

**DESARROLLO DE UN SISTEMA MULTI-SENSORIAL PARA LA MEDICIÓN DE
VARIABLES SUBACUÁTICAS**

DAVID ALEJANDRO COLLAZOS BURBANO



**FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2012**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA MULTI-SENSORIAL PARA LA MEDICIÓN DE
VARIABLES SUBACUÁTICAS**

DAVID ALEJANDRO COLLAZOS BURBANO

**TESIS DE GRADO PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERO
ELECTRONICO**

DIRECTORES

JOAO LUIS EALO CUELLO, Ing. PhD.

LEONARDO JARAMILLO PIZARRO, Ing. Msc.

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI**

2012

Esquema de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

A Dios, mi amado, mi torre y mi fortaleza. Quien por su amor, gracia y misericordia, abrió mis ojos y me enseñó a disfrutar de la vida.

A mi madre, por su entrega, amor incondicional y apoyo constante a pesar de las dificultades. Porque el amor todo lo cree, todo lo espera, todo lo soporta, el amor nunca deja de ser.

Gracias, Je amo.

A mi padre, porque a través de su ejemplo me ha inspirado y me ha enseñado el valor de perseverar y nunca rendirse.

A mis hermanos, Feidy y Luis Miguel, por todo su amor y paciencia.

AGRADECIMIENTO

A Dios, porque gracias a Él todo esto ha sido posible.

A mi familia, en especial mi madre, porque han sido mi apoyo y respaldo en todo momento.

Al profesor Joao, por su ayuda, su apoyo, sus valiosos consejos e interés continuo en este trabajo.

Al profesor Leonardo, por su dirección, colaboración y enseñanza.

A los muchachos del Laboratorio de Vibraciones y Acústica, de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por su esmerada colaboración en cada fase de este trabajo.

Al grupo de investigación en Dinámica de Fluidos, de la escuela de ingeniería mecánica, por prestar sus equipos para realizar las pruebas del sistema desarrollado.

A mis amigos, por todo su cariño y su constante compañía dentro y fuera de la academia.

A todas las personas que por sus observaciones, comentarios y sugerencias permitieron mejorar continuamente este trabajo.

CONTENIDO

RESUMEN.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
OBJETIVOS.....	14
0.1 OBJETIVO GENERAL.....	14
0.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1.MARCO TEÓRICO.....	15
1.1 INTRODUCCIÓN.....	15
1.2 RETOS DE UN AMBIENTE SUBACUÁTICO.....	15
1.3 VARIABLES OBJETO DE ESTUDIO EN UN ENTORNO SUBACUÁTICO.....	16
1.4 TEMPERATURA, SALINIDAD Y SU RELACIÓN CON LA RAPIDEZ DEL SONIDO BAJO AGUA.....	17
1.5 SISTEMAS DE MEDIDAS.....	18
1.5.1 SENSORES Y TRANSDUCTORES.....	19
1.5.2 ADQUISICIÓN, ACONDICIONAMIENTO Y PRESENTACIÓN DE LOS DATOS.....	20
1.5.3 EXACTITUD Y PRECISIÓN.....	20
1.5.4 TIPOS DE ERRORES.....	21
1.5.5 SENSIBILIDAD, LINEALIDAD Y RESOLUCIÓN.....	21
1.6 MEDICIÓN DE SALINIDAD.....	22
1.6.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UNA CELDA DE CONDUCTIVIDAD.....	24
1.7 MEDICIÓN DE TEMPERATURA.....	24
1.7.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UN TERMISTOR.....	26
1.8 MEDICIÓN DE VELOCIDAD EMPLEANDO UNA PROPELA.....	27
1.8.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UNA PROPELA.....	27
1.9 POTENCIA Y ENERGÍA DISIPADA EN CIRCUITOS ELÉCTRICOS.....	28
1.10 SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN EFICIENTE PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA	30
1.11 RESUMEN DE CAPÍTULO.....	31
2.REVISIÓN BIBLIOGRAFICA DE LOS METODOS EXISTENTES PARA MEDIR VELOCIDAD DE FLUJO, TEMPERATURA Y SALINIDAD BAJO EL AGUA.....	32
2.1 INTRODUCCIÓN.....	32
2.2 REVISIÓN DE LOS SENSORES DE VELOCIDAD DE FLUJO.....	32
2.3 REVISIÓN DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA.....	35
2.4 REVISIÓN DE LOS SENSORES DE SALINIDAD.....	36
2.5 PLATAFORMAS Y/O MECANISMOS DE INTEGRACIÓN DE SENSORES PARA LA EXPLORACIÓN SUBACUÁTICA DE MÚLTIPLES VARIABLES.....	38
2.6 OTROS PROYECTOS (Ya realizados y en curso).....	40
2.7 RESUMEN DE CAPÍTULO.....	41
3.MÓDULOS SENSORIALES PARA LA MEDICIÓN DE LAS VARIABLES.....	42
3.1 MÓDULO SENSORIAL PROPUESTO.....	42
3.2 MÓDULO PARA LA MEDICIÓN DE SALINIDAD.....	43
3.2.1 DESCRIPCIÓN FÍSICA DE LA CELDA.....	43
3.2.2 EXCITACIÓN Y LECTURA DE CONDUCTIVIDAD.....	44

3.3 MÓDULO PARA LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA.....	49
3.3.1 DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL TERMISTOR.....	49
3.3.2 LECTURA DE TEMPERATURA.....	51
3.4 MÓDULO PARA LA MEDICIÓN DE VELOCIDAD.....	54
3.4.1 DESCRIPCIÓN FÍSICA DE LA PROPELA.....	54
3.4.2 LECTURA DE VELOCIDAD.....	55
3.5 TARJETAS DE CIRCUITO IMPRESO.....	56
3.5.1 UBICACIÓN Y ORIENTACIÓN DE COMPONENTES:.....	57
3.6 RESUMEN DE CAPÍTULO.....	60
4.MÓDULO DE CONTROL Y ANÁLISIS DE DATOS, Y EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	61
4.1 INTRODUCCIÓN.....	61
4.2 MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE POTENCIA ELÉCTRICA.....	61
4.3 CONSIDERACIONES PRÁCTICAS PARA DISMINUIR EL CONSUMO DE POTENCIA POR HARDWARE.....	63
4.4 CONSIDERACIONES PRÁCTICAS PARA DISMINUIR EL CONSUMO DE POTENCIA POR SOFTWARE.....	64
4.4.1 DISMINUCIÓN DE CONSUMO DE POTENCIA A PARTIR DEL SOFTWARE.....	64
4.4.2 MEDICIÓN DEL CONSUMO DE POTENCIA EN SISTEMAS MICROPROCESADOS.....	67
4.5 ALIMENTACIÓN, REGISTRO Y CONTROL.....	68
4.6 METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	75
4.7 MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE POTENCIA DEL SISTEMA MULTI-SENSORIAL IMPLEMENTADO.....	77
4.8 RESUMEN DE CAPÍTULO.....	85
5.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	86
5.1 CONCLUSIONES.....	86
5.2 RECOMENDACIONES.....	89
6.BIBLIOGRAFIA.....	92
7.ANEXOS.....	101

INDICE DE FIGURAS

Figura. 1.5.1: Sistema genérico de medida y control.....	18
Figura. 1.5.2: Proceso de instrumentación. Visión global.....	20
Figura. 1.6.1: Celda de conductividad.....	23
Figura. 1.6.2: Guía para la elección de una celda para aplicaciones específicas.....	23
Figura. 1.6.3: Celda de conductividad de cuatro electrodos.....	24
Figura. 1.9.1: Convenio de signos en circuitos eléctricos.....	28
Figura. 1.9.2: Triángulo de potencias.....	30
Figura. 3.1.1: Sistema multisensorial propuesto.....	42
Figura. 3.2.1: Celda de conductividad construida.....	43
Figura. 3.2.2: Diagrama de bloques del circuito electrónico en la celda de conductividad.....	44
Figura. 3.2.3: Driver de corriente para la celda de conductividad.....	45
Figura. 3.2.4: Generador de onda seno y control de amplitud para la celda de conductividad.....	46
Figura. 3.2.5: Etapas en la lectura de voltajes de la celda de conductividad.....	46
Figura. 3.2.6: Amplificador de instrumentación y filtro pasa banda.....	47
Figura. 3.2.7: Conversor AC-DC.....	47
Figura. 3.2.8: Caracterización de la celda de conductividad.....	48
Figura. 3.2.9: Error en la medida de conductividad.....	49
Figura. 3.3.1: Encapsulado construido para proteger los termistores.....	50
Figura. 3.3.2: Curva de caracterización de los termistores. (a) Termistor I, (b) Termistor II.....	51
Figura. 3.3.3: Diagrama de bloques del circuito electrónico para los termistores.....	51
Figura. 3.3.4: Circuito para la adquisición de temperatura. (a) Circuito de linealización, (b) Circuito corrector de signo.....	52
Figura. 3.3.5: Respuesta del circuito de adecuación para el termistor I. (a) Rango inferior,(b) Rango superior.....	53
Figura. 3.3.6: Respuesta del circuito de adecuación para el termistor II. (a) Rango inferior,(b) Rango superior.....	54
Figura. 3.4.1: Propela utilizada en para la medición de velocidad.....	54
Figura. 3.4.2: Diagrama de bloques del circuito de adquisición para medir velocidad.....	55
Figura. 3.4.3: Curva de caracterización de la propela.....	56
Figura. 3.5.1 Jerarquía de las especificaciones de diseño IPC.....	57
Figura. 3.5.2. Diseño de las tarjetas de circuito impreso. (a) Microcontrolador, (b) LCD, (c) Driver, (d) Adquisición.....	59
Figura. 3.5.3 Diseño de la tarjeta impresa para la fuente regulada.....	60
Figura. 4.4.1: Técnicas de diseño de baja potencia por software.....	64

Figura. 4.4.2: Consumo de potencia encontrado en aplicaciones cotidianas [39].....	66
Figura. 4.5.1: Sistema de medición multi-sensorial. Panorama general.....	69
Figura. 4.5.2: Diagrama de flujo del sistema de control.....	70
Figura. 4.5.3: Diagrama de flujo para la medición de temperatura.....	71
Figura. 4.5.4: Diagrama de flujo para la medición de salinidad.....	73
Figura. 4.5.5: Diagrama de flujo para la medición de velocidad.....	74
Figura. 4.6.1: Modelo del sistema de gestión de energía.....	75
Figura. 4.7.1: Identificación de los bloques para medición de desempeño energético.....	77
Figura. 4.7.2: Potencia de entrada de la fuente dual (sin conectar carga). (a) Primer conversor DC-DC, (b) Tres conversores DC-DC.....	78
Figura. 4.7.3: Potencia de entrada de la fuente dual. (a) driver conectado, (b) ADQ conectado.....	79
Figura. 4.7.4: Potencia consumida. Arriba: terminal positiva. Abajo: terminal negativa. (a) Driver de corriente, (b) Tarjeta de adquisición.....	79
Figura. 4.7.5: Potencia de entrada de la fuente dual con LCD conectado (microcontrolador escribiendo sobre el LCD). (a) Sin luz de fondo, (b) Con luz de fondo.....	80
Figura. 4.7.6: Potencia consumida por el LCD. (a) Sin luz de fondo, (b) Con luz de fondo.....	80
Figura. 4.7.7: Potencia consumida. Arriba: Fuente dual. Abajo: Microcontrolador. (a) ADC, (b) LCD.....	81
Figura. 4.7.8: Potencia consumida cuando la memoria externa esta operando. Arriba: Fuente dual. Abajo: Microcontrolador. (a) Escritura, (b) Lectura.....	82
Figura. 4.7.9: Potencia consumida por el sistema multi-sensorial.....	83
Figura. 4.7.10: Potencia total consumida por el sistema. Arriba: +5V permanente. Medio: +5V controlada. Abajo: -5V controlada.....	84
Figura. 4.7.11: Comparación de potencias.....	85

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1: Valores de conductividad para algunas muestras típicas.....	22
Cuadro 1.2: Cuadro comparativo de sensores de temperatura.....	25
Cuadro 2.1: Sensores de velocidad.....	35
Cuadro 2.2: Sensores de temperatura.....	36
Cuadro 2.3: Sensores de salinidad.....	38
Cuadro 2.4: Otras plataformas que integran sensores para medición subacuática.....	41

INDICE DE ANEXOS

AI. 1: Fuente regulada. (a) Lado de componentes, (b) Lado de pistas.....	102
AI. 2: Lado de componentes de las tarjetas impresas. (a) Microcontrolador, (b) LCD, (c) Driver de corriente, (d) Placa de adquisición.....	103
AI. 3: Lado de pistas de las tarjetas impresas. (a) Microcontrolador, (b) LCD, (c) Driver de corriente, (d) Placa de adquisición.....	104
AI. 4: Plataforma multisensorial. (a) Lado microcontrol y ADQ, (b) Lado Driver y fuentes, (c) Ubicación de placas, (d) Prueba del sistema.....	105
AI. 5: Caracterización acústica. (a) Transductor construido, (b) Esquema de operación, (c) SPL, (d) Linealidad, (e) Directividad Horizontal, (e) Directividad Vertical.....	106
AI. 6: Caracterización eléctrica. (a) Dominio Temporal, (b) Dominio frecuencial, (c) Resistencia y Reactancia, (d) Capacitancia, (e) Equivalente eléctrico.....	107

RESUMEN

En la actualidad la electrónica ha permitido la implementación de sistemas sensoriales cada vez más pequeños, pasando de tecnologías que requieren de gran espacio a unos de menores dimensiones, tan pequeños como la necesidad lo requiera (gracias a la tecnología MEMS¹), de bajo costo y bajo consumo. Adicionalmente, la disponibilidad de nuevos dispositivos electrónicos permite agrupar pequeños dispositivos para inspeccionar diferentes entornos (bajo agua, en tierra o en aire), que operen en tiempo real, con la posibilidad de ser manipulados remotamente desde un PC.

En este trabajo se propone el desarrollo de un sistema multi-sensorial que mida la velocidad de flujo, temperatura y salinidad bajo el agua, integrando los sensores sobre una misma plataforma, y evaluando el desempeño de dicho sistema con base en el incremento de la eficiencia energética.

El documento se ha distribuido en tres grandes partes: La primera parte consta de un marco teórico (capítulo 1.) que involucra los conceptos relacionados con el desarrollo realizado, así como información teórica importante sobre el medio donde operará el sistema; también, se presenta una revisión bibliográfica (capítulo 2.) de algunos mecanismos, métodos y plataformas empleados para medir las variables deseadas bajo agua.

La segunda parte, presenta los módulos sensoriales implementados (capítulo 3.), dentro del cual se explica el sistema sensorial, su principio de funcionamiento, los circuitos electrónicos y las normas de diseño de PCB seguidas para asegurar un mejor funcionamiento de cada módulo del sistema. La tercera parte, está destinada a la evaluación del consumo de potencia del sistema (capítulo 4.), tanto a nivel software como hardware. Finalmente, se presentan las conclusiones del trabajo desarrollado y recomendaciones para mejorar el sistema propuesto inicialmente.

¹ *Micro-Electro-Mechanical-Systems*, por sus siglas en inglés.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad el estudio de las masas de agua, tanto en la superficie como a profundidad, se ha convertido en un tema de vital importancia [98]; no sólo por que al cubrir casi el 70% de la tierra (el agua), representan efectos directos sobre cada uno de los seres vivos, sino también por que al reconocer las variables, tanto físicas como químicas, involucradas en los entornos subacuáticos, es posible reconocer el recurso energético de dicho medio [35] [37] [98].

La necesidad de establecer fuentes de generación de energía, alternativas y renovables, ha propiciado el desarrollo en las tecnologías para el aprovechamiento energético marino. Estas tecnologías se enfocan en transformar la energía marina presente, entre otras, en las corrientes submarinas, el gradiente de temperatura entre la superficie y las profundidades, y las concentraciones de salinidad [20] [26] [69] [70].

Por lo tanto, se genera una necesidad no sólo de conocer el recurso de las fuentes marinas, sino también de aprovechar al máximo los recursos provistos por estas fuentes, llevando a evaluar el consumo de los sistemas empleados, tanto a nivel comercial como a nivel científico.

El mejoramiento continuo de la tecnología de fabricación de sensores ha favorecido su integración, permitiendo su inclusión en una pequeña pieza de silicio, no solo del sensor sino también de toda la electrónica relacionada con el acondicionamiento de señal, permitiendo la producción de lo que se conoce como sensores inteligentes². Esto, junto con los recientes avances en las comunicaciones móviles, han llegado a convertirse en una realidad, permitiendo el uso de redes de sensores de bajo costo y bajo consumo en diversos ambientes, los cuales interaccionan por medio del sistema de comunicación no alambrada. Ellos ofrecen un amplio rango de aplicaciones novedosas, tales como el monitoreo ambiental, redes militares de sensores, aplicaciones para el cuidado de la salud, redes para la detección química, biológica, radiológica, material explosivo y nuclear, redes de sensores de tráfico, automatización industrial y de manufactura, aplicaciones de vigilancia, monitoreo de estructuras y construcciones, entre otros.

El uso de estos sensores en aplicaciones ambientales, en un entorno abierto y no controlado, y la elección de sensores de bajo costo (tanto pasivos como activos), con capacidad de monitorear las magnitudes físicas requeridas (tales como presión, temperatura, humedad relativa, intensidad de luz y concentración de la polución) requiere no sólo de sensores que alteren al mínimo el entorno de estudio, sino también del desarrollo de circuitos electrónicos de bajo voltaje y baja potencia.

2 *Smart sensors* [51].

OBJETIVOS

0.1 OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar un sistema multi-sensorial para la medición subacuática de velocidad de flujo, temperatura y salinidad, evaluando su desempeño con base en el incremento de la eficiencia energética.

0.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una revisión bibliográfica de los métodos existentes para medir velocidad de flujo, temperatura y salinidad bajo el agua, y de las técnicas del uso eficiente de energía.
- Diseñar e implementar un sistema multi-sensorial que permita la medición de las variables subacuáticas.
- Evaluar el sistema multi-sensorial desarrollado bajo un entorno subacuático controlado, identificando la posibilidad de autonomía, por medio del uso eficiente de energía.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 INTRODUCCIÓN

El agua presenta muchas propiedades especiales. Estas propiedades se deben a la composición química del agua (dos átomos de hidrógeno conectados con uno de oxígeno). Su estructura es asimétrica, como consecuencia la carga eléctrica es anisotrópica, lo que hace que la molécula de agua presente un momento dipolar eléctrico. Además, dado que el agua tiene la propiedad de disolver más sustancias que cualquier otro líquido contiene gran cantidad de iones dentro de su volumen [100].

Otra propiedad del agua es el gran valor de sus calores específico y latente. Como consecuencia, el agua posee una gran inercia térmica y juega un rol importante en el almacenamiento y transporte del calor en el sistema climático. De esta forma, el agua regula las características del clima [100].

Los instrumentos de medición basan su funcionamiento en principios físicos, a partir de los cuales se pueden determinar o inferir el valor de la variable de interés. En los procesos subacuáticos, una descripción teórica es posible, en principio, con base en siete variables: velocidad (u, v, w)³, densidad (D), temperatura (T), salinidad (S), presión (P), las coordenadas espaciales (ϕ, λ, z)³ y el tiempo (t) [19].

De esta forma, conociendo la dinámica de estas variables, tanto en el espacio como en el tiempo, es posible tener un conocimiento más completo del entorno subacuático. El objetivo de este capítulo es recopilar los fundamentos básicos que se deben tener en cuenta, desde el punto de vista físico, para poder implementar el sistema sensorial que mida las variables deseadas.

1.2 RETOS DE UN AMBIENTE SUBACUÁTICO

La interfaz agua-aire, las altas presiones a grandes profundidades, la corrosión, y el bio-fouling⁴ son algunos de los retos al momento de realizar mediciones bajo el agua. La alta presión encontrada al desplegar la instrumentación a una profundidad significativa regula la geometría del almacenamiento de los sensores, que típicamente son esferas o cilindros. Los cilindros se emplean usualmente para almacenar las tarjetas de los circuitos.

La corrosión se puede reducir seleccionando correctamente los materiales. En lo posible, el almacenamiento y las plataformas deben ser hechas de materiales no corrosivos (plástico, vidrio, titanio, platino, etc.). Por décadas se ha usado vidrio, que empleado apropiadamente es robusto y económico, incluso a grandes profundidades. Varios plásticos son adecuados para profundidades menores de 600m [19].

En el caso de almacenamientos metálicos, debe prestarse atención a las propiedades galvánicas y las conexiones galvánicas con otros metales; ya que si existen flujos de corriente eléctrica, la carcasa se puede corroer y finalmente fallar.

³ En las tres direcciones espaciales.

⁴ Contaminación de los sensores, como consecuencias de la agrupación, alrededor de dichos sensores, de organismos existentes en el entorno de medición.

La dificultad para suministrar alimentación eléctrica y medios de comunicación bajo el agua afecta sobremanera medidas *in situ*. Debido a esto, los instrumentos deben usar la menor cantidad de energía posible. Por fortuna, la electrónica y los sistemas de almacenamiento han posibilitado el uso de sistemas más eficientes, de tal forma que la mirada se puede centrar en realizar sensores más eficientes. A nivel mundial, con el objetivo de remover las restricciones de alimentación y comunicaciones, se han iniciado varios programas internacionales tal que se pueda proporcionar una infraestructura de potencia y comunicaciones bajo agua a grandes profundidades [19].

1.3 VARIABLES OBJETO DE ESTUDIO EN UN ENTORNO SUBACUÁTICO

En oceanografía son variables de especial interés: la presión, temperatura, salinidad, rapidez de las corrientes marinas y rapidez del sonido. Por lo general, la densidad se calcula, de forma indirecta, como una función empírica de estas (especialmente de las tres primeras).

La **presión** (Medida en pascuales [Pa]) se define como la fuerza perpendicular ejercida por unidad de área sobre la superficie de un cuerpo, que en el contexto de ambientes subacuáticos depende de la profundidad de medida. La medición de la presión se usa principalmente con el objetivo de inferir la profundidad (que se toma como una coordenada vertical para otras variables) [68].

La **temperatura** (Medida en grados centígrados [$^{\circ}\text{C}$]) es la medición de la energía interna de las partículas de un cuerpo, en este caso el agua [68]. De forma rigurosa, puede pensarse en la temperatura como una propiedad que determina cuándo se encuentra o no un objeto en *equilibrio térmico* con otros objetos. El *equilibrio térmico* es una situación en la que dos cuerpos en *contacto térmico*⁵ entre sí, dejan de tener intercambio neto de energía [80]. Este principio es el que hace posible tener un valor de temperatura, ya que un sensor entra en equilibrio térmico con el entorno que le rodea.

La **salinidad** (Medida en S/cm) es una medida de la cantidad de sales disueltas en el agua. En el mar, por ejemplo, el agua es una mezcla compleja de iones con 11 constituyentes primarios, que llegan a completar hasta el 99,99% de todos los materiales disueltos [19]. Estos constituyentes se encuentran muy bien mezclados a través de los océanos y se encuentran en proporciones casi constantes.

Cuando se habla de **corriente marina** se está haciendo referencia al desplazamiento de un volumen de agua dentro del océano. Cuando se habla de rapidez de corriente marina se hace referencia a la velocidad (magnitud) a la cual dicha masa de agua se está moviendo [13].

Como dato adicional, en algunos casos se suele estudiar la velocidad del sonido bajo el agua, debido a que es una función fuertemente dependiente de la temperatura, la presión y una función, débil, de la salinidad [19]. En ciertos casos es más sencillo y económico medir temperatura, presión y rapidez del sonido y luego calcular de forma indirecta la salinidad.

5 Dos cuerpos están en contacto térmico si existe la posibilidad de que exista un intercambio de energía entre ellos en ausencia de trabajo macroscópico realizado por uno de ellos sobre el otro.

1.4 TEMPERATURA, SALINIDAD Y SU RELACIÓN CON LA RAPIDEZ DEL SONIDO BAJO AGUA

La rapidez del sonido en cualquier tipo de fluido depende de dos cantidades físicas: la densidad y la compresibilidad. De acuerdo a extensivas investigaciones empíricas [100], existen tres parámetros susceptibles de medición, los cuales en conjunto permiten determinar los parámetros de densidad y compresibilidad del agua, y por ende la rapidez del sonido:

- La presión estática o la profundidad del agua.
- La salinidad.
- La temperatura.

De forma empírica se puede encontrar una relación entre la rapidez del sonido, la temperatura, la salinidad y la profundidad [19] [100]:

$$V_{(T,S,D)} = f_{1(T)} + f_{2(S)} + f_{3(D)} + M_{(T,S,D)} \quad (1)$$

La ecuación 1 expresa que la velocidad, bajo el agua, se puede expresar como la suma de una función dependiente de la temperatura, una dependiente de la salinidad, una dependiente de la densidad y otra que combina estas tres variables.

$$f_{1(T)} = 1448,96 + 4,59 T - 53,04 * 10^{-3} T^2 + 237,40 * 10^{-6} T^3 \quad (2a)$$

$$f_{2(S)} = 1,34 (S - 35) \quad (2b)$$

$$f_{3(D)} = 16,30 * 10^{-3} D + 1,68 * 10^{-7} D^2 \quad (2c)$$

$$M_{(T,S,D)} = -10,25 * 10^{-3} T (S - 35) - 7,14 * 10^{-13} T D^3 \quad (2d)$$

En la ecuación 2 los parámetros son:

V: Rapidez del sonido (m/s).

T: Temperatura (°C). En el rango $-2\text{ °C} \leq T \leq 30\text{ °C}$.

S: Salinidad (psu). En el rango $25\text{ psu} \leq S \leq 40\text{ psu}$.

D: Profundidad (m). En el rango $0\text{ m} \leq D \leq 8000\text{ m}$.

La unidad “psu” para la salinidad, se conoce como unidad práctica de salinidad, aunque de acuerdo con la UNESCO (Organización educativa, científica y cultural de las naciones unidas, por sus siglas en inglés) también puede ser medida en términos de la conductividad eléctrica [19].

Dependencia de la presión estática:

Un incremento en la presión, incrementa la densidad y disminuye la compresibilidad; sin embargo, el cambio no lineal de esta última es demasiado fuerte. Por esto, con un incremento en la presión se presenta un incremento en la rapidez del sonido. Como regla práctica, un incremento en la presión en 6 bares se debe a una profundidad de 60m, lo que lleva a un aumento aproximado de 1m/s en la rapidez del sonido [100].

Dependencia de la salinidad:

Se puede encontrar que, sin mayor especificación sobre el contenido químico del agua, un aumento en la salinidad tiene efectos similares a incrementar la presión externa. Esto se debe a la gran fuerza eléctrica que los iones de la sal ejercen entre ellos. Como regla práctica incrementar la salinidad en 0,1% incrementará la rapidez del sonido en cerca de 1m/s [100].

Dependencia de la temperatura:

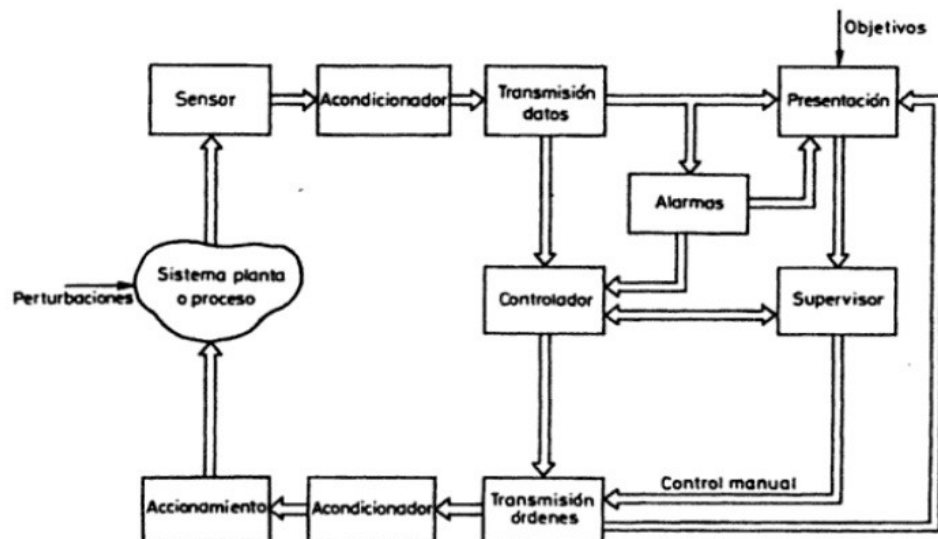
Un incremento en la temperatura produce un incremento en la rapidez del sonido. Físicamente, se puede observar un comportamiento inusual de la rapidez del sonido como función de la temperatura. Como menciona Wille [100], a 20°C la rapidez del sonido aumentará unos 3m/s, pero cuando la temperatura es de 10°C el incremento puede acercarse a 4m/s, y a 0°C puede ser de unos 5m/s.

1.5 SISTEMAS DE MEDIDAS

Se denomina **sistema** a la combinación de dos o más elementos, subconjuntos y/o partes necesarias para realizar una o varias funciones. En los sistemas de medida, esta función es la asignación objetiva y empírica de un número a una propiedad o cualidad de un objeto o evento. Por consiguiente, el resultado de la medida debe cumplir las siguientes características:

- Objetiva: Independiente del observador.
- Empírica: Basada en la experimentación.
- Debe existir una correspondencia entre las relaciones numéricas y las propiedades físicas descritas por esos números.

Figura. 1.5.1: Sistema genérico de medida y control



Fuente: Pallás Areny Ramón. Sensores y acondicionares de señal [66].

En la figura 1.5.1 se muestra una visión general de un sistema de control y medida. Realizar una medida implica, además de adquirir datos, procesar la información obtenida y presentar los resultados, tal que puedan ser percibidos por nuestros sentidos. Como puede observarse en la figura 1.5.1, el sistema consta no solo de todo el esquema de toma, procesamiento y presentación de los datos; sino también, del esquema de control y actuación sobre la planta o proceso estudiado, el cual es regulado dependiendo de la situación actual de los sensores.

1.5.1 SENSORES Y TRANSDUCTORES

Cuando se trata con sistemas de medidas es necesario distinguir entre **sensores** y **transductores**. La palabra **transductor** se refiere a todo dispositivo que convierte una señal de una forma física en una señal equivalente pero de forma física distinta [66]. En la práctica, todo ambiente involucrado en la medición es un entorno multifísico, es decir, sujeto a la combinación de muchos procesos físicos (temperatura, presión, velocidad, humedad, etc.), pero al momento de medir, dependiendo del esquema de adquisición seleccionado, se pueden despreciar las variables que no son de interés (porque no influyen de forma significativa en la toma de datos, por ejemplo), y se interpreta que se está midiendo únicamente la componente de interés.

Existen seis tipos de señales: mecánicas, térmicas, magnéticas, eléctricas, ópticas y moleculares (químicas) [66]. Aunque la definición de transductor dada arriba es general, en la práctica se considera que un transductor es aquel que convierte cualquiera de estos tipos de señal en una señal eléctrica. Esto, debido a que los sistemas de medida, en la actualidad, son predominantemente electrónicos y la señal de interés es, por lo general, eléctrica.

Emplear sistemas electrónicos tiene, entre otras, las siguientes ventajas:

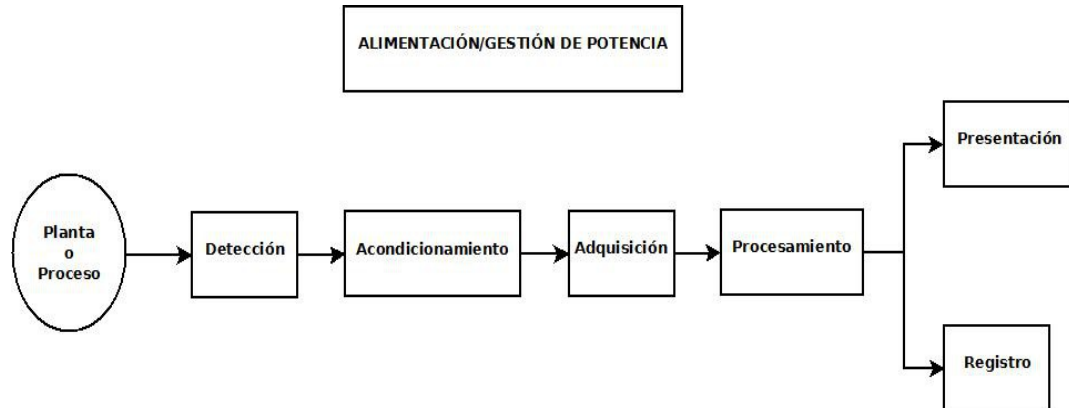
- Una respuesta eléctrica es consecuencia de la estructura electrónica de la materia, ya que cualquier variación de un parámetro no eléctrico en la materia es acompañada por la variación de un parámetro eléctrico.
- En los procesos de medida no conviene extraer energía del sistema donde se mide, lo mejor es amplificar la señal de salida del transductor. Esto puede ser llevado a cabo fácilmente usando amplificadores electrónicos, que permiten obtener ganancias muy altas en una sola etapa (en este caso debe tenerse en cuenta la relación frecuencia-ganancia).
- Existe una gran variedad de recursos, en forma de circuitos integrados, para acondicionar o modificar las señales eléctricas. Incluso hay transductores que incorporan físicamente en un mismo encapsulado parte de estos recursos.
- La forma de presentación es muy versátil, ya que existen numerosas herramientas que permiten registrar y presentar información de forma electrónica, a través de los cuales se pueden manejar tanto datos numéricos como textos y gráficos.

Por su parte, un **sensor** es un mecanismo de ampliación de los sentidos para adquirir un conocimiento de cantidades físicas que, por su naturaleza o tamaño, no pueden ser percibidas directamente por los sentidos [66]. El transductor, en cambio, sugiere sólo que las señales de entrada y salida no deben ser del mismo tipo.

1.5.2 ADQUISICIÓN, ACONDICIONAMIENTO Y PRESENTACIÓN DE LOS DATOS

El acondicionador de señal, en un sentido amplio, es un elemento que hace parte del sistema de medida que procesa la señal del sensor, y ofrece una señal apta para ser presentada o registrada. Este procesamiento puede ser llevado de forma analógica o digital. De forma digital usando software programado en un sistema microprocesado (por ejemplo, Computadores personales, DSPs, FPGAs, Microcontroladores, etc.). De forma analógica mediante circuitos electrónicos.

Figura. 1.5.2: Proceso de instrumentación. Visión global



Fuente: Pallás Areny Ramón. Sensores y acondicionares de señal [66].

En la figura 1.5.2 se muestra una visión global, propuesta por Pallás [66], del proceso de instrumentación. El módulo de alimentación y gestión de potencia puede o no ser común a todas las etapas, eso depende del tipo sistema implementado y de las características del entorno, si es necesario añadir energía para realizar la medición o no. Por ejemplo, el sistema de locomoción de un vehículo subacuático requiere de la administración en su alimentación de potencia, pero para medir las corrientes marinas puede no requerirse inyectar energía.

1.5.3 EXACTITUD Y PRECISIÓN

La **exactitud** es la cualidad que caracteriza la capacidad de un instrumento (de medida) para dar indicaciones que se aproximen al valor verdadero de la magnitud medida. En contraposición, la **precisión** evalúa la repetibilidad de las mediciones, esto es, dado el valor fijo de una variable, la precisión es una medida del grado con el cual mediciones sucesivas difieren una de la otra. Aunque algunas ocasiones se utiliza indistintamente el concepto de exactitud y precisión, esto no es del todo adecuado.

La discrepancia ente la indicación del instrumento y el valor verdadero de la magnitud medida se llama **error**. Se pueden distinguir, principalmente, dos tipos de errores [66]:

- Error absoluto: Es la diferencia entre la indicación del instrumento y el valor verdadero. Este puede ser dado como porcentaje respecto al máximo valor que puede medirse con el instrumento (valor de fondo de escala) o puede darse respecto a la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo medible. En este caso:

$$\text{error absoluto} = \text{valor medido} - \text{valor verdadero} \quad (3)$$

- Error relativo: Es el error especificado como el cociente entre el error absoluto y el valor verdadero de la magnitud medida.

$$\text{error relativo} = \frac{\text{error absoluto}}{\text{valor verdadero}} \quad (4)$$

1.5.4 TIPOS DE ERRORES

En una medición se debe lidiar con dos tipos de errores distintos: los errores sistemáticos (comúnmente conocido como *bias*) y el error aleatorio [34]. El error sistemático tiende a influir en el resultado real y produce resultados o muy altos o muy bajos. Este tipo de error puede ocurrir en el proceso de muestreo, en situaciones tales como calibración inapropiada de un termómetro no protegido, determinación incorrecta de la profundidad de muestreo, propiedades insuficientes de muestreo de flujo del dispositivo empleado, entre otros.

El error sistemático es la forma más seria de error, porque dicho error afecta los resultados de todas las muestras tomadas con el mismo método. Muy frecuentemente es difícil detectar la desviación sistemática del valor real, ya que en el trabajo de campo el valor real por lo general no se conoce. Una forma de descubrir este error, es aplicar distintos métodos de muestreo o dispositivos de muestreo.

Los errores aleatorios, son aquellos en los que el resultado de análisis repetidos, sobre la misma muestra, varía del valor verdadero. Este tipo de errores puede surgir debido al tipo de instrumentación usada, errores de personal, y los errores inherentes del propio método.

En la mayoría de los casos es posible reconocer estos errores (el sistemático y el aleatorio) y obtener un estimado razonable de su magnitud a través de análisis independientes de la misma muestra. Los errores aleatorios siempre se encuentran presentes y son independientes de la existencia de los errores sistemáticos.

1.5.5 SENSIBILIDAD, LINEALIDAD Y RESOLUCIÓN

El comportamiento estático de un sensor puede ser descrito usando la exactitud, precisión y sensibilidad. La **sensibilidad** o factor de escala es la pendiente de la curva de calibración, que relaciona la salida con la entrada. En este sentido, la sensibilidad relaciona la respuesta del instrumento respecto al cambio en la entrada (variable medida), como se puede observar en la ecuación 5, siendo “y” la salida, “x” la entrada y “S” la sensibilidad en el punto “x_a”.

$$S(x_a) = \frac{dy}{dx}_{x=x_a} \quad (5)$$

La **linealidad** expresa el grado de coincidencia entre la curva de calibración y una línea recta dada. La linealidad expresa hasta que punto es constante la sensibilidad del sensor. Esta característica es interesante ya que para una sensibilidad constante, y por ende un mayor grado de linealidad, la conversión lectura-valor medido es más fácil, por lo que consume menos recursos del sistema. Además de la linealidad, existe el concepto de **resolución**, definida como el incremento mínimo requerido en la entrada para obtener un cambio en la salida.

1.6 MEDICIÓN DE SALINIDAD

La conductividad eléctrica es una propiedad inherente de muchos materiales, y se extiende desde materiales extremadamente conductores (como los metales) hasta materiales no conductores (como los plásticos y el vidrio). La mitad de las aplicaciones entre estos dos extremos se refiere a soluciones acuosas, tales como el agua de mar [92]. En los metales, la corriente eléctrica es transportada por electrones, mientras en las soluciones acuosas la corriente eléctrica se debe a los iones cargados. En ambos casos, la conductividad se determina por el número de portadores de carga, qué tan rápido se mueven, y la cantidad de carga que cada uno transporta.

Algunos tipos de soluciones se ionizan de forma más completa en agua que en otros disolventes, y como resultado conducen más. Cada ácido, base o sal tiene su propia curva característica de Concentración vs. Conductividad. En el agua los iones se mueven de forma más lenta que en los metales, por lo que su conductividad es menor. Un incremento en la temperatura del agua la hace menos viscosa, permitiendo que los iones se muevan más rápido. En el cuadro 1.1 se muestra un conjunto de datos que relaciona la conductividad y diferentes muestras a 25°C.

Como se ha dicho previamente, la conductividad es una propiedad inherente de cada material; en contraposición, la conductancia depende de cómo se realiza la medida, del tamaño de la muestra, la distancia entre electrodos, las dimensiones del volumen de inspección, etc.

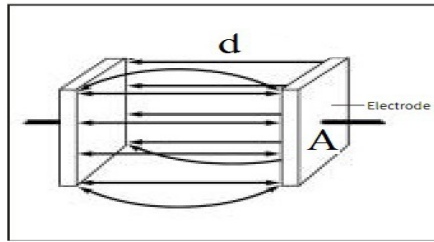
En las celdas de conductividad, las medidas tomadas dan el valor de conductancia, por lo que es necesario convertir el valor medido a la conductividad correspondiente. Una forma de hacer este proceso es midiendo la constante de la celda (**K**). La constante de una celda está relacionada con las características físicas de la medición. La constante **K** está definida para dos electrodos planos y paralelos, con una distancia de separación d y un área de los electrodos A (ver figura 1.6.1).

Cuadro 1.1: Valores de conductividad para algunas muestras típicas.

Muestra a 25°C	Conductividad [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
Agua ultra pura	0,055
Agua potable	50
Agua del océano	53000
5% NaOH	223000
50% NaOH	150000
10% HCL	700000
32% HCL	700000
31% HNO ₃	865000

Fuente: Thermo Electron Corporation. Orion Conductivity Theory [92].

Figura. 1.6.1: Celda de conductividad.



$$K = \frac{d}{A} \quad (6)$$

$$\sigma = Y_{\text{celda}} * K \quad (7)$$

Donde “ Y_{celda} ” indica la conductancia medida en los terminales de sensado de la celda, y σ indica la conductividad de la solución acuosa.

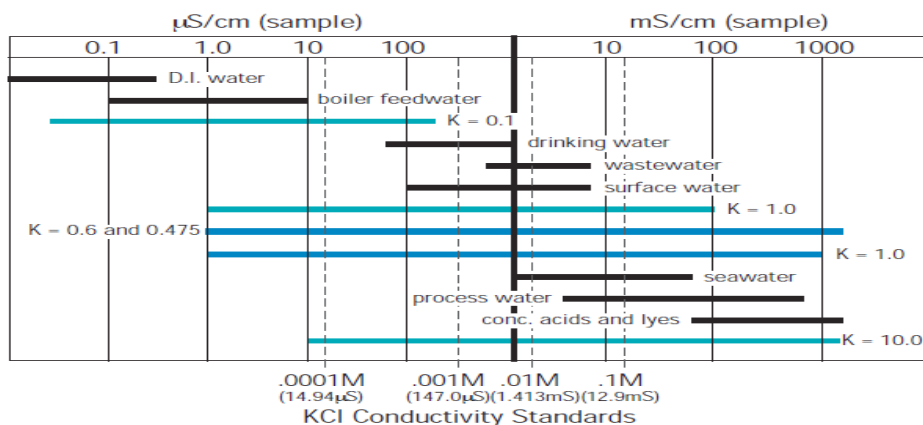
Conociendo la corriente y el voltaje, además de la geometría de la celda, es posible estimar de forma precisa la conductividad del agua, utilizando la ecuación 8:

$$\sigma = K_{\text{celda}} \frac{I}{\Delta V} \quad (8)$$

En la ecuación 8, σ es la conductividad de la solución acuosa, K_{celda} es la constante de la celda, ΔV e I son el voltaje (medido en los electrodos de sensado) y la corriente (fluyendo dentro del volumen de agua encerrado).

En la práctica, una celda con $K=0,1 \text{ cm}^{-1}$ se escoge para medidas en agua pura. Mientras valores que se encuentran entre $0,4 \leq K \leq 1 \text{ cm}^{-1}$ se emplean para medir agua del ambiente y soluciones industriales [92]. En el caso de muestras muy conductoras se emplean valores de $K=10 \text{ cm}^{-1}$. En la figura 1.6.2 se da una guía que ayuda en la selección de celdas dependiendo de la aplicación específica.

Figura. 1.6.2: Guía para la elección de una celda para aplicaciones específicas.



Legend

- Conventional 2-Electrode Cells
- DuraProbe 4-Electrode Cells

Fuente: Thermo Electron Corporation. Orion Conductivity Theory [92].

1.6.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UNA CELDA DE CONDUCTIVIDAD

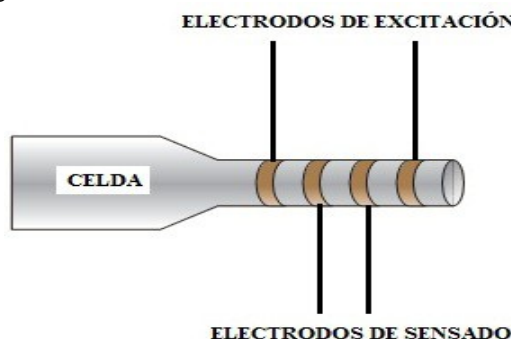
En el arreglo más simple (una celda de dos electrodos), un voltaje es aplicado a dos electrodos que encierran una solución conductora, luego la corriente resultante es medida. Entonces de la ley de Ohm se puede obtener la conductancia. Sin embargo, existen dificultades prácticas debido a que la conductividad de la solución es debida a la movilidad de iones, el uso de voltaje DC podría provocar que los iones se acumulen cerca a los electrodos, causando polarización. Esto conlleva a medir una resistencia más alta que la real. También, la acumulación excesiva de iones sobre uno de los electrodos puede ocasionar corrosión del electrodo afectado. Estas dificultades se pueden vencer usando un voltaje AC.

Celdas de conductividad modernas de dos electrodos usan señales AC para minimizar los efectos mencionados arriba y, usando la constante de la celda y midiendo la temperatura, se puede reportar la conductividad de la muestra estudiada.

Una celda de conductividad de cuatro electrodos contiene dos electrodos para energizar (inyección de corriente) y dos electrodos de sensado (manejo de voltaje), como se muestra en la figura 1.6.3. Los electrodos encargados de energizar la celda son alimentados por un voltaje AC, y la corriente alternante que fluye es medida para determinar la conductividad.

Debido a que los electrodos de sensado están ubicados en un área de corriente baja en la celda, y debido a que el voltaje en esta zona es medido usando un circuito de alta impedancia, es posible representar con gran exactitud la magnitud del campo eléctrico dentro de la celda [92].

Figura. 1.6.3: Celda de conductividad de cuatro electrodos.



Usando esta señal para mantener la magnitud del campo constante, la corriente que fluye por los electrodos, al energizar, es proporcional a la conductividad de la muestra, y los errores debidos a la polarización, contaminación y resistencias de cable son mínimos, por lo que no contribuyen a errores en la medida. Los errores debido a sedimentos aislantes son tres veces menores que aquellos obtenidos con las celdas de dos electrodos [92].

1.7 MEDICIÓN DE TEMPERATURA

Medir temperatura es de vital importancia en el estudio de cualquier tipo de proceso físico, químico o biológico, ya que es un índice del estado del sistema que se está estudiando, tanto a nivel molecular como a nivel macro estructural.

Cuadro 1.2: Cuadro comparativo de sensores de temperatura.

TIPO	CARACTERÍSTICA E/S DE TEMPERATURA Y ELÉCTRICA	COMENTARIOS
TermoSwitches	Interruptor de cierre. Salida de encendido/apagado simple.	Muchos tipos disponibles, cubriendo un amplio rango de temperaturas, configuraciones de contacto, y capacidades de manejo de corriente.
Termocuplas	Baja impedancia de fuente, 10Ω típico. Dispositivo de salida de voltaje. Desplazamiento de salida de decimas de $\mu V/^{\circ}C$. A temperatura ambiente la salida es del orden de los mV.	Baja salida de voltaje requiere acondicionamiento de señal de deriva baja. Como ventaja tiene pequeño tamaño y amplio rango de temperatura. Requiere de referencia a una temperatura conocida. Respuesta no lineal.
Platino y otros RTDs	Cambio de resistencia con la temperatura. Coeficiente positivo de temperatura. Impedancia típica ($0^{\circ}C$) de 20Ω a $20k\Omega$. Sensibilidades típicas de $0,1\%/^{\circ}C$ a $0,66\%/^{\circ}C$, dependiendo del material.	Alta repetibilidad. Buena linealidad sobre amplios rangos. Requiere puentes u otras redes para interfaces típicas.
Termistores	Cambio de resistencia con la temperatura. Coeficiente negativo o positivo de temperatura. Impedancia típica ($25^{\circ}C$) de 50Ω a $1M\Omega$. Sensibilidad de $4\%/^{\circ}C$ a $25^{\circ}C$. Redes de linealización disponibles con una sensibilidad de $0,4\%/^{\circ}C$.	La más alta sensibilidad entre los transductores comunes de temperatura. Inherentemente no lineal (función exponencial) pero linealizado con exactitud con redes disponibles.
Sensor Semiconductor	Función del voltaje, corriente o la resistencia. Los de tipo voltaje (diodos) requieren excitación de corriente. Los de tipo corriente (AD590) requieren excitación de voltaje. Los de tipo resistivo (<i>Bulk silicon</i>) pueden usar ambos tipos de excitación.	Muchos dispositivos no son calibrados y requiere acondicionamiento de señal significativo. El AD590 esta calibrado, es lineal y requiere mínimo esfuerzo en el acondicionamiento de señal.

Fuente: Sheingold. Transducer interfacing handbook: A guide to analog signal conditioning [82].

Existen varios dispositivos que permiten relacionar operaciones eléctricas como función de la temperatura, entre los se pueden incluir los elementos de expansión térmica (elementos bi-metálicos y *switches* con columna de mercurio), de voltaje Seebeck (termocuplas), de efecto resistivo (RTDs y Termistores), de efecto de unión semiconductor (Diodos y PTAT). En el cuadro 1.2 se realiza una comparación de los distintos elementos que actúan como dispositivos sensores. En este cuadro se puede observar que los tipos de sensores más tentativos para realizar una implementación son los RTD y los Termistores. Ambos son resistores variables con la temperatura.

Los RTD se basan en conductores, requieren acondicionamiento de señal (amplificación, filtrado y excitación de corriente), proveen la mejor exactitud, son muy precisos y estables. Por su parte, los termistores se basan en semiconductores, y proveen la mejor sensibilidad, son no lineales y se pueden encontrar con diversos valores de resistencia nominal [82].

Los RTD se pueden construir de diversos materiales (para mayor información se puede consultar a Sheingold [82]):

- **Platino:** Ligera alinealidad, alto costo, alta precisión, alto punto de fusión, amplio rango de medida, resistente a la corrosión y oxidación, muy estable.
- **Níquel:** Apreciablemente alineal, costo moderado, provee la mayor sensibilidad, susceptible a la corrosión y a la oxidación.
- **Cobre:** El más lineal, bajo costo, baja resistividad, pobre rango de operación, muy susceptible a la corrosión y a la oxidación.

Los termistores, cuentan con un coeficiente de temperatura negativo o positivo de valor elevado, por lo que presentan variaciones rápidas y extremadamente grandes para cambios relativamente pequeños en la temperatura (esto es, alta sensibilidad). Se fabrican con óxidos de níquel, manganeso, hierro, cobalto, cobre, magnesio, titanio y otros metales.

1.7.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UN TERMISTOR

Los termistores son semiconductores pasivos sensibles a la temperatura, exhiben un gran cambio en la resistencia eléctrica cuando están sometidos a un ligero cambio en la temperatura.

Pueden ser de dos tipo: **NTC** (Coeficiente de temperatura negativo) que disminuyen la resistencia cuando existe un aumento en la temperatura; **PTC** (Coeficiente de temperatura positivo) que aumentan su resistencia con un aumento en la temperatura. La resistencia de un termistor sólo es una función de la temperatura absoluta, y puede ser modelado como lo muestra la ecuación 9:

$$R = R_0 e^{\beta \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right]} \quad (9)$$

Las temperaturas (T y T_0) se miden en Kelvin. R es la resistencia a temperatura T . R_0 es la resistencia a la temperatura de referencia T_0 . β es el coeficiente de temperatura, constante en un intervalo moderado de temperatura.

Las aplicaciones de un termistor PTC estándar se pueden clasificar en dos grupos [74]:

- Aplicaciones donde la temperatura del PTC esta determinada principalmente por la temperatura del ambiente circundante (Medición de temperatura, control de temperatura, compensación de temperatura y protección de sobre temperatura).
- Aplicaciones donde la temperatura del PTC esta determinada principalmente por la potencia eléctrica disipada por el dispositivo (Protección de sobre corriente, detección de nivel de líquido, detección de flujo de aire, retardo de tiempo, aplicaciones de temperatura y corriente constantes).

En el caso de los NTC, cuando la potencia disipada en el termistor es pequeña, su temperatura se puede considerar únicamente dependiente del ambiente que lo rodea. En tal situación, la resistencia eléctrica se convierte en una función de la temperatura del entorno, y puede ser utilizado para medir variaciones de temperatura del exterior. Debido al alto coeficiente de temperatura del termistor, se pueden obtener medidas exactas de temperatura con un simple componente. Entre las aplicaciones más comunes se encuentran: Medición de temperatura, medición de temperatura diferencial, control de temperatura, compensación de temperatura, retardo de tiempo, supresión de sobrecorriente [73].

1.8 MEDICIÓN DE VELOCIDAD EMPLEANDO UNA PROPELA

Cuando se habla de una corriente subacuática se está haciendo referencia al desplazamiento de masas de agua, debajo o sobre la superficie. A nivel global, en el océano, la oceanografía física considera que, principalmente, actúan tres fuerzas: La de gravedad (relacionado con los gradientes de presión, el empuje y las mareas), la de fricción (relativo al movimiento entre parcelas de fluidos, sean gaseosos o líquidos), y las pseudofuerzas (como la fuerza de **Coriolis**) [89].

Para medir la velocidad de flujo, es posible utilizar diferentes dispositivos (como se puede ver en la revisión bibliográfica de la sección 2.2). Aquí se discute un instrumento que utiliza el empuje dinámico del agua para determinar el caudal del flujo. Se pueden encontrar tres tipos, principalmente, que funcionan con este principio [75]:

- Hélice o propela: Este tipo de medidor contiene un elemento giratorio que se coloca en el centro del flujo y las revoluciones de éste elemento son proporcionales a la velocidad de flujo. El número de giros se transmite mecánicamente a un registrador, el cual, por lo general, muestra el valor del gasto y el volumen acumulado.
- Turbina: Este tipo de medidor es una variante de los medidores de velocidad de hélice o propela, ya que funcionan con el mismo principio de relacionar la velocidad del flujo con el número de vuelta que da, en este caso, una especie de turbina.
- Molinete: Este instrumento consiste en una rueda provista de un dispositivo, mediante el cual el agua en movimiento hace girar un mecanismo que permite contar o medir número de vueltas que da esta rueda.

1.8.1 PRINCIPIO DE OPERACIÓN DE UNA PROPELA

Los medidores de velocidad utilizan un elemento primario consistente en álabes, copas o aspas que giran por consecuencia de la presión dentro de una carcasa o tubería, debido a la acción del flujo que pasa por estos conductos en dirección axial. La medición de la velocidad del flujo en este tipo de aparatos se logra gracias a la proporcionalidad que existe entre el número de revoluciones que dan los álabes del dispositivo y la velocidad del agua que es transportada a través del conducto.

Debe tenerse en cuenta que este tipo de medidores trabajan adecuadamente con flujos uniformes, en caso de que el flujo no sea uniforme los datos arrojados por el medidor pueden no ser confiables, por lo que es recomendable verificar en el sitio de medición si el flujo cumple con esta característica.

1.9 POTENCIA Y ENERGÍA DISIPADA EN CIRCUITOS ELÉCTRICOS

La **energía potencial** es una medida, de la capacidad, que tiene un sistema para realizar un trabajo. En un sistema eléctrico, la corriente que fluye en un circuito, puede transferir energía (de la batería, por ejemplo) a los componentes del mismo y por ende realiza un trabajo sobre ellos. La rapidez a la cual dicha energía es transferida se conoce como **potencia eléctrica**.

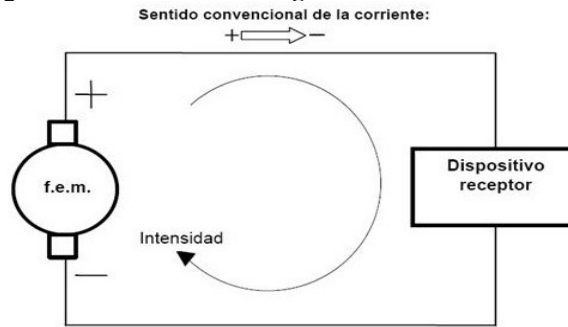
De esta definición se puede comprender la importancia que tiene la estimación de la potencia (y por ende la energía) consumida por un sistema, ya que a mayor potencia consumida la rapidez a la cual se entrega energía es mayor, y por tanto la autonomía⁶ del sistema se reduce.

Matemáticamente, la potencia instantánea (**p**), de cualquier dispositivo, se puede calcular a partir de la tensión (**v**) y de la corriente (**i**) a través de un elemento de circuito, utilizando la ecuación 10:

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (10)$$

Esta relación es válida para cualquier dispositivo o elemento de circuito. La **potencia instantánea** es una magnitud que varía con el tiempo. Cumpliendo el convenio de signos aplicado a dispositivos pasivos, mostrado en la figura 1.9.1, el dispositivo absorbe potencia si el sentido de la corriente es del potencial mayor al menor (elemento que consume), y entrega potencia si el sentido de la corriente se dirige del terminal con menor potencial al de mayor potencial (fuente de alimentación):

Figura. 1.9.1: Convenio de signos en circuitos eléctricos.



La energía, o trabajo (W), se define como la integral de la potencia instantánea:

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \quad (11)$$

La ecuación 11 sigue el convenio de signos para dispositivos pasivos, y expresa la energía absorbida (en Joules) por un componente durante un tiempo de operación $t_2 - t_1$. Existe también una potencia, conocida como **potencia promedio, activa o real**, calculada como el promedio de la potencia instantánea, $p(t)$, durante el tiempo de operación (**T**):

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t)i(t) dt \quad (12)$$

⁶ En este trabajo, la autonomía se refiere a la capacidad que tiene un sistema para operar largo tiempo sin necesidad de recargar las baterías o enchufarse a una fuente de energía externa.

En el caso en el que la señal de potencia sea periódica, T representa el periodo de dicha onda. Un caso especial se encuentra en los circuitos electrónicos, donde interesa conocer la potencia absorbida o suministrada por una fuente de corriente continua. En este caso, la potencia media absorbida desde una fuente de tensión continua $v(t)=V_{cc}$ que suministra una corriente $i(t)$ se calcula de la siguiente manera:

$$P_{cc} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t) i(t) dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V_{cc} i(t) dt = V_{cc} \left[\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) dt \right] = V_{cc} I_{med} \quad (13)$$

La potencia media absorbida por una fuente de tensión continua es el producto de la tensión por la corriente media [28].

CALCULO DE POTENCIA EMPLEANDO SERIES DE FOURIER:

Una herramienta bastante útil para calcular la potencia de un sistema con tensiones y/o corrientes con diferentes contenidos de frecuencia y formas arbitrarias, es la serie de Fourier. Empleando estas series se puede calcular la potencia media como sigue [38]:

$$v(t) = V_0 \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cos(n\omega_0 + \theta_n) \quad (14)$$

$$i(t) = I_0 \sum_{n=1}^{\infty} I_n \cos(n\omega_0 + \phi_n) \quad (15)$$

Así, la potencia media es:

$$P = V_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} V_{n,rms} I_{n,rms} \cos(\theta_n - \phi_n) \quad (16)$$

Donde los términos V_0 e I_0 son los términos de corriente continua. Y los términos $V_{n,rms}$ e $I_{n,rms}$ se calculan como:

$$V_{n,rms} = \frac{V_n}{\sqrt{2}} \quad ; \quad I_{n,rms} = \frac{I_n}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

POTENCIA APARENTE, ACTIVA Y REACTIVA

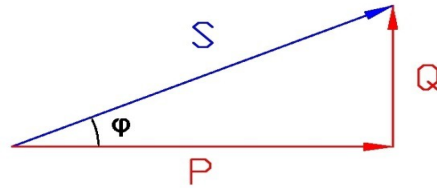
La potencia, expresada en el espectro de frecuencias, se puede describir como [38]:

$$S(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) = V(j\omega)_{rms} * I(j\omega)_{rms}' \quad ; \quad j = \sqrt{-1} \quad (18)$$

$I(j\omega)_{rms}'$ es el conjugado del valor rms de la corriente, $V(j\omega)_{rms}$ es el valor rms del voltaje aplicado. $S(j\omega)$ se conoce como la potencia aparente y es una cantidad compleja, $P(\omega)$ es la potencia activa y $Q(\omega)$ la potencia reactiva. j es la variable compleja. La potencia activa (Medida en Watts [W]) representa la capacidad del circuito para realizar un proceso de transformación de la energía eléctrica en trabajo. Esta es la potencia que realmente consumen los circuitos.

La potencia reactiva (Medida en Volti-Amperios [VAR]) es la utilizada para la formación de campos eléctricos y magnéticos en los componentes reactivos (bobinas y condensadores).

Figura. 1.9.2: Triángulo de potencias.



La figura 1.9.2 se conoce como triángulo de potencias, y muestra la relación vectorial entre la potencia activa, la reactiva y la aparente. Para señales perfectamente sinusoidales, el triángulo de potencia es útil para definir el **factor de potencia**, como la relación entre la potencia activa y la reactiva expresada en la ecuación 19 [38]:

$$f.d.p = \cos(\phi) = \frac{P}{S} \quad (19)$$

1.10 SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN EFICIENTE PARA EL SUMINISTRO DE ENERGÍA

Con el objetivo de alcanzar productos energéticamente eficientes, un primer paso es empezar cuantificando la cantidad de energía almacenada, empleando técnicas de medición experimental de potencia, tal como se ha mencionado en la sección anterior. También, es necesario tener claro los posibles focos de consumo, con el objetivo de aumentar el rendimiento energético que se puede alcanzar, ya sea incorporando el uso de nuevas tecnologías, nuevas topologías y mecanismos eficientes de alimentación de circuitos electrónicos, y/o mejorando las fuentes de alimentación de las tarjetas y la forma como esa energía es entregada.

Hoy en día la electrónica ha logrado avances orientados a la mejora en la eficiencia de la operación de los dispositivos electrónicos, a través de la mejora en el diseño de circuitos integrados, la tecnología de conmutación de los semiconductores, y la metodología de control [71].

La alimentación de circuitos electrónicos puede llevarse a cabo empleando uno de los siguientes módulos:

- Una fuente regulada que se encarga de convertir el voltaje proporcionado por las baterías en voltajes adecuados para la alimentación de los dispositivos electrónicos utilizados.
- Un sistema cargador de batería que se encargue de convertir el potencial de energía disponible en el medio (fuentes alternas), en energía adecuada para recargas de las baterías.

Existen dos tipos de fuentes reguladas:

- Reguladores lineales: Se emplea una caída de voltaje resistiva para lograr un voltaje estable menor que el voltaje de la fuente, el cual pierde el excedente de energía en forma de calor.

- Regulador conmutado: La reducción de voltaje se realiza por medio de un elemento que acumula energía proveniente de la fuente de voltaje, para luego descargarla en forma controlada a través de la carga por medio de un interruptor.

1.11 RESUMEN DE CAPÍTULO

En este primer capítulo se ha dado una breve introducción al entorno de trabajo en el cual deben operar los sensores. Se han puesto de manifiesto las relaciones entre las variables que serán objeto de estudio, y se ha destacado su importancia en el sistema climático global. Se ha hecho una descripción de los componentes de un sistema de medida y de las definiciones y términos más comunes en medición de variables físicas, destacando la importancia de un sistema electrónico en la instrumentación de espacios reales. Por último, se ha descrito la teoría que rige el cálculo de potencia en circuitos eléctricos, y la importancia que tiene dicha estimación. Asimismo, se pone de manifiesto la necesidad de contar con dispositivos y metodologías eficientes de diseño, construcción y gestión de la energía eléctrica.

2. REVISIÓN BIBLIOGRAFICA DE LOS METODOS EXISTENTES PARA MEDIR VELOCIDAD DE FLUJO, TEMPERATURA Y SALINIDAD BAJO EL AGUA

2.1 INTRODUCCIÓN

Un sistema multi-sensorial que mida distintas variables bajo el agua (velocidad de flujo, temperatura, salinidad, presión, concentración química, ...) debe ser eficiente y en lo posible integrar todo el conjunto de sensores en una misma plataforma, sin dejar de lado el rendimiento, desempeño y autonomía del sistema completo con base en una gestión efectiva en el suministro de potencia eléctrica.

Considerar un paquete de sensores que comprenda tanto sensores pasivos como activos, así como sensores ópticos y de microonda, e instrumentos de perfilación y para la creación de imágenes, es una buena opción para el estudio de variables multifísicas como las que se desea estudiar. En general este conjunto de instrumentos es diseñado de forma modular, tal que sean un subconjunto óptimo, que pueda ser escogido dependiendo de las tareas científicas a considerar [105].

En este capítulo se realiza una revisión bibliográfica de los métodos de sensado de cada una de las variables de interés (velocidad de flujo, temperatura y salinidad bajo el agua), y de las tendencias actuales en la medición de dichas variables. El capítulo se organiza como sigue: primero se presentan los métodos de sensado de velocidad, después los de temperatura y por último los de salinidad. Luego de realizar esta presentación se exponen algunas plataformas que integran varios instrumentos que funcionan de forma remota o *in situ*.

2.2 REVISIÓN DE LOS SENSORES DE VELOCIDAD DE FLUJO

Para medir velocidad se han podido encontrar, principalmente, cinco alternativas: mecánicas, boyas de deriva, electromagnéticas, acústicas, bio-inspiradas (A la cual se ha prestado especial atención en los últimos años).

Los métodos mecánicos emplean elementos tales como los rotores, las propelas, entre otros, usados en trabajos como los de Khan [49] y Serkin [79]. La medición con boyas⁷ consiste en lanzar una boya, y dejar que envíe su posición a un receptor a medida que pasa el tiempo. Debido a que se mide la posición de la boya en diferentes instantes, esta debe relacionar su posición actual con respecto a una posición de referencia (generalmente empleando un GPS). La mayoría de las boyas de deriva flotan en la superficie, pero algunas están diseñadas para trabajar sumergidas a diferentes profundidades y eventualmente suben a la superficie a transmitir los datos, como propone Posada [70].

Los medidores de tipo electromagnético aprovechan que un fluido conductor en movimiento a través de un campo magnético, genera un campo eléctrico dependiente de la velocidad del fluido⁸. En este tipo de medidores el campo magnético es generado por una excitación de corriente AC, de tal forma que se pueda inducir el campo eléctrico [19].

⁷ Las boyas son plataformas diseñadas para llevar diferentes instrumentos de medición.

⁸ Ley de Faraday [80].

También existen sensores, que emplean mecanismos ópticos para medir la velocidad. Un ejemplo, que cae dentro de esta última categoría es la de un LDV⁹ propuesto por Agrawal [4]. Utilizando este tipo de instrumentos se puede medir la velocidad a través del desplazamiento Doppler de la luz, ocasionado por la dispersión de la luz debido a las partículas en el flujo. Frecuentemente, el método se puede describir en términos de las fronteras de interferencia, formadas en la región de intersección de un par de rayos derivados de un único láser. El periodo de cruce de estas fronteras representa la velocidad de los dispersores [4].

Los medidores de corriente subacuática de tipo acústico pueden ser de dos tipos: de tiempo de vuelo (**ATT**¹⁰) y de efecto Doppler (**ADCP**¹¹) [19] [70]. Los instrumentos basados en el tiempo de vuelo se basan en la noción de que el sonido viaja más rápido con el flujo que en contra de él. De esta forma, el tiempo diferencial de vuelo tiene relación directa con la velocidad de flujo; al mismo tiempo, el promedio de dos tiempos de vuelo ayuda a encontrar la rapidez del sonido o del flujo.

Hardcastle [36] realiza una toma de datos, de alta resolución, empleando técnicas Doppler acústicas. El principio de la medición de velocidad empleando retro-propagación Doppler¹² (fenómeno de pulso-eco), consiste en sistemas que transmiten pulsos de sonido y observa los ecos de pequeños dispersores suspendidos en el agua (y en movimiento con ella), para obtener un perfil de velocidades. En el caso de que se necesite gran exactitud en la medida de la velocidad, se requieren altas tasas de muestreo y emplear técnicas Doppler coherente pulso a pulso. Este tipo de sistemas opera manteniendo coherencia de fase entre pulsos sucesivos, y da resolución de velocidad cercana a los dos ordenes de magnitud. Al final, la estimación de la velocidad se deriva del desplazamiento Doppler, evaluado del cambio de fase pulso a pulso de la señal retro-dispersada.

En 1998, Williams [103] desarrolló un sensor de velocidad acústico modular, denominado **MAVS**¹³. Este dispositivo mide componentes de flujo 3D a lo largo de cuatro trayectorias acústicas usando técnicas temporales de viaje diferencial, removiendo el *offset* de cada eje acústico (originado por características propias del cableado o de cualquier *offset* electrónico). En este sentido el sistema se diseña con base en la idea de que la distorsión de flujo debido al sensor debe ser reducido a un nivel aceptable (definido por los parámetros de diseño). Además, la determinación del *offset* para un flujo nulo es medido y compensado fácilmente, manteniendo el *offset* en un nivel estable.

Songying [88] introduce un medidor de flujo, en un canal abierto, basado en el principio de sensor ultrasónico. Durante el desarrollo del sistema, con el animo de reducir el consumo de potencia, el tiempo de ejecución de la CPU es minimizado. Así mismo, mediante un procedimiento de calibración de flujo, se establece el modelo de medición de la tasa de flujo relevante. El objetivo de este desarrollo fue reducir el consumo de potencia e incrementar la exactitud en las mediciones. El sistema esta compuesto de un *Parshall flume*¹⁴, un sensor ultrasónico, un sistema de adquisición de señales, un MCU, un módulo de visualización, un módulo de potencia, un modulo de compensación de temperatura y un bus con interfaz RS485.

9 Laser Doppler Velocimeter [4].

10 Acoustic Travel Time

11 Acoustic Doppler Current Profiler

12 También conocido como pulso-eco.

13 Modular acoustic velocity sensor.

14 Dispositivo usado para medir el flujo de agua en un canal abierto.

En Colombia un grupo de ingenieros vallecaucanos (Alejandro Carvajal, Alfredo Constaín, Héctor F. Aristizabal, Rodrigo Lemos, Juan C. Mena, Oscar Agredo), desarrollaron un modelo teórico (basado en el principio de efecto Doppler aplicado al agua) y un equipo electrónico digital portátil, con la capacidad de medir variables como velocidad, caudal, rugosidad¹⁵, temperatura. Este equipo es actualmente utilizado para medir caudal en los ríos por las CAR, CRC y la CVC, que son las corporaciones autónomas regionales de Cundinamarca, Cauca y Valle [22].

El tipo de sensores bio-inspirados, se basa en prototipos que intentan simular los mecanismos altamente eficientes de los sistemas biológicos en el proceso de sensado de flujo. Por ejemplo, sólo dando una mirada al mecanismo de sensado auditivo se puede encontrar una característica bastante deseable en este tipo de sistemas: *Los elementos sensores en los sistemas biológicos están basados en la sensibilidad al flujo, por parte de grandes arreglos de mecano-sensores operando en paralelo* (como los cabellos o los cilios) [55].

En el campo de la biomimética, Krijnen [55] ha desarrollado un sensor de flujo basado en cabellos sensoriales parecidos a los vellos mecano-receptivos de los grillos. Los cabellos del dispositivo, filiformes, son altamente perceptivos del sonido a baja frecuencia, con sensibilidad de energía cercana al umbral térmico. El dispositivo se compone de “cabellos” sensoriales contruidos a partir de tecnología de poli-silicio, para formar membranas suspendidas de nitruro de silicio, y procesamiento de polímero SU8 [55]. Dichas membranas tienen unos delgados electrodos de cromo, formando con el sustrato condensadores variables, lo que permite la lectura de la variable deseada.

Chen [18] desarrolló un sensor artificial que asemeja el comportamiento de las vellosidades en los animales. El sensor está basado en cilios perpendiculares a un sustrato plano, al cual se anexan galgas extensiométricas con el ánimo de medir el grado de deflexión de cada cilio del sistema; esta configuración hace posible la construcción de un arreglo distribuido de sensores de flujo con intrusión mínima al campo de flujo estudiado, es decir, distorsiona al mínimo el campo. El sistema fue enfocado hacia las aplicaciones de los sensores de flujo, y ha sido probado tanto en aire como en agua. Para el caso de las aplicaciones subacuáticas, el sensor se caracterizó bajo dos condiciones de flujo: un flujo laminar de estado estable (flujo en DC) y un flujo en condiciones oscilatorias (flujo en AC). Este sensor exhibe una sensibilidad exquisita a la velocidad del flujo y una capacidad excepcional para la detección del ángulo de flujo. Una de las ventajas de este tipo de desarrollo es el beneficio obtenido comparado con los sensores de flujo convencionales, entre los que se incluye una alta resolución espacial y temporal, que permite el sensado direccional y provee una alta sensibilidad.

En el cuadro 2.1 se hace una recopilación de los sensores, comúnmente empleados para medir velocidad de flujo bajo el agua.

¹⁵ Irregularidad topográfica del lecho que ofrece una resistencia al paso del agua.

Cuadro 2.1: Sensores de velocidad

TIPO	IMPLEMENTACIÓN	DESCRIPCIÓN	TRABAJO
MECÁNICO	ROTORES		Khan [48], Serkin [78]
	PROPELAS		Khan [48], Serkin [78]
BOYAS	BOYAS DE DERIVA	Mide el desplazamiento de las boyas mediante la ubicación por GPS	Posada [69]
ELECTROMAGNÉTICO	CAMPO ELECTROMAGNÉTICO	Velocidad del fluido obtenido a partir de la aplicación de la ley de Faraday	Chereskin [19]
	ÓPTICO	Velocímetros láser basados en efecto Doppler	Agrawal [4]
ACÚSTICAS	TIEMPO DE VUELO	El tiempo de vuelo de la señal acústica entre emisor-receptor tiene relación con la velocidad del fluido	Chereskin [19], Posada [69]
	EFFECTO DOPPLER	El desplazamiento en frecuencia de la señal acústica proveniente de un transceiver operando en pulso-eco permite calcular la velocidad del fluido	Constain [21], Hardacastle [35], Williams [102], Songying [87]
BIO-INSPIRADOS	CABELLOS SENSORIALES DE EFECTO CAPACITIVO	Cabellos sensoriales de polímeros basados en los vellos mecánico-receptivos de los grillos forman capacitores variables cuyo valor depende del flujo del fluido	Krijnen [54]
	CABELLOS SENSORIALES QUE APLICAN PUNTOS DE PRESIÓN	Cilios artificiales que se asemejan a las vellosidades de los animales permiten medir el grado de deflexión y a partir de allí estimar la velocidad de flujo	Chen [18]

2.3 REVISIÓN DE LOS SENSORES DE TEMPERATURA

Los mecanismos de sensado de temperatura que se pueden encontrar son de dos tipos: de estimación directa y de estimación indirecta. Cuando se emplean métodos directos, se ha encontrado que la tendencia es usar termistores o líquidos que se expanden con la temperatura (como el mercurio), aunque en los últimos tiempos con el auge de los sistemas MEMS¹⁶, se han comenzado a emplear sensores micro-maquinados para el sensado de flujo de temperatura.

Cuando se utilizan termistores, estos son encapsulados dentro de un cristal y protegidos contra la presión. La resistencia de estos elementos, que se relaciona exponencialmente con la temperatura de los mismos, es el elemento controlador en el circuito de adecuación, un ejemplo de aplicación se encuentra en Chen [18].

Dentro del empleo de líquidos se encuentran termómetros de inversión, que son medidores de temperatura basados en la expansión volumétrica de un líquido. Este tipo de termómetros se utilizan generalmente en sistemas de muestreo que emplean botellas de Nansen [70]. En el caso que se desee medir temperaturas a grandes profundidades dentro del océano, se utilizan termómetros no protegidos que están expuestos a la presión hidrostática para determinar la profundidad en la que se toman las muestras [70].

Schalko [78] presenta una aproximación novedosa a un sensor de flujo térmico micromaquinado¹⁷, embebiendo cuatro películas delgadas de termistores de germanio en una membrana de nitrato de silicio. El arreglo de termistores, colocado apropiadamente, actúa simultáneamente como sensor de fuentes de calor y sensor de temperatura. Los termistores se conectan a través de un puente de Wheatstone alimentado con una fuente de corriente constante. Ambos, el voltaje de salida del puente y el de alimentación del mismo, se encuentran disponibles como salidas de señal inmediatas, ofreciendo alta sensibilidad inicial o un rango

¹⁶ Micro Electro-Mechanical System.

¹⁷ Micromachined.

amplio de medida. Comparando con un sensor de flujo electrocalorimétrico, el requerimiento de potencia se reduce por más de un orden de magnitud, característica muy provechosa y crucial para la medición remota del flujo de fluidos que presenta leves incrementos de temperatura.

López [58] desarrolló un termógrafo digital submarino, que consiste en un sistema de adquisición, almacenamiento y recuperación de datos, destinado al registro a largo plazo de temperatura de agua marina. Presenta una resolución de 0.01°C , una precisión de 0.2°C y es capaz de almacenar hasta 20193 mediciones. El sistema puede operar en forma autónoma hasta por un año. Los datos son extraídos del termógrafo con la ayuda de un PC, a través del puerto serie RS-232 y con la ayuda de un programa especialmente diseñado para permitir la interfaz con el dispositivo.

En aplicaciones de sensado indirecto, se emplea el concepto de *tomografía acústica*. Este método sigue la noción de que el sonido viaja más rápido en agua caliente que en agua fría. Por lo cual, midiendo el tiempo de viaje del sonido sobre una trayectoria conocida, se puede determinar la velocidad del sonido, y de esta la temperatura en el medio. De igual forma el sonido viaja más rápido con una corriente que en contra de ella, así que midiendo el tiempo de viaje recíproco en cada dirección a lo largo de la trayectoria, se puede determinar, también, la velocidad absoluta del agua. Por tanto cada tiempo de viaje acústico esta íntimamente relacionado con la velocidad del sonido y con la temperatura [19].

Cuadro 2.2: Sensores de temperatura.

TIPO	IMPLEMENTACIÓN	DESCRIPCIÓN	TRABAJOS
TERMISTORES	TERMISTORES	Variación de la resistencia como función exponencial de la temperatura	Chen [18], Williams [101]
LIQUIDOS	TERMOMETROS	Expansión volumétrica de un líquido como función de la temperatura	Posada [69]
MICROMAQUINADO	PELICULAS DE TERMISTORES MICROMAQUINADAS	Sobre una membrana de silicio se ubican arreglos de películas termistoras	Schalko [77]
BIMETALICO	TERMOGRAFO	Sistema de adquisición basado en anillos bimetalicos	López [57]
ACÚSTICO	TOMOGRAFÍA ACÚSTICA	Midiendo el tiempo de viaje del sonido sobre una trayectoria conocida se puede estimar la temperatura del ambiente	Chereskin [19], Sabinin [76]

En el cuadro 2.2 se hace una recopilación de los sensores empleados para medir temperatura de flujo bajo el agua. Esta lista es pequeña debido a que la bibliografía consultada se baso en artículos y documentación encontrada en aplicaciones oceanográficas, y de que tipo de sensores se usa más comúnmente bajo agua; sin embargo, en la sección 3.3 se hace una descripción de mecanismos para medir temperatura y se hace la selección del sensor adecuado para la aplicación deseada.

2.4 REVISIÓN DE LOS SENSORES DE SALINIDAD

Usualmente la salinidad es medida determinando la conductividad eléctrica. Normalmente la medida es llevada a cabo junto con la profundidad y la temperatura, empleando para esto dispositivos conocidos como **CTD** (conductividad, temperatura y profundidad). En este caso, la salinidad es medida con base en la movilidad de los iones en el agua, lo que implica que los datos obtenidos pueden depender de la sal que en el momento esta disuelta en el agua [23].

Debe tenerse cuidado con esta forma de medir la salinidad, ya que al ser una medida

inherentemente eléctrica se ve afectada por interferencias del mismo tipo. En agua salada, la conductividad es una propiedad intrínseca de la cual se puede obtener la salinidad. Sin embargo, no es posible medir la conductividad de forma directa sobre el agua, pero se puede optar por medir su conductancia y luego, a partir de esta, derivar su conductividad [19].

Esto se puede lograr empleando una celda para medición de conductividad. Este tipo de celdas puede tener dos o más electrodos, dependiendo del método de medición: amperimétrico (dos electrodos) y o potenciométrico (cuatro electrodos). En el primer caso, se emplean dos electrodos paralelos (por lo general de platino), espaciados a unos pocos milímetros de distancia, entre los cuales se aplica una diferencia de potencial conocida y se mide el flujo de corriente que tiene lugar. En el caso de las celdas de cuatro electrodos, se tienen cuatro electrodos paralelos, a los dos más externos se les aplica una corriente conocida y en los dos internos se mide la caída de potencial que ocurre. En cualquiera de los dos casos se emplea la ley de Ohm para medir la resistencia del volumen de agua y luego conociendo la constante de la celda se puede medir la conductividad deseada [19] [70].

Otra forma de medir la conductividad eléctrica del agua es emplear sensores inductivos. En general, consisten en dos bobinas toroidales, una transmisora y otra receptora, ambas sumergidas en el líquido de forma paralela. A la bobina transmisora se le aplica un voltaje de corriente alterna, lo que produce un flujo electromagnético en el fluido, cuyo valor es proporcional a la conductividad del medio en el que están inmersas las bobinas. A su vez, este flujo induce un voltaje en la bobina receptora; al final, la conductividad se puede determinar con la constante del sensor y el voltaje medido en la bobina receptora [19] [29].

También, se puede optar por el empleo de sensores capacitivos, a través de la variación de permitividad del dieléctrico del agua, como lo propone Posada [70]. Por su parte, en 2006, Díaz [23] probó de forma exitosa la factibilidad de un medidor óptico de salinidad para aplicaciones marinas. Un instrumento óptico (conocido como *optode*), en el cual el primer elemento es un sensor de fibra óptica con índice refractivo basado en un **SPR**¹⁸. La base física de la medición fue el acople resonante de la luz guiada por la fibra con ondas de plasma en la superficie, soportado por la estructura planar para un índice de refracción dado del medio externo, lo que produce la atenuación de la potencia óptica transmitida por la fibra, que es el parámetro sujeto a medición. Los resultados obtenidos muestran una buena correlación con los datos provistos por una sonda de salinidad comercial.

Desde el punto de vista acústico, se puede realizar la medición de forma indirecta, como se mencionó en la sección 1.4, utilizando la dependencia de la densidad con la temperatura, presión, salinidad y rapidez del sonido en el agua [70] [77]. Otra opción, reciente, ha sido realizar un estudio desde el espacio utilizando el satélite SMOS¹⁹, a través del cual se adquiere la información de las propiedades dieléctricas de la superficie del mar, las cuales están relacionadas con la salinidad. Dicha información esta contenida en la emisión de micro-onda capturada por el instrumento SMOS. El concepto en el cual se basa esta medición se conoce como MIRAS²⁰, desarrollado por la Agencia Espacial Europea [30].

El cuadro 2.1 resume los sensores mencionados, usados para medir salinidad bajo el agua.

18 Surface Plasmon Resonance.

19 Soil Moisture and Ocean Salinity, por sus siglas en inglés.

20 Microwave Imaging Radiometer by Aperture Synthesis.

Cuadro 2.3: Sensores de salinidad.

TIPO	IMPLEMENTACIÓN	DESCRIPCIÓN	TRABAJO
ELECTROMAGNÉTICO	CELDA DE CONDUCTIVIDAD	Celdas de 2,3,4 electrodos que miden la conductancia eléctrica de un volumen de agua	Chereskin [19], Posada [69]
	SENSORES CAPACITIVOS	Se basa en la variación de la permitividad del agua para medir la conductividad	Posada [69]
	SENSORES INDUCTIVOS	Dos bobinas toroidales, emisora-receptora, producen un flujo magnético entre ellas proporcional a la conductividad del medio	Chereskin [19], Fougere [28]
	SATELITAL	Desde un satélite se adquieren las propiedades dieléctricas del agua	Font [29]
	MEDIDOR ÓPTICO	Se mide la potencia óptica que puede transmitirse por el agua	Díaz [22]
ACÚSTICO	SONIDO	Basado en la dependencia que existe entre la densidad con la temperatura, presión, salinidad y la rapidez del sonido en el agua	Posada [69], Sabinin [76]

2.5 PLATAFORMAS Y/O MECANISMOS DE INTEGRACIÓN DE SENSORES PARA LA EXPLORACIÓN SUBACUÁTICA DE MÚLTIPLES VARIABLES

Barakos [7] llevó a cabo un proyecto donde se toma una serie de perfiles de temperatura, salinidad y rapidez del sonido, empleando un sistema de perfilación ambiental STD/SV²¹, en aguas al sur de California (al oeste de San Diego²²), a una profundidad de 350 m. Los datos son almacenados en una cinta magnética a una frecuencia de muestreo de 0.2 Hz. La exactitud del sistema global es ± 0.02 °C, ± 0.02 partes por mil (salinidad), ± 0.11 m/s. La constante de tiempo de los sensores de temperatura y profundidad es 0.35 s y 0.10 s, respectivamente. La unidad de campo es bajada por un cable que tiene un conductor eléctrico simple, que transporta potencia DC al equipo submarino y por el cual regresan señales de datos FM a través de un multiplexor. Esta unidad contiene los transductores, uno para cada variable, y el oscilador para convertir las propiedades oceánicas medidas en información modulada en FM.

Ishimaru [43] construyó un sistema denominado **OCTOPUS**, destinado al monitoreo en tiempo real para la observación de parámetros oceanográficos físicos, biológicos y ópticos en aguas poco profundas. Consiste de un CTD con sensor de oxígeno, un fluorómetro (sensor para detectar y medir fluorescencia), un transmisómetro (dispositivo para medir la transmisión de luz en algún medio), y un medidor de cuantums (dispositivo para medir el número de fotones) *in situ*. También, puede equiparse con un dispositivo muestreador de agua. Fue diseñado como un muestreador/perfilador multiparamétrico para uso biológico en el estudio oceanográfico basado en un sistema CTDO y una RMS (*Rosette Multi Sampler*). en el que se combinan los sensores anteriormente mencionados.

Bajo el programa EUREKA [105] ha sido desarrollado un sistema de monitoreo remoto (aéreo) denominado EUROMAR-SEASTARS, siendo Italia responsable por los requerimientos del mar mediterráneo y Alemania responsable por los mares del norte y báltico. De entre los múltiples sensores que este sistema provee se encuentra un Radiómetro de Microonda (**IMR**²³), que consiste de dos módulos independientes, llamados *módulo de resolución media* (**MRM**²⁴) y

21 Se refiere a un tipo de dispositivo que funciona con base en principios electromagnéticos.

22 El proyecto se ejecuta en Marzo de 1972 por el NUC (Naval Undersea Center), a una 10 millas del oeste de San Diego.

23 Imaging Microwave Radiometer.

24 Medium Resolution Module.

módulo de resolución alta (HRM²⁵).

El MRM, que trabaja a bajas frecuencias, mide los parámetros físicos básicos de contenido de sal y temperatura en la superficie. La máxima sensibilidad al medir la salinidad se alcanzó alrededor de 1,4 GHz (el efecto medido depende del comportamiento resonante de las moléculas de agua). Además, se escogió una frecuencia de 5,6 GHz para obtener la máxima sensibilidad de la emisión de microonda al medir la temperatura de la superficie, sin encontrarse con una dependencia significativa de la salinidad. El HRM mide en tres ventanas atmosféricas a 18,7 GHz, 36,5 GHz, y 90 GHz. La principal aplicación es la determinación del espesor y volumen de las capas que flotan completamente sobre la superficie. Esto es hecho mediante el análisis y la evaluación del incremento en la temperatura comparado con la capa libre de la superficie. Otra aplicación es el mapeo y análisis del hielo marino [105].

Williams [102] ha configurado un medidor de flujo, basado en el tiempo de viaje de una onda acústica con el fin de medir la vorticidad sobre escalas de 15 y 45 cm, también es empleado para medir vorticidad sobre la capa fronteriza del fondo marino sobre una escala de 1,5 metros. Adicionalmente, se desarrollaron dos plataformas. La primera constituye un medidor de vector de vorticidad en una trayectoria de 45 cm de largo. La segunda es un instrumento para trayectorias de 1,5m de longitud. Ambas plataformas permiten la medición de velocidad, vorticidad, temperatura y presión, las cuales pueden ser medidas a frecuencias de 7 Hz con corrientes de hasta 3 nudos²⁶. Para obtener gradientes de temperatura se emplean termistores. Cada medidor de vorticidad almacena internamente los datos de componentes de velocidad, temperatura, inclinación y presión, sobre 340MB en discos duros. El muestreo es programado para evitar el aliasing de las señales de marea.

Birch [10] implementó una plataforma científica altamente configurable y efectiva en la relación costo-beneficio, desarrollada para el estudio científico de los procesos oceánicos cercanos al fondo marino. La plataforma es un trípode de aluminio con una base de dimensión cercana a los 3m y una altura total de 2.2m. Se escogió el aluminio por su peso liviano y su resistencia a la corrosión. Dicha plataforma es fácilmente configurable con cualquier sensor que sea requerido. Por lo general, a las piernas del trípode se añaden ADCPs y OBS²⁷, mientras los sonares de escaneo y los sensores de flujo electromagnético son montados, normalmente, en el área abierta directamente debajo del trípode. Hasta la fecha de publicación (2003) los instrumentos son autónomos, cada uno teniendo su propia fuente de alimentación y *data logger*. Esta aproximación permite un sistema bastante configurable, de diversos sensores que pueden ser optimizados para una aplicación particular, y también asegura una operación y ensamble simples.

Wood [107] desarrolló un AUV (vehículo autónomo subacuático), que funciona bajo el principio de desplazamiento²⁸, buscando un bajo consumo de potencia, con propósitos de investigación científica en el campo de la biología marina, la oceanografía física y en general el estudio de ambientes marinos. El vehículo permite recolectar datos acústicos y en video de los fenómenos físicos estudiados. También se pueden obtener muestras de agua para el análisis químico, así como recolectar muestras de especímenes biológicos. El vehículo puede ser

25 High Resolution Module.

26 Equivale aproximadamente a 0,5 m/s.

27 Optical Backscatter Sensors.

28 De la palabra **glider**. Es un vehículo (AUV, en este caso) que se puede mover hacia abajo o hacia arriba dentro del océano, cambiando su centro de gravedad según la dirección de movimiento que se desee.

programado y configurado (esto es, cambiar sus componentes físicos, como cambiar cámaras y sensores, de acuerdo a las necesidades). El proyecto para el cual se ha desarrollado el vehículo submarino tiene la finalidad de realizar un estudio a profundidad de variables tales como temperatura, salinidad, turbidez, clorofila, rodamina, y fluorescencia.

En 2009, Williams [104] implementó un sistema sensorial en trípode, a través del cual fueron medidos corrientes y ondas. El trípode tiene como función soportar un **ADCP** (perfilador de corrientes por efecto Doppler acústico) y un **MAVS** (sensor de velocidad acústico modular). La recuperación del trípode desde el fondo del agua, se realiza a través de un cable, del cual se tira para sacar el sistema del agua.

2.6 OTROS PROYECTOS (Ya realizados y en curso)

Desde 2009, investigadores están agregando sensores subacuáticos a los arroyos y a los lagos. Los sensores, que miden profundidad y flujo de agua, turbidez, temperatura, salinidad, PH, y niveles de nitrato y oxígeno, transmiten sus datos de regreso vía celular a los investigadores, los cuales pueden evaluar que tan bien funcionan los métodos de remoción de la polución en las ciudades. La idea general es monitorear los niveles de polución en el agua, y evaluar que tan bien están trabajando los sistemas de remoción de la contaminación, lo que permite crear un entendimiento más detallado de la calidad del agua y las condiciones de los lagos. Usando una red de sensores, los investigadores pueden acumular más información, de la que está disponible usando métodos más tradicionales [60].

A través del experimento denominado **HOME**²⁹ se hizo un esfuerzo para comprobar (mediante observaciones y modelos computacionales) la teoría según la cual, las mezclas en el océano no ocurren uniformemente sobre la totalidad del mismo, sino que están concentradas en la vecindad de la topografía áspera del océano. En este proyecto, los datos provenían de medidores de corriente fijos, **CDTs**³⁰, y **ADCPs**. Mediante este trabajo se ayudó a determinar la localización y ubicación de regiones donde las actividades de mezclas³¹ parecen ser comunes, sin relacionarse con la fuente de energía, lo que guió el despliegue subsecuente de fuentes de campo. En el 2000, se realizaron medidas de temperatura, salinidad, velocidad vertical y horizontal, disipación de energía turbulenta, atenuación óptica, retro-dispersión acústica y topografía del fondo marino [19].

En el cuadro 2.4 se resumen las plataformas que integran diferentes sensores para realizar inspección subacuática.

29 Hawaii Ocean Mixing Experiment.

30 Sensores de Conductividad – Profundidad – Temperatura.

31 Se destaca la importancia de las mezclas ya que como se ha podido comprobar experimentalmente, el 99,99% del océano esta compuesto por mezclas.

Cuadro 2.4: Otras plataformas que integran sensores para medición subacuática.

NOMBRE	DESCRIPCIÓN	TRABAJO
ESTRUCTURA PARA MEDIR VELOCIDAD AL SUR DE CALIFORNIA	Permite medir perfiles de temperatura, salinidad y rapidez del sonido	Barakos [7]
OCTOPUS	Plataforma de monitoreo en tiempo real para la observación de parámetros oceanográficos físicos, biológicos y ópticos en aguas poco profundas. Incorpora sensores CTD, sensores de oxígeno, fluorómetros, transmisómetros, entre otros.	Ishimaru [42]
EUROMAR-SEASTAR	Sistema de monitoreo que permiten medir sal, temperatura, espesor y volumen de las capas que flotan sobre la superficie del agua	Wolfram [104]
MEDIDOR DE VORTICIDAD ACÚSTICA	Mide velocidad, vorticidad, temperatura y presión	Williams [101]
TRIPODE MULTI-SENSORIAL	Trípode multisensorial que incorpora ADCP, OBS, sonares de escaneo, y sensores de flujo electromagnético	Birch [10]
AUV	Glider que incorpora sonares, CTD, video cámaras, hidrofones, sensores de clorofila y fluorescencia, entre otros	Wood [106]
MEDIDOR DE CORRIENTE Y ONDAS	Sistema sensorial en trípode que implementa un ADCP	Williams [103]
MONITOREO EN TIEMPO REAL PARA LAGOS	Proyecto en el cual se construyó una plataforma para medir profundidad y flujo de agua, turbidez, temperatura, salinidad, PH, niveles de nitrato y oxígeno.	Martella [59]
HOME	Incorpora medidores de corriente, CTDs, ADCPs, entre otros. Con esta plataforma se realizaron medidas de temperatura, salinidad, velocidad vertical y horizontal, disipación de energía turbulenta, atenuación óptica, retro-dispersión acústica y topografía submarina	Chereskin [19]

2.7 RESUMEN DE CAPÍTULO

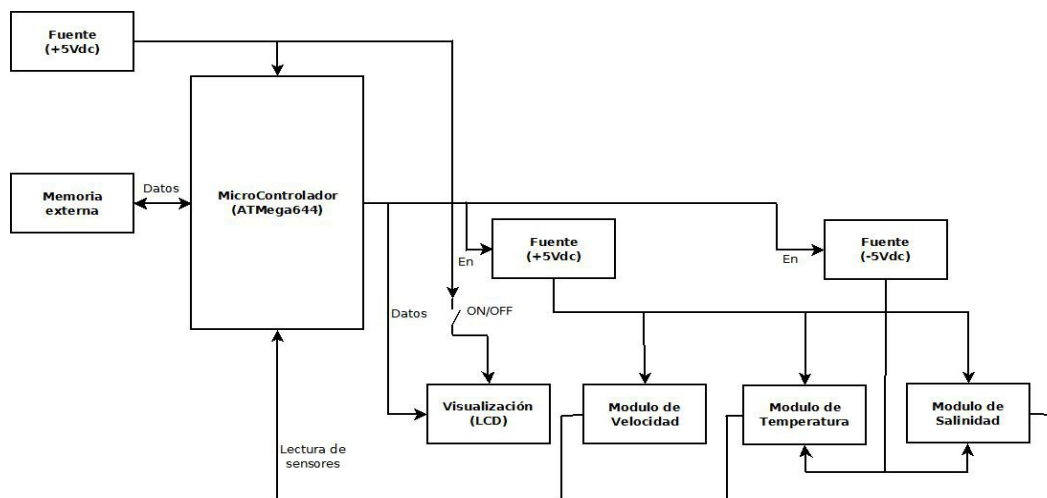
En este capítulo se ha presentado una revisión bibliográfica relacionada con los métodos de sensado de velocidad de flujo, temperatura y salinidad bajo agua, teniendo en cuenta el tipo de sensores, propiedad física y tecnología de medición. Se ha descrito la tendencia en este tipo de sensores, en especial aquellos que comúnmente se utilizan en oceanografía. El estudio se ha dividido en cuatro partes: aquellos que se refieren a la velocidad de flujo, los que se relacionan con la medida de temperatura, los empleados para medir salinidad y una última sección en la cual se encuentran plataformas que integran estos sensores con otros que se encuentran fuera del rango de este trabajo.

3. MÓDULOS SENSORIALES PARA LA MEDICIÓN DE LAS VARIABLES

3.1 MÓDULO SENSORIAL PROPUESTO

De la revisión bibliográfica del capítulo 2. se pudo observar que existen múltiples formas de medir variables bajo el agua. En el presente trabajo se desarrolla un sistema para la medición multisensorial de variables subacuáticas. Se requiere que dentro de la plataforma se encuentren integrados los sensores necesarios, espacial y funcionalmente coordinados, de tal manera que su funcionamiento sea eficiente. Por tal motivo se propone el diseño mostrado en la figura 3.1.1.

Figura. 3.1.1: Sistema multisensorial propuesto



La figura 3.1.1 muestra la arquitectura general del sistema. Este cuenta con tres fuentes de alimentación. La fuente principal (fija o permanente, como también se le llama en este documento), es una fuente de $+5V_{dc}$, encargada de alimentar el módulo de control (un microcontrolador ATMega644), la memoria externa (24LC512) y el módulo de visualización (que consiste en un LCD 16x2). Las otras dos fuentes, de $+5V$ y $-5V$, son fuentes controladas por el microcontrolador del sistema, activadas o desactivadas según lo necesite el sistema. Estas se encargan de alimentar los módulos sensoriales para la medición de velocidad, temperatura y salinidad. Para realizar estas medidas se implementa el sistema sensorial utilizando una propela, termistores, y una celda de conductividad.

En lo que sigue se realiza una descripción de los módulos desarrollados, que consiste en la descripción de los sensores construidos, la caracterización de cada uno de los sensores, los diagramas de bloques y metodología de adquisición, y las tarjetas electrónicas (PCBs) diseñadas y fabricadas.

3.2 MÓDULO PARA LA MEDICIÓN DE SALINIDAD

3.2.1 DESCRIPCIÓN FÍSICA DE LA CELDA

En este trabajo se ha optado por construir una celda de cuatro electrodos. Esta mejora de forma significativa el rendimiento de la celda al momento de medir, en especial en lo que se refiere a soluciones de alta conductividad. Una de las ventajas es que minimiza el efecto de la polarización y de la contaminación de los electrodos (que se refleja en la inexactitud de la medida); también, elimina los errores debidos a la resistencia en los cables y en los conectores [92]. El material principal (sustrato) de la celda de conductividad construida es acrílico. Como electrodos se han seleccionado tornillos de acero inoxidable (3,7mm de diametro y 19,6mm de longitud).

En la figura 3.2.1 se muestra la celda construida. El diámetro de la sección transversal del sustrato es de 1cm y la distancia entre los electrodos de sensado es de 5mm. La celda mostrada tiene como característica que tanto los electrodos de excitación como los de sensado son atravesados por el mismo flujo de agua (se encuentran en serie). Como consecuencia, la corriente que fluye a través de la solución acuosa, encerrada entre los electrodos de sensado, es de igual valor que la inyectada por los electrodos de excitación.

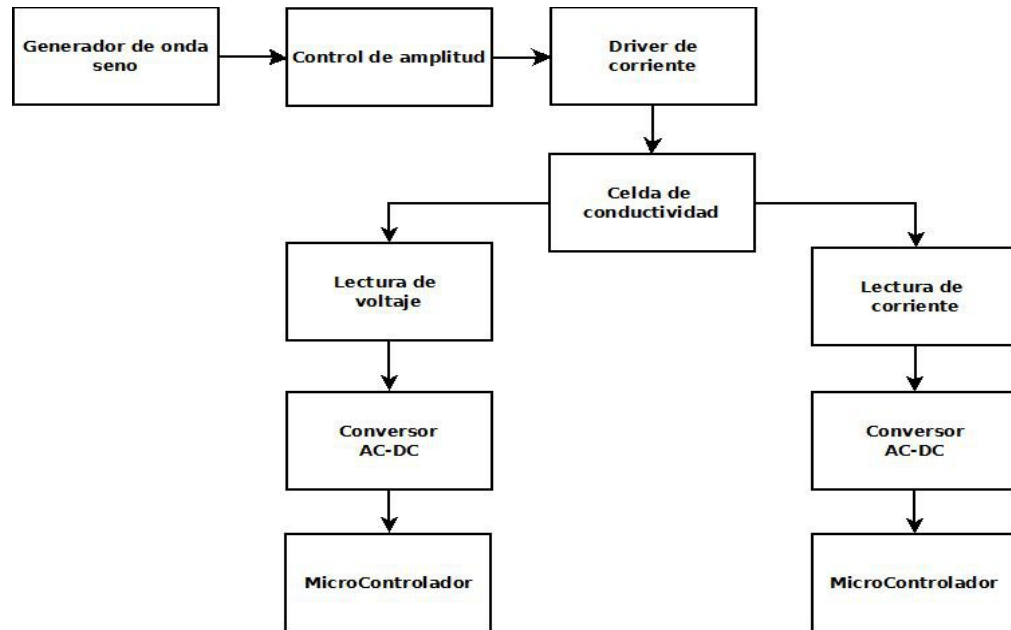
Figura. 3.2.1: Celda de conductividad construida.



La celda finalmente utilizada dentro del desarrollo, fue la celda de cuatro electrodos que se muestra en la figura 3.2.1, debido a las ventajas anteriormente mencionadas. Esta celda fue probada con corriente DC, sin embargo después de un tiempo en operación se encontró que uno de los electrodos se oxidó completamente, aun cuando era de material inoxidable. Al cambiar a corriente AC este problema desapareció, lo que permitió una medida más confiable.

3.2.2 EXCITACIÓN Y LECTURA DE CONDUCTIVIDAD

Figura. 3.2.2: Diagrama de bloques del circuito electrónico en la celda de conductividad.



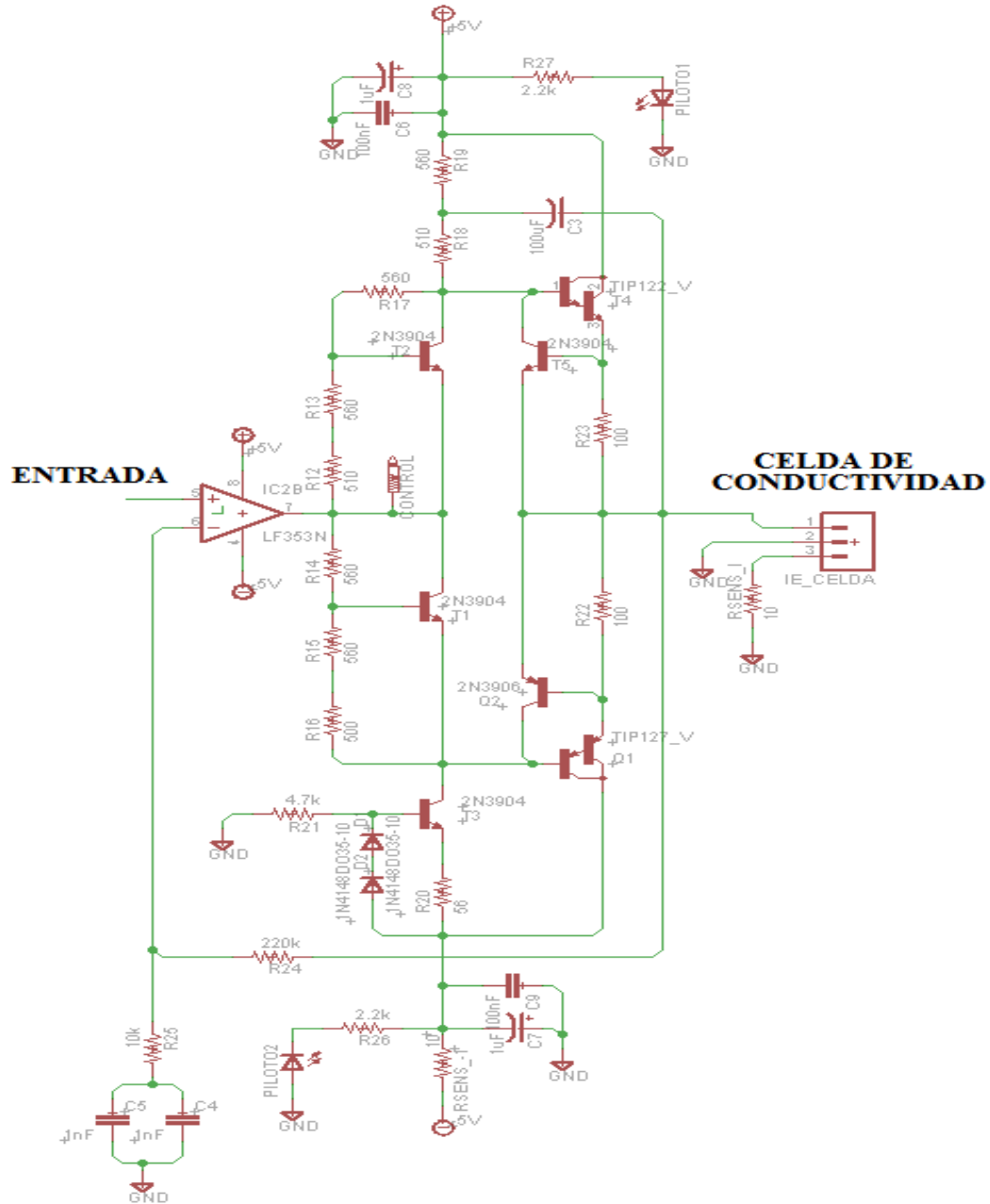
En la figura 3.2.2 se muestra el diagrama de bloques de la etapa de excitación y de adquisición de la señal relacionadas con la celda de conductividad. La fila horizontal de bloques, en la parte superior de la figura 3.2.2, corresponde al circuito de excitación. Las columnas verticales hacen parte del circuito de adquisición de las señales.

La excitación consta de tres bloques principales (ver figura 3.2.2). El bloque de generación de la señal alterna para la excitación de la celda. Dicho circuito, mostrado en la figura 3.2.4, es un circuito oscilador (configuración puente de *wien*) construido siguiendo el criterio de Barkhausen [31], con una frecuencia de oscilación igual a 1,6kHz. Se puede notar en la figura 3.2.4 la conexión de las resistencias R_6 , R_7 y R_8 en serie, la cual induce un pequeño ruido que posibilita la oscilación sinusoidal del circuito (por esta razón no se reemplazó esta conexión en serie por una resistencia equivalente). El bloque de control de amplitud es un bloque que ajusta la amplitud de la señal alterna creada, para que no sature³² el driver de corriente en la etapa siguiente.

La etapa de *driver* (figura 3.2.3) consiste de un amplificador de potencia clase AB, implementado con un circuito de polarización conocido como multiplicador V_{BE} [28]. El multiplicador V_{BE} es importante por que brinda estabilidad de polarización frente a cambios de temperatura. Una de las mayores dificultades, al implementar este circuito fue lograr la inyección de una onda sinusoidal limpia en la terminal de salida. Dos razones fueron las causantes: la saturación a la salida del *driver* de la figura 3.2.3 que no permitía inyectar una onda sinusoidal a la celda de conductividad, y la presencia de un ruido en la señal de salida.

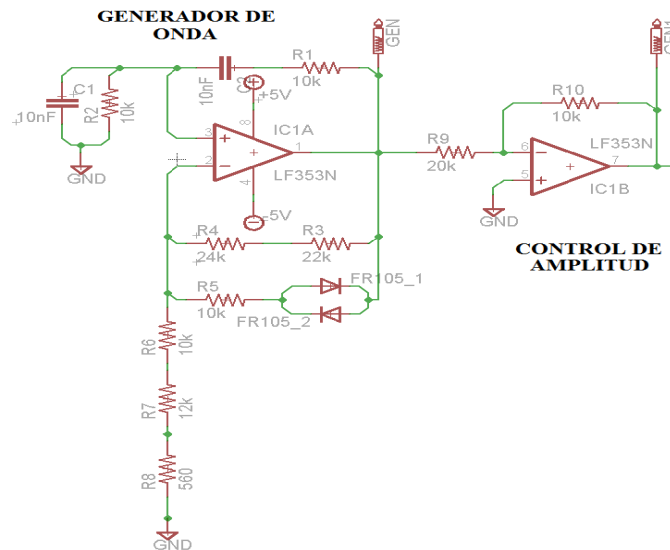
³² El cuidado en la saturación es importante ya que los niveles de alimentación son bajos, entre $\pm 5V$.

Figura. 3.2.3: Driver de corriente para la celda de conductividad.



La presencia de ruido se pudo solucionar ubicando condensadores de acople (C_6 , C_7 , C_8 , C_9) de valor $1\mu\text{F}$ y 100nF entre la alimentación y tierra. El problema de saturación del amplificador se resolvió seleccionando valores apropiados de los elementos de circuito R_{24} , R_{25} , C_4 y C_5 , junto con un ajuste a la salida del circuito de control de amplitud de la figura 3.2.4. La resistencia R_{sens_I} en la terminal de salida del *driver*, es usada para medir la corriente que fluye a través de la celda de conductividad.

Figura. 3.2.4: Generador de onda seno y control de amplitud para la celda de conductividad.

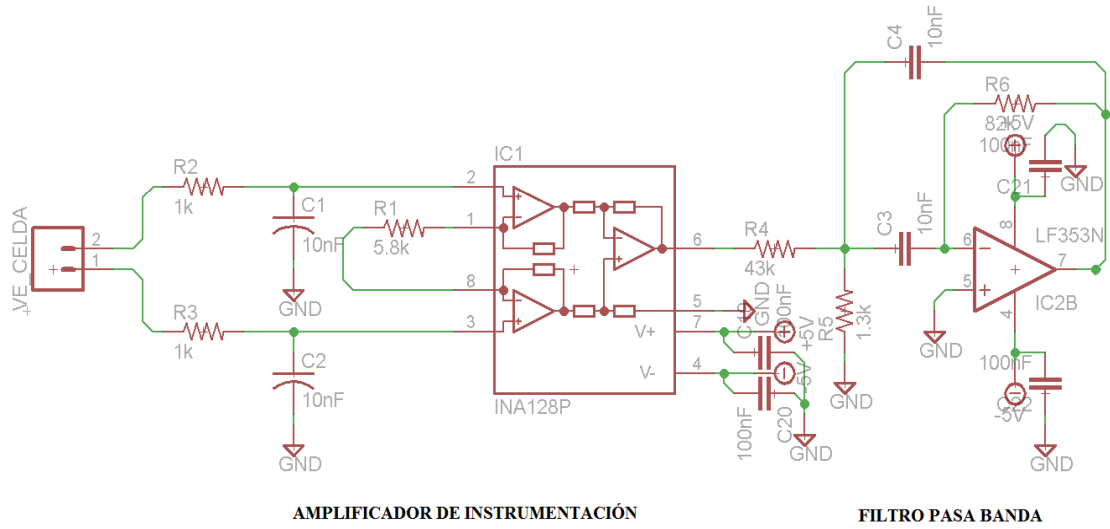


El bloque de adquisición (ver bloques en columna de la figura 3.2.2) consiste en dos ramas distintas, una para el voltaje y otra para la corriente (como se desea medir la conductancia en la celda, es necesario conocer ambos valores). La lectura de voltaje, mostrada en la figura 3.2.5, se realiza de forma directa en los electrodos de sensado mediante un amplificador de instrumentación [91], como se muestra en la figura 3.2.6. Un amplificador de instrumentación es un amplificador que, en su sentido más general, toma la diferencia de las señales a la entrada de él, y da como resultado esa diferencia multiplicada por una ganancia. En la figura 3.2.6, se puede apreciar, también, una etapa de filtrado, conectada a la salida del amplificador de instrumentación, la cual esta constituida por un filtro pasobanda con topología de realimentación múltiple (salida simple) [31], con una frecuencia central de 1,6 kHz.

Figura. 3.2.5: Etapas en la lectura de voltajes de la celda de conductividad.

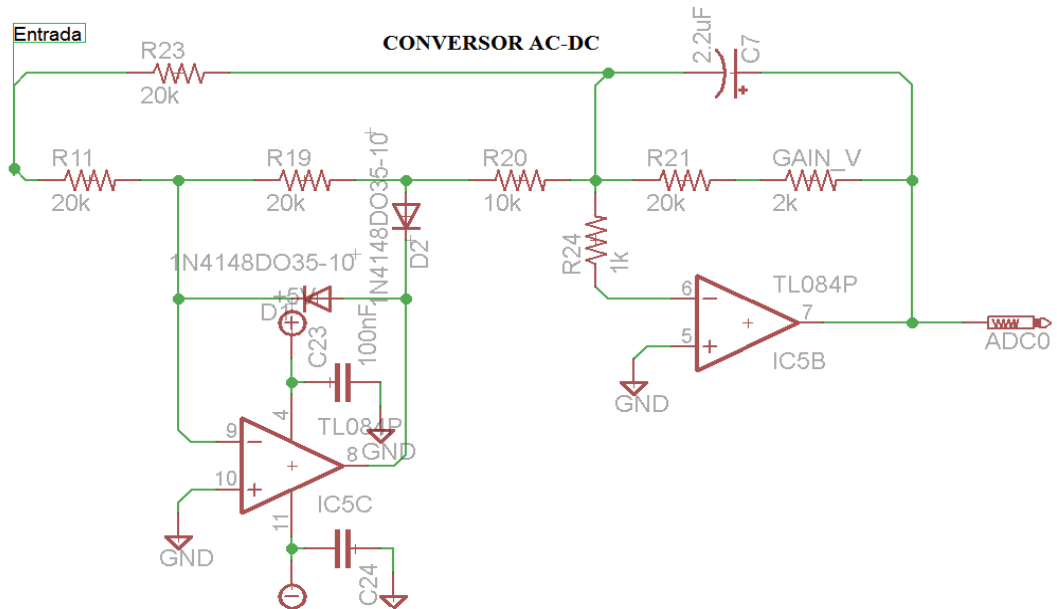


Figura. 3.2.6: Amplificador de instrumentación y filtro pasa banda.



La etapa de filtro pasobanda es necesaria, debido al ruido que se presenta en la señal. El efecto de este ruido es fuerte debido a los pequeños valores de la señal obtenida, tanto en voltaje como en corriente (se pueden medir valores menores de 1mV_{pp} de amplitud). Es precisamente por este valor tan pequeño de voltaje que se requiere una segunda etapa de amplificación, después del filtro pasobanda (ver figura 3.2.5). Esta segunda etapa de amplificación es construida a partir de un amplificador operacional configurado como inversor (no se muestra el circuito).

Figura. 3.2.7: Conversor AC-DC.



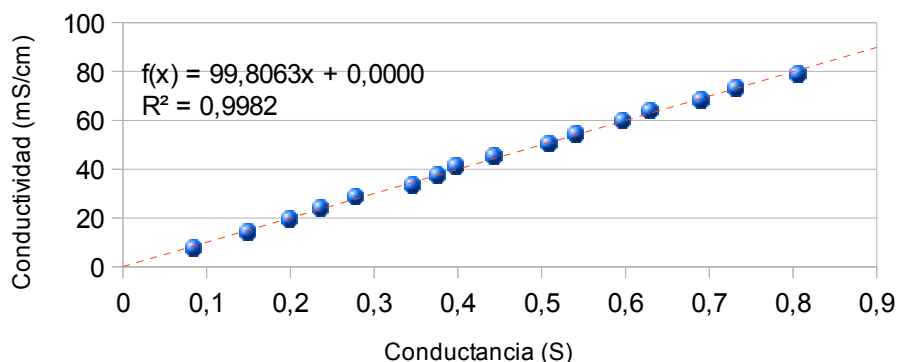
Hasta este punto, la señal sigue siendo alterna, pero ya ha sido filtrada. Como se desea leer la señal desde un microcontrolador (ATMega644) es necesario adecuar esta señal en el rango de niveles que este puede leer, como se indica en la figura 3.2.2. Por este motivo, se implementa el circuito conversor AC-DC de la figura 3.2.7 [31]. La función del conversor AC-DC es obtener una representación de voltaje en DC a partir de una señal de AC.

La lectura de corriente se realiza de forma similar. Los bloques implementados son idénticos a los explicados anteriormente. Debido a que la corriente es medida indirectamente, a través del voltaje en una resistencia (de pequeño valor), que se encuentra en serie con los electrodos de corriente de la celda de conductividad, el voltaje leído debe ser dividido entre 10 (el valor de la resistencia de sensado).

El proceso de caracterización de la celda de conductividad se llevó a cabo utilizando un conductivímetro calibrado; dicha calibración permitió construir una curva que relaciona la conductividad del agua con su conductancia (cociente entre corriente y voltaje), medida utilizando la celda como se muestra en la figura 3.2.8. El proceso de calibración consistió en sumergir la celda en agua con diferentes concentraciones de sal (sal marina), y medir las señales de corriente y voltaje, de forma paralela se midió la conductividad del agua con el instrumento calibrado, de lo cual se pudo construir la gráfica de la figura 3.2.8. Con esta celda se pudo alcanzar una sensibilidad de $99,81 \times 10^{-3} \text{cm}^{-1}$. La resolución obtenida con esta técnica fue de 4mS/cm, con un rango de operación entre 7,5mS/cm y 80 mS/cm que, de acuerdo con la figura 1.6.2, coincide con el rango de conductividades que se puede encontrar en agua marina.

Figura. 3.2.8: Caracterización de la celda de conductividad

COMPORTAMIENTO DE LA CELDA DE CONDUCTIVIDAD (CARACTERIZACIÓN)



En la figura 3.2.8 se muestra la curva de caracterización de la celda de conductividad, relacionando la conductividad (medida de la salinidad en mS/cm) con la conductancia (medida desde la celda en S), como se muestra en la ecuación 20.

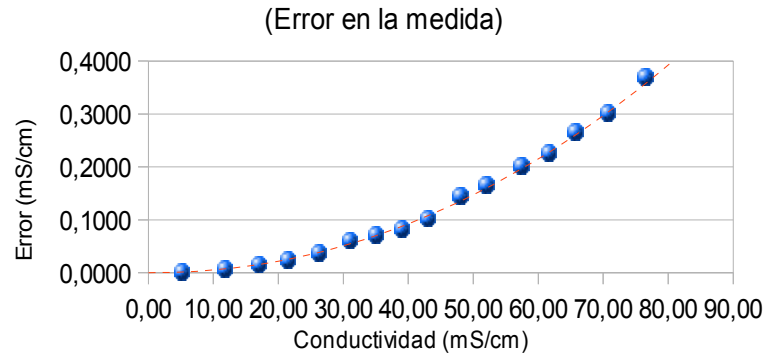
$$\sigma = 99,8063 * Y_{celda} \quad (20a)$$

$$Y_{celda} = \frac{I}{V} \quad (20b)$$

$$\Delta \sigma = \left| 99,8063 * (0,1 - Y) * \frac{\Delta V}{V} \right| \quad (20c)$$

Figura. 3.2.9: Error en la medida de conductividad.

COMPORTAMIENTO DE LA CELDA DE CONDUCTIVIDAD



Donde $\Delta \sigma$ es el error en esta medida (las barras verticales indican valor absoluto), interpretado como $\pm \Delta \sigma$. $\Delta V = 1,2 \text{ mV}$, que es el error en la lectura de voltaje en el ADC. Este error se logró gracias a una técnica de sobre-muestreo a través de la cual es posible expandir la resolución del convertidor ADC del microcontrolador (en este caso la expansión fue de 10 bits a 12 bits) [3]. Con base en la ecuación 20c, la propagación del error relacionado con los datos de la figura 3.2.8, se muestran en la figura 3.2.9.

Se observa, de la figura 3.2.9, que el comportamiento del error en la medida tiende a ser cuadrático creciente, a medida que el valor de conductividad aumenta. Debido a este comportamiento, programar el cálculo de este error en el microcontrolador representa un costo de energía extra. Además, debido al carácter de esta tendencia, el formato de los datos (flotante) y el número de accesos adicionales, a la memoria externa, que esto implica (costo energético), se ha optado por utilizar, como regla práctica, un error máximo absoluto de 0,34 mS/cm para todas las conductividades medidas entre 5 y 80 mS/cm (rango de conductividades medidas). Este valor resulta del máximo error obtenido de la curva de error, ver figura 3.2.9, dentro del rango de caracterización de la celda.

3.3 MÓDULO PARA LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA

3.3.1 DESCRIPCIÓN FÍSICA DEL TERMISTOR

Para los propósitos de este trabajo se desea un material resistente a la corrosión, por lo que un RTD de platino sería una buena opción, ver sección 1.7, no sólo por su resistencia a la corrosión sino por su gran precisión, amplio rango de medida y pequeña alinealidad. No obstante estas grandes prestaciones, debe tenerse en cuenta que los cambios de temperatura

pueden llegar a ser pequeños bajo el agua³³, por lo que se desea un sensor con gran sensibilidad que detecte estos pequeños cambios. Por esta razón, además del costo, se han seleccionado un conjunto de termistores, como sensores para el módulo de medición de temperatura.

La primera consideración a tener en cuenta, es que el termistor debe ser protegido de la corrosión con el objetivo de evitar deterioro parcial o total del elemento. Como protección del termistor se fabricó un encapsulado de aluminio, como el mostrado en la figura 3.3.1. Con el objetivo de tener redundancia, se ha optado por usar dos termistores. El encapsulado del primer termistor tiene un espesor de 0,5mm, el del segundo es de 0,8mm.

Figura. 3.3.1: Encapsulado construido para proteger los termistores.

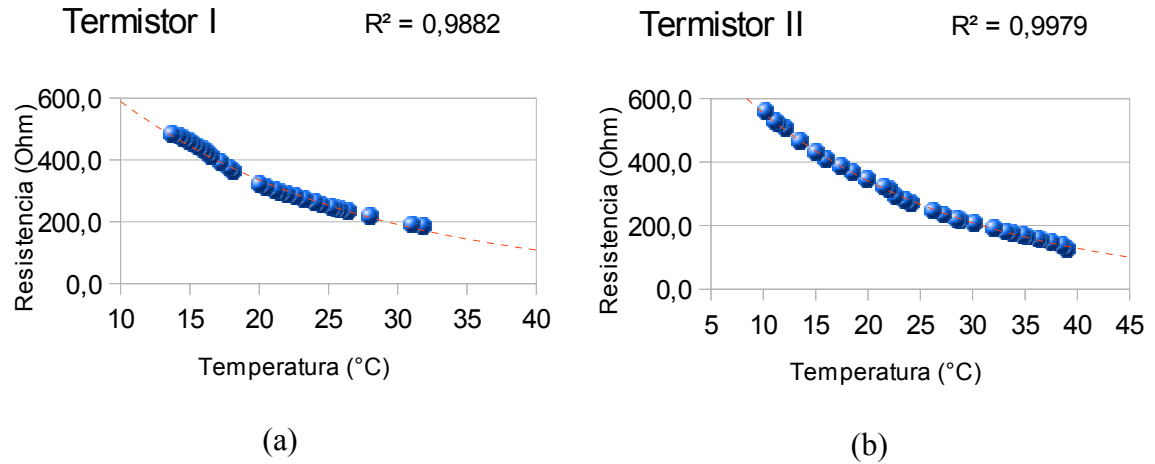


La selección de aluminio, como mecanismo de encapsulado de los termistores, se debe a la inmunidad a la oxidación y su capacidad de transmitir fácilmente el calor. Los termistores tienen forma de pastilla circular con un pequeño espesor, y la forma del encapsulado es como se muestra en la figura 3.3.1 (como cilindro acabado en punta circular), lo que dejó un espacio de aire. Para evitar que este fuera un problema, cada termistor se puso en contacto directo con la pared de su encapsulado, el otro lado (espacio con aire) se llenó de papel aluminio. De esta forma, el calor se puede transmitir de forma eficiente al termistor (esto se pudo observar al momento de realizar la caracterización de cada uno de los termistores con su encapsulado).

El comportamiento de cada uno de los termistores fue evaluado experimentalmente (una vez encapsulados dentro de la protección) y se encontraron las respuestas mostradas en la figura 3.3.2. En esta figura interesa conocer si el comportamiento es exponencial dentro del rango de operación esperado. Tal como se observa, se obtuvieron valores R^2 de 98,82% y 99,79% para el termistor I y II, respectivamente. La ligera diferencia observada en los valores de resistencia de los termistores, a la misma temperatura, se pueden explicar porque los termistores no son idénticos, por defectos en la construcción del encapsulado, así como por el relleno de aluminio utilizado para eliminar el espacio de aire entre cada termistor y su respectivo encapsulado.

³³ Aunque esto es relativo, ya que en la realidad se pueden presentar corrientes bajo el agua con temperaturas bastante diferenciadas que pueden llevar a cambios considerables en el valor de temperatura.

Figura. 3.3.2: Curva de caracterización de los termistores. (a) Termistor I, (b) Termistor II.

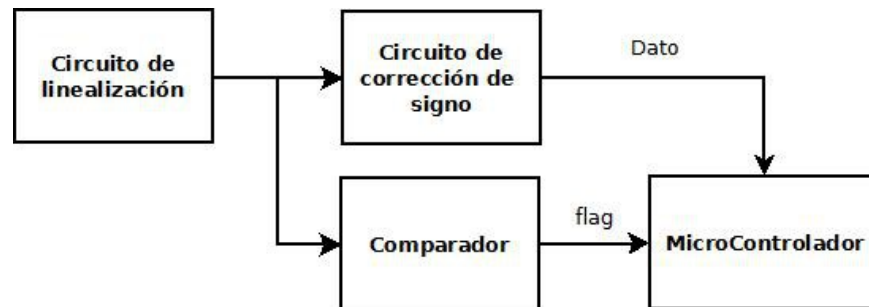


3.3.2 LECTURA DE TEMPERATURA

La relación no lineal del termistor, entre la resistencia y la temperatura, es un punto a favor cuando se mide temperatura bajo el agua, a la vez que puede ocasionar problemas de tratamiento, ya que puede salir rápidamente del rango de operación de los componentes electrónicos. Por este motivo se ha ideado el esquema de acondicionamiento mostrado en el diagrama de bloques de la figura 3.3.3.

Por facilidad de procesamiento (ver sección 1.5.5) se decide linealizar los termistores. Los métodos de linealización son muy variados, entre los que se encuentran métodos que utilizan la modificación de la impedancia mediante adición de componentes fijos, asociación de sensores con alinealidades contrarias, empleo de puentes tanto pasivos como activos, empleo de dispositivos de comportamiento logarítmico, etc [11], [16], [48], [106]. En particular, Williams [106] ha realizado un trabajo exhaustivo en el estudio de los puentes, prestando especial atención a los puentes activos y a las diferentes configuraciones circuitales que se pueden implementar para tratar termistores, resaltando las ventajas y desventajas de cada una de sus propuestas. Por su simplicidad, se ha seleccionado como método de linealización un puente activo con un único elemento sensor como el mostrado en la figura 3.3.4 (a) [66].

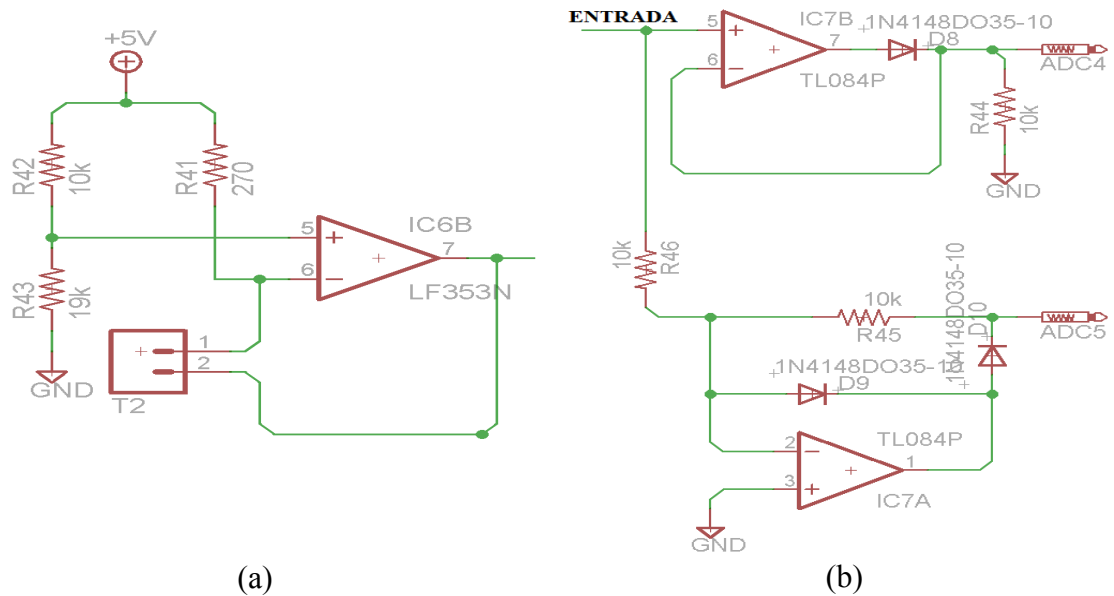
Figura. 3.3.3: Diagrama de bloques del circuito electrónico para los termistores.



El diagrama de bloques presentado en la figura 3.3.3, muestra el procesamiento realizado a la señal proveniente del termistor. Inicialmente, el termistor se conecta al circuito de linealización (figura 3.3.4 (a)) que se encarga de dos tareas: la primera es convertir el cambio de resistencia (producto del cambio de temperatura) en una señal de voltaje equivalente. Debido a que la relación entre la temperatura del termistor y la resistencia entre sus terminales es exponencial, como se puede apreciar en la figura 3.3.2, la segunda tarea del bloque de linealización es garantizar que la salida de voltaje, proveniente de este circuito linealizador, presente una relación lineal con la temperatura del medio.

Una vez obtenido el voltaje del circuito de linealización, la señal pasa a un circuito de corrección de signo y a un comparador (figura 3.3.3). el circuito de corrección de signo (figura 3.3.4 (b)) es un circuito que permite realizar la función de valor absoluto a los datos que provienen del circuito linealizador. Esto es, los voltajes positivos no se ven afectados, pero los voltajes negativos son cambiados de signo. El circuito de corrección de signo es muy importante, debido a que la salida del puente de linealización se encuentra entre $\pm 3V$; por lo tanto, se necesita que las salidas negativas sean convertidas a positivas para que puedan ser leídas por el conversor analógico-digital del microcontrolador. Conjuntamente con el circuito de corrección de signo se utiliza un circuito comparador (bloque comparador de la figura figura 3.3.3) que permite saber si el dato a la salida del circuito de corrección corresponde a un valor positivo o negativo de voltaje. El circuito comparador de signo se implementa a través de un disparador de Schmitt [31].

Figura. 3.3.4: Circuito para la adquisición de temperatura. (a) Circuito de linealización, (b) Circuito corrector de signo.



En las figuras 3.3.5 y 3.3.6 se muestran los voltajes de salida del circuito de adquisición, para cada termistor, después de pasar por el bloque de corrección de signo. La resolución obtenida con estos termistores fue de $0,2^{\circ}\text{C}$, operando en un rango entre 5°C y 40°C (rango de

caracterización de cada uno de los termistores). Como elementos de calibración para caracterizar este sistema, se usaron por separado una termocupla tipo k (la termocupla tenía su dispositivo de lectura digital) y un cubo de *leslie*. La termocupla se empleo, en primer lugar, para calcular las curvas de la figura 3.3.2, con el ánimo de conocer su error y características de comportamiento exponencial ($T_{\min}$, $T_{\max}$, $R_{\min}$, $R_{\max}$, R_0 o resistencia a temperatura ambiente), a partir de los cuales fue posible diseñar e implementar los circuitos propuestos en la figura 3.3.3. En la figura 3.3.5, las gráficas rotuladas como (a) y (b) corresponden al rango de temperaturas menores y mayores a 22°C (rango inferior y superior), respectivamente. La selección entre una u otra será determinada por la salida del circuito comparador.

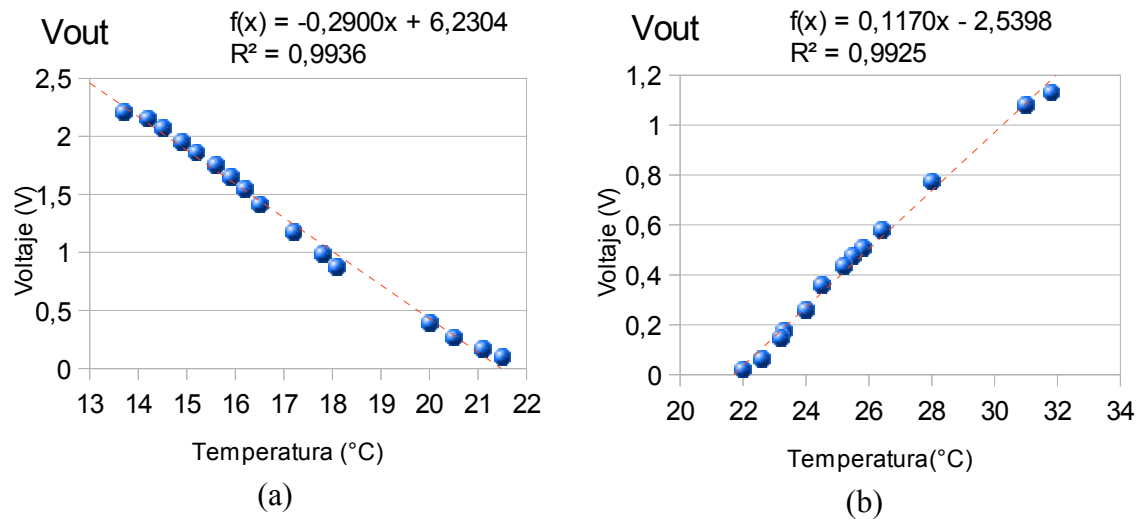
De la figura 3.3.5, se calcula la relación $T_{(V)}$ para el termistor I de la ecuación 21:

$$T_{(V)} = -3,45 V + 21,48 \quad T < 22^{\circ}\text{C} \quad (21a)$$

$$T_{(V)} = 8,55 V + 21,71 \quad T \geq 22^{\circ}\text{C} \quad (21b)$$

Después de obtener estas ecuaciones, el funcionamiento del sistema de temperatura se corrobora utilizando el cubo de *leslie*, el cual permite cambiar controladamente la temperatura al interior del mismo y conocer con precisión su valor. El error en las medidas a partir de las ecuaciones 21a y 21b es $0,5^{\circ}\text{C}$. Las sensibilidades y porcentajes de alinealidad, en el rango inferior son $0,29 \text{ V}/^{\circ}\text{C}$ y $11,2\%$, respectivamente, en el rango superior son $0,29 \text{ V}/^{\circ}\text{C}$ $16,6\%$, respectivamente.

Figura. 3.3.5: Respuesta del circuito de adecuación para el termistor I. (a) Rango inferior, (b) Rango superior.



De la figura 3.3.6, se calcula la relación $T_{(V)}$ para el termistor II de la ecuación 22:

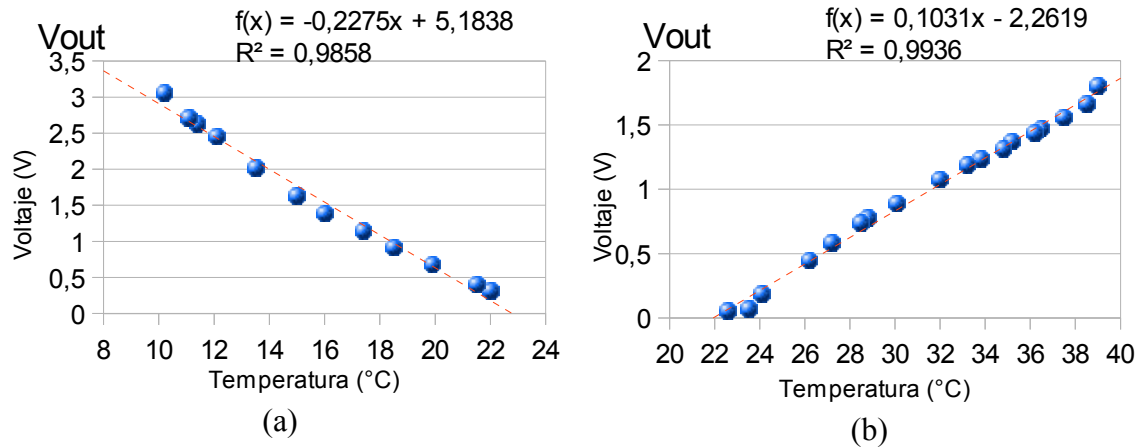
$$T_{(V)} = -4,40 V + 22,79 \quad T \leq 22^{\circ}\text{C} \quad (22a)$$

$$T_{(V)} = 9,70 V + 21,94 \quad T > 22^{\circ}\text{C} \quad (22b)$$

Las sensibilidades en el rango inferior y superior de medida son $0,23 \text{ V}/^{\circ}\text{C}$ y $0,10 \text{ V}/^{\circ}\text{C}$, respectivamente. El error en las medidas a partir de las ecuaciones 22a y 22b es de $0,5^{\circ}\text{C}$.

Los porcentajes de alinealidad para el conjunto de ecuaciones 22a y 22b, figura 3.3.6, en los rangos inferior y superior son 10,4% y 18,11%, respectivamente. Si se comparan las figuras 3.3.5 y 3.3.6, se puede notar que los rangos inferior y superior presentan comportamientos lineales, pero de sensibilidades diferentes. Esto sucede porque los termistores tienen una mayor sensibilidad para valores de temperatura menores a la ambiente, como se puede observar en la figura 3.3.2.

Figura. 3.3.6: Respuesta del circuito de adecuación para el termistor II. (a) Rango inferior, (b) Rango superior.



3.4 MÓDULO PARA LA MEDICIÓN DE VELOCIDAD

3.4.1 DESCRIPCIÓN FÍSICA DE LA PROPELA

Los dispositivos para medir velocidad de flujo, que funcionan mediante empuje dinámico, básicamente constan de dos partes, una que gira con el paso del flujo (hélice, propela, turbina, molinete, ...) y un mecanismo que registra el giro de la parte rotatoria (motor, encoder, sensor inductivo, ...). En este caso se empleará una hélice (propela) con nueve aspas y un mecanismo de registro óptico.

Figura. 3.4.1: Propela utilizada en para la medición de velocidad.



La propela implementada es muy sencilla, consiste de nueve alabes encapsulada en un armazón que permite total libertad de giro de las aspas cuando el agua fluye. El material es de plástico, lo que evita deterioro por la corrosión, una imagen se muestra en la figura 3.4.1. Las aspas son muy livianas y delgadas, y la fricción entre ellas y el eje es despreciable, por lo que permite medir velocidades tan pequeñas como 0,2cm/seg. Sin embargo, a grandes profundidades (mayores a 50 cm, para esta propela) pueden comenzar a deformarse. El sistema de conteo de las revoluciones se lleva a cabo a través de un encoder óptico montado con fotodiodos (diodos infrarrojos).

3.4.2 LECTURA DE VELOCIDAD

Figura. 3.4.2: Diagrama de bloques del circuito de adquisición para medir velocidad.



En la figura 3.4.2 se muestran los bloques que constituyen el circuito de medida. El conteo de pulsos se realiza a través de un encoder óptico. La señal que genera el encoder es una señal cuadrada cuando las aspas están girando. Con el objetivo de garantizar una señal digital (entre cero y cinco volts) esta señal pasa a través de un disparador de Schmitt. La salida del disparador se dirige al microcontrolador. Aquí la variable de interés es la frecuencia con la que los pulsos suceden, ya que esta frecuencia esta relacionada con la velocidad de la propela y por ende del flujo que la atraviesa.

En la figura 3.4.3 se muestra la curva de caracterización de la propela. Esta caracterización se llevó utilizando el túnel de agua que se encuentra en el Laboratorio de Fluidos de la Universidad del Valle. Este túnel de agua permite variar, de forma regulada, la velocidad del flujo de agua que atraviesa por una sección específica del mismo, en la cual se sumergió la propela. En la gráfica de la figura 3.4.3, el eje horizontal corresponde a la frecuencia leída por el microcontrolador durante un tiempo determinado. El eje vertical es la velocidad, estimada en cm/segundo.

A partir de la figura 3.4.3 se calcula la expresión para estimar la velocidad de flujo a partir de la frecuencia leída, tal como se muestra en la ecuación 23. Experimentalmente se obtuvo una sensibilidad de 0,52cm/pulso, con una resolución de 0,2 cm/seg, dentro de un rango de operación entre 3,96 cm/seg y 10,90 cm/seg.

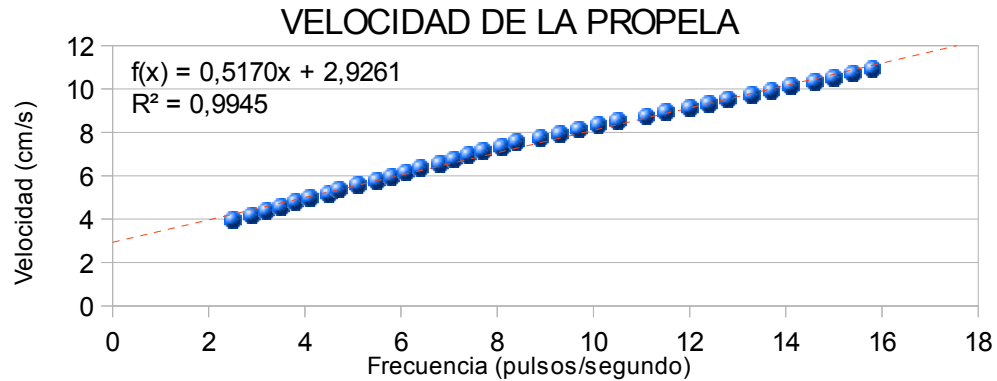
$$V = 0,5170 * f + 2,9261 \left[\frac{cm}{s} \right] \quad (23)$$

En la ecuación 23, f es la frecuencia medida en pulsos por segundo, y V la velocidad en cm/s.

Debe tenerse en cuenta que la gráfica de la figura 3.4.3 está en el rango de velocidades en el cual se caracterizó la propela, que es pequeño debido a que el canal de agua solo permitía obtener un máximo de 13cm/seg en la velocidad del flujo. No obstante, el rango de velocidades medido puede ser superior pero debe calibrarse para valores mayores de velocidad para asegurar la certeza de las velocidades medidas y para garantizar que la tendencia lineal del

sensor se mantiene. También, se debe subrayar que la caracterización de este sensor se realiza con un flujo perpendicular a la cara de la propela, y que la ecuación 23 sólo es válida en el caso de flujos normales al dispositivo. En este desarrollo no se tuvieron en cuenta los efectos de la posición relativa entre la propela y el flujo, para ángulos distintos a 90°.

Figura. 3.4.3: Curva de caracterización de la propela.



3.5 TARJETAS DE CIRCUITO IMPRESO

En la práctica no todas las tarjetas de circuito impreso (**PCB**³⁴) entran en servicio. Los primeros prototipos de estas PCBs están orientados a reconocer puntos de falla en el diseño, para incrementar el rendimiento del producto final conocido como *yield* (en inglés). En general, para tener un buen *yield* son necesarias tres cosas [63]: 1) la tarjeta debe ser fabricable, 2) La tarjeta debe funcionar apropiadamente (integridad y calidad de las señales), 3) la tarjeta debe ser confiable (debe funcionar durante todo el tiempo de operación esperado).

Desde el punto de vista de la fabricación, la tarjeta debe ser fabricada cumpliendo ciertos estándares y además, debe estar disponible para el ensamble, esto es, las partes deben estar disponibles para ser soldadas a la placa con puntos de soldadura apropiados sin riesgo de dañar la tarjeta o las partes.

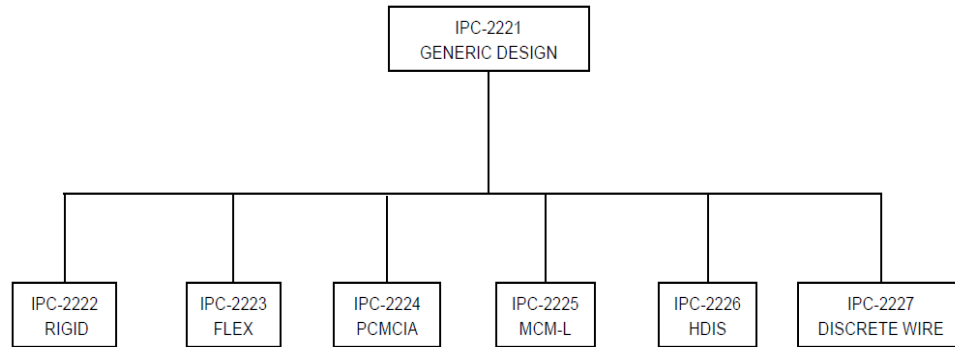
Desde el punto de vista del funcionamiento, se deben atender las características mecánicas y eléctricas de la tarjeta. Mecánicamente la tarjeta debe ajustarse físicamente al soporte y debe ser protegida del ambiente (temperatura, vibración, humedad). Electricamente la tarjeta debe dar cumplimiento a las restricciones operacionales del diseño (potencia, entrada/salida, etc.), a la inmunidad a interferencias externas, y a la reducción de posibles interferencias a equipo vecino.

En esta sección se trata un poco sobre el diseño de los circuitos impresos, prestando especial atención al estándar IPC-2221 [41]. Dicho estándar está pensado para proveer información relacionada con todos los aspectos y detalles de diseño de tarjetas impresas. Entre otros, provee la estructura para el montaje e interconexión electrónica, electromecánica, y mecánica de los componentes. El propósito de este estándar es establecer principios de diseño y

34 Printed Circuit Board.

recomendaciones, que deben ser usados conjuntamente con requerimientos detallados de una estructura específica de interconexión, que produzcan diseños apropiados para montar y soldar componentes pasivos y activos.

Figura. 3.5.1 Jerarquía de las especificaciones de diseño IPC.



Fuente: Standard IPC-2221. Generic Standard on Printed Circuit Board [41].

El estándar IPC-2221 identifica los principios genéricos de diseño, y está provisto con varios documentos seccionales (ver figura 3.5.1), que presentan detalles y aspectos específicos relacionados con cada tecnología de fabricación de PCBs. Entre estos se encuentran:

- IPC-2222: Estructura de diseño de PCBs empleando materiales orgánicos.
- IPC-2223: Estructura de diseño empleando PCBs flexibles.
- IPC-2224: Estructura de diseño de PCBs, formato de tarjetas para PCB, usando materiales orgánicos.
- IPC-2225: Estructura de diseño de PCBs, MCM-L, usando materiales orgánicos.
- IPC-2226: Estructura de diseño de PCBs, con interconexiones de alta densidad (HDI).
- IPC-2227: Estructura de diseño de PCBs, usando cableado discreto.

3.5.1 UBICACIÓN Y ORIENTACIÓN DE COMPONENTES:

El ensamble de una PCB consiste de la tarjeta, los componentes soldados y de los conectores. El diseño de la tarjeta tiene un impacto sobre la sencillez o complejidad para ubicar o añadir los componentes a la placa impresa, también influye en la confiabilidad del producto desarrollado. Entre otros, se deben tener en cuenta la topología de la tarjeta (clases y nivel, ver estándar en [41]), la tecnología de los componentes (**SMD** o **through hole**), y los métodos de soldado. Aunque por sí solos, estos elementos no hacen que la tarjeta funcione mejor, hace que sea más fácil el ensamble, la evaluación y la corrección de problemas. Como guías generales se tienen [41] [42] [63]:

1. Los componentes deben ser ubicados de forma tal que el diseño sea lo más limpio posible, y que los componentes estén organizados y/o alineados con espaciado uniformes.

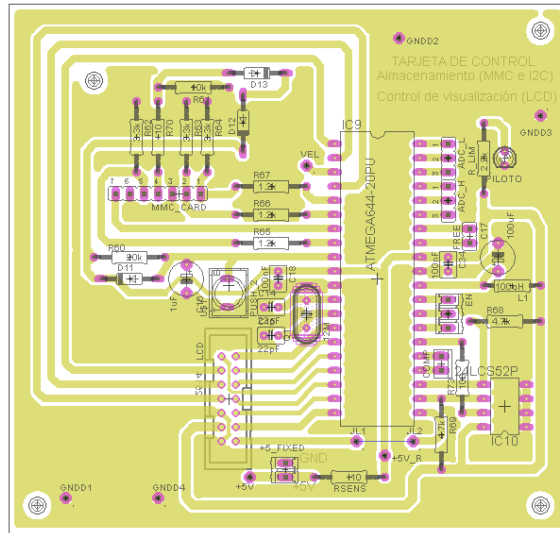
2. Los componentes deben estar orientados de tal manera que los bordes sean paralelos a los bordes de la tarjeta (aunque existen ciertas excepciones).
3. Si la tarjeta es soldada utilizando una máquina, los componentes *through hole* deben ser montados por el lado opuesto a la soldadura.
4. Cuando se posicionan componentes por ambos lados de la tarjeta, y cuando se mezclan tecnologías *through hole* y *SMD*, debe tenerse en cuenta que pueden requerirse múltiples fases de ensamble, lo que incrementa el costo y el número de puntos de falla potenciales.
5. No poner bases para integrados o condensadores de tantalio en la capa baja de la tarjeta (mejor conocida como “*bottom side*”), debido a que pueden agrietarse por fatiga relacionada con la temperatura.
6. Durante el diseño usar, en lo posible, cuadrículas de 100mil (2,5mm). Aunque cuadrículas de 20mil o incluso de 2mil pueden ser usados si se requiere para componentes que no tengan dimensiones estándar.
7. Condensadores polarizados y diodos deben ser orientados consistentemente a través de la tarjeta para hacer más fácil la inspección y evaluación de funcionamiento.
8. Permitir espacio adecuado a lo largo de los bordes de la tarjeta durante la ubicación de los componentes para acomodar el montaje del hardware.
9. Aquellos componentes que pesen más de 5g deben ser fijados mecánicamente si la placa experimenta vibraciones.
10. El control de temperatura durante los procesos de soldadura y de operación del circuito deben ser considerados a través de los procesos de diseño.
11. Usualmente las consideraciones eléctricas tienen prioridad sobre las consideraciones mecánicas cuando exista conflicto entre los dos, a menos que esto resulte en fallas mecánicas de la tarjeta.
12. Para tarjetas que involucren señales mezcladas (análogo y digital), los componentes deben estar separados (desacople) para minimizar los efectos del ruido de conmutación sobre los circuitos analógicos. Igualmente, los circuitos de alta potencia deben separarse (desacople) de aquellos de baja potencia y de bajo ruido.

Para mayor información se pueden consultar los respectivos estándares [41] [42].

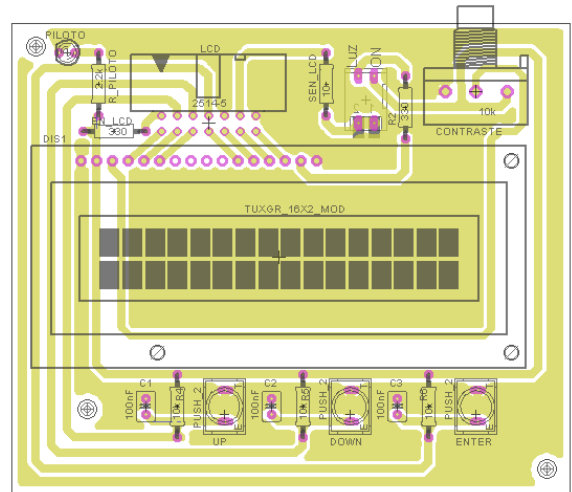
Siguiendo las recomendaciones de los estándares IPC-2221 e IPC-2222, así como algunas sugerencias propuestas por Mitzner [63], se diseña el ruteo de las placas, tal como se muestra en las figuras 3.5.2 y 3.5.3. Estas figuras muestran el diseño físico de las placas impresas (PCBs) para el sistema multi-sensorial. En la figura 3.5.2, la gráfica (a) corresponde a la tarjeta que contiene el microcontrolador, encargada de realizar el control de adquisición y operación de las placas restantes. En particular, se encarga de la adquisición y almacenamiento de los datos, control de activación/inactivación de los módulos del sistema, y del control de visualización de los datos. La gráfica (b) muestra el módulo LCD, diseñado para visualizar el estado del sistema y aquellos almacenados en la memoria externa. La gráfica (c) es el *driver* de corriente, encargado de inyectar la corriente requerida por la celda de carga. La gráfica (d) es la imagen de la tarjeta de adquisición de las señales provenientes de los sensores. En la figura

3.5.3 se encuentra el diseño de la fuente regulada, la cual tiene como objetivo brindar la alimentación dual a cada circuito del sistema a partir de una fuente no dual.

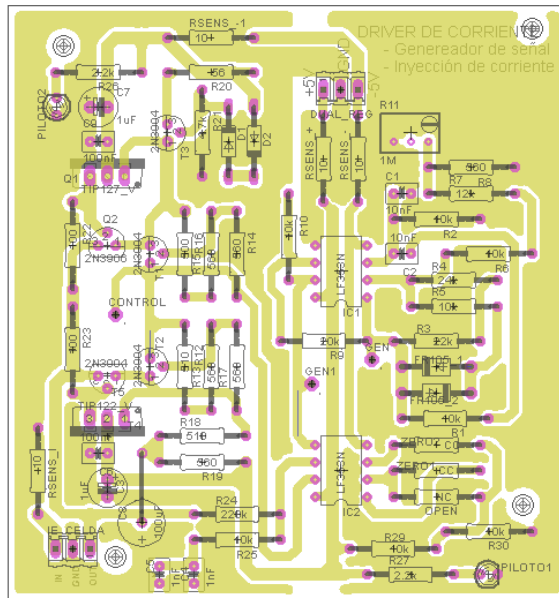
Figura. 3.5.2. Diseño de las tarjetas de circuito impreso. (a) Microcontrolador, (b) LCD, (c) Driver, (d) Adquisición.



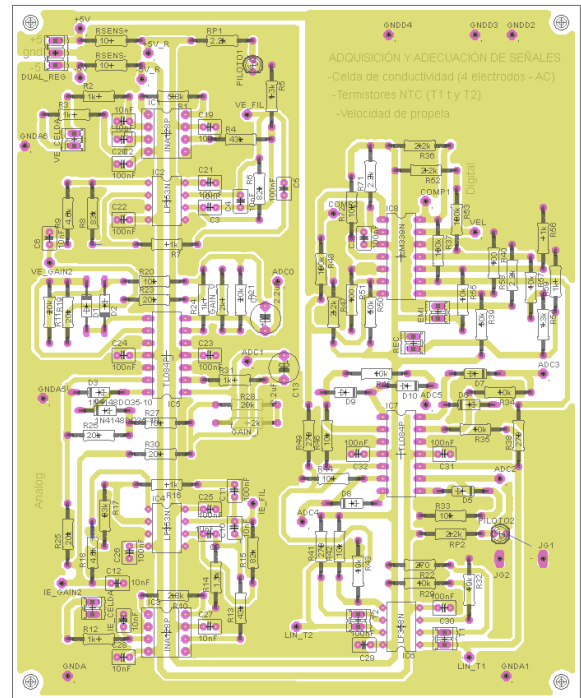
(a)



(b)

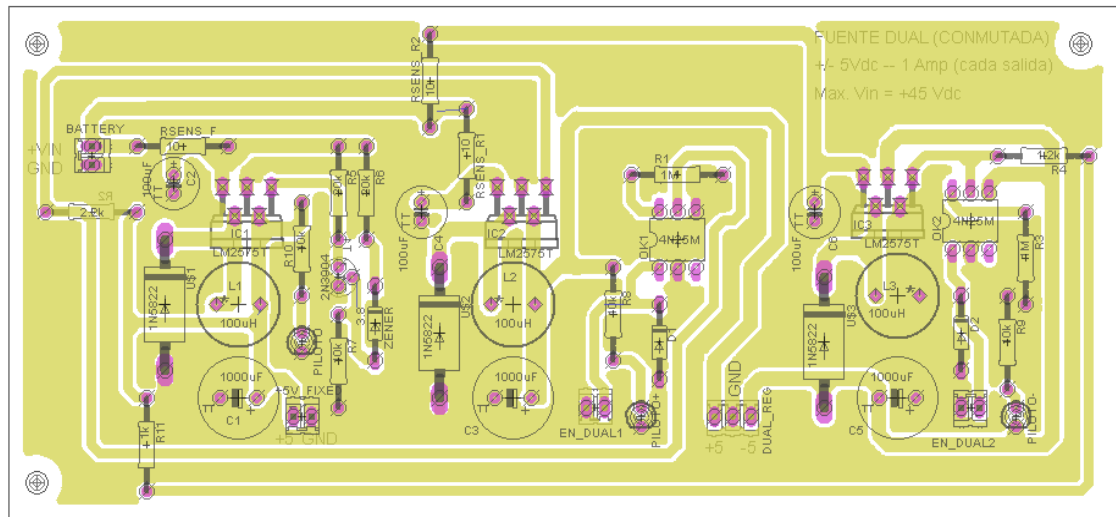


(c)



(d)

Figura. 3.5.3 Diseño de la tarjeta impresa para la fuente regulada.



4. MÓDULO DE CONTROL Y ANÁLISIS DE DATOS, Y EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA

4.1 INTRODUCCIÓN

La electrónica moderna ha sido diseñada basada en la portabilidad y el bajo consumo de potencia. En cada aplicación el consumo de potencia es esencial para la funcionalidad de un sistema, no sólo porque depende de la duración de la batería, sino también por los problemas de calentamiento que pueden surgir durante la operación. Tener un dato concreto de la potencia consumida, permite tomar decisiones y realizar ajustes para reducir las posibles fuentes de pérdida de energía y de calentamiento de los dispositivos. Como se menciona en este capítulo, dichas fuentes pueden ser de naturaleza *hardware* o *software*.

En la realidad siempre es posible encontrar fuentes de pérdida de energía, algunos se pueden evitar, mientras que otros, por limitaciones físicas y de tecnología, son imposibles de resolver. En este capítulo se estudian los métodos empleados en este trabajo para medir la potencia consumida por el sistema multi-sensorial implementado, además se propone una metodología, basado en la norma ISO 50001 [44], para evaluar el desempeño del sistema y encontrar posibles puntos de mejora. A partir de este conocimiento, se realiza una evaluación del sistema construido tanto a nivel *hardware* como *software*.

4.2 MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE POTENCIA ELÉCTRICA

Rajagopalan [71] propone un protocolo de evaluación detallado para el calculo de la eficiencia de un sistema eléctrico (midiendo potencia consumida por el sistema). La potencia puede ser medida bajo distintos niveles de carga (por ejemplo, 20%, 50%, o 100% de carga). Una vez la potencia es almacenada, la eficiencia para cada condición de carga, se puede calcular de acuerdo a la ecuación 28.

$$\eta = \frac{\sum_i P_{oi}}{\sum P_{input}} \quad (24)$$

Donde P_{oi} es la potencia de salida de la i -ésima salida. La potencia de entrada P_{input} , incluye todos los circuitos auxiliares que operan como fuente y que son requeridos durante la operación del sistema.

Para medir la potencia de entrada se puede optar por medir la corriente de entrada. Para medir dicha corriente pueden utilizarse dos técnicas: emplear un inductor a la entrada que funciona como sensor de corriente; o se puede emplear un método de segregación de cargas. El método de segregación de cargas consiste en permitir que la corriente fluya solo por una carga a la vez, dejando apagadas todas las demás.

Algunas dificultades se pueden presentar cuando se realizan las medidas:

- Las dificultades de acceso a los puntos de prueba, tanto de entrada y salida.
- El punto de medida de la potencia de salida puede afectar, de forma significativa, los resultados debido a grandes caídas a través de las pistas de cobre. De allí la importancia

de realizar un buen diseño de la(s) PCB(s).

- Las fuentes del circuito electrónico pueden tener mecanismos de control que pueden estar conectados a los componentes que dicho dispositivo alimenta.
- El desarrollo de un método de evaluación común y universal, y la instrumentación acompañante, se convierte en un reto debido a la multiplicidad y diversidad de topologías de circuitos.

Un procedimiento, etapa a etapa, propuesto por Rajagopalan [71] para medir la eficiencia, y que se utilizó en este trabajo, se menciona a continuación:

1. Identificar cada componente que hace parte del sistema electrónico.
2. Identificar como están conectados los componentes.
3. Las etapas en la medición de la eficiencia son:
 - a) Poner a operar cada fuente (en el caso de que hayan varias), como si cada una estuviera sola (segregación de cargas).
 - b) Determinar la potencia de entrada de cada fuente, de acuerdo a lo que se establece en el punto anterior.
 - c) Determinar la potencia a la salida, realizando la medición en el punto de carga.

Los siguientes pasos se repiten para cada una de las fuentes que se tenga en el sistema:

- I. Como una primera etapa, la fuente debe ser operacional. La evaluación de los voltajes de salida se deciden, usualmente, de acuerdo al rango completo de voltaje de salida que puede proveer la fuente.
- II. Se miden los voltajes de entrada y salida, V_{in} y V_{out} .
- III. Se posiciona un sensor para medir la corriente a través de la carga, I_{out} .
- IV. Se posiciona un sensor para medir la corriente de cada fuente I_{in} .
- V. La carga eléctrica es variada por etapas, desde el estado de “no carga” hasta el estado de “full carga”, a intervalos de corriente dados, y los cuatro parámetros I_{in} , V_{in} , I_{out} , V_{out} son tomados y almacenados.
- VI. Se calcula la eficiencia del sistema, para cada carga, empleando la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{I_{out} * V_{out}}{I_{input} * V_{input}} * 100 \% \quad (25)$$

En un sistema electrónico la eficiencia, a carga plena, no llega al 100%, por lo general se encuentra alrededor de los 90% a 95%. Esto lleva a pensar que siempre existe una oportunidad, aunque sea pequeña, de mejorar la eficiencia a carga plena. Sin embargo, en el caso de cargas bajas (corrientes pequeñas) la eficiencia decae de forma marcada.

Como el equipo electrónico gasta un tiempo significativo en estados de cargas bajas, existe una oportunidad de ahorrar/guardar energía, a través de una mejor gestión en la alimentación del sistema en **estados de cargas bajas**.

4.3 CONSIDERACIONES PRÁCTICAS PARA DISMINUIR EL CONSUMO DE POTENCIA POR HARDWARE

Existen varias oportunidades potenciales de mejorar la eficiencia sin sacrificar el rendimiento general del producto. Algunas oportunidades de mejora son [39] [51] [71] [84] [85]:

- Minimizar las pérdidas por cobre en la placa: Una posibilidad es incrementar el espesor y el ancho de la pista de cobre (optimización desde la PCB).

$$R = \frac{\rho * l}{A} \quad (26)$$

De acuerdo con la ecuación 26, un incremento en el ancho de la pista permite disminuir la resistencia al flujo de corriente. Sin embargo, esto es difícil de evaluar porque el área completa de la pista puede incrementarse de diversas maneras, ya sea minimizando las divisiones en los planos, los huecos en los planos o maximizando el ancho del plano.

- Utilizar reguladores conmutados: En el caso de que se estén empleando reguladores lineales, estos se pueden reemplazar por reguladores conmutados. Dichos reguladores, son convertidores síncronos de alta eficiencia. De acuerdo con Rajagopalan [71], este tipo de convertidores puede llegar a alcanzar una eficiencia de hasta el 95%, aunque esta medida es susceptible de cambio dependiendo de la carga que tenga el convertidor. Por ejemplo, los convertidores empleados en este trabajo, **LM2575-5V**, presentan una eficiencia de 77%, con un voltaje de alimentación de 12V y una carga de 1A.
- Utilizar inductores de bajas pérdidas: Los inductores que se emplean en la electrónica convencional son, por lo general, bobinas toroidales sobre un núcleo de hierro. Este tipo de inductores presenta pérdidas, que pueden localizarse, principalmente, en dos componentes: pérdidas en el cobre debido al embobinado del inductor y pérdida en el núcleo. Las pérdidas en el cobre son, típicamente, causadas por el factor I^2R en el embobinado. En este caso, se pueden emplear embobinados con baja resistencia (usando cables planos en vez de los circulares, por ejemplo) o conectar en paralelo los inductores (disminución de la corriente por cada inductor). Las pérdidas en el núcleo pueden disminuirse empleando nuevos materiales de ferrita en el núcleo del embobinado.
- Minimizar la resistencia en los contactos: Se refiere a las resistencias ohmicas que suelen presentarse en los contactos conector-*socket*, o incluso en los puntos de soldadura de los componentes (buscar una buena soldadura de los componentes).
- Utilizar dispositivos de próxima generación: Se refiere a la posibilidad de emplear nuevos dispositivos, que permitan un bajo perfil de pérdidas. Por ejemplo, MOSFET con pequeña carga de puerta y baja resistencia de encendido, y los nuevos controladores PWM que presentan mejores controles inteligentes. También, el uso de reguladores conmutados en vez de reguladores lineales, o emplear dispositivos digitales de bajo voltaje (pasar de dispositivos que requieren alimentación de 5V a 3,3V, por ejemplo).
- Emplear topologías de conmutación en paralelo: Las pérdidas, debidas a grandes corrientes, se pueden disminuir empleando un número mayor de MOSFETs en paralelo. Esto disminuye las pérdidas en proporción directa al cuadrado de la corriente.

- Disminuir las pérdidas en los periodos de inactividad: En general, las eficiencias de los sistemas electrónicos, cuando operan a *full* carga, superan el 80%. Sin embargo, cuando la operación de estos sistemas se debe a cargas parciales, o a estados de inactividad de algunos de los módulos dentro del sistema, se presentan oportunidades para la mejora en la eficiencia. En estados inactivos, es posible emplear técnicas para reducir las pérdidas.

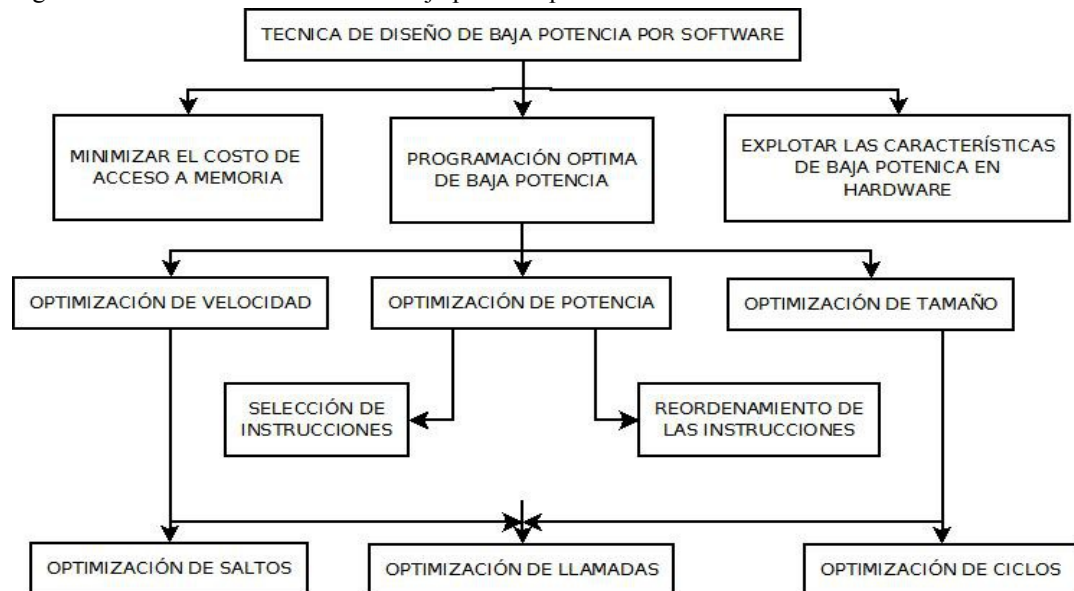
4.4 CONSIDERACIONES PRÁCTICAS PARA DISMINUIR EL CONSUMO DE POTENCIA POR SOFTWARE

En un dispositivo programable, el consumo de potencia se concentra en la arquitectura del sistema (tanto al *hardware* interno del dispositivo, como el externo a él) y en las instrucciones por *software*. En este tipo de dispositivos, el conjunto de instrucciones comienza a convertirse en un tema muy importante (en especial, cuando no se trata de dispositivos programables de aplicación específica), debido a que el software dirige la mayor parte de la actividad del sistema y, por lo tanto, puede permitir una disminución en el consumo de potencia, que, de acuerdo con Kirianaki [51], puede llegar a ser del 10% al 35% en el diseño final.

Uno de los dispositivos programables más conocidos y usados es el microcontrolador (en este trabajo se empleó un microcontrolador AVR de 8 bits, de baja potencia de la empresa ATMEL®, de referencia ATmega644). En un diseño de software, de baja potencia, el microcontrolador debe ser programado en un estilo de “**programación orientado al bajo consumo**” (ver sección 4.4.1).

4.4.1 DISMINUCIÓN DE CONSUMO DE POTENCIA A PARTIR DEL SOFTWARE

Figura. 4.4.1: Técnicas de diseño de baja potencia por software



Fuente: Kirianaki, Nikolay. Data acquisition and signal processing for smart sensors [51].

Las instrucciones y la forma como estas son ejecutadas están directamente relacionadas con el consumo de potencia de un microcontrolador. Por esta razón, la forma como se escribe un código puede llegar a reducir por mucho el consumo de potencia del sistema, tal como se muestra en la figura 4.4.1.

Selección de instrucciones y reordenamiento: Debido a que muchas secuencias posibles de código permiten cumplir la misma tarea, es posible seleccionar una secuencia de código adecuada que minimice los costos en energía y potencia.

Optimización de tamaño y velocidad: La optimización del tamaño de código tiene que ver con llevar todos los códigos idénticos, o funcionalmente similares, a las mismas subrutinas. La idea básica es reducir el numero de etapas fundamentales y los ciclos de reloj necesarios para la ejecución de una tarea dada. Esto abre una posibilidad para que el microcontrolador entre en un estado de inactividad por un periodo más largo, e incluso es una opción para disminuir la frecuencia de operación y/o la alimentación.

La reducción en el tamaño de código, reduce el número de accesos a memoria, y por tanto el consumo de energía. En lo posible, debe buscarse un balance entre la optimización del tamaño y la rapidez.

Optimización de los llamados (call) y saltos (jump o goto): En lo posible se deben evitar, o al menos reducir, los llamados y los saltos dentro de un programa. Lo más apropiado es lograr que el programa sea ejecutado de manera directa, en forma consecutiva, y con el menor numero de ramificaciones. Si los saltos son necesarios, es conveniente organizar el programa de tal manera que su probabilidad de ocurrencia sea la mas baja posible. También, se puede optar por transformar los llamados en saltos, debido a que los llamados requieren más tiempo de ejecución que los saltos.

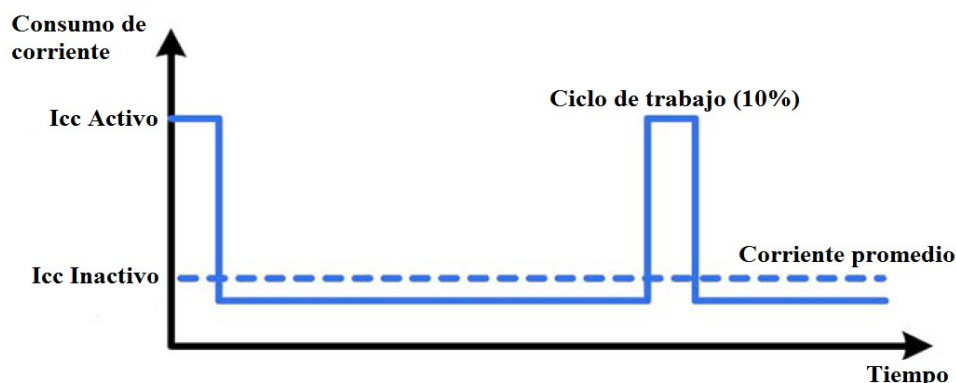
Optimización de ciclos: Todos los métodos para la optimización de ciclos pueden ser reducidos a un conjunto de dos reglas empíricas:

- Nunca hacer dentro de un ciclo, lo que es posible hacer fuera de él. Esto surge de la premisa de que el 90% del tiempo de ejecución se invierte en el 10% del código. Por tanto, un recurso para reducir el tiempo de ejecución de un programa es hallar los puntos calientes del mismo, y revisar todos los ciclos como un objetivo con potencial de optimización.
- Donde sea posible, librarse de la transferencia de control dentro de los ciclos. Esto consiste en la asociación de ciclos: las instrucciones deben reorganizarse para construir un sólo ciclo, en vez de varios que se repiten el mismo numero de veces.

Otra forma de eliminar ciclos es **no** usar ciclos pequeños, por ejemplo, remover las secuencias de código de control de un ciclo, simplemente repitiendo el cuerpo del ciclo el numero necesario de veces (sólo para ciclos pequeños).

Minimización de costo de acceso a memoria: Este es, usualmente, el cuello de botella tanto en potencia como en rendimiento. Las técnicas de reducción de potencia, relacionadas con la memoria, se concentran en los siguientes objetivos: disminuir el numero de accesos a memoria requeridos por un algoritmo, reducir la memoria total requerida por un algoritmo, hacer que los accesos a memoria sean lo mas cercanos posible al procesador del sistema (primero los registros, luego la memoria interna, por último la memoria externa).

Figura. 4.4.2: Consumo de potencia encontrado en aplicaciones cotidianas [39].



Explotar las características de baja de potencia del hardware: Se pueden aprovechar los modos de operación en inactividad que proveen los dispositivos programables. Por ejemplo, en algunas situaciones resulta más conveniente trabajar a alta frecuencia durante un periodo corto de tiempo y luego regresar al modo de inactividad por un periodo más extenso, que disminuir la frecuencia de operación por un tiempo muy largo [67]. Otro factor importante es el control de la temperatura, debido a que mayores temperaturas implica mayores consumos de potencia.

También, debido a que el procesador no se está ejecutando siempre (ver figura 4.4.2), y los periféricos no siempre están activos, se puede optar por tomar ventaja de los varios modos de operación en inactividad (*sleep modes*), que proveen los microcontroladores actuales, a través de los cuales se puede ahorrar energía. Dependiendo del modo de inactividad seleccionado así mismo será la disminución de la corriente de alimentación.

OPTIMIZACIÓN A TRAVÉS DE LENGUAJE DE ALTO NIVEL

Tal como lo expone Ortiz [65], la optimización por software se puede alcanzar desde el nivel de compilador, nivel de instrucciones y/o nivel de código fuente. En la actualidad, la mayor parte de los microcontroladores incluyen compiladores que permiten escribir el código en lenguaje de alto nivel (tales como C y C++) que, bien escrito, es más fácil de leer y mantener que un código escrito en lenguaje de bajo nivel (ensamblador). Además, el tiempo de desarrollo se reduce, es **reutilizable** y teniendo en cuenta ciertos cuidados es **portable**.

Para programar el microcontrolador en el desarrollo de este trabajo se usó lenguaje que, con la madurez de la tecnología para lenguajes de alto nivel y las nuevas arquitecturas de CPU, puede llegar a ser competitivo con programas escritos en ensamblador [59]. No obstante, siempre se hace necesario conocer las características y particularidades de la arquitectura y del compilador que se está empleando, para escribir de forma eficiente el código fuente [2] [8] [32].

A continuación se mencionan algunas sugerencias, cuando se escribe código fuente para microcontroladores en lenguaje C (Para mayor información pueden consultarse la nota de aplicación AVR035 de ATMEL [2] y Mann [59]):

- En lo posible, compilar con optimización de tamaño.
- Cuando sea posible usar variables locales.

- Usar el más pequeño tipo de dato aplicable. Si aplica usar variables no signadas (*unsigned*).
- Si una variable no local se referencia solamente dentro de una función, esta debe ser declarada de tipo estático (*static*).
- Agrupar datos no locales en estructuras cuando sea natural. Esto incrementa la posibilidad de direccionamiento indirecto sin recarga de punteros.
- Usar punteros con *offset* o declarar estructuras para acceder memoria mapeada (entrada/salida).
- Cuando sea aplicable emplear ciclos while.
- Usar contadores de ciclo decrecientes y pre-decremento cuando aplique.
- Acceder a memoria (entrada o salida) directamente (no usar punteros).
- Reducir el tamaño del segmento del vector de interrupción al valor que sea estrictamente necesario para la aplicación. Como alternativa, se puede concatenar todo el segmento de código dentro de una declaración y aquello será realizado automáticamente.
- Agrupar varias funciones en un módulo incrementa el factor de reutilización de código.
- En algunos casos, la optimización completa de velocidad resulta en un menor tamaño de código que la misma optimización completa de tamaño. Sin embargo, es adecuado compilar modulo a modulo para investigar cual da mejor resultado.
- En lo posible evitar realizar llamado a funciones dentro de la rutina de interrupción.
- Usar el modelo de memoria mas pequeño que sea posible.
- Todas las constantes y los literales deben ser ubicados en la memoria FLASH.
- Evitar el uso de variables globales si las variables son locales por naturaleza (ayuda a ahorrar espacio de código). Las variables locales se localizan en la pila dinámica y son removidos cuando la función ya no esta en uso.

4.4.2 MEDICIÓN DEL CONSUMO DE POTENCIA EN SISTEMAS MICROPROCESADOS

Existen diversas formas para medir el consumo de potencia en un sistema microcontrolado, tanto teóricas como experimentales. Por ejemplo, estimar la disipación de potencia debido a la ejecución de un fragmento de código o mediante la aproximación de un modelo de bajo nivel (a nivel de compuertas, por ejemplo). También es posible obtener una solución en un nivel más alto, basándose en la frecuencia de ejecución de una secuencia de instrucciones. En una primera aproximación, se puede tomar como base la actividad de conmutación de los buses (direcciones, datos y control), ya que esta es representativa de la potencia disipada en el procesador. Una desventaja de estas aproximaciones, es que para llevar a cabo este método se necesita una información adicional acerca de la forma como el código y los datos son mapeados en el espacio de direcciones.

Kirianaki [51], propone un análisis de potencia a “nivel de instrucciones”, en el cual se establece un modelo de potencia a este nivel; para esto se requiere que los costos de potencia asociados con cada instrucción sean conocidos, así como también aquellos asociados con pares de instrucciones consecutivas.

Chang [17] y Sheayun [81] proponen, para el análisis de los procesadores RISC y el ARM7TDMI, realizar medidas con la ayuda de dos condensadores que, alternadamente, provean la energía necesaria del sistema bajo evaluación. En este caso la diferencia de voltaje entre los condensadores permite estimar la energía consumida. Aunque los dos condensadores son el punto central de esta técnica, representan una desventaja porque el dispositivo no opera a alimentación constante. Además, las características no ideales de los conmutadores que incluye el diseño puede producir imprecisiones en la medida.

Tiwari [93] propone utilizar un multimetro digital para estudiar el consumo de potencia de tres procesadores comerciales, basándose en un modelo de energía a partir de las instrucciones. Sinevriotis [86], por su parte, propone emplear un miliampérmetro de precisión para evaluar el consumo de los procesadores ARM7 y DSP5615. Russell [76] usa una resistencia para medir el valor promedio de la corriente consumida por un procesador. Más tarde, Varma [97] mejora la propuesta de emplear resistencias, midiendo con mejor exactitud, comparado con Sinevriotis, el consumo de un procesador Xscale de Intel.

Kavvadias [47], Konstantakos [53] y Laopoulos [56] proponen el uso de espejos de corriente. Con este método, la corriente es duplicada, de tal forma que la medida de la corriente no afecta aquella que consume el procesador. En este caso, no se almacena la corriente promedio consumida, sino una onda de corriente instantánea para cada ciclo de reloj.

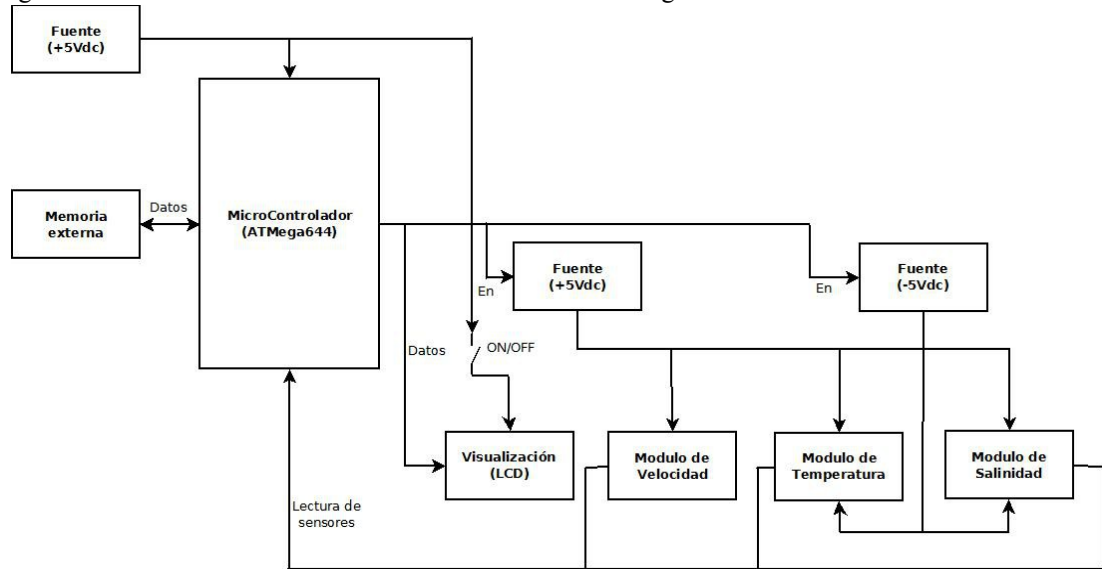
4.5 ALIMENTACIÓN, REGISTRO Y CONTROL

En la figura 4.5.1 se muestra el panorama general del sistema implementado. Este sistema, incluyendo el diseño y construcción de las tarjetas impresas y el código fuente, se realizaron siguiendo las buenas prácticas y recomendaciones encontradas en la literatura estudiada, y mencionadas en las secciones 3.5 , 4.3 y 4.4 .

El sistema, figura 4.5.1, cuenta con tres bloques distintos de alimentación, dos de ellos son fuentes conmutadas de $5V_{dc}$ y el otro es una fuente de $-5V_{dc}$. Todas las fuentes han sido construidas a partir de reguladores conmutados (de referencia **LM2575-5V**), con capacidad para manejar corrientes de hasta 1A a su salida. El circuito diseñado para las fuentes (figura 3.5.3) permite obtener una fuente dual a partir de una única fuente de continua con un valor entre $6V_{dc}$ y $40V_{dc}$ (a partir de $6V_{dc}$ para garantizar $\pm 5V_{dc}$ a la salida), de tal forma que todo el sistema puede ser alimentado con una batería sin requerir circuitos especiales adicionales.

En este trabajo la alimentación de todo el sistema consistió de una fuente simple de $12V_{dc}$, con la cual se pudo garantizar la salida dual que necesita el sistema. Se recomienda que cuando se usen estos conversores (LM2575-5V), se tenga en cuenta el voltaje de alimentación de los mismos, ya que un voltaje de alimentación muy bajo (inferior a $6V_{dc}$, cuando todas las placas estaban conectadas) puede ocasionar valores fluctuantes por debajo del valor deseado (en este caso $\pm 5V_{dc}$).

Figura. 4.5.1: Sistema de medición multi-sensorial. Panorama general.



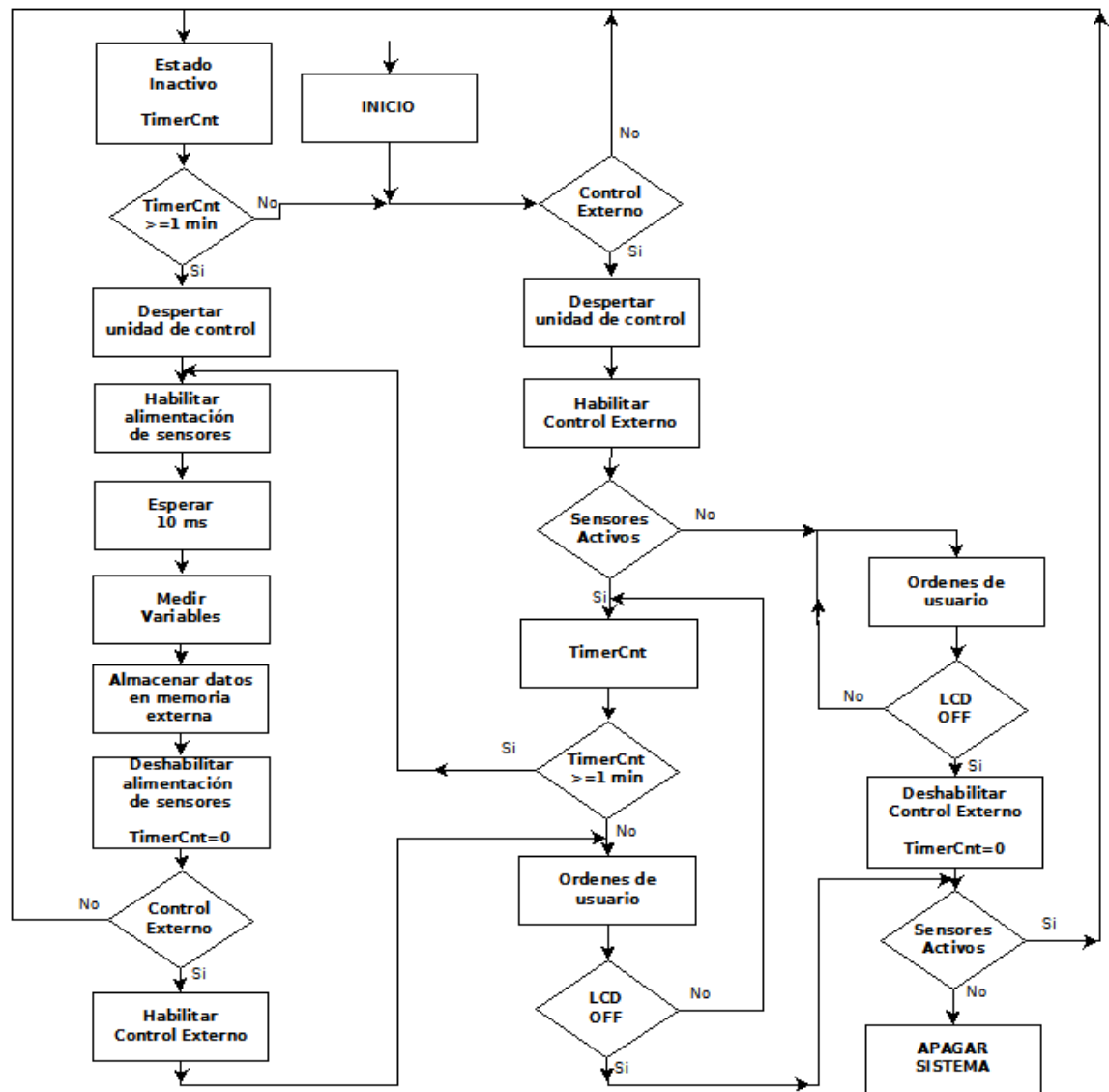
Con el objetivo de controlar la activación de los módulos del sistema, las fuentes encargadas de alimentar los módulos de sensado (velocidad, temperatura y salinidad), pueden ser habilitadas o inhabilitadas desde el módulo de control (figura 3.5.2a). Esta característica permite apagar o encender la fuentes según la necesidad del circuito de control, de tal forma que en periodos de inactividad los módulos puedan ser apagados, incluyendo las fuentes de alimentación de los módulos sensoriales. Con esto, se disminuye el consumo de corriente en periodos no productivos, pero también se generan picos de corriente en las transiciones de encendido que pueden generar ruidos indeseados, por lo cual se utilizaron dos técnicas para minimizar este problema: añadir capacitores de desacople y esperar un tiempo para que el voltaje a la salida se estabilice (10ms).

Tal como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 4.5.1, el microcontrolador regula practicamente toda la operación del sistema, tanto la activación de los módulos sensoriales como el almacenamiento de los datos en la memoria externa. El único módulo que no se activa desde el microcontrolador es el que contiene el LCD. Esta unidad debe ser encendida manualmente, y puede ser operada con o sin luz de fondo. El módulo de visualización es controlado (de forma externa) por el usuario, debido a que este módulo sólo es requerido cuando exista interacción entre el sistema y su operador.

En la figura 4.5.2 se presenta un diagrama de flujo de la operación global del sistema. En esta figura se detalla el flujo de la información durante los procesos de adquisición, almacenamiento y visualización de los datos. Cuando el sistema se enciende por primera vez, la unidad de control espera que el usuario tome el control del sistema, si al cabo de 1 minuto el usuario no responde, el sistema empieza la toma de datos.

La toma de datos, a groso modo, consiste en el encendido de los módulos de sensado, para la medición de las variables deseadas. Este proceso inicia con la habilitación de las fuentes que alimentan los circuitos de medición.

Figura. 4.5.2: Diagrama de flujo del sistema de control.



El flujo de datos, durante la medición de las variables se explica más adelante, utilizando los diagramas de flujo de las figuras 4.5.3, 4.5.4 y 4.5.5. Una vez los datos han sido tomados, se procede almacenarlos en la memoria externa. La memoria externa es una memoria EEPROM de 512kbits de capacidad (referencia **24LC512** de la empresa microchip), con un tiempo de escritura máximo de 5ms, capaz de operar en un rango de voltaje entre 1,8V y 5,5V, y empleada en aplicaciones de baja potencia. Esta memoria se comunica con el microcontrolador a través de la interfaz I²C. Se destaca el ahorro de energía en estados inactivos, con un voltaje de alimentación de 5,5V es de alrededor 100 μ A, mientras que durante el proceso de lectura asciende a 400 μ A y en escritura se eleva a 5mA [62]. La memoria se ha dividido en cuatro bloques (un bloque para cada sensor), lo cual quiere decir que se pueden almacenar 4kB de

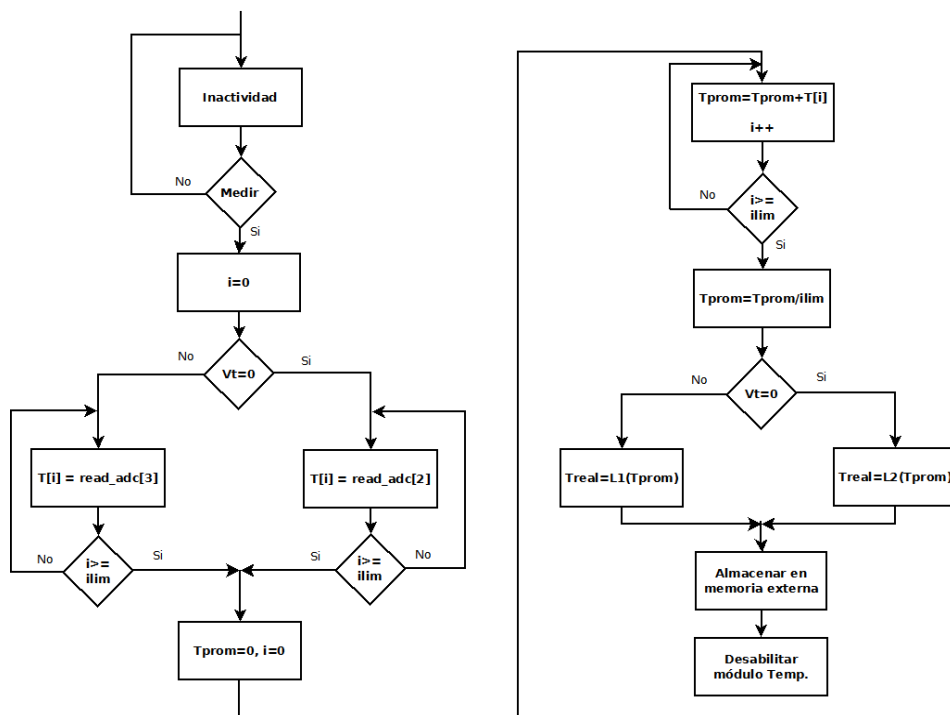
datos en punto flotante (cada dato en punto flotante requiere 4Bytes en el formato IEEE-754 de 32bits). De acuerdo con esta capacidad de memoria y teniendo en cuenta que el tiempo de muestreo es de 1 min aproximadamente, se pueden almacenar datos durante 68 horas.

Una vez los datos han sido almacenados en la memoria externa, el módulo de control entra en estado de inactividad, hasta que pasen otros 1 minutos o hasta que el usuario pida el control externo del sistema. Cuando el usuario toma el control del sistema (módulo de visualización activo), tiene la opción de cancelar la toma de datos o de permitir la ejecución normal de dicha toma de datos. En el modo de control externo, el usuario puede revisar el historial de datos almacenados en la memoria externa o ver en pantalla los datos en tiempo real.

En la figura 4.5.3 se muestra el diagrama de flujo del programa para medir temperatura. En esta medida se destinan los canales de conversión analógico-digital del 2 al 5 del microcontrolador, ya que cada termistor requiere de dos canales de conversión distintos. Como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 3.3.3, debido al bloque de corrección de signo existen dos salidas de voltaje para un mismo termistor, una para los voltajes positivos y otra para los voltajes negativos provenientes del puente de linealización; su selección dependerá del valor 0 o 1 que se tenga a la salida del circuito comparador (ver figura 3.3.3).

Como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 4.5.3, cuando el módulo de control da la orden de medir la temperatura, el microcontrolador revisa si el comparador tiene un nivel alto o bajo a su salida (variable v_i en la figura 4.5.3), y de acuerdo con este valor se elige leer por el convertor 2 o 3. Esta secuencia de lectura se realiza cuatro veces (en este caso, $i_{lim}=4$), con el objetivo de realizar un promedio entre cuatro muestras distintas, con el fin de tener un valor más estable de temperatura (indirectamente se esta realizando una especie de filtrado digital).

Figura. 4.5.3: Diagrama de flujo para la medición de temperatura.



Una vez se obtiene el promedio de los datos leídos, se pasa a calcular el valor de la temperatura del medio (rotulado en la figura 4.5.3 como T_{real}) que corresponde a ese voltaje promedio. Una vez más se acude al valor v_t del comparador, para saber si se está trabajando en el rango alto o bajo de temperaturas (ver sección 3.3.2) y de acuerdo a esto seleccionar entre las ecuaciones 21a o 21b. En el diagrama de bloques de la figura 4.5.3, L1 y L2 corresponden a estas ecuaciones. Finalmente, después de calcular el valor de temperatura se procede a almacenar este valor en la memoria externa.

A continuación se muestran los fragmentos más representativos del código fuente, que implementa la aplicación descrita en el diagrama de bloques de la figura 4.5.3.

Se empieza por leer los datos con los conversores ADC del microcontrolador. Como se desea una resolución de conversión de 12bits se aplica la técnica de sobremuestreo.

```
for(i=0; i<16; i++){
    if(PINC.2==1){
        data_adc[2]+=read_adc(2);}
    else{
        data_adc[2]+=read_adc(3);
    }
}
```

//Desplazamiento de dos posiciones de los datos

```
data_adc[2]/=4;
```

```
j++;
```

Se realiza un promedio con 4 muestras de voltaje para disminuir fluctuaciones en los valores medidos (filtro digital).

```
if(j<5){
    T1[j]=data_adc[2]*0.00122; //Resolución de 12 bits
    (1,2mV).
}else{
    T1[0]=0;
    for(i=1; i<5; i++){
        T1[0]+=T1[i];
    }
}
```

```
T1[0]/=4; //Promedio entre cuatro muestras de temperatura.
```

Una vez se tiene el voltaje asociada con la temperatura del sistema, se procede a relacionar el voltaje medido con la temperatura respectiva.

//Calculo de temperatura

```
if(PINC.2==1){ //Rango inferior de temperatura
```

```
T1[0]*=-3.45;
```

```
T1[0]+=21.48;
```

```
}else{ //Rango superior de temperatura
```

```
T1[0]*=8.55;
```

```
T1[0]+=21.71;
```

```
}
```

Una vez se ha calculado la temperatura, se almacena este dato en la memoria externa. La variable “escritura” es una variable global (tipo flotante), la cual es accedida por la función `write_float` a través de punteros (por este motivo no se necesita especifica en el argumento de la función cual es el dato que se desea almacenar). Una vez se ha completado un proceso de escritura, se actualiza la nueva dirección de escritura disponible.

```
escritura=T1[0];
```

```
PORTC.4=0;
```

```
if(dir_escLtem1_ptr<0xFB){
```

```
    dir_escLtem1_ptr=write_float(dir_escHtem1_ptr,dir_escLtem1_ptr);
```

```
}else{
```

```
    dir_escLtem1_ptr=write_float(dir_escHtem1_ptr,dir_escLtem1_ptr);
```

```
    dir_escHtem1_ptr++;
```

```
    dir_escLtem1_ptr=0x00;
```

```
}
```

```
if(dir_escHtem1_ptr==0xC0 && dir_escLtem1_ptr>=0x00){
```

```
    dir_escHtem1_ptr=0x80;
```

```
    dir_escLtem1_ptr=0x00;
```

```
}
```

```
PORTC.4=1;
```

```
}
```

La función *write_float* se muestra a continuación³⁵.

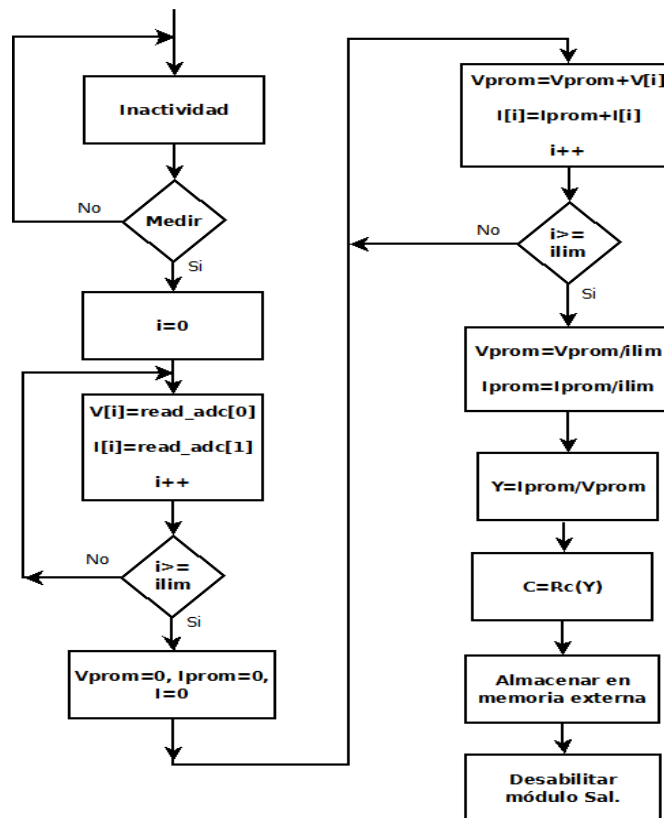
La función *eeeprom_write* permite realizar la escritura de un dato, tipo *char*, en la memoria externa usando la interfaz I²C.

```
void eeeprom_write(unsigned char addressH, unsigned char
addressL, unsigned char dat){
    i2c_start();
    i2c_write(EEPROM_BUS_ADDRESS);
    i2c_write(addressH);
    i2c_write(addressL);
    i2c_write(dat);
    i2c_stop();
    /*10ms delay to complete the write operation*/
    delay_ms(15);
}
```

La función *write_float* usa la función *eeeprom_write* para escribir un dato, tipo flotante en formato IEEE754 de 32 bits, en la memoria externa usando la interfaz I²C.

```
unsigned char write_float(unsigned char addH, unsigned char
addL){
    PORTC.4=0;
    eeeprom_write(addH, addL,*(escritura_ptr+0));
    eeeprom_write(addH, addL+1,*(escritura_ptr+1));
    eeeprom_write(addH, addL+2,*(escritura_ptr+2));
    eeeprom_write(addH, addL+3,*(escritura_ptr+3));
    addL+=4;
    return (addL);
    PORTC.4=1;
}
```

Figura. 4.5.4: Diagrama de flujo para la medición de salinidad.

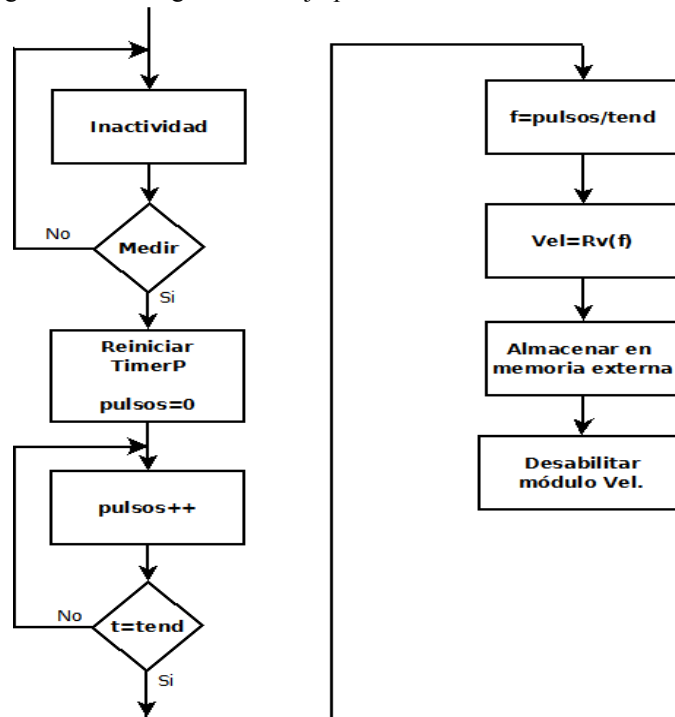


35 Sólo se muestran los fragmentos de código que corresponden a la temperatura. Aquellos para medir salinidad y velocidad son muy similares y no se presentan en este documento.

El diagrama de flujo para la medición de salinidad se muestra en la figura 4.5.4. La metodología es similar a la seguida para medir temperatura. En este caso los conversores ADC empleados son el número 0 y 1, para medir el voltaje y la corriente a través de la celda, respectivamente. Con el objetivo de minimizar la fluctuación de los datos, se toman 4 muestras (i_{lim} en el diagrama de flujo) y luego se procede a realizar un promedio entre las muestras medidas, tanto para el voltaje como para la corriente. A partir de estos valores, se calcula la conductancia del volumen de agua dentro de la celda, y posteriormente se emplea la ecuación 20 para conocer el valor de la conductividad, en mS/cm, del agua. Al tener este dato, se procede a almacenarlo en la memoria externa.

Para medir velocidad se utilizó el algoritmo mostrado en el diagrama de flujo de la figura 4.5.5. La idea es contar el numero de pulsos que ocurren por el giro de las aspas de la propela, durante un tiempo equivalente a 40 segundos (t_{end} en el diagrama de flujo). Al finalizar ese tiempo de inspección se calcula la frecuencia de giro de la propela y se utiliza la ecuación 23 para calcular la velocidad del flujo de agua que atraviesa la propela. En este caso, se ha optado por no dividir el numero de pulsos entre el numero de aspas, debido a que esto representa un consumo extra, innecesario, para calcular la velocidad. Una vez se conoce la velocidad, se procede a guardarla en la memoria externa.

Figura. 4.5.5: Diagrama de flujo para la medición de velocidad.



En los diagramas de flujo de las figuras 4.5.3, 4.5.4 y 4.5.5, se tiene un bloque al finalizar cada lectura, que corresponde a la inhabilitación del módulo de medida respectivo. Esta inhabilitación se realiza de forma simultánea para los tres sensores, al apagar la fuente dual desde el módulo de control.

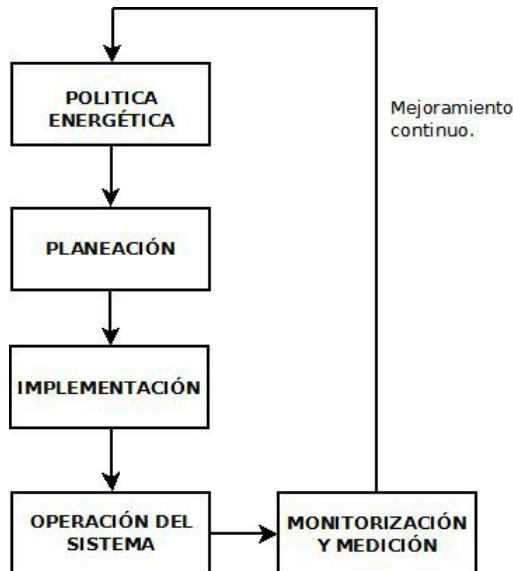
4.6 METODOLOGÍA PARA LA MEDICIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

La metodología propuesta a continuación se basa en la normativa ISO 50001 [44] para la evaluación de eficiencia energética. En ningún caso se pretende una aplicación directa de tal norma, mas bien es una adaptación de ella a la política de gestión de energía y medición de eficiencia en el sistema multi-sensorial desarrollado en el proyecto.

Un sistema de gestión de energía es un conjunto de elementos interrelacionados (o que interactúan entre sí) para establecer políticas energéticas y objetivos en cuanto al desempeño energético. En la figura 4.6.1 se muestra el esquema de gestión propuesto:

- **Política energética:** Se refiere al total de intenciones, disposiciones y/o direccionamientos relacionados con el desempeño energético. En este caso desarrollar un sistema multi-sensorial subacuático, de bajo consumo energético, de tal forma que sólo consuma energía en los periodos de medición, y que en cualquier otra situación entre en un estado de bajo consumo (de preferencia consumo nulo).

Figura. 4.6.1: Modelo del sistema de gestión de energía.



- **Planeación:** Se refiere al conjunto de acciones y/o procedimientos a seguir, con el fin de cumplir con los objetivos propuestos en la política energética. En este caso: disminución del consumo de potencia a partir del aprovechamiento de los estados de inactividad del sistema, disminución de impedancias inducidas o pérdidas de energía por calentamiento (diseño de PCB), y empleo de *hardware* configurable (DSP, FPGAs, Microcontrolador, Psoc, etc.) de acuerdo a la necesidad y disponibilidad de recursos.
- **Implementación:** Desarrollo de software (rutinas, subrutinas, etc.), y/o diseño e implementación de *hardware* (PCBs, sensores, visualización, etc.). En este caso: Escribir código para la unidad microcontroladora, a partir de lenguaje de alto nivel desarrollado con base en buenas prácticas de programación (prácticas de bajo consumo

energético), empleo de dispositivos de bajo consumo, y de reguladores conmutados para alimentación de los módulos, diseño de la PCB orientada a la disminución de consumo por calentamiento y/o impedancias inducidas (estándar IPC-2221).

- **Operación del sistema:** Se refiere a la puesta en marcha del sistema incluyendo cada uno de los módulos que lo componen. Esto es: Ensamble de cada uno de los módulos, prueba de funcionamiento y/o calibración de los sensores.
- **Monitorización y medición:** Se refiere a la medición del consumo de potencia de cada módulo o tarjeta importante del sistema implementado (por ejemplo, bloque de linealización, módulo de adquisición, bloque de filtrado, módulo de visualización, módulo de control, etc.).

El modelo planteado en la figura 4.6.1 se puede entender de la siguiente manera: Inicialmente se plantea una política de gestión para alcanzar el desempeño energético deseado, se realiza la planeación e implementación de dicha política; posteriormente, se pone en funcionamiento el sistema y se estudia su desempeño, evaluando si cumple con los requerimientos de la política planteada. Después de realizar esta evaluación, se centra la atención en los puntos susceptibles de ser mejorados, a partir de los cuales se plantea una nueva política de gestión más robusta, y el ciclo comienza de nuevo. Este ciclo, se repite cada vez que se encuentren puntos susceptibles de mejora (de allí la etiqueta de mejoramiento continuo).

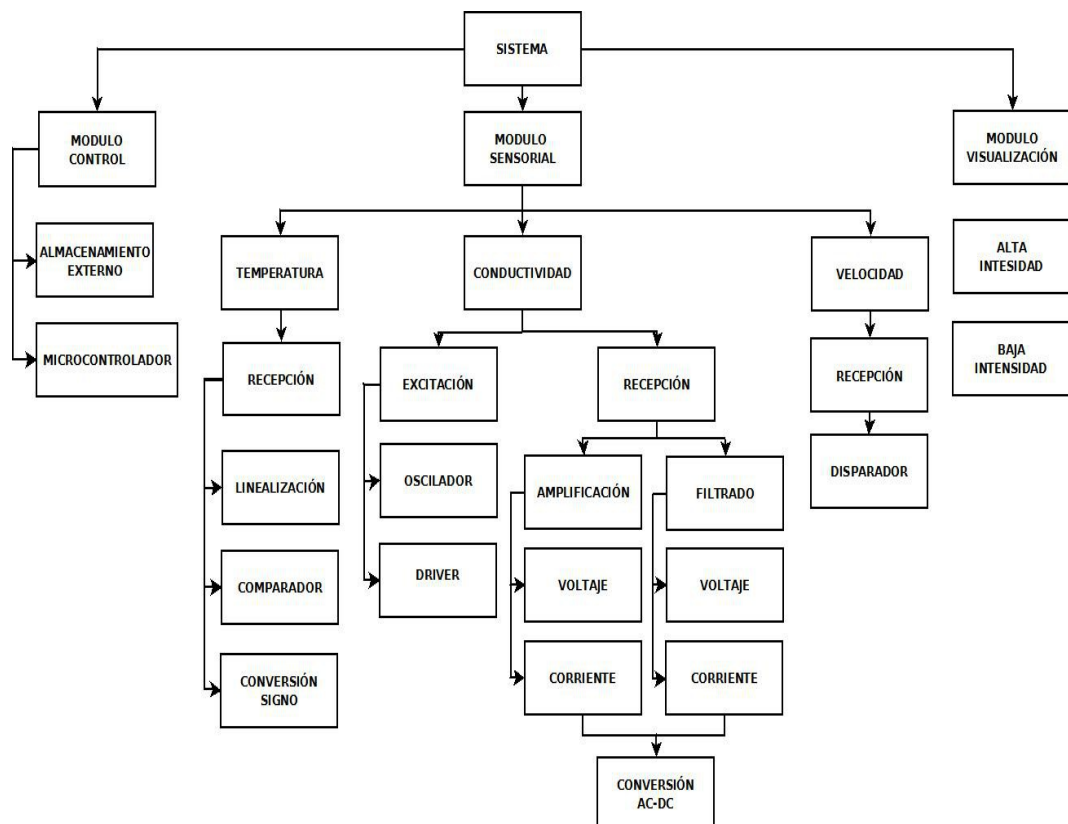
Desempeño energético:

El concepto de desempeño energético, de acuerdo con la ISO50001 [44], se compone de los siguientes ítems, los cuales deben ser tratados en conjunto y no como entidades separadas:

- **Consumo energético:** En el contexto de este trabajo, se refiere a la potencia/energía consumida como consecuencia de la operación del sistema (carga completa, sistema con módulos inactivos, estado de operación inactivo, etc.).
- **Eficiencia energética:** En términos generales se refiere a la eficiencia en la conversión de energía. Una forma de calcularla es:
$$\frac{\text{Energía requerida}}{\text{Energía usada}}, \quad \frac{\text{Potencia salida}}{\text{Potencia entrada}}$$
 Como se puede ver esta definición de eficiencia se adapta muy bien cuando se habla de equipos que convierten energía (ej. conversores dc-dc, elementos piezo-eléctricos, motores, reguladores, etc.). En el caso de un amplificador operacional, el tema no es tan inmediato ya que no es posible identificar un proceso de conversión de energía.
- **Intensidad energética:** Se calcula como el inverso de la eficiencia energética.
- **Uso específico de la energía:** Se refiere al tipo de aplicación a la cual se destina la potencia: por ejemplo, alimentación de cada una de las tarjetas electrónicas que componen el sistema, alimentación de sensores, etc.

4.7 MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE POTENCIA DEL SISTEMA MULTI-SENSORIAL IMPLEMENTADO

Figura. 4.7.1: Identificación de los bloques para medición de desempeño energético.



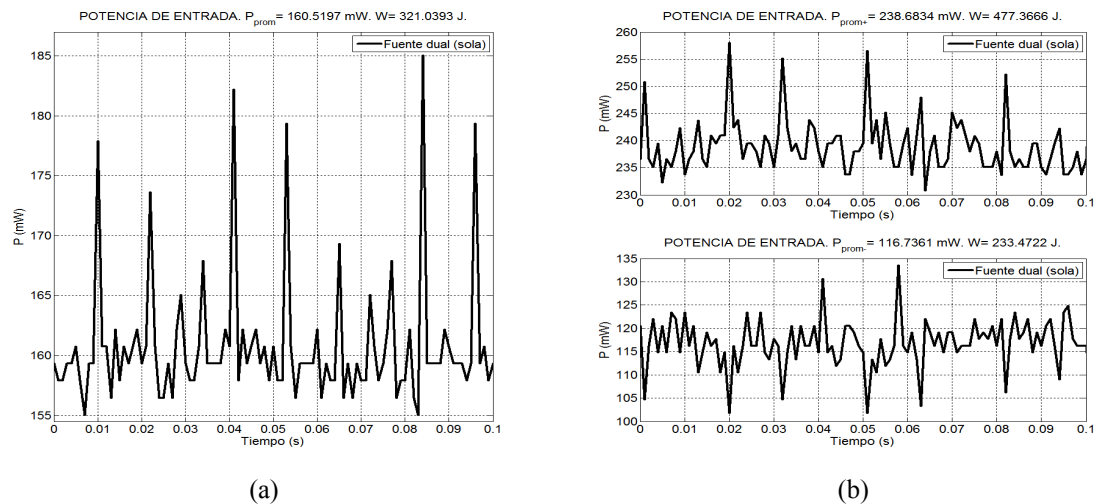
El primer paso en la medición del consumo del sistema es la identificación de cada uno de los bloques que componen el sistema multi-sensorial. Esta tarea se ha realizado en la figura 4.7.1, en la cual se ha discriminado cada bloque de procesamiento por separado, y se ha detallado como está compuesto cada módulo. Una vez identificados, de forma detallada, cada uno de los componentes del sistema se plantea una secuencia de pruebas para evaluar el consumo de potencia. En el anexo AI.4 se pueden mostrar fotos de las placas y de la plataforma implementada para sumergir los sensores al agua.

Las pruebas de consumo se realizaron, cada una, durante 2000 segundos (aprox. 33 min.), con una frecuencia de muestreo de 1kHz, empleando un sistema de adquisición de señales, marca Agilent serie U2761A de National Instruments. La potencia y energía consumidas en cada caso, se calcularon utilizando las ecuaciones 10 a 13 de la sección 1.9. El método para realizar el cálculo experimental de potencia consistió en medir el voltaje de alimentación de cada tarjeta, bajo una condición particular de operación, así como la corriente que fluye por ella. Cada tarjeta, tiene una resistencia de pequeño valor ($10\Omega \pm 5\%$), la cual sirve para medir su corriente de alimentación, lo que implica que por cada volt medido en la resistencia la incertidumbre en la corriente medida es de 5mA (relación lineal), adicional al error debido al instrumento.

Las figuras 4.7.2 a 4.7.8, muestran los consumos de potencia en los primeros 100ms de operación. La energía (W), mostrada en cada una de estas figuras, ha sido calculada integrando, numéricamente, la potencia durante todo el tiempo de operación del sistema (2000 segundos) tal como se mencionó en la sección 1.9 (ecuación 11). En la figura 4.7.9, se muestra la distribución de potencia para cada uno de los casos estudiados durante la evaluación de consumo del sistema multisensorial implementado. Con base en esto y en lo mencionado en la sección 4.2, se establece el siguiente conjunto de pruebas:

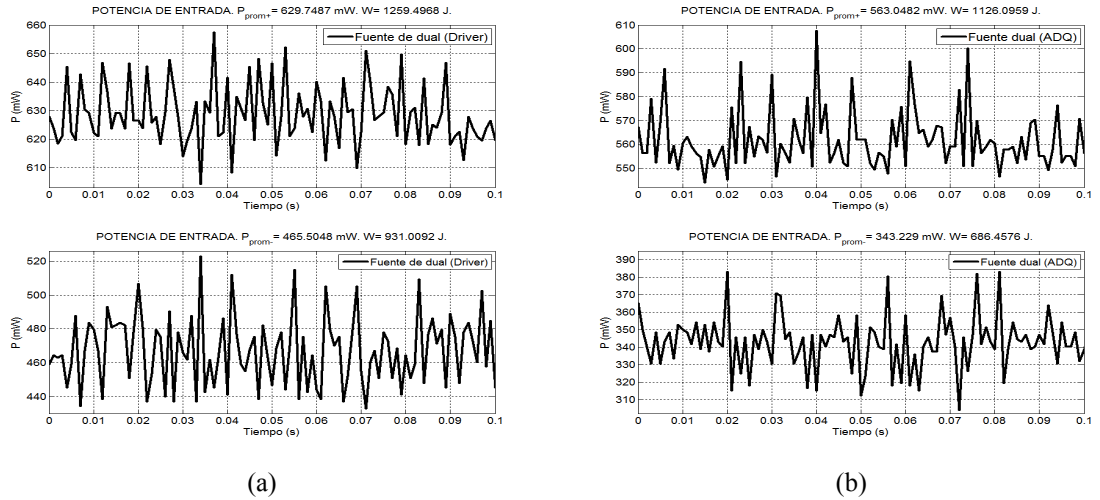
1. Medir el consumo de la fuente regulada sin carga (figura 4.7.2). En este caso, se tienen en cuenta las tres fuentes (la fija y las dos conmutadas) operando durante todo el periodo de evaluación sin conectar ninguna de las cargas. La gráfica 4.7.2(a) se refiere al convertor que siempre esta activo (alimentación del microcontrolador). La gráfica 4.7.2(b) incluye los tres convertidores, el que siempre está activo (fijo) y los de la fuente dual que alimentan los módulos sensoriales (conmutados), como se muestra en la figura 4.5.1.

Figura. 4.7.2: Potencia de entrada de la fuente dual (sin conectar carga). (a) Primer convertor DC-DC, (b) Tres convertidores DC-DC.



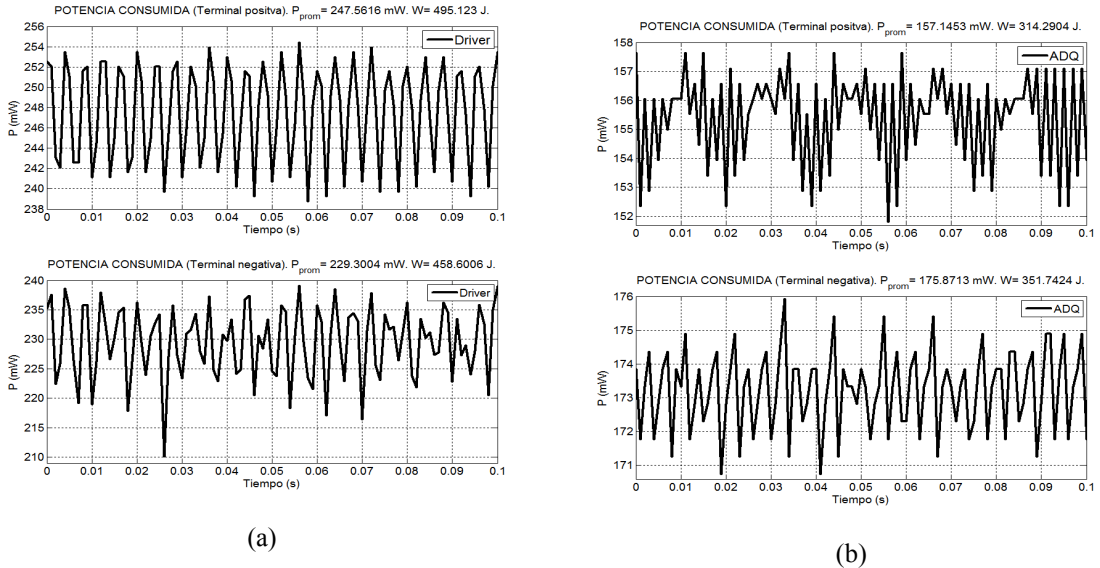
2. Medir el consumo de la fuente regulada cuando se conectan el driver de corriente (figura 4.7.3(a)) y la tarjeta de adquisición de señales (figura 4.7.3(b)). En la figura 4.7.3, se muestra la potencia de entrada de la fuente dual cuando se han conectado el *driver* de corriente y la tarjeta de adquisición. En esta figura, los rótulos P_{prom+} y P_{prom-} se refieren a la potencia de entrada medida en los convertidores conmutados de +5V y -5V, (no se cuenta el fijo), respectivamente. Cada convertor en la tarjeta de alimentación cuenta con una resistencia de 10Ω para medir la corriente. Se puede notar como la corriente pedida por los convertidores aumenta al conectar cada una de las cargas. En las figuras 4.7.2(b) y 4.7.3 se muestra como la potencia consumida por la fuente conmutada aumenta de 355,42mW ($P_{prom+} + P_{prom-}$, sin carga) a 1095mW ($P_{prom+} + P_{prom-}$) y 906,28mW ($P_{prom+} + P_{prom-}$) cuando se conectan el *driver* de corriente y la tarjeta de adquisición, respectivamente.

Figura. 4.7.3: Potencia de entrada de la fuente dual. (a) driver conectado, (b) ADQ conectado.



3. Medir el consumo de la tarjeta que contiene el driver de corriente (figura 4.7.4(a)) y de la tarjeta de adquisición de señales (figura 4.7.4(b)).

Figura. 4.7.4: Potencia consumida. Arriba: terminal positiva. Abajo: terminal negativa. (a) Driver de corriente, (b) Tarjeta de adquisición.



En la figura 4.7.4 se muestran las potencias y energías consumidas por la tarjeta de adquisición (figura 4.7.4(b)) y el *driver* de corriente (4.7.4(a)). En cada caso, se ha calculado la potencia consumida por el sistema a través de sus terminales positiva (P_{prom+}) y negativa (P_{prom-}). Como es de esperarse, el *driver* de corriente consume más corriente que la tarjeta de adquisición.

Esto se puede notar de los valores de la figura 4.7.4, siendo 476,86mW ($P_{prom-} + P_{prom+}$) la potencia consumida por el *driver* de corriente, y 333,02mW ($P_{prom-} + P_{prom+}$) la consumida por la tarjeta de adquisición. La razón principal es que el *driver* debe alimentar con corriente la celda de conductividad (alta carga), mientras que la tarjeta de adquisición sólo esta destinada para alimentar circuitos integrados y elementos pasivos de menor consumo.

4. Medir el consumo del sistema cuando se conecta el LCD (operando en la figura 4.7.5 y en reposo en la figura 4.7.6). Al comparar las figuras 4.7.2(a) (fuente de +5V fija) y 4.7.5, se observa un cambio en el consumo pasando de 160,52mW (sin carga) a 182,62mW y 216,51mW, con y sin luz de fondo, respectivamente. Esto no es sorprendente, ya que el convertor DC-DC conmutado regula su consumo de potencia dependiendo de la carga que se conecte en sus terminales de salida. También puede verse como operar el LCD con y sin luz de fondo tiene un impacto en el consumo del sistema que, de acuerdo con los datos mostrados en estas figuras, implica una diferencia de 33,89mW.

Figura. 4.7.5: Potencia de entrada de la fuente dual con LCD conectado (microcontrolador escribiendo sobre el LCD). (a) Sin luz de fondo, (b) Con luz de fondo.

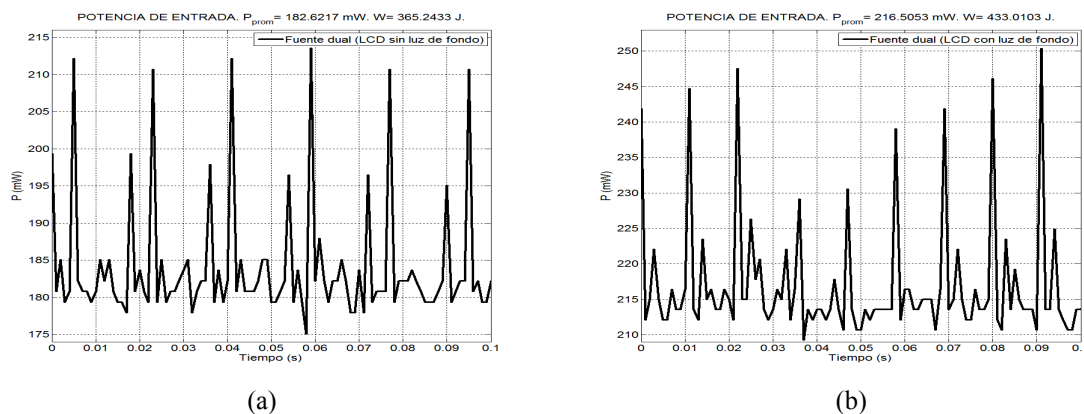
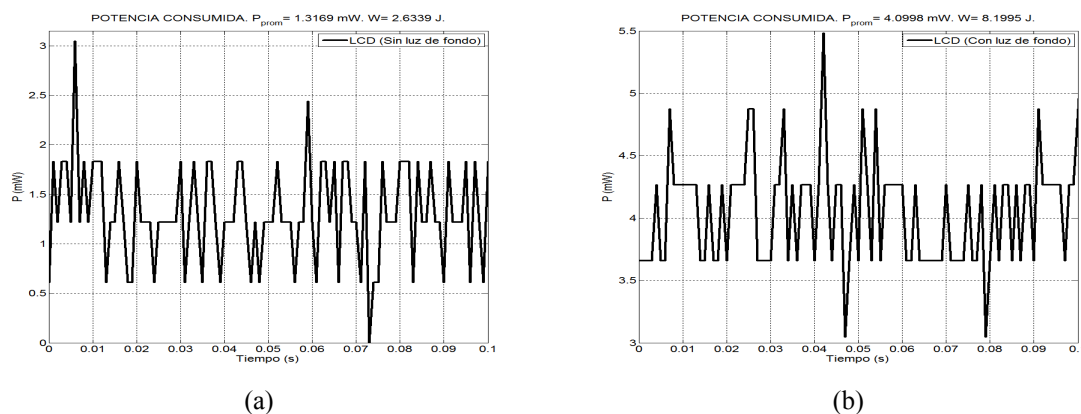


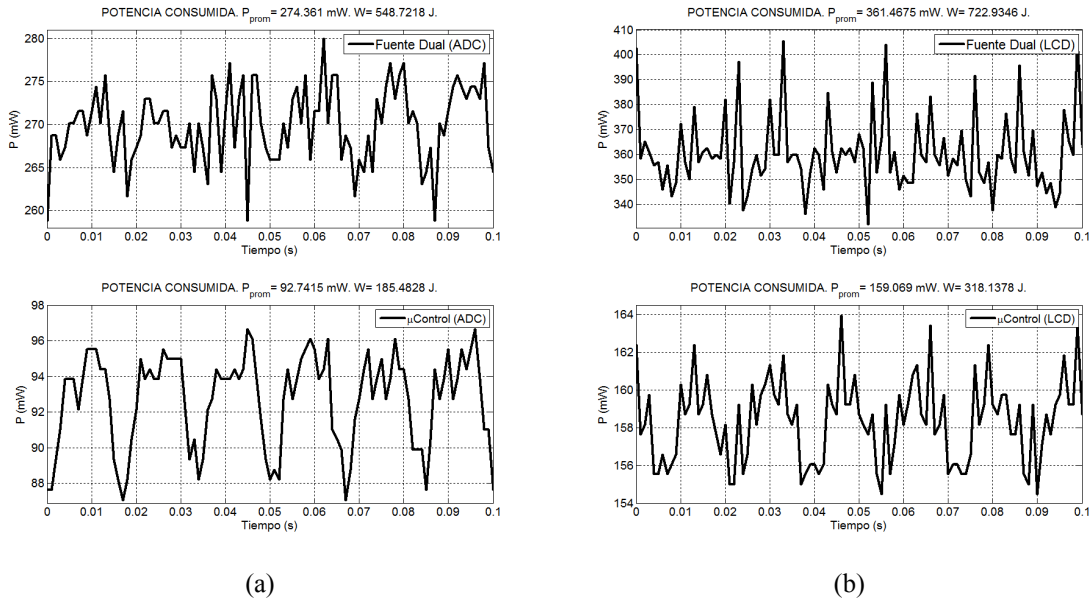
Figura. 4.7.6: Potencia consumida por el LCD. (a) Sin luz de fondo, (b) Con luz de fondo.



Se puede observar que el consumo, cuando el LCD no tiene la luz de fondo encendida, es de 1,32mW (figura 4.7.6). Cuando se enciende la luz de fondo, el consumo se triplica, alcanzando un valor de 4,1mW. Este consumo es realmente pequeño, sin embargo, aumenta cuando el microcontrolador comienza a escribir sobre el LCD (figura 4.7.5). También, se muestra que, aunque la luz de fondo hace más cómoda la visualización del LCD también incrementa considerablemente el consumo de energía (2,78mW en reposo y 33,89mW en operación).

5. Medir el consumo del sistema cuando se conecta la tarjeta del microcontrolador.
 - Rutina cuando están activos los conversores analógico-digital (figura 4.7.7(a)).
 - Rutina de escritura sobre el LCD (figura 4.7.7(b)).

Figura. 4.7.7: Potencia consumida. Arriba: Fuente dual. Abajo: Microcontrolador. (a) ADC, (b) LCD.



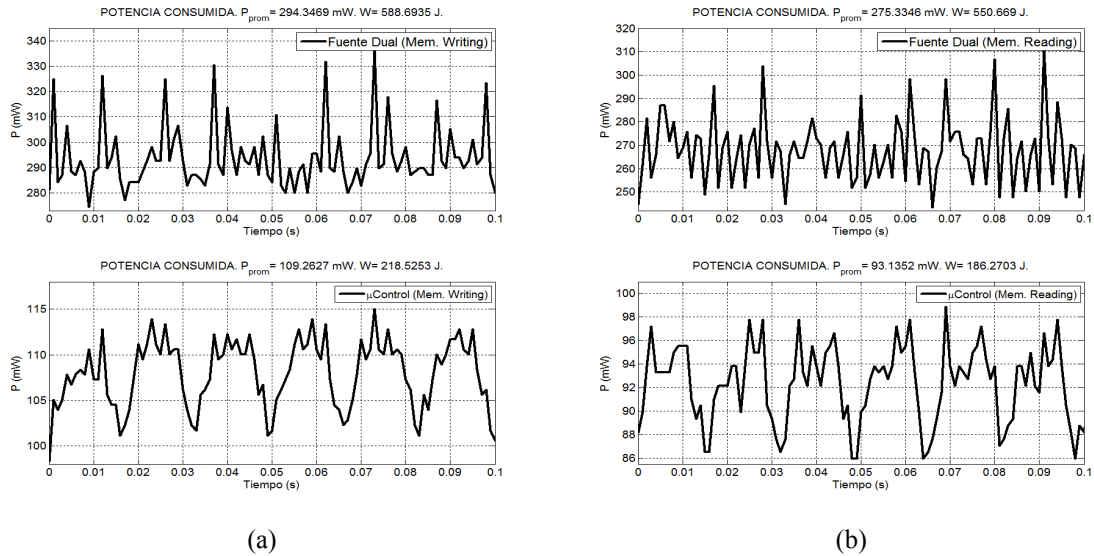
En la figura 4.7.7, se muestra la potencia, instantánea, consumida por el microcontrolador en dos condiciones de operación: realizando una conversión analógico-digital (a) y escribiendo sobre el LCD (b). Para medir la corriente requerida por el microcontrolador se usó una resistencia tal como lo propone Rusell [76]. Este método se ha seleccionado por su simplicidad, aunque una mejor estimación se puede alcanzar empleando espejos corriente, como proponen Kavvadias [47], Konstantakos [53] y Laopoulos [56].

En la figura 4.7.7(a), la potencia fue medida con los 6 primeros conversores ADC del microcontrolador funcionamiento, operando con la técnica de sobremuestreo [3] para alcanzar una resolución de 12 bits. En este caso, se programó una rutina de lectura, durante 33 minutos, en la cual solo un conversor se activaba a la vez (la activación de los conversores fue secuencial, uno después de otro). Se incluyó, además, la conversión a punto flotante de cada uno de los datos leídos.

Puede notarse una simetría, en la corriente de alimentación del microcontrolador. Esto permite pensar que cada conversor está usando la misma cantidad de energía (aproximadamente), en su proceso de lectura. En la figura 4.7.7(b), se muestra el consumo de potencia cuando el microcontrolador escribe sobre el LCD (con luz de fondo). La rutina programada, en este caso, es una cuenta de 0 a 15 (formato de datos tipo “char”), que se escribe sobre el LCD, refrescando la cuenta cada segundo. La potencia consumida que se muestra, incluye los efectos del microcontrolador, y del LCD. Se puede notar una ligera simetría, aunque no tan limpia como en el caso de los conversores ADC (figura 4.7.7 (b)).

- Rutina de escritura de la memoria externa (figura 4.7.8(a)).
- Rutina de lectura en la memoria externa (figura 4.7.8(b)).

Figura. 4.7.8: Potencia consumida cuando la memoria externa esta operando. Arriba: Fuente dual. Abajo: Microcontrolador. (a) Escritura, (b) Lectura.

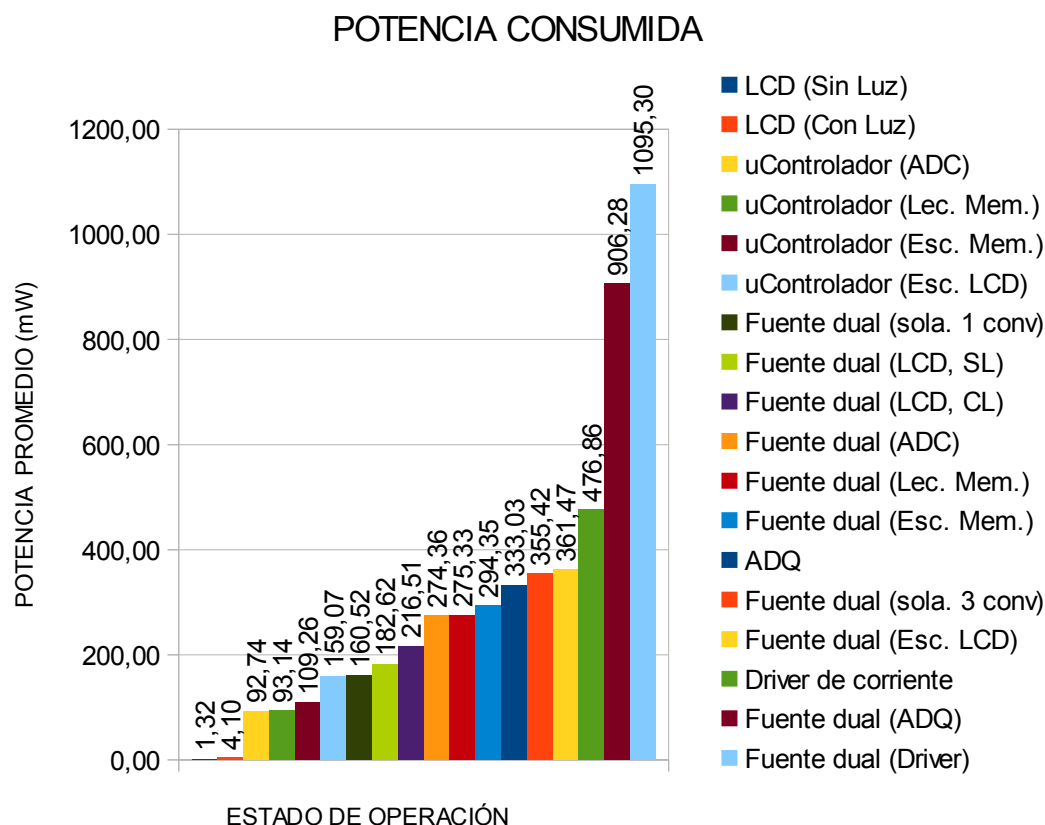


La siguiente prueba que se realizó, consistió en leer y escribir sobre la memoria externa. En la figura 4.7.8 se muestran los resultados obtenidos. Durante esta medida se escribieron datos decimales aleatorios, con formato en punto flotante sobre la memoria externa. El formato en punto flotante, que emplea el software en el que se escribió el código fuente, utiliza el formato IEEE-754 de 32bits. La rutina se repitió durante los 33 minutos que dura el estudio, arrojando los resultados que se muestran en la figura 4.7.8(a).

Posteriormente, en una medida independiente durante otro periodo de lectura de 33 minutos, se leyeron los datos, que en el paso anterior fueron almacenados, obteniéndose el consumo de la figura 4.7.8(b). Se puede observar, que esto coincide con lo indicado por la hoja de datos de la memoria [62], en el cual el proceso de lectura consume más que el proceso de escritura. En particular, la potencia consumida durante la lectura fue 93,14mW, mientras que el consumo en el proceso de escritura es de 109,26mW. En ambos casos, se puede notar una simetría en el consumo de la corriente.

De las cuatro medidas relacionadas con el microcontrolador (ADC, LCD, lectura y escritura de la memoria), cabe destacar la simetría en el consumo. Dicha simetría muestra, que mientras el microcontrolador está realizando la tarea el consumo de corriente se eleva, y cuando cesa la ejecución de esa tarea el consumo disminuye.

Figura. 4.7.9: Potencia consumida por el sistema multi-sensorial.



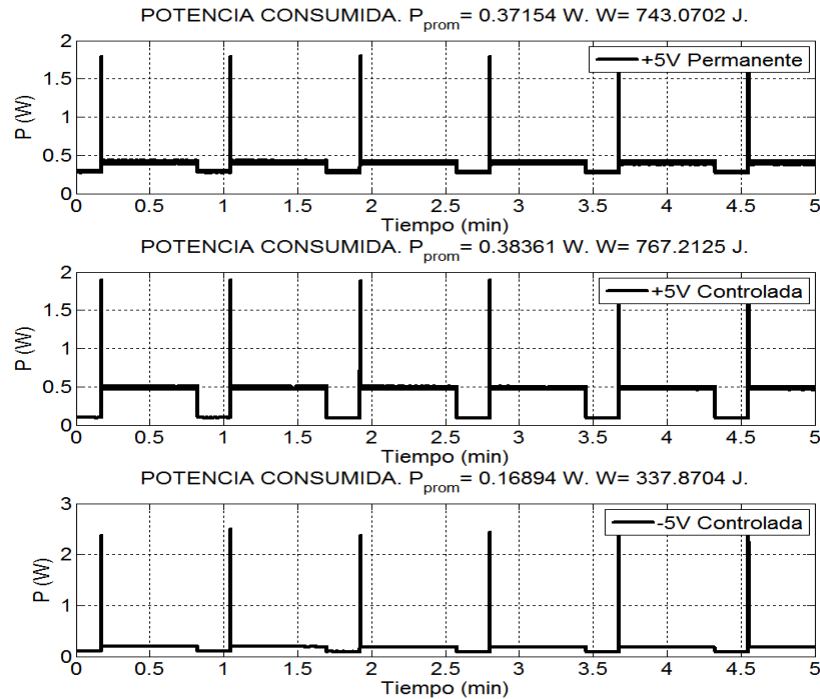
En la figura 4.7.9 se muestra un gráfico de barras que condensa la información de consumo promedio de potencia, durante la evaluación energética del sistema multi-sensorial implementado. El análisis se puede dividir en dos partes: el consumo relacionado con los circuitos analógicos y el consumo relacionado con los circuitos digitales. De estos dos, los circuitos analógicos consumen más energía que los digitales.

Desde el punto de vista analógico, el mayor consumo es debido al *driver* de corriente (476,86mW), seguida por la tarjeta de adquisición (333,03mW). Desde el punto de vista digital, el mayor consumo se debe al módulo de visualización (159,07mW), seguido por la escritura y lectura de la memoria externa (109,26mW y 93,14mW, respectivamente).

La figura 4.7.9, muestra que los tres más altos consumos, suceden cuando están funcionando el *driver* (1095,30mW), la tarjeta de adquisición (906,28mW) y la escritura sobre el LCD (361,47mW).

Finalmente, con el objetivo de medir el consumo de potencia en condiciones normales de operación, y conocer los efectos que tiene aprovechar los tiempos de inactividad, se evalúa el consumo cuando se inactivan los módulos del sistema en estado de reposo (convertidores DC-DC, convertidores ADC, módulos sensoriales, memoria externa, etc), como se muestra en la figura 4.7.10.

Figura. 4.7.10: Potencia total consumida por el sistema. Arriba: +5V permanente. Medio: +5V controlada. Abajo: -5V controlada.

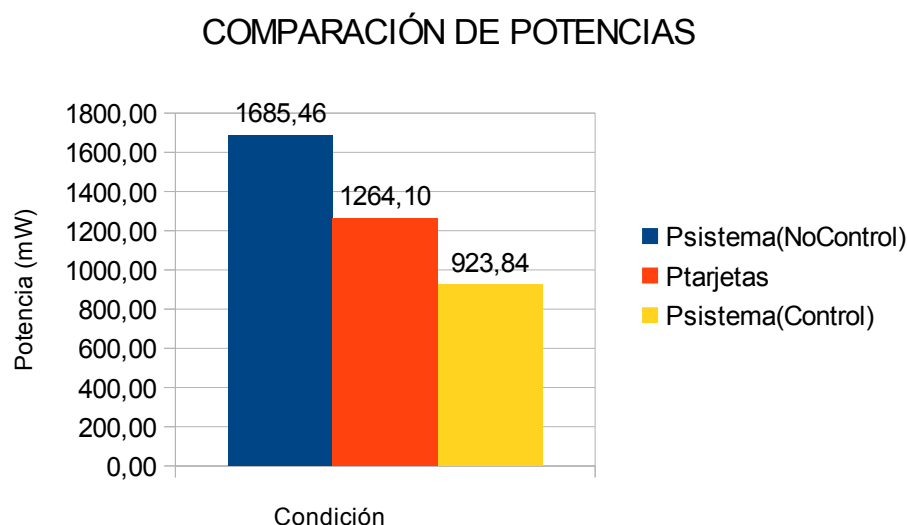


En la figura 4.7.10 se muestra el consumo total de potencia del sistema cuando se encuentra operando bajo condiciones normales. La gráfica superior corresponde a la fuente de +5V fija o permanente, la del medio corresponde a la fuente de +5V controlada o conmutada³⁶ y la inferior corresponde a la de -5V controlada o conmutada. Los picos se deben a la transición de apagado a encendido que ocurre en los convertidores DC-DC.

En la figura 4.7.11 se muestra un diagrama de barras donde se relacionan las potencias consumidas por el sistema bajo tres condiciones de análisis diferentes: el consumo total del sistema cuando no se aprovechan los tiempos de inactividad ($P_{sistema} \text{ (NoControl)}$), el consumo de potencia de todas las tarjetas sin tener en cuenta el convertor DC-DC ($P_{tarjetas}$), el consumo total del sistema aprovechando los tiempos de inactividad ($P_{sistema} \text{ (Control)}$).

³⁶ En este caso, se dice conmutado para indicar que el microcontrolador es quien activa o desactiva la operación del convertor DC-DC correspondiente.

Figura. 4.7.11: Comparación de potencias



Se puede observar que el consumo de todo el sistema, cuando se aprovechan tiempos de inactividad, disminuye en casi el 55% respecto de la condición de no aprovechamiento (se pasa de 1685,46mW a 923,84mW). También, es interesante conocer el consumo de todas las tarjetas del sistema, sin tener en cuenta las fuentes de alimentación (tarjetas de los conversores DC-DC), ya que en cualquier momento se puede optar por cambiar este tipo de fuentes conmutadas por unas más eficientes, sin la necesidad de cambiar los otros componentes (el sistema es modular).

4.8 RESUMEN DE CAPÍTULO

El consumo de potencia de un sistema electrónico se ve afectado por dos grandes partes: el *software* y el *hardware*. Desde el punto de vista *software* la mejora en el consumo se puede alcanzar utilizando buenas técnicas de programación, ya sea utilizando lenguaje de alto o bajo nivel. Asimismo, utilizando los servicios que los dispositivos programables brindan para entrar en estados de inactividad cuando no se encuentran funcionando. Desde el punto de vista *hardware*, se puede lograr una mejora en el consumo del sistema utilizando dispositivos de última tecnología, realizando una buena gestión en el suministro de energía y realizando un buen diseño de los circuitos impresos (PCBs), entre otros.

Los parámetros relacionados con el *hardware* pueden ser el consumo del procesador, así como el consumo de las unidades periféricas como la memoria, los módulos de comunicación, de adquisición, etc. En este capítulo se han presentado técnicas y consideraciones a tener en cuenta para disminuir el consumo de potencia desde el *hardware* y desde el *software*. También, se ha realizado una descripción del sistema multi-sensoreial implementado, así como el flujo de datos desde las tarjetas de adquisición hasta la memoria de almacenamiento de los mismos. Adicionalmente, se presentó la metodología para medir potencia teniendo en cuenta las recomendaciones de la normativa en eficiencia energética ISO50001, y se midió la potencia y energía consumidas.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Al realizar un estudio bibliográfico de los métodos de medición de salinidad, temperatura y velocidad de flujo, se han encontrado diversas propuestas para medir estas variables. La tendencia en la actualidad es el desarrollo de sensores *micro-maquinados* (MEMS) y *bioinspirados*. Este tipo de sistemas es particularmente útil por su eficiencia y mimetización con el entorno de estudio (lo que permite, además, hacer estudios en presencia de especies vivas sin alterar el hábitat). Aunque esta es una opción muy interesante también involucra una inversión alta. Por lo que se puede optar por otras soluciones eficientes y que también sean de bajo costo, potencia y área, utilizando métodos clásicos (empleando técnicas de implementación novedosas).
- Durante la revisión bibliográfica en el desarrollo de este trabajo, se han podido encontrar soluciones en módulos individuales o como plataformas multi-sensoriales. Lo más recomendable en este tipo de aplicaciones es emplear plataformas donde los sensores sean modulares y se encuentren lo más cerca posible entre si. La modularidad, permite sacar de operación un sensor o tarjeta en particular sin afectar el rendimiento de los otros sensores. La cercanía entre los módulos permite considerar que los datos provenientes de los distintos sensores se refieren al mismo volumen de agua, de lo cual se puede realizar un estudio que busque relacionar la dependencia entre las variables estudiadas (como se mencionó en el primer capítulo) y evaluar el comportamiento del sistema, a través de lo cual es posible encontrar fallas o detectar un comportamiento erróneo en alguno de los módulos de la plataforma sensorial.
- Los pequeños cambios de temperatura y salinidad del agua, en ausencia de corrientes acuáticas, imponen retos en la forma como se miden estas variables, ya que cambios pequeños requieren de instrumentos con una sensibilidad alta, a través de los cuales se pueda realizar la medición. Esta es una de las razones más importantes de porque la literatura refleja una tendencia predominante en el uso de dispositivos como los termistores y las celdas de conductividad.
- En el desarrollo de este trabajo, se ha implementado un sensor de salinidad a partir de una celda de conductividad de cuatro electrodos. Con esta celda se pudo alcanzar una sensibilidad de $99,81 \cdot 10^{-3} \text{cm}^{-1}$. La resolución obtenida con esta técnica fue de 4mS/cm, al realizar la caracterización de la celda en el rango entre 5mS/cm y 80mS/cm. Este rango coincide, de acuerdo con la figura 1.6.2, al rango en el que oscila el agua de mar.
- La celda de conductividad implementada fue una celda con cuatro electrodos. Una ventaja de este tipo de celda es la separación de los electrodos de corriente y los de voltaje. Al probar con corriente DC uno de los electrodos se oxidó completamente, aun cuando era de material inoxidable. Al cambiar a corriente AC se evitó este problema, lo que permitió una medida más confiable, en la cual no se aprecian los efectos capacitivos que se reportan en la literatura. Una razón, es la pequeña área transversal de los electrodos (los electrodos no eran planos sino cilíndricos), además, la frecuencia se mantuvo baja (1,6kHz), y la variable de interés siempre fue el voltaje pico pico de la

señal en los electrodos de sensado, lo que libro al sistema de considerar cambios de fase.

- Aunque el circuito de medida de salinidad se cierra con un nivel bajo de agua dentro de la celda, dicho nivel afecta el valor medido de la conductividad. En la práctica se observó, que el resultado es totalmente confiable y repetible cuando la cavidad de la celda se llena completamente. Asimismo, cuando se emplea una celda de cuatro electrodos con corriente AC, la literatura reporta que los errores debido a los depósitos de sal no afectan la medida. Esto se pudo verificar, experimentalmente, al sumergir durante 12 horas la celda en agua salada (sal marina disuelta en agua). Después de este tiempo, al volver a medir, el resultado obtenido se encontró dentro del error esperado.
- Para medir temperatura en este trabajo, se seleccionaron termistores, debido a su alta sensibilidad, bajo costo de adquisición y sencillez de procesamiento para leer el valor de temperatura. Para evitar daño por contacto con el agua salada, se construyó un encapsulado a partir de aluminio. Se han logrado construir dos sensores de temperatura que pueden funcionar con una resolución de $0,1^{\circ}\text{C}$, en un rango de operación entre 5°C y 40°C .
- La selección de aluminio, como mecanismo de encapsulado de los termistores, se debe a la inmunidad a la oxidación y su capacidad de transmitir fácilmente el calor. Los espesores de estos encapsulados fueron de 0,5mm y 0,8mm. Debido a la forma y dimensión de su encapsulado, ver figura 3.3.1, entre este y cada termistor (en forma de pastilla) quedó un espacio de aire. Para evitar que esto fuera un problema, cada termistor se puso en contacto directo con la pared del encapsulado y el otro lado (espacio con aire) se lleno de papel aluminio. Esto permitió que el calor del entorno fuera transmitido de forma eficiente al termistor, lo cual se pudo observar al momento de realizar la caracterización y las medidas de temperatura.
- Para cada termistor se construyó un circuito de adecuación de señal (figura 3.3.3), y la operación de cada uno de ellos se dividió en dos rangos: uno inferior a 22°C y otro superior a 22°C . En cada rango se obtuvo una curva de linealización, para cada termistor. Asimismo, se obtuvieron dos sensibilidades (para rango inferior y superior), para cada termistor. Para el primer termistor, las sensibilidades en el rango inferior y superior de medida fueron de $0,29\text{ V}/^{\circ}\text{C}$ y $0,12\text{ V}/^{\circ}\text{C}$, respectivamente (figura 3.3.5). Para el segundo, las sensibilidades en el rango inferior y superior de medida son $0,23\text{ V}/^{\circ}\text{C}$ y $0,10\text{ V}/^{\circ}\text{C}$, respectivamente (figura 3.3.6).
- Los termistores presentaron comportamientos lineales, pero de sensibilidades diferentes. Esto se debe a que los termistores empleados en el desarrollo fueron tipo NTC, con resistencia a temperatura ambiente alrededor de 250Ω (ambos). Esto implica que la excursión de temperaturas por arriba de la temperatura ambiente es más pobre que la disponible para temperaturas inferiores a la ambiente (ver figura 3.3.2).
- La medición de velocidad de flujo se empleó una propela de plástico (medidor de tipo mecánico). Con este sensor se logró una resolución de $0,2\text{cm}/\text{seg}$, midiendo velocidades en el rango de $3,96\text{cm}/\text{seg}$ y $10,90\text{cm}/\text{seg}$. Estas velocidades se alcanzaron gracias a la baja resistencia al giro que presentan los alabes con el eje de la propela. Aunque en un principio, estas velocidades sean pequeñas, este rango de operación puede ser

expandido a uno de mayores velocidades flujo pero requiere de una nueva caracterización.

- Durante el proceso de caracterización se pudo notar que la frecuencia de giro de la propela y la velocidad de flujo presentan una relación lineal. Asimismo, se pudo observar que la sensibilidad de la propela depende del ángulo relativo entre el flujo y la sección del dispositivo. En particular, la mayor sensibilidad se obtuvo con un ángulo de 90° , es decir, cuando el flujo impacta perpendicularmente a la propela. Por este motivo, la curva de caracterización empleada en este trabajo fue calculada para ángulos de 90° . Igualmente, para un correcto funcionamiento y una correcta medida, debe estar completamente sumergida en el flujo que se desea medir.
- En la actualidad dentro del diseño de sistemas electrónicos se ha tenido como regla el menor consumo de potencia posible. Para disminuir dicho consumo se puede optar por muchas soluciones que relacionan los componentes *hardware* y *software*. Dentro de este trabajo se ha podido comprobar que ninguno de estos se puede despreciar, ya que tanto el hardware como el software tienen asociados consumos importantes del recurso energético. Por lo tanto, una buena planeación, diseño y construcción se reflejan en el desempeño energético del sistema.
- Desde el punto de vista hardware este trabajo ha considerado dos grandes partes: la selección de componentes y el diseño de las PCBs. Con respecto a este último, el diseño de la tarjeta impresa puede influir en un ahorro o gasto de la energía, debido a que un ruteo inadecuado de las pistas puede generar problemas de capacitancias parásitas o problemas de impedancias inducidas. Adicionalmente, un buen diseño de las tarjetas disminuye el costo de fabricación, el tiempo de evaluación de fallos y disminuye el conflicto entre señales del sistema (conflicto entre señales digitales y analógicas, por ejemplo).
- Desde el punto de vista de componentes, en este trabajo la atención se centro en la selección de fuentes conmutadas, que permitieran un control de encendido o apagado desde el modulo de control. Asimismo, se limitó la corriente que podía entregar el *driver* de corriente a la celda de conductividad a un máximo de 70mA. La tarjeta de visualización se consideró como un módulo externo a todo el sistema, que puede estar o no conectada, dependiendo de las necesidades del usuario, además puede trabajar en dos modos de operación (con luz de fondo y sin luz de fondo). También, se seleccionó una memoria I2C que presenta un mecanismo de ahorro de energía en periodos de inactividad y se optó por aprovechar las opciones hardware que tenía el microcontrolador para ahorro de energía en periodos inactivos, tales como la entrada en estado *idle*, el apagado de los conversores ADC, de los timers, del WDT, entre otros.
- Desde el punto de vista software, este trabajo se concentró en la estructura del código escrito. El lenguaje de programación usado fue C (alto nivel). Los esfuerzos fueron concentrados en aplicar buenas prácticas de programación tal como fue expuesto en el capítulo 4. Entre estos se consideran: evitar continuos accesos a memoria externa, la organización, procesamiento y el flujo de información de punto flotante relacionada con los sensores, además de la selección adecuada de instrucciones, el reordenamiento de estas, y la optimización de tamaño (código escrito) y velocidad (por compilador).

- Se ha medido el consumo de potencia del sistema bajo distintos estados de operación. Al realizar un análisis empleando segregación de cargas, se pudo observar que el mayor consumo se debe a la fuente dual cuando el *driver* de corriente está funcionando (1095,30 mW); este consumo es seguido por el que se obtiene cuando la tarjeta de adquisición está funcionando (906,28 mW). De todas las tarjetas, quitando la fuente dual, la que más consume corresponde al driver de corriente (476,86 mW).
- Se pudo observar que el LCD (con luz de fondo), presenta un alto consumo durante el proceso de escritura (361,47 mW). Este proceso de escritura involucra tanto la potencia requerida por el LCD como aquella requerida por el microcontrolador para realizar la función de escritura. Este dato es interesante, ya que si se tiene en cuenta el consumo del LCD, por sí solo es despreciable (1,32 mW sin luz de fondo, y 4,10 mW con luz de fondo). Al analizar el consumo de acceso a memoria externa, se puede observar que el proceso de escritura (109,26 mW) consume más que el de lectura (93,14 mW).
- Al utilizar los periodos de inactividad del sistema para apagar módulos no utilizados en un lapso de tiempo dado, se encontró que el sistema puede disminuir en casi el 55% el consumo de potencia, pasando de una potencia de 1685,46mW sin aprovechar tales tiempos a 923,84mW aprovechándolos.

5.2 RECOMENDACIONES

- Para futuros trabajos sería adecuado utilizar soluciones mediante sistemas embebidos. Un ejemplo de este tipo de solución la propone Cabrera[14], quien implementa sobre un PSoC un sistema embebido para el procesamiento de señales ultrasónicas, realizando control tanto en emisión como en recepción.
- Una de las mayores desventajas en la medida de salinidad es la forma en la que se presenta el error en cada medida, como lo muestra la ecuación 20 en la sección 3.2 . Este comportamiento resulta ser exponencial, como se observa en la figura 3.2.9, lo que implica un gasto adicional de los recursos del sistema (formato en punto flotante, comportamiento exponencial y acceso adicional a la memoria externa). Por este motivo este error no es almacenado en la memoria, llevando a trabajar con un error máximo absoluto (0,34 mS/cm) de acuerdo con la figura 3.2.9. Para solucionar este inconveniente se propone establecer errores máximos por tramos (*lookup table* para los errores). Esto consiste en asignar errores a tramos más cortos en los cuales los errores sean más cercanos entre si (por ejemplo, para conductividades entre 5-30mS/cm un error de 0,04mS/cm es más acertado, para 30,1-43,0mS/cm un error de 0,1mS/cm, así sucesivamente). Esto permite asignar un error más adecuado al dato medido, anular los cálculos exponenciales y de punto flotante asociados, y disminuir el numero de accesos a memoria externa.
- Aunque la solución al espacio de aire que quedo entre el termistor y su encapsulado permitió leer valores precisos de temperatura, es claro que el contacto térmico puede mejorar. Una de dichas mejoras se puede lograr haciendo que la forma del encapsulado sea más parecida a la forma del termistor (como una pastilla), además buscar que las paredes del cubrimiento sean cada vez más delgadas. Esto permitiría disminuir las pérdidas de transmisión del calor desde el entorno al termistor. Es conveniente,

también, buscar nuevos mecanismos y materiales para construir el encapsulado de protección, de tal forma que sea más pequeño (para que no interfiera con las corrientes subacuáticas del medio y evite generar turbulencias). Igualmente, se requiere que el proceso sea más eficiente y repetible, tal que no dependa de la velocidad y habilidad del operador de la maquina.

- Una mejora en términos de consumo energético, se puede obtener cambiando el sensor de temperatura, por un RTD de platino de alto rango de trabajo y buena sensibilidad, de tal forma que no se necesite un circuito de linealización (y por ende se prescindiera de un comparador y corrector de signo).
- Obtener un perfil del campo de velocidades, con la propela empleada es difícil. No solo por el tamaño de la misma, sino también por la restricción en su operación (el flujo debe ser perpendicular a la sección transversal de la propela). Una forma de solucionar este problema es añadir un mecanismo a la propela de tal manera que ésta se alinee con el flujo del medio. Este mecanismo debe incluir, además, un sensor de giro que permita determinar el ángulo que giró el dispositivo hasta alinearse al flujo. Asimismo, reducir el tamaño de la propela, ayudaría a mejorar la resolución del campo de velocidades obtenido.
- Aunque utilizar una resistencia para medir la corriente de alimentación de las PCBs produjo buenos resultados, la medición es susceptible a cambios debido a la tolerancia de la resistencia (5%), ya que produce fluctuaciones, como se puede observar en las figuras 4.7.2 a 4.7.8. Una solución es utilizar espejos de corriente como proponen Kavvadias [47], Konstantakos [53] y Laopoulos [56], en especial cuando se quiera medir el consumo debido al microcontrolador. Este método permite resultados más limpios y exactos, ya que la técnica es menos susceptible a la tolerancia de los dispositivos utilizados en la medición.
- En general la corriente y el voltaje de alimentación, de un microcontrolador, se relacionan con la frecuencia mediante: $I_{cc}=V_{cc}^2f$ [67]. Así que se puede reducir la corriente requerida, ya sea disminuyendo el voltaje de alimentación o reduciendo la frecuencia de reloj del sistema. De acuerdo con Panfil [67] reducir el voltaje de alimentación de 5V a 4,5V, puede significar un ahorro del 20% en el consumo de potencia. También reducir la frecuencia de operación puede significar una disminución en la corriente (por ejemplo, pasar de 16MHz a 10MHz puede significar un ahorro entre 30% a 40%, aunque para ciertas aplicaciones puede interferir en el desempeño del software).
- Una alternativa para medir velocidad y temperatura, es utilizar técnicas acústicas a partir de transductores ultrasónicos utilizando polímeros piezoeléctricos de bajo costo y bajo consumo. Uno de estos polímeros es conocido como PVDF, este es un material fácil de trabajar, poco sensible a la humedad y consume poca potencia eléctrica [61], su consumo es muy bajo (aproximadamente $1,7mW^{37}$ para un transductor construido con frecuencia de resonancia de 56kHz, aplicando un voltaje de 10Vpp) [21]. Desde el punto de vista mecánico, dada la facilidad de manipulación del PVDF, se pueden

³⁷ Este es un valor de consumo mucho menor que su contraparte PZT, que puede llegar a consumir 90mW, bajo condiciones similares de operación.

construir formas donde el frente de onda acústico puede enfocarse, esto representa un alto grado de directividad, sin la necesidad de restringir la propagación de los frentes de onda a geometrías sencillas, tales como casquetes esféricos o cilíndricos. Como material para aplicaciones subacuáticas, la impedancia de este es muy cercano a la del agua, por lo que no necesita capa de adaptación.

- Debido a las prestaciones del PVDF se construyó un prototipo de transductor ultrasónico [21], en los apéndices AI.5 Y AI.6 Se encuentran las gráficas de caracterización acústica y eléctrica, respectivamente (Un mayor detalle, del proceso de construcción y caracterización, se puede encontrar en Collazos [21]). Este fue probado bajo agua, con el objetivo de conocer su capacidad de transmisión en este medio, sin resultados iniciales satisfactorios (En aire se obtuvieron resultados favorables). Como un mecanismo para obtener éxito en esta prueba se propone reducir la curvatura del material y, eventualmente, probar con prototipos que empleen la película corrugada [94]. Otro avance se puede conseguir mejorando el mecanismo de sujeción de la película al sustrato, debido a que el desempeño del transductor en modo longitudinal depende fuertemente de la calidad de dicha sujeción. Adicionalmente, el contacto eléctrico entre los electrodos de la película y la fuente de excitación se puede cambiar (inicialmente se empleó una cinta adhesiva conductora), ya que este puede producir pérdidas considerables de energía. Como trabajo futuro de este desarrollo se propone probar diferentes tipos de *backing* (ver Toda [95]) para la concavidad de la película, así como también probar la relación entre el tipo de curvatura (uniforme y no uniforme) y el desempeño del transductor [95]. Además, probar la medición de velocidad, ya sea empleando la frecuencia Doppler o el tiempo de vuelo [19] [36], así como medir la temperatura del medio a través del método de tomografía acústica [19] y/o empleando las propiedades piroeléctricas del material [61].

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Atmel. “8-bit AVR microcontroller with 64kBytes in system programmable flash. Atmega644 datasheet”.
- [2] Atmel. “Efficient C coding for AVR”. Atmel application note for 8-bit AVR microcontroller. AVR035 application note. Disponible en: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc1497.pdf. [Visto en 2011]
- [3] Atmel, “Enhancing ADC resolution by oversampling”. Atmel applicatin note for 8-bit AVR microcontroller. AVR121 application note. Disponible en: <http://www.atmel.com/Images/doc8003.pdf>. [Visto en 2011]
- [4] Agrawal Y., Trowbridge H.H., Pottsmith H.C., Oltman-Shay, J. “Velocity, concentration and flux of sediments in a coastal bottom boundary layer with a laser Doppler velocimeter”. OCEANS '93. Engineering in Harmony with Ocean. Proceedings. Vol. 3. p.g. 137-142. IEEE 1993.
- [5] Arnau Vives Antonio. “Piezoelectric transducers and applications. Ch. 6: Interface electronic systems for broadband piezoelectric ultrasonic applications: analysis of responses by means of linear approaches”. Springer Berlin Heidelberg. p.g. 187-203. Second Edition. SpringerLink 2008.
- [6] Ariza Miguel, Luna Ivan. “Diseño e implementación de un sistema de alimentación eficiente y robusto para suministro de energía de un pico-satélite tipo cubesat”. Developing Entrepreneurial Engineers for the Sustainable Growth of Latin America and the Caribeann: Education, Innovation, Technology and Practice. 1B.4 pag. 1-4. LACCEI'2007 .Fifth LACCEI International Latin America and Caribbean Conference for Engineering and Technology. Tampico, México, 2007.
- [7] Barakos P. A., Nelson K. W., “Small scale structure of temperature, salinity and sound speed off southern California”. Oceans 1984. Vol. 5. p.g. 538-548. IEEE. 1973.
- [8] Barnett Richard, O'cull Larry, Cox Sarah. “Embedded C programming and the atmel AVR”. 2nd edition. Delmar cengage learning. Editorial Thompson. 2007.
- [9] Bhavsar Rashmi , Ganguly Partha, McKinley Gareth, Pauchet Frederic. “Inteligencia en materiales innovadores”. Oilfield Review. 2008. Disponible en: www.slb.com/~media/Files/resources/~/inteligencia_en_materiales.ashx.
- [10] Birch R., Hill P. R., Clarke M., Lemon D. Fissel D., “A configurable multi-sensor tripod for the study of near-bottom ocean processes”. Oceans 2003. Proceedings. Vol. 4. p.g.. 2254-2260. IEEE. 2003.
- [11] Blythe Broughtoun M., “Analysis and design of almost-linear one-thermistor temperature transducers”. IEEE Transactions on instrumentation and measurement. Vol. IM-23, No. 1, p.g. 1-5. IEEE 1974.
- [12] Brinkman F., Dam N. E., Deák E., Durbiano F., Ferrara E., Füko J., Jensen H. D., Máriássy M., Shreiner R. H., Spitzer P., Sudmeier U., Surdu M., Vyskocil L. “Primary methods for the measurement of electrolytic conductivity”. Accred. Qual. Assur. General Paper. p.g. 346-353. Springer-Verlag. SpringerLink 2003.

- [13] Brown E., Colling A., Park D., Phillips J., Rothery D., Wright J. "Ocean circulation". Butterworth-Heiemann. Second Edition. 2001.
- [14] Cabrera Lopez J.J., Velasco Medina J. "Diseño e implementación de un sistema embebido para el procesamiento de señales ultrasónicas". Revista Colombiana de Física. Vol. 43, No.1. p.g. 100-104. 2011.
- [15] Cabrera R., Deines K., Brumley B., Terray E. "Development of a practical coherent acoustic Doppler current profiler". OCEANS'87. p.g. 93-97. IEEE 1987.
- [16] Castro Moreno E., Salazar Mustelier A., Ramírez Muñoz D., Sánchez Moreno J. "Método de linealización dinámica para un acondicionador de temperatura/tiempo utilizando termistores". 6th. Iberoamerican congress on sensors., Proceedings. Sao Paulo, Brazil. p.g. 622-628. IBERSENSOR 2008.
- [17] Chang N., Kim K., Lee H.G. "Cycle accurate energy measurement and characterization, with a case study of the ARM7TDMI", IEEE transactions on very large scale integration (VSLI) systems. Vol. 10, No. 2, p.g. 146-154. 2002.
- [18] Chen N., Tucker C., Engel J. M., Yang Y., Pandya S., Liu C. "Design and characterization of artificial hair cell sensor for flow sensing with ultrahigh velocity and angular sensitivity". Journal of Microelectromechanical Systems. Vol. 16 Issue 5. p.g. 999-1014. IEEE. 2007.
- [19] Chereskin T., Howe B. "Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics". Oceanographic Measurement (Chapter 18). Springer Berlin Heidelberg. Springer Link. 2007.
- [20] Chronicle UN. "The true costs of conventional energy". 2009. Disponible en: http://www.un.org/wcm/content/site/chronicle/cache/bypass/lang/en/home/archive/Issues2009/pid/5089;jsessionid=5CC99D3B1889ED277318F7577C85DD26?ctnscroll_articleContainerList=1_0&ctnlistpagination_articleContainerList=true
- [21] Collazos B. David A., Burbano R. Carlos A., Ealo C. Joao L. "Diseño, construcción y modelado de un transductor ultrasónico en modo longitudinal, a partir de un polímero piezoeléctrico de bajo costo". First International Conference on Advanced Mechatronics, Design, and Manufacturing Technology, AMDM. Pereira, Colombia 2012.
- [22] Constain Croce Vannesa. "Nueva tecnología para medir el agua de los ríos". Agencia AUPEC. Marzo de 2001. Disponible en: <http://aupec.univalle.edu.co/informes/marzo01/rios.html>.
- [23] Diaz Herrera N, Esteban O, Navarrete M, Le Haitre Michel, Gonzalez Cano A. "In situ salinity measurements in seawater with a fibre-optic probe". Measurement Science and Technology (0957-0233) (Institute of Physics), Vol. 17 , N. 8 , p.g. 2227-2232. 2006.
- [24] Dijkstra Henk A., "Dynamical oceanography". Earth and environmental science. Springer Berlin Heidelberg. Springer Link. 2008.
- [25] Dupé Valérie, Briand Renaud. "Interactive method for autonomous microsystem design". International Journal on Interactive Design and Manufacturing.

Vol. 4, p.g. 35-50. Springer Paris. SpringerLink. 2010.

- [26] Falcão António. "Wave energy utilization: A review of the technologies". Elsevier. Renewable and sustainable energy reviews. Vol. 14, p.g. 899-918. Science Direct 2010.
- [27] Fiorillo Antonino. "Design and characterization of a PVDF ultrasonic range sensor". IEEE Transactions on ultrasonic, ferroelectrics, and frequency control. Vol. 39, No. 6, p.g. 688-692. IEEE. 1992.
- [28] Fleeman Stephen. "Electronic Devices: discrete and integrated". Editorial Prentice Hall. 1990.
- [29] Fougere Alan. "New non-external field inductive conductivity sensor (NXIC) for long term deployments in biologically active regions". OCEANS 2000 MTS/IEEE conference and exhibition. Vol. 1, p.g. 623-630. IEEE 2000.
- [30] Font Jordi, Camps Adriano, Borges Andres, Neira Manuel, Reuli Nicolas, Kerr Yann, Hahne Achim, Mecklenburg Susanne. "SMOS: The challenging sea surface salinity measurement from space". Proceeding of the IEEE. Vol. 98, Issue 5, p.g. 649-665. IEEE 2010.
- [31] Franco Sergio. "Design with operational amplifiers and analog integrated circuits". 3 edition. McGraw-Hill Book Company. 2002.
- [32] Gadre Dhananjay. "Programming and customizing the AVR microcontroller". Editorial McGraw-Hill. 2000.
- [33] Gomez Tomás, "Acoustic impedance matching of piezoelectric transducers to the air". IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. Vol. 51, No. 5. p.g. 624-633. IEEE 2004.
- [34] Grasshoff Klaus, "Methods of seawater analysis". Institute for marine research at Kiel University. Weinheim. 1976.
- [35] Greenemeier Larry. "Turning the tide on harnessing the ocean's abundant energy". Scientific American. News. 2008. Disponible en: http://www.eflorida.com/uploadedFiles/Innovation_Center/Innovation_Buzz/ScientificAmerican-OceanEnergy.pdf.
- [36] Hardcastle, P.J. "A high resolution coherent acoustic Doppler profiler for the measurement of near bed turbulent flow". OCEANS '95. MTS/IEEE. Challenges of Our Changing Global Environment. Vol. 2. p.g 1361-1366. IEEE 1995.
- [37] Hiriart Le Bert, Gerardo. "Potencial energético del alto golfo de California". Boletín de la sociedad geológica Mexicana. Nota técnica. Vol. 61, Num. 1, p.g. 143-146. 2009.
- [38] Hart Daniel, Vuelapluma S. "Electrónica de potencia". Pearson Educación. 2001.
- [39] Holberg Arne Martín, Sætre Asmund. "Innovative techniques for extremely low power consumption with 8-bit microcontrollers". Atmel white paper. Disponible en: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc7903.pdf. [Visto en

2011].

- [40] Hu H.L., Xu T.M., Hui S.E. "A high-accuracy, high-speed interface circuit for differential-capacitance transducer". *Sensor and actuators*. Vol. 125, Issue 2, p.g. 329-334. Elsevier. Science Direct 2006.
- [41] IPC-2221. "Generic standard on printed board design". Institute for interconnecting and packaging electronic circuits. 1998.
- [42] IPC-2222. "Sectional design standard for rigid organic printed boards". Institute for interconnecting and packaging electronic circuits. 1998.
- [43] Ishimaru T., Ototbet H., Saino T., Hasumoto H., Nakai. T. "OCTOPUS, an octo parameter underwater sensor, for use in biological oceanography studies". *Journal of the Oceanographical Society of Japan*. Vol. 40, p.g. 207 - 212. Springer Link 1984.
- [44] ISO/CD 50001. "Energy management systems – Requirements with guidance for use". Versión 2,1c2. ISO 2009.
- [45] Jaafar W., Fischer S., Bekkour K. "Velocity and turbulence measurements by ultrasound pulse Doppler velocimetry". *Measurement*. Vol. 42. p.g. 175-182. Elsevier Science Inc. 2008.
- [46] Karki James. Signal conditioning piezoelectric sensors. Application report. Texas instruments. 2000.
- [47] Kavvadias N., Neofotistos P., Nikolaidis S., Kosmatopoulos K. And Laopoulos Th. "Measurement analysis of the software related power consumption in microprocessors". *IEEE trans. On instrumentation and measurements*. Vol. 56, No. 4. 2004.
- [48] Khan Anwar, Gupta Sen. "A linear thermistor-based temperature-to-frequency converter using delay network". *IEEE Transactions on instrumentation and measurement*. Short Papers. Vol. IM-34, No. 1. IEEE 1985.
- [49] Khan Nahidul, Iqbal Tariq, Hinchey Michael. "Submerged water current turbines". *OCEANS* 2008. p.g. 1-6. IEEE 2008.
- [50] Kim T. J., Grill W. "Determination of the velocity of ultrasound by short pulse switched sinusoidal excitation and phase sensitive detection by a computer-controlled pulse-echo system". *Ultrasonics*. Vol. 36. p.g. 233-238. Elsevier. Science Direct. 1998.
- [51] Kirianaki Nikolay, Yurish Sergey, Shpak Nestor, Deynega Vadim. "Data acquisition and signal processing for smart sensors". Editorial John Wiley & Sons, LTD. 2002.
- [52] Kok, T. and Seah, W.K.G. and Wong, W.C. "An Energy Efficient Topology Management Scheme for Underwater Acoustic Sensor Network Using Connected Dominating Sets". *OCEANS 2006 - Asia Pacific*. p.g. 1-7. IEEE 2006.
- [53] Konstantakos V., Kosmatopoulos K., Nikolaidis S., Laopoulos Th. "In chip configuration for monitoring power consumption in micro-processing systems". *IEEE international workshop on intelligent data acquisition and advanced computed systems: technology and applications*. p.g. 156-161, 2005.

- [54] Kostaschuk Ray, Best Jun, Villard Paul. Peakall Jeff, Franklin Mark. "Measuring flow and sediment transport with an acoustic doppler current profiler". Geomorphology. Vol. 68, p.g. 25-37. Science Direct. 2005.
- [55] Krijnen G., Lammerink T., Wiegerink R. "Cricket Inspired Flow-Sensor Arrays". IEEE Sensors, 2007 Conference. p.g. 539-546. IEEE 2007.
- [56] Laopoulos T., Neofotistos P., Kosmatopoulos K. And Nikolaidis S. "Measurement of current variations for the estimation of software related power consumption". IEEE trans. On instrumentation and measurement. Vol. 52, No. 4. 2003.
- [57] Levassort Franck, Boy Phillipe, Maréchal Pierre, Acher Olivier. "Toward more efficient matching layer for piezoelectric transducers". Ultrasonics symposium (IUS), IEEE international. p.g. 2762-2765. IEEE 2010.
- [58] López Bonilla O. R., "Termógrafo digital submarino". Revista instrumentación y desarrollo. Vol. 3. Instituto de investigaciones oceanológicas. Universidad autónoma de baja California. 1992.
- [59] Mann Richard. "How to program an 8-bit microcontroller using C language". Atmel applications journal. p.g. 13-16 Disponible en: http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/avr_3_04.pdf.
- [60] Martella Melanie. "Real time monitoring for lakes". Sensors. 2009. Disponible en: <http://www.sensorsmag.com/sensors-mag/real-time-monitoring-lakes-5846>.
- [61] Measurement Specialities Inc. "Piezo film sensor technical manual". 2008. Disponible en: <http://www.meas-spec.com>. [Visto en 2011].
- [62] Microchip. "512K I²C CMOS Serial EEPROM Memory Datasheet".
- [63] Mitzner Kraig, "Introduction to complete PCB design using OrCAD capture and layout". Elseiver. ScienceDirect. 2007.
- [64] Morton John. "AVR: An introductory course". Elseiver Ltd. ScienceDirect 2002.
- [65] Ortiz David, Santiago Nayda. "Impact of source code optimizations on power consumption of embedded systems". Circuits and systems and TAISA conference, 2008. pag. 133-136. IEEE 2008.
- [66] Pallás Areny Ramón. "Sensores y acondicionadores de señal". Cuarta edición. Editorial AlfaOmega. 2007.
- [67] Panfil Jim. "8-bit microcontroller drives battery-powered thermostat". Atmel applications journal. p.g. 10-11. Disponible en: http://atmel.com/dyn/resources/prod_documents/battery.pdf. [Visto en 2011].
- [68] Pascual Mayo Juan Manuel. "Diccionario de Biología". Susaeta ediciones. 2000.
- [69] Pelc Robin, Fujita Rod. "Renwable energy from the ocean". Elsiever, Marine Policy. Vol. 26. p.g. 471-479. Science Direct. 2002.
- [70] Posada Northa, Zuluaga Carlos, Correa Julio, Floréz Diego, Valencia Raúl.

- “Instrumentación para caracterizar el recurso energético marino de Colombia”. V congreso internacional de ingeniería mecánica y III de ingeniería mecatrónica. Bogota, Colombia. 2011.
- [71] Rajagopalan, S. and Geist, T. and Fortenbery, B. and May-Ostendorp, P. “Opportunities, challenges, and recommendations to measure and improve secondary power supply efficiency”. Applied Power Electronics Conference and Exposition. p.g. 429 -435. APEC 2008. Twenty-Third Annual IEEE. 2008.
 - [72] Revuelto J., Calvo B., Medrano N., Zatorre G., Celma S. “A circuit interface for resistive sensors”. Proceedings of the 2009 Spanish conference on electron devices. p.g. 316-319. IEEE. 2009.
 - [73] RTI Electronics, Inc. Standard NTC Thermistor Applications. General notes. Disponible en: <http://www.rtie.com/ntc/ntcappln.htm>.
 - [74] RTI Electronics, Inc. Standard PTC Thermistor Applications. General notes. Disponible en: http://www.rtie.com/ptc/ptc_appl1.htm.
 - [75] Ruiz Aparicio Angel. “Medidores de velocidad (hélice, turbina y molinete)”. Coordinación de tecnología hidráulica (IMTA). Subdirección general de administración del agua (CNA). México. Visto en 2012. Disponible en: http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/medidores_de_velocidad.pdf
 - [76] Russell J.T., Jacome M.F. “Software power estimation and optimization for high performance, 32bit embedded processors”, in proceedings of the international conference of computer design (ICCD'98). 1998.
 - [77] Sabinin K., Kudryashov V., Kozoubskaia G. “Acoustic tomography as a tool for the arctic ocean salinity monitoring: feasibility and perspectives”. OCEANS'98 conference proceedings. Vol. 1, p.g. 134-142. IEEE 1998.
 - [78] Schalko J., Jachimowicz A., Ćerimović S., Talić A., Sauter T., Kohl F., Beigelbeck R. “A novel thermal transduction method for sub-mW flow sensors”. IEEE Sensors, 2009 Conference. p.g. 1325 – 1328. IEEE 2009.
 - [79] Serkin Howard, Kronengold Morton. “The effects of tilt on a savonius rotor exposed to a turbulent flow regime”. IEEE transactions on geoscience electronics. Vol. 12, Issue 2, p.g. 55-69. IEEE 1974.
 - [80] Serway Raymond. “Física universitaria”. Tomo I. Tercera Edición. McGraw Hill Book Company. 1992.
 - [81] Sheayun Lee, Andreas Ermedahl, Sang Lyul Min. “An accurate instruction level energy consumption model for embedded RISC processors”, Proceedings of the ACM SIGPLAN workshop on languages, compilers and tools for embedded systems. p.g. 1-10. 2001.
 - [82] Sheingold Daniel H. “Transducer interfacing handbook: A guide to analog signal conditioning”. Analog Devices Inc. 1981.
 - [83] Shields F., Rigby J. “River Habitat Quality from River Velocities Measured Using Acoustic Doppler Current Profiler”. Agricultural Research Service National

Sedimentation Laboratory. Environmental Management. Vol. 36, No. 4, p.g. 565-575. Springer New York. 2005.

- [84] Simunic Tajana, Benini Luca, De Micheli Giovanni. "Energy efficient design of battery powered embedded systems". IEEE transactions on very large scale integration systems. Vol. 9, Issue 1, pag. 15-28. IEEE 2002.
- [85] Simunic Tajana, Benini Luca, De Micheli Giovanni. "Energy efficient design of battery powered embedded systems". Low power electronics and design, 1999, proceedings. Pag. 212-217. IEEE 1999.
- [86] Sinevriotis G. and Stouraitis Th. "SOFLOPO: Low power software development for embedded applications". Public final report, European Comission, ESD Best practice: pilot action for low power design. 2001.
- [87] Smith Ricardo, Vesga Daniel, Cadena Angela, Boman Ulf, Larsen Erik, Dyrer Isaac. "Energy scenarios for Colombia: process and content". Elsevier, Futures. Vol. 37, p.g. 1-17. ScienceDirect. 2005.
- [88] Songying Yang, Guowei Liang, Weiguo Zhao, Dailiang Xie, Zhenwei Huang. "Design of low power consumption ultrasonic open channel flow meter". The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments. ICEMI 2009. Vol. 1. p.g. 999-1002. IEEE 2009.
- [89] Stewart Robert. "Introduction to physical oceanography". Department of oceanography Texas A & M University September 2008.
- [90] Takeda Yasushi. "Velocity profile measurement by ultrasound Doppler method". Experimental thermal and fluid science. Vol. 10. p.g. 444-453. Elsevier Science Inc. 1995.
- [91] Texas Instruments. "Precision, low power instrumentation amplifier INA128". Datasheet. Burr-Brown products. 2005.
- [92] Thermo Electron Corporation. "Orion conductivity theory". Orion products. The technical edge. Disponible: http://www.thermo.com/eThermo/CMA/PDFs/Articles/articlesFile_11377.pdf.
- [93] Tiwari Vivek, Malik Sharad, Wolfe Andrew, Tie-Chien Lee Mike. "Power analysis of embedded software: a first step towards software power minimization", IEEE transaction on ver large scale integration (VLSI). Vol. 2, No. 4, p.g. 437-445. 1994.
- [94] Toda Minoru, Dahl Jerry. "PVDF corrugated transducer for ultrasonic ranging sensor". Sensors and Actuators. A. 134. p.g. 427-435. Elsevier. ScienceDirect. 2007.
- [95] Toda Minoru, Toisima Soitiro. "Theory of curved, clamped, piezoelectric film, air-borne transducers". IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. Vol. 47, No. 6, p.g. 1421-1431. IEEE. 2000
- [96] Torres D.J., Millard R.C., Swartz H.M., Toole, J.M. "A comparison of LADCP and CTD performance on a slide-down-wire frame versus a standard CTD frame". OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition. Vol. 1. p.g. 359-366. IEEE

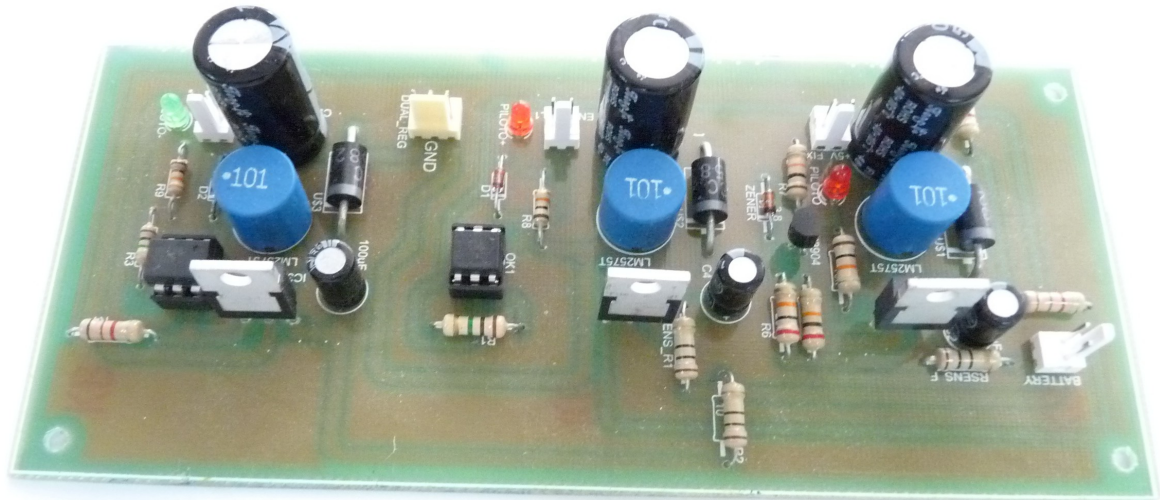
2000.

- [97] Varma A. "Instruction level power dissipation in the intel XScale embedded microprocessor". Proceedings of SPIE. Vol. 5683. Intel corp. And Univ. Of Maryland/ College park. 2005.
- [98] Wave & Tidal Energy News. "Siemens invests in tidal energy". 2010. Disponible en: <http://www.wave-tidal-energy.com/home/news-archive/40-general/254-siemens-invests-in-tidal-energy>.
- [99] Wille Peter. "Sound image of the ocean in research and monitoring. Chapter 2: Alternatives to imaging the sea by sound and first acoustic trials". Springer Berlin Heidelberg. Springer Link. 2005.
- [100] Wille Peter. "Sound image of the ocean in research and monitoring. Chapter 3: Acoustic features of the sea". Springer Berlin Heidelberg. Springer Link. 2005.
- [101] Wille Peter. "Sound image of the ocean in research and monitoring. Chapter 4: Technical and physical characteristics of high resolution echosounders". Springer Berlin Heidelberg. Springer Link. 2005.
- [102] Williams A.J. III, Terray E.A., Thwaites F.T., Trowbridge, J.H. "Acoustic vorticity meter for benthic boundary layer flow measurements". OCEANS '94. 'Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation.' Proceedings. Vol, 3. p.g. 250-253. IEEE 1994.
- [103] Williams, A.J. III, Thwaites, F.T. "Earth coordinate 3-D currents from a modular acoustic velocity sensor". OCEANS '98 Conference Proceedings. Vol. 1. p.g. 244 -247. IEEE 1998.
- [104] Williams A. J. III, Churchill J., Cowles G. "Current and wave measurements in support of shallow water environmental modeling". OCEANS 2009-EUROPE, 2009. OCEANS '09. p.g. 1-7. IEEE 2009.
- [105] Wolfram A. P., Böswetter C., Kunkel B., Kraft U., Böhmer D. ., Smith D. J., Reuter R. "EUROMAR – SEASTAR . A modular multi-sensor system for airborne remote sensing of the sea". Geoscience and remote sensing symposium, 1991. IGARSS'91. Remote sensing: Global monitoring for earth management, International. Vol. 4. p.g. 2027-2030. IEEE 1991.
- [106] Williams Jim. "Bridge circuits. Marrying gain and balance". Application note 43. p.g. 1-48. Linear Technology, June 1990.
- [107] Wood, Stephen (Dr.). Allen, Todd. Kuhn, Sean. Caldwell, Joseph. "The development of an autonomous underwater powered glider for deep-sea biological, chemical and physical oceanography". Oceans 2007. p.g. 1-6. IEEE. 2007.
- [108] Xu, Minnan. "Local measurement of the pulse wave velocity using Doppler Ultrasound". Submitted to the Department of Electrical Engineering and Computer Science, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Science in Electrical Engineering and Computer Science, at Massachusetts Institute Of Technology (MIT). 2002.

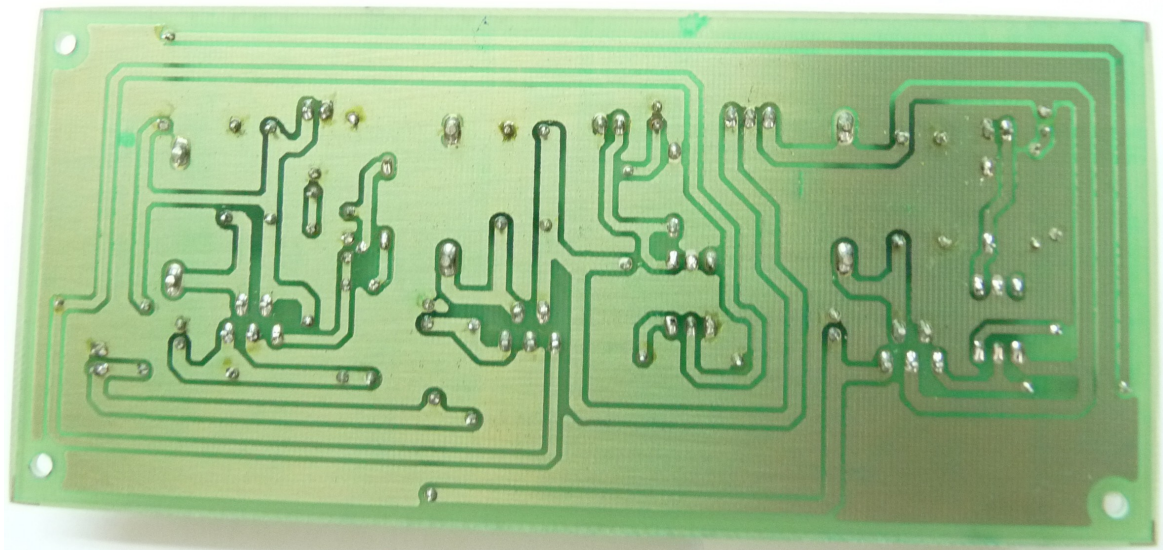
- [109] Zedel L., Cabrera R., Lohrmann A., Hay A. "Single beam, high resolution pulse-to-pulse coherent Doppler profiler". Current measurement, 1995, proceedings of the IEEE fifth working conference on. p.g. 199-204. IEEE 1995.

7. ANEXOS

ANEXO I

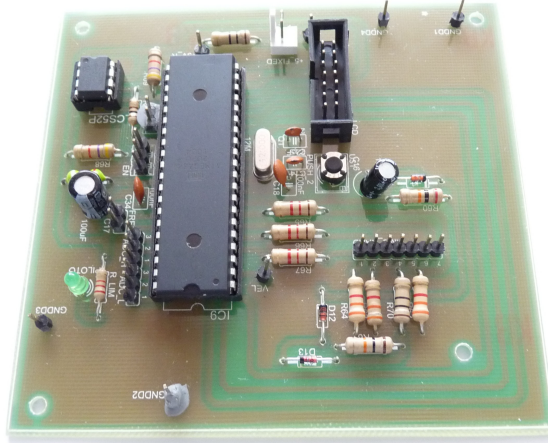


(a)

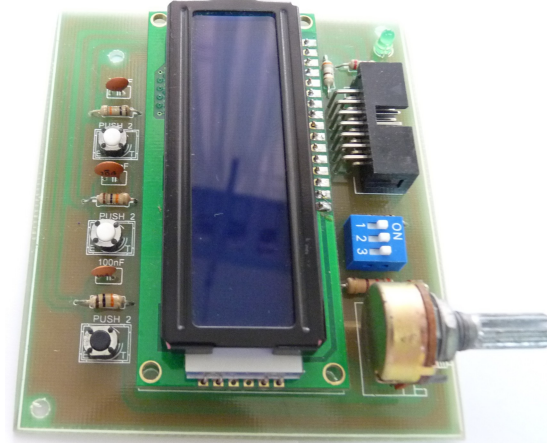


(b)

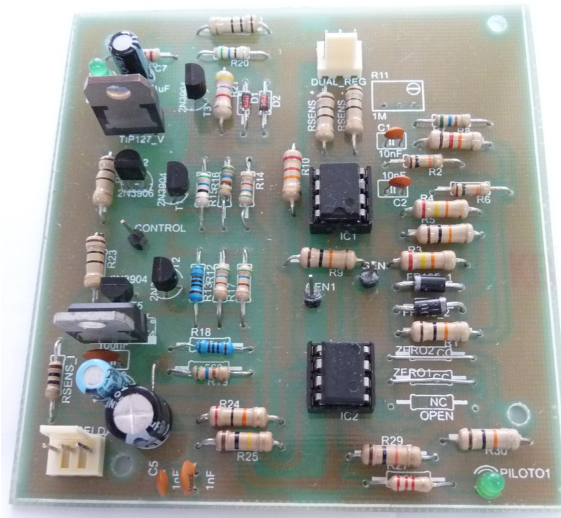
AI. 1: Fuente regulada. (a) Lado de componentes, (b) Lado de pistas.



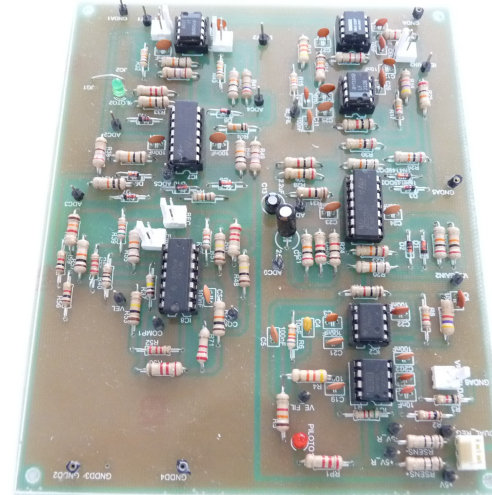
(a)



(b)

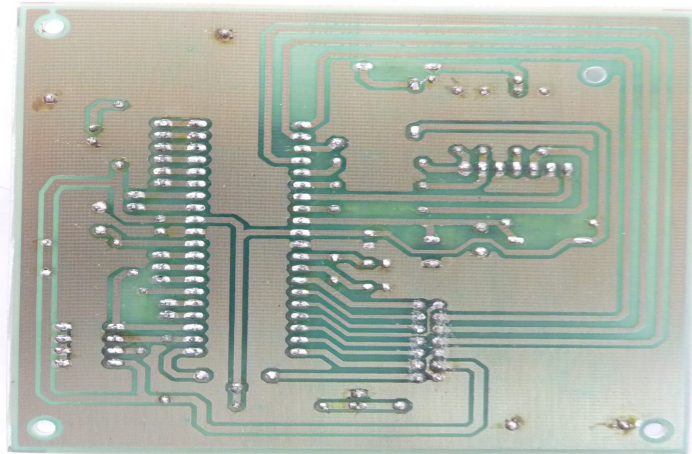


(c)

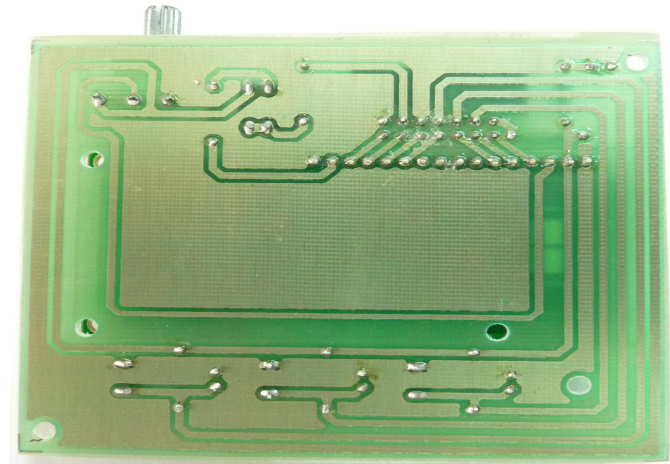


(d)

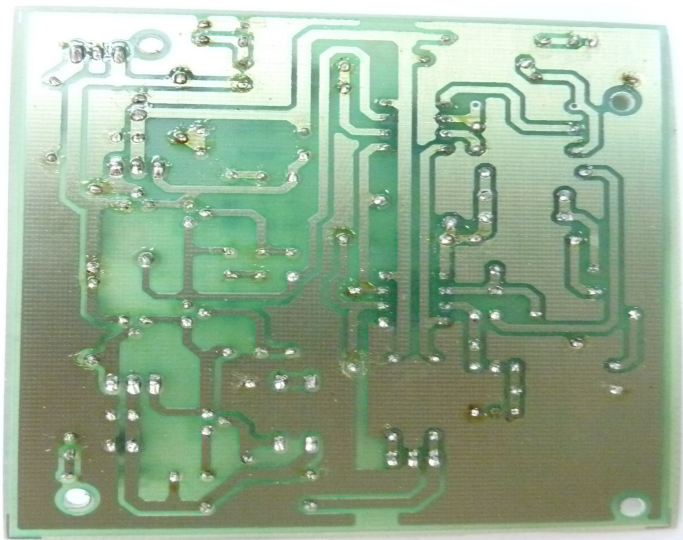
AI. 2: Lado de componentes de las tarjetas impresas. (a) Microcontrolador, (b) LCD, (c) Driver de corriente, (d) Placa de adquisición.



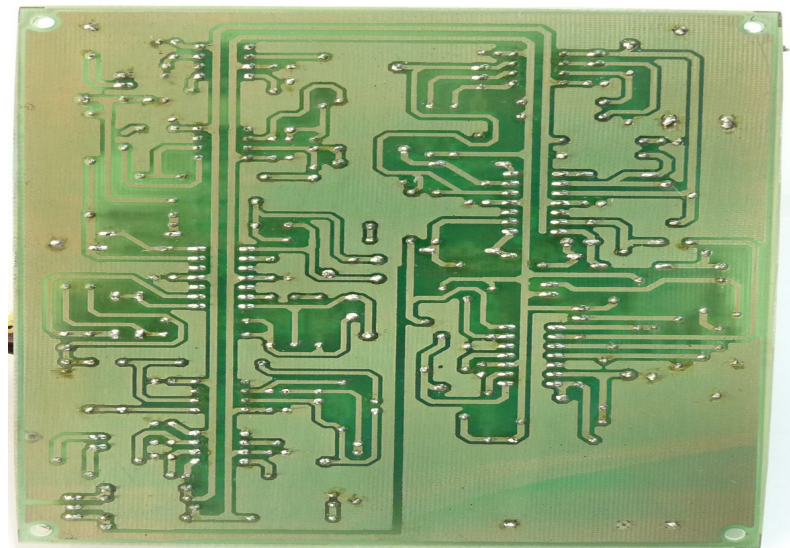
(a)



(b)

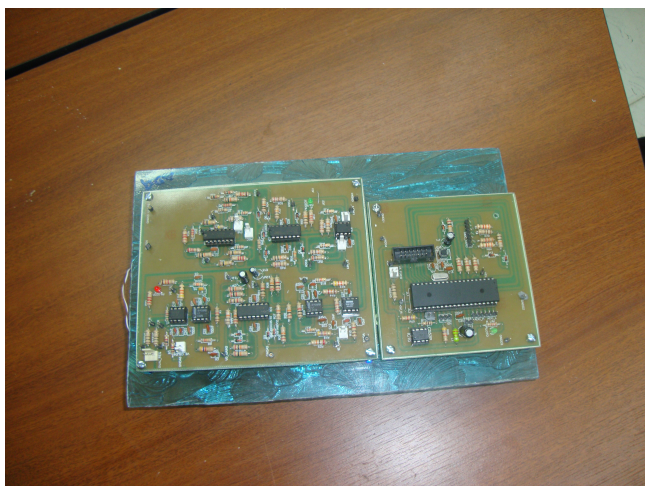


(c)



(d)

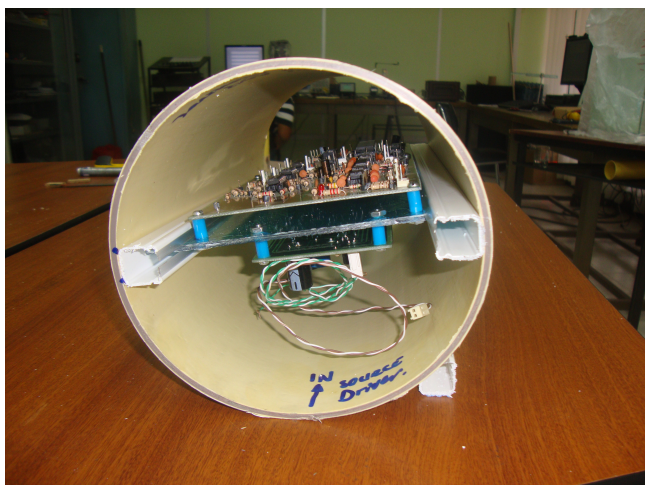
AI. 3: Lado de pistas de las tarjetas impresas. (a) Microcontrolador, (b) LCD, (c) Driver de corriente, (d) Placa de adquisición.



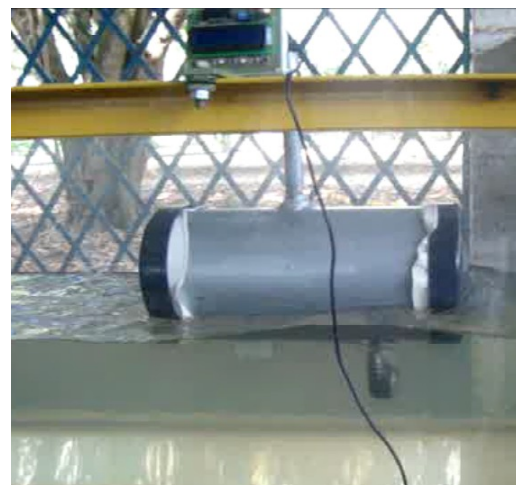
(a)



(b)

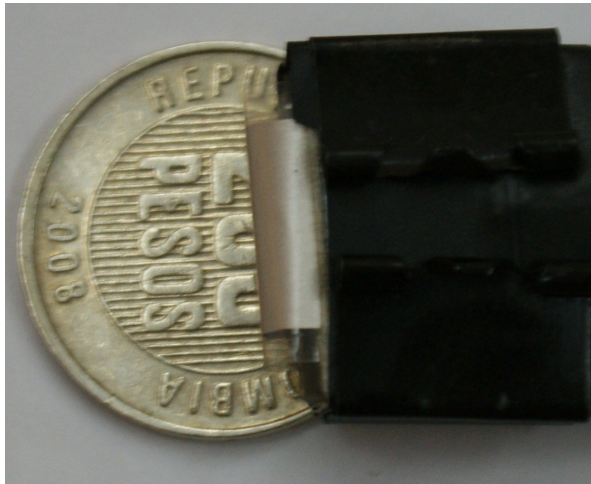


(c)

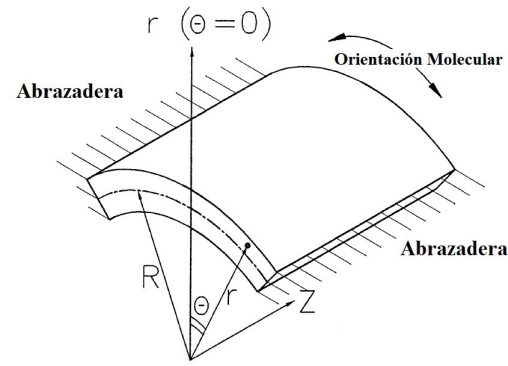


(d)

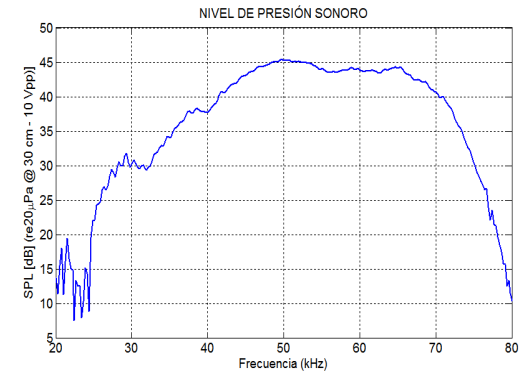
AI. 4: Plataforma multisensorial. (a) Lado microcontrol y ADQ, (b) Lado Driver y fuentes, (c) Ubicación de placas, (d) Prueba del sistema.



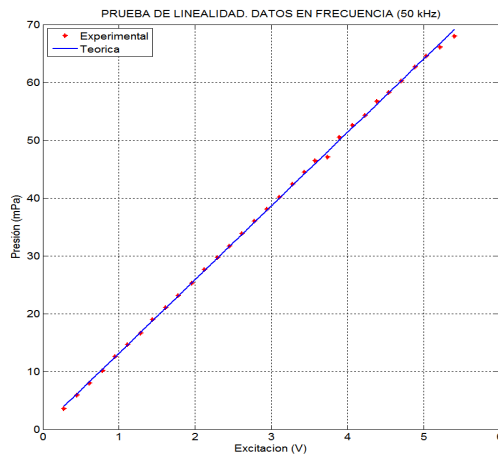
(a)



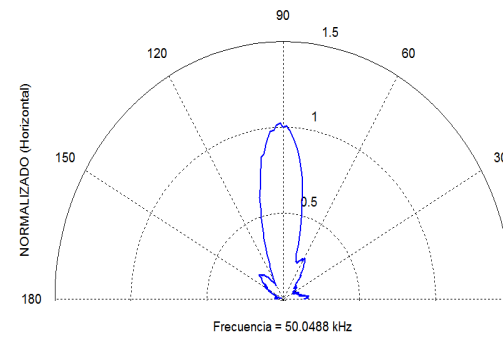
(b)



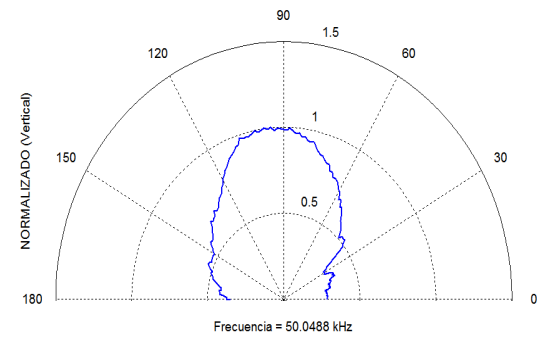
(c)



(d)

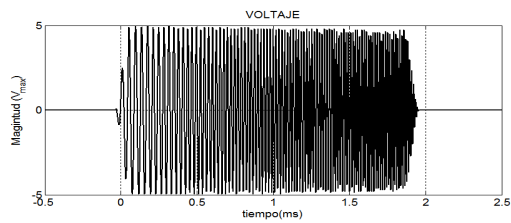


(e)

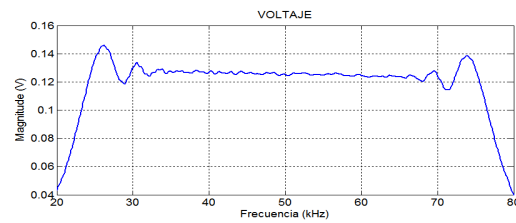


(f)

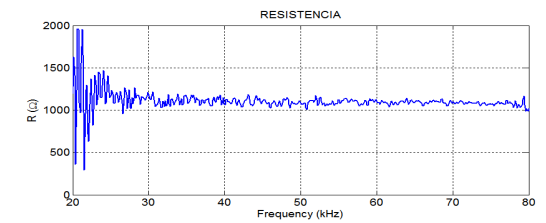
AI. 5: Caracterización acústica. (a) Transductor construido, (b) Esquema de operación, (c) SPL, (d) Linealidad, (e) Directividad Horizontal, (f) Directividad Vertical.



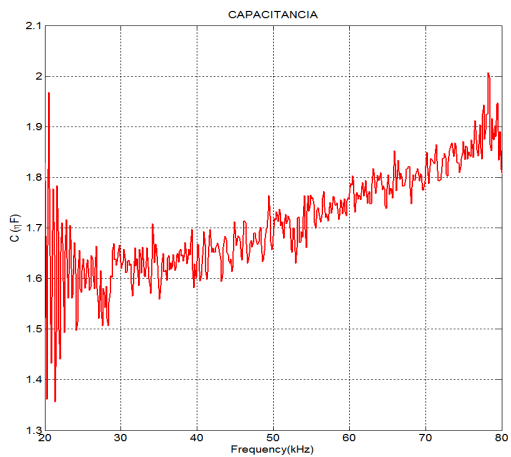
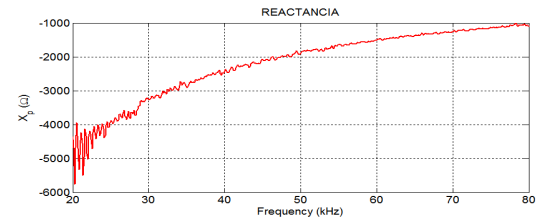
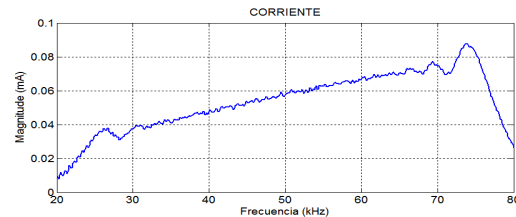
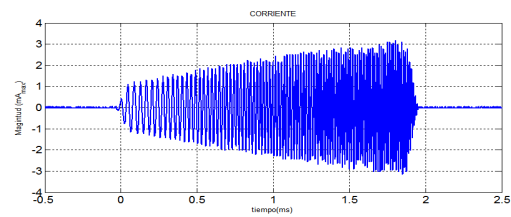
(a)



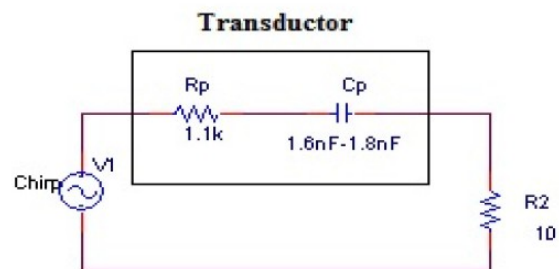
(b)



(c)



(d)



(e)

AI. 6: Caracterización eléctrica. (a) Dominio Temporal, (b) Dominio frecuencial, (c) Resistencia y Reactancia, (d) Capacitancia, (e) Equivalente eléctrico.