Consideraciones y suposiciones para simplificar el sistema	87
6.3.2	Esquema de Control	88
6.3.3	Simulaciones	88
6.4	Discusión de resultados	93
7	Conclusiones	94
7.1	Introducción	94
7.2	Sumario	94
7.3	Conclusiones	94
7.4	Trabajos futuros	95
	Referencias	96
	Anexos	102

Anexos	102
A Planos de diseño del prototipo	102
A.1 Plano vista explosionada	102
A.2 Plano de carcasa	103
A.3 Plano de cola	104
A.4 Plano de soporte motor	105
A.5 Plano de soporte motor de cola	106
A.6 Plano de hélice	107
A.7 Plano de timón	108
A.8 Plano acople servo-piñon	109
B Especificaciones de dispositivos electrónicos	110
B.1 Conector SP28-6S	110
B.2 Especificaciones motor brushless	111
B.3 Especificaciones controlador motor brushless	112
B.4 Sensor MPU6050	113
B.5 Servo-motor FreeTech	114
C Planos de conexión	115
C.1 Plano de conexión pin a pin	115
D Simulaciones en Ansys	116
D.1 procedimiento en Workbech	116
D.2 Gráficas de fuerza de arrastre	125
D.3 Código para obtención de gráficas de fuerza de arrastre en Matlab	125
E Obtención de parámetros en SolidWorks	127
F Simulación de control	128
F.1 Bloques de control en Simulink	128
F.2 Código de seguimiento de referencias	130

Índice de figuras

1.1	clasificación de robots submarinos. Fuente: [1]	3
1.2	sistemas de propulsión hélice. a) ODIN-III (múltiples propulsores) [2]. b) REMO (impulsores vectoriales) [3].	5
1.3	sistemas de propulsión planeador. a) MarIam [4]. b) Slocum [5].	6
1.4	sistemas de propulsión Bio-Inspirados. a) SEPIOS,SQUIDBOT [6]. b) Robotic Dolphin [7]	7
1.5	vehículo submarino AUV a propulsión con inyección. Fuente: [8].	7
1.6	materiales usados en la fabricación de la cabina en AUVs. Fuente: [9].	10
1.7	geometrías utilizadas en cabinas de AUV's. Fuente: [9].	11
1.8	esquema de control PD propuesto para ROV ROSUB6000. Fuente: [10]	17
1.9	diagrama de bloque para control PID. Fuente: [11]	18
1.10	diagrama de bloque para un controlador HRN. Fuente: [12]	19
1.11	diagrama de bloque del SMC óptimo basado en el tiempo de una red neuronal para el control de Pitch y Yaw con una acción de control suave. Fuente: [13]	21
2.1	área proyectada de vehículo submarino y vista superior.	25
2.2	área proyectada de vehículo submarino y vista frontal.	26
2.3	volumen de control hélice. Fuente: [14]	27
2.4	geometría básica de series <i>Ka</i> . Fuente: [15]	31
2.5	gráfica de pruebas de serie <i>Ka</i> 3-65 para hélice con tobera N°19. Fuente: [16].	32
2.6	modelo usado para simulación en ANSYS.	35
2.7	detalles dimensionales de hélices serie <i>Ka</i> . Fuente: [15].	36
2.8	sección tobera N°19. Fuente: [15]	36
2.9	ensamble sistema de propulsión motor-hélice. a) vista lateral, b) vista isométrica, c) vista superior.	37
2.10	clasificación de tipos de timón. Fuente: [17]	37
2.11	a) spade rudder. b) full skeg rudder. Fuente: [17]	38
2.12	forma de perfil NACA. Fuente: [17]	39
2.13	diseño de timón realizado en CAD. a) vista isométrica, b) vista superior, c) vista lateral.	40
2.14	Servomotor FreeTech FS5106B. Fuente: [18]	40
2.15	Sistema de timón.	41
2.16	sistema de timón con vista explosionada.	41
3.1	a) diseño inicial propuesto. b) ensamble inicial del diseño propuesto	43
3.2	a) comparación mecanizado entre buen y mal resultado. b) partes obtenidas a partir de CNC. c) unión de partes. d) aplicación de masilla y ensanchamiento de molde.	44
3.3	a) suavizado superficie y primeras capas de cera. b) molde con capa de cera pulida. c) primera aplicación de tela de fibra de vidrio. d) aplicación de fibra de vidrio y resina.	45
3.4	a) molde de fibra de vidrio. b) cara útil del molde de fibra de vidrio.	46
3.5	proceso de infusión por vacío. Fuente: [19].	47
3.6	vista seccionada de proceso general de infusión por vacío.	47
3.7	vista seccionada de proceso de infusión al vacío a implementar.	48

3.8	a) capas de fibra de vidrio, peel ply y malla. b) vista cercana lateral de las capas de material en el molde. c) vista lejana lateral de las capas de material en el molde.	48
3.9	a) adhesión de mangueras, conexión T y peel ply al molde. b) vista cercana de la adhesión de algunos insumos al molde mediante el pegote.	49
3.10	a) instalación de bolsa de vacío y prueba de vacío. b) conexión de manguera de vinilo a conector tipo T para la inyección de resina al molde. c) inyección de resina al vacío. d) vista cercana de inyección de resina al vacío.	49
3.11	a) compresor utilizado para generar vacío. b) acumulador de succión.	50
3.12	a) carcasa de fibra de vidrio. b) carcasas simétricas.	50
3.13	a) mecanizado de pestañas en carcasas. b) vista isométrica de carcasas.	51
3.14	comparación de agujeros.	51
3.15	a) deformación de tubos PVC. b) encamisado de carcasas con tubos PVC (vista frontal). c) encamisado de carcasas con tubos PVC (vista lateral).	52
3.16	a) rediseño de prototipo. b) rediseño de prototipo junto con el sistema de timón.	52
3.17	piezas de impresión 3D.a) acople cola. b) aleta de timón. c) caja servomotor. d) cola. e) extensión brazo servo. f) guía de soporte servomotor. g) hélice. h) soporte para motor vertical. i) soporte para motor cola. j) soporte servomotor k) tapa de caja servomotor.	53
3.18	a) conjunto de piezas a ensamblar. b) configuración de encamisado y soporte motor. c) ensamble de hélice-motor. d) ensamble del soporte motor a la cola, motor y hélice.	54
3.19	a) piezas impresas 3D para transmisión de movimiento timón. b) piezas impresas 3D para el acople de timón en cola. c) sistema de timón acoplado en cola.	54
3.20	a) junta entre carcasa. b) junta entre carcasa y encamisado. c) pasaje entre cableado de motores e interior estructura.	55
3.21	a) empaquetadura a utilizar en el sellado entre carcasas. b) adhesivo Agorex usado en el pegado de junta y carcasa. c) perfil de carcasa sobre el cual se trabaja la junta.	55
3.22	a) vista isométrica implementación junta. b) vista superior implementación junta.	56
3.23	a) vista posterior junta implementada. b) vista posterior en esquina junta implementada. c) vista lateral junta implementada. d) vista superior junta implementada.	56
3.24	a) vista interior sellado. b) vista exterior sellado.	57
3.25	sellado interior de cables.	57
4.1	Arduino DUE. Fuente: [20]	58
4.2	a) controlador motor brushless tipo tarjeta [21] . b) ESC con inversor de giro [22].	60
4.3	MPU 6050. Fuente: [23]	61
4.4	conector resistente al agua modelo SP28-6S. Fuente: [24]	61
4.5	a) batería Li-ion 18650 [25]. b) banco de baterías Li-ion.	63
4.6	batería Lipo Reedy Wolfpack Gen2 3S. Fuente: [26]	64
4.7	bloques de conexión.	65

4.8	esquema de conexión Motor-Driver-Arduino.	66
4.9	esquema de conexión Arduino-IMU, servomotor.	66
4.10	integración de componentes electrónicos y otros elementos.	67
4.11	vista explosionada - conjunto de motores y hélices.	68
4.12	vista explosionada - elementos de cola.	68
5.1	marcos de referencia para describir el movimiento del vehículo.	69
5.2	fuerzas de flotación.	70
6.1	marcos de referencia.	81
6.2	vista superior, identificación actuadores, yaw, ángulo timón.	82
6.3	vista lateral, identificación de actuadores y velocidades lineales.	82
6.4	vista isométrica, fuerzas y momentos.	83
6.5	vista frontal, fuerzas y momentos.	83
6.6	esquema general de control.	86
6.7	visualización de plano X-Y y parámetros.	87
6.8	esquema de control para el sistema desacoplado de X-Y-Yaw.	88
6.9	esquema de control para el sistema desacoplado de Z.	89
6.10	simulación de control de posición en el plano X-Y, con referencia en X = 15 , Y = 15.	90
6.11	simulación de control de posición Z, con referencia en z = -5.	90
6.12	control de trayectoria por puntos en plano X-Y con $K_p=200$	91
6.13	control de trayectoria por puntos en plano X-Y con $K_p=1000$	92
D.1	creación de proyecto en Ansys.	116
D.2	vista de geometría importada junto con enclosure.	117
D.3	árbol de trabajo de Design Modeler.	117
D.4	árbol de trabajo de entorno Mesh.	118
D.5	vista de sólidos con generación de Mesh aplicada.	118
D.6	árbol de trabajo donde se insertan métodos.	119
D.7	aplicación de un método a un cuerpo.	119
D.8	árbol de trabajo en Mesh donde se insertan Selecciones nombradas.	119
D.9	vista de Inlet.	120
D.10	vista de Outlet.	120
D.11	árbol de trabajo de entorno Setup.	121
D.12	opciones de límites de condiciones.	122
D.13	declaración de reporte de variables.	122
D.14	ventana de inicialización de soluciones.	123
D.15	ventana comenzar el cálculo.	123
D.16	gráfico Fuerza arrastre - Iteraciones (yaw).	124
D.17	visualización de resultados obtenidos en yaw.	124
D.18	gráficas obtenidas de las fuerzas de arrastre en X, Y, Z, Yaw, para el proto- tipo diseñado.	125
E.1	variables obtenidas del ensamble en SolidWorks.	127
F.1	esquema de control de posición en Simulink.	128
F.2	bloque de cálculo de ángulo.	129
F.3	bloque de cálculo velocidad de referencia.	129
F.4	bloque de cálculo velocidad actual.	129
F.5	bloque de ponderación señal de motores.	129

Índice de tablas

1.1	ventaja y desventaja entre tipos de autonomía.	3
1.2	ventaja y desventaja entre tipos de misiones.	4
1.3	ventaja y desventaja en los tipos de propulsores.	8
1.4	materiales para cabinas de vehículos submarinos. Fuente: [27]	10
1.5	resumen de características de baterías usadas comunmente. Fuente: [28].	12
1.6	ventajas y desventajas de baterías en vehículos submarinos. Fuente: [28].	13
1.7	arquitecturas de Control.	16
1.8	ventajas y desventajas de tipos de técnica de control.	21
2.1	cálculos obtenidos para potencia requerida en X	29
2.2	resultados para hélices en Z	34
2.3	empujes obtenidos en la dirección de Z	35
2.4	elementos de sistema timón.	42
4.1	comparación de características entre placas Arduino disponibles para el proyecto.	59
4.2	características controladores motor brushless . Fuente: [21] [22]	60
4.3	corriente permitida de dispositivos.	62
4.4	comparación de baterías.	63
4.5	comparación de baterías.	64
4.6	comparación precios y configuración de batería.	64
4.7	elementos de electrónica y otros elementos.	67
5.1	notación de movimiento de vehículos marinos. Fuente: [29].	70
5.2	coeficientes de arrastre obtenidos en ANSYS.	76
6.1	resumen de parámetros y variables.	84
6.2	parámetros y coeficientes del vehículo.	85
6.3	datos utilizados en la simulación de objetivo en plano X-Y.	89
6.4	datos utilizados en la simulación para alcance de objetivo en Z	90
6.5	datos utilizados para simulación de trayectoria en el plano X-Y con $K_p = 200$	91
6.6	datos utilizados para simulación de trayectoria en el plano X-Y con $K_p = 1000$	92
B.1	especificaciones servomotor.	114
D.1	datos obtenidos de simulaciones en ANSYS para fuerzas de arrastre.	125