

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE DE PROCESAMIENTO PARA LA
OBTENCIÓN DE DATOS DE UN SENSOR CTD**

FRANCISCO RICARDO BARREIRO PINTO

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN**

2015

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE DE PROCESAMIENTO PARA LA
OBTENCIÓN DE DATOS DE UN SENSOR CTD**

FRANCISCO RICARDO BARREIRO PINTO

Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería

Director
Carlos Alejandro Zuluaga Toro
Magister en Ingeniería

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2015**

Nota de aceptación

Firma
Nombre:
Presidente del jurado

Firma
Nombre:
Jurado

Firma
Nombre:
Jurado

Medellín, Abril 9 de 2015

Este trabajo de grado se lo dedico principalmente a Dios que ha sido mi guía y me ha dado la fuerza y la sabiduría para salir a delante y superar todas las dificultades que se han presentado. A mis padres y hermanos por su apoyo, consejos, comprensión y por ayudarme con los recursos necesarios para culminar estos estudios. Por darme todo lo que soy como persona, mis valores, principios, empeño, perseverancia y coraje para lograr mis objetivos. A mi esposa Liliana por su paciencia, comprensión, bondad y sacrificio. A mi hija Alanna que me ha inspirado para ser mejor. Este trabajo de grado lleva mucho de ustedes, gracias por estar a mi lado.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios que me ha dado la oportunidad de vivir esta etapa de mi vida y permitirme crecer intelectualmente, agradecido estoy también con el director del trabajo de grado Carlos Zuluaga y todos los docentes que participaron en este proceso de formación por guiarme y compartirme sus conocimientos, también agradezco a todas las personas que hacen parte del Grupo de Automática y Diseño A+D de la Universidad Pontificia Bolivariana por abrirme las puertas durante la culminación de mi trabajo de grado.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. MEDICIÓN DE TEMPERATURA, CONDUCTIVIDAD Y PROFUNDIDAD	17
1.1. Sensores de salinidad, temperatura y profundidad (CTD)	17
1.2. Medición de conductividad, temperatura y profundidad	18
1.2.1. Instrumentación utilizada para la medición de conductividad	18
1.2.2. Instrumentación para la medición de temperatura en el agua de mar	20
1.2.3. Instrumentación para la medición de la profundidad en el mar	22
2. INGENIERÍA CONCEPTUAL	25
2.1. Descripción de los requerimientos del proyecto	25
2.2. Cálculo de salinidad del agua de mar	26
2.3. Cálculo de densidad del agua de mar	29
2.4. Cálculo de la velocidad del sonido en el agua de mar	32
2.5. Cálculo de la temperatura del punto de congelación del agua de mar	34
3. DESARROLLO DE SOFTWARE Y PUESTA A PUNTO	36
3.1. Análisis	36
3.2. Desarrollo	37

3.3.	Implementación del software para adquisición y procesamiento de datos .	37
3.4.	Implementación de los módulos para el cálculo de profundidad, salinidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación a partir de la presión, conductividad y temperatura del agua de mar	39
3.4.1.	Módulo para el cálculo de la profundidad	40
3.4.2.	Módulo para el cálculo de la salinidad	40
3.4.3.	Módulo para el cálculo de la densidad	41
3.4.4.	Módulo para el cálculo de la velocidad del sonido	42
3.4.5.	Módulo para el cálculo del punto de congelación del agua de mar . . .	43
3.5.	Validación	44
4.	Resultados obtenidos	45
	CONCLUSIONES	49
	BIBLIOGRAFÍA	51
	ANEXOS	56
A.	ARTÍCULO PUBLICABLE	57
B.	ANTEPROYECTO	78

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1 Sensor de conductividad tipo inductivo	19
2 Adquisición de datos en la plataforma de LabVIEW®	38
3 Etapa de procesamiento de datos	38
4 Interfaz gráfica CTD	39
5 Cálculo de la profundidad en la plataforma de LabVIEW®	40
6 Módulo para el cálculo de la profundidad	40
7 Cálculo de la salinidad en la plataforma de LabVIEW®	41
8 Módulo para el cálculo de la salinidad	41
9 Cálculo de la densidad en la plataforma de LabVIEW®	42
10 Módulo para el cálculo de la densidad	42
11 Cálculo de la velocidad del sonido en la plataforma de LabVIEW®	42
12 Módulo para el cálculo de la velocidad del sonido	43
13 Cálculo del punto de congelación del agua en la plataforma de LabVIEW®	43
14 Módulo para el cálculo del punto de congelación del agua de mar	43
15 Gráfica profundidad vs. presión	46
16 Gráfica salinidad vs. presión	46

17	Gráfica densidad vs. presión	47
18	Gráfica velocidad del sonido vs. presión	48

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1 Nomenclatura	16
2 Porcentaje de error módulos	48

GLOSARIO

MATLAB: es un lenguaje de alto nivel y el entorno interactivo utilizado por millones de ingenieros y científicos en todo el mundo. Permite explorar y visualizar ideas, así como colaborar interdisciplinariamente en procesamiento de señales e imagen, comunicaciones, sistemas de control y finanzas computacionales [1].

LABVIEW: *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*, sigla del inglés. Es una plataforma de desarrollo de Software propiedad de *National Instruments* que utiliza iconos en lugar de líneas de texto para crear aplicaciones. LabVIEW® utiliza la programación de flujo de datos, donde el flujo de datos a través de los nodos en el diagrama de bloques determina el orden de ejecución de los instrumentos virtuales y las funciones. Los instrumentos virtuales, son programas de LabVIEW® que imitan instrumentos físicos. Aunque pretende ser de propósito general, la plataforma LabVIEW® es utilizada principalmente para adquisición de datos, control de instrumentación y automatización, a nivel académico, de investigación e industrial [2].

SOFTWARE: conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora [3].

ADQUISICIÓN DE DATOS: la adquisición de datos es el proceso de medir un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema de adquisición de datos permite digitalizar, procesar, visualizar y almacenar datos procedentes de una medición [4].

CTD: *Conductivity, Temperature, and Depth*. Es la herramienta principal para determinar propiedades físicas esenciales de agua de mar. Entrega una cartografía precisa

y completa de la distribución y la variación de la temperatura del agua, salinidad y densidad de la columna de agua [5].

SENSOR DE PRESIÓN: los sensores de presión Suelen estar basados en la deformación de un elemento elástico cuyo movimiento es detectado por un transductor de presión que transforma la magnitud física de presión o fuerza por unidad de superficie en otra magnitud eléctrica que es la que se emplea en los equipos de automatización o adquisición estándar. Los rangos de medida son muy amplios, desde unas milésimas de Bar hasta los miles de Bar [6, 7].

SENSOR DE TEMPERATURA: es un instrumento que sirve para medir la temperatura, basado en el efecto que un cambio de temperatura produce en algunas propiedades físicas observables y en el hecho de que dos sistemas a diferentes temperaturas puestos en contacto térmico tienden a igualar sus temperaturas. Entre las propiedades físicas en las que se basan los sensores de temperatura destaca la dilatación de los gases, la dilatación de una columna de mercurio, la resistencia eléctrica de algún metal, la variación de la fuerza electromotriz de contacto entre dos metales, la deformación de una lámina metálica, cuantificación de la radiación emitida o pico de frecuencia de onda emitida, etc. En los CTD se utilizan básicamente dos tipos de sensores de temperatura, los termistores y los RTD. El sensor de temperatura, típicamente suele estar formado por el elemento sensor, de cualquiera de los tipos anteriores y el termopozo, el cual debe ser de un material que sea buen conductor del calor, para que los cambios se transmitan rápidamente al elemento sensor y del cable al que se conectarán el equipo electrónico [8, 9].

SENSOR DE CONDUCTIVIDAD: el sensor de conductividad eléctrica hace la medición de los electrolitos de una solución. Esto se define como la conductancia en un volumen dado. Conductancia es la habilidad de la solución para conducir la corriente eléctrica. La conductancia eléctrica es un indicador importante de calidad de agua [10].

RESUMEN

En este trabajo de grado se presenta el desarrollo y puesta a punto de un software diseñado para la adquisición y procesamiento de datos que entregan los sensores de conductividad, temperatura y profundidad, utilizados en exploraciones oceanográficas, del proyecto “Desarrollo de un software de procesamiento para la obtención de datos de un sensor CTD”. Cada uno de los datos entregados por estos sensores serán procesados y utilizados para calcular variables del agua de mar relacionadas a estas tres mediciones como son salinidad, conductividad, temperatura, profundidad, presión, densidad, punto de congelación y velocidad del sonido. Para darle solución a estos requerimientos en el desarrollo del software, se implementarán subrutinas para la adquisición y procesamiento de las señales entregadas por los sensores. Para el cálculo de las variables salinidad, profundidad, densidad, punto de congelación y velocidad del sonido, se implementan funciones basadas en las ecuaciones descritas en los documentos técnicos de la UNESCO para las ciencias marinas No. 44 “*Algorithms for computation of fundamental properties of seawater*”.

PALABRAS CLAVE:

Mediciones oceanográficas; Propiedades del agua de mar; Sensores de conductividad, temperatura y profundidad; Software; Adquisición y procesamiento de datos.

INTRODUCCIÓN

La población mundial está en constante crecimiento al igual que su consumo energético, esto trae como consecuencia el agotamiento de los recursos naturales, generando así un impacto irreparable en el medio ambiente. Por esta razón uno de los principales temas de estudio en la actualidad es la explotación y buen uso de los recursos naturales de los océanos. Por tal motivo, la medición y el estudio de variables como salinidad, conductividad, temperatura y presión del agua en los océanos es de gran importancia, ya que estas variables indican la viabilidad de la explotación de los recursos naturales de una zona [11].

Los océanos cumplen un papel muy importante para el planeta ya que en estos se producen procesos biológicos, físicos y químicos que ayudan a mantener su estructura y movimiento. Por esta razón el monitoreo de las variables oceanográficas salinidad, temperatura y presión, no es sólo importante para la explotación de recursos naturales, sino que también ayuda a comprender los procesos que ocurren en el entorno, calcular la probabilidad de inundaciones costeras, predicción de los efectos del calentamiento global y desastres naturales, ya que estos fenómenos en la actualidad afectan la calidad de vida y la de las próximas generaciones [12, 13].

Uno de los mayores impedimentos para la comprensión de procesos oceánicos es la falta de datos *in situ* en regiones remotas. Como consecuencia, en la actualidad, existe una falta de capacidad para detectar y vigilar los cambios en las condiciones oceanográficas en algunas regiones que son importantes climáticamente, otra consecuencia es la escasez de datos con los cuales se puede cuestionar y validar los modelos climáticos. Para comprender el papel de los océanos en el sistema climático se requiere de un constante muestreo de propiedades fundamentales del agua de mar tales como temperatura, presión y salinidad [14]. La herramienta principal para determinar las propiedades físicas esenciales del agua en los océanos es un sensor de conductividad, temperatura y

profundidad, conocidos por sus siglas en inglés como CTD. Con los datos proporcionados por el sensor y el uso de un software de procesamiento de señales diseñado para el CTD, los científicos pueden obtener gráficos precisos y completos de la distribución y la variación de la temperatura del agua, salinidad y densidad que ayuda a entender cómo los océanos afectan a la vida en la tierra [15].

Los modelos matemáticos para el cálculo de las propiedades de agua de mar tales como salinidad, profundidad, densidad y punto de congelación entre otras, han facilitado tener en forma digital los datos de las mediciones de conductividad, presión y temperatura. Estos modelos matemáticos fueron desarrollados originalmente en FORTRAN, sin embargo estas pueden ser implementadas en Matlab® y otros motores computacionales. [16].

Este trabajo presenta beneficios asociados a las exploraciones oceanográficas, ya que está enfocado en la medición y cálculos de algunas de las propiedades fundamentales del agua de mar, a través de las cuales se puede estudiar la posibilidad de explotación de sus recursos naturales. Además posibilita la reducción de costos en la obtención del dispositivo CTD y su software de procesamiento, ya que comercialmente tienen un alto costo. La utilización de sensores de conductividad, temperatura y presión en exploraciones oceanográficas reduce la complejidad en la medición de variables del agua de mar, ya que con los valores de estas tres mediciones (conductividad, temperatura y presión), se pueden monitorear otras propiedades del agua de mar como son salinidad, profundidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación sin tener que utilizar sensores para cada una de estas propiedades.

Tabla 1. Nomenclatura

P	Presión de la columna de agua, dBar
LAT	Valor de la latitud del lugar de muestreo, °
GR	Variación de la gravedad con la latitud
$Depth$	Profundidad, m
T	Temperatura del agua, °C
S	Salinidad práctica, PSU
C	Conductividad, S/m
ρ	Densidad del agua de mar, kg/m ³
ρ_w	Densidad de referencia para el agua pura, kg/m ³
σ	Variación de la densidad, kg/m ³
U	Velocidad del sonido, m/s
t_f	Temperatura de congelación del agua de mar, °C
K	Módulo de compresibilidad secante para agua de mar

1. INSTRUMENTACIÓN PARA LA MEDICIÓN DE TEMPERATURA, CONDUCTIVIDAD Y PROFUNDIDAD EN EXPLORACIONES OCEANOGRÁFICAS

En esta sección se describe la instrumentación utilizada para medir o monitorear la conductividad, temperatura y presión en las exploraciones oceanográficas y sus características principales.

1.1. SENSORES DE SALINIDAD, TEMPERATURA Y PROFUNDIDAD (CTD)

Los instrumentos CTD son las principales herramientas para el estudio de las características del agua marina tales como conductividad, temperatura, presión, salinidad, profundidad y densidad. Estos instrumentos reciben el nombre CTD debido a que miden directamente las variables conductividad, temperatura y profundidad [17]. Este dispositivo ha sustituido a la tradicional *hydrocast* que utiliza botellas Niskin y termómetros reversibles con los cuales se tomaban muestras de agua para ser procesadas en un laboratorio, esta era la práctica oceanográfica estándar de alrededor de 1910 a 1970 [16].

Los CTD incorporan sensores de medición local para conductividad eléctrica, temperatura y presión. La medición de la conductividad eléctrica se hace debido a que ésta es uno de los parámetros necesarios para calcular la salinidad. Con los datos de salinidad, temperatura y presión obtenidos a partir de las mediciones del CTD, se puede calcular la densidad y la velocidad del sonido en el agua, lo que ha impulsado el desarrollo militar y la aplicación de la tecnología CTD para submarinos [18].

1.2. INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA PARA LA MEDICIÓN DE CONDUCTIVIDAD, TEMPERATURA Y PROFUNDIDAD

Los sensores CTD utilizan sensores independientes para la medición de las variables conductividad, temperatura y presión, por esta razón se debe analizar cada uno de estos sensores y los métodos utilizados en las mediciones.

1.2.1. *Conductividad e instrumentación utilizada para su medición en exploraciones oceanográficas*

La conductividad es la medida de la capacidad que tiene un material para conducir la corriente eléctrica. Entonces, la conductividad eléctrica, se define como la capacidad que tienen las sales inorgánicas en solución (electrolitos) para conducir la corriente eléctrica. El agua pura, prácticamente no conduce la corriente, sin embargo el agua con sales disueltas conduce la corriente eléctrica. Los iones cargados positiva y negativamente son los que conducen la corriente, y la cantidad conducida dependerá del número de iones presentes y de su movilidad [19].

La conductividad eléctrica del agua de mar se debe a que esta contiene una gran abundancia de sales disueltas. La conductividad depende de la temperatura, la salinidad y la presión, siendo más fuerte la dependencia de la temperatura y más débil la dependencia de la presión. Por eso para estimar la salinidad (PSU) se debe medir la temperatura (°C) y la conductividad (S) [20].

Para realizar las mediciones de conductividad con el CTD, generalmente se emplean dos clases de sensores: los inductivos y los de tipo electrodo. Ambos presentan ventajas y desventajas, y los diferentes fabricantes construyen sus sensores de formas distintas para cumplir con los requerimientos [21].

1. Sensores de conductividad inductivos: el principio de funcionamiento de este tipo de sensores consiste en dos bobinas toroidales, una transmisora y otra receptora.

Ambas bobinas están integradas en un alojamiento hueco. La zona de las bobinas se sumerge en el líquido y este pasa a través de los agujeros de las bobinas toroidales, luego se aplica una corriente alterna sinusoidal a la bobina transmisora, lo cual produce una corriente en el fluido proporcional a su conductividad y a su vez, esta corriente induce una tensión en la bobina receptora, tal como se puede observar en la Figura 1 [22]. La conductividad se determina midiendo la tensión en la segunda bobina toroidal y conociendo la constante de la celda [22]. Los sensores de conductividad inductivos son generalmente robustos, fáciles de limpiar y como no necesitan protección se pueden exponer más fácilmente a las corrientes marinas sin riesgo de daños [21].

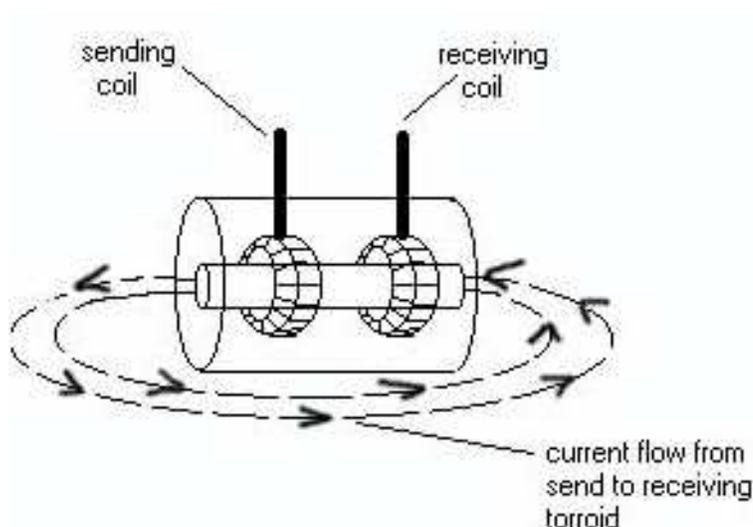


Figura 1. Sensor de conductividad tipo inductivo

2. Sensores de conductividad tipo electrodos: estos sensores miden la capacidad de una solución de conducir una corriente eléctrica entre dos electrodos. En la solución, la corriente fluye por el transporte del ion. Por lo tanto, una gran concentración de iones en la solución dará lugar a valores más altos de conductividad.

El sensor de conductividad está midiendo realmente la conductancia, definida como el recíproco de la resistencia. Cuando la resistencia se mide en ohms (Ω), la conductancia se mide utilizando la unidad Siemens (S). Puesto que Siemens es una unidad muy grande, las muestras acuosas son medidas comúnmente en microsiemens (μS), o milisiemens (mS). Aunque el sensor de conductividad mide

conductancia, la conductividad (C) en una solución acuosa, está definida por la fórmula $C = GK_c$, donde G es la conductancia y el K_c es la constante de la célula. La constante de la célula para un sensor tipo electrodo está definida por: $K_c = d/A$. Donde d es la distancia entre los dos electrodos, y A es el área de la superficie del electrodo. Una diferencia de potencial se aplica a los dos electrodos del sensor de conductividad. La corriente que resulta es proporcional a la conductividad de la solución. Esta corriente se convierte en un voltaje que se leerá mediante una interfaz [23].

Las células de electrodos bajo condiciones determinadas de funcionamiento especificadas por el fabricante pueden dar gran exactitud y no suelen tener problemas de estabilidad. En cualquier caso, pueden ser frágiles por lo que deben ser protegidas de las corrientes marinas, y pueden dar errores mucho mayores que las inductivas si están contaminadas, ya que esto afectaría la medición de la corriente eléctrica entre dos electrodos [21].

1.2.2. Instrumentación para la medición de temperatura en el agua de mar

La posición geográfica en la tierra, la hora del día, la profundidad y las estaciones del año determinan la temperatura en la superficie del agua de mar. La temperatura en la superficie del mar puede exceder los 30 °C en aguas tropicales abiertas y 40 °C en las lagunas tropicales poco profundas. El principal aporte calorífico que tiene el agua del mar está representado por las radiaciones energéticas que le llegan del Sol. Su calor específico tiene un valor elevado en comparación con el calor específico de las demás sustancias existentes en la superficie del planeta; esto confiere al mar una extraordinaria capacidad para almacenar energía y por esta propiedad puede actuar como un gigantesco moderador del clima. Se entiende por calor específico, en general, la cantidad de calor necesario para aumentar en un grado centígrado la temperatura de una cantidad determinada de agua. Esta capacidad de los océanos para conservar el calor permite que la temperatura sea más estable en el mar que en los continentes, siendo en aquél menos marcados sus cambios a través de las cuatro estaciones del año. La distribución de la temperatura en el oceano es compleja y no puede predecirse con suficiente precisión, debido a que el comportamiento de la temperatura en la columna de agua es

también muy complejo [24, 25, 26].

Los cambios de temperatura de las aguas oceánicas no sólo influyen en la dinámica del mar y de la atmósfera, sino que constituyen uno de los factores principales que intervienen en la distribución de los organismos marinos, la forma de los seres vivos y la velocidad con que se llevan a cabo sus reacciones metabólicas. Por todo esto es importante contar con los mapas que describan las características de la temperatura de las aguas del océano. Para la elaboración de estos mapas con la ayuda de los dispositivos CTD se utilizan generalmente sensores de temperatura tipo termistores o tipo detectores de temperatura resistivos (RTD) [25].

1. Termistores: un termistor es un elemento sensor de temperatura integrado de material semiconductor que exhibe un gran cambio en la resistencia proporcional a un pequeño cambio en la temperatura. Existen dos tipos de termistores, dependiendo de si su coeficiente de temperatura es negativo o positivo. Si es negativo se denominan NTC, y si es positivo se denominan PTC.

El funcionamiento de un termistor se basa en la variación de la resistencia de un semiconductor con la temperatura, debido a la variación de la concentración de portadores. Para los termistores NTC, al aumentar la temperatura, aumentará también la concentración de portadores, por lo que la resistencia será menor, de ahí que el coeficiente sea negativo. Para los termistores PTC, en el caso de un semiconductor con un dopado muy intenso, éste adquirirá propiedades metálicas, tomando un coeficiente positivo en un margen de temperatura limitado.

En algunos casos, la resistencia de un termistor a la temperatura ambiente puede variar entre 100Ω y $100 \text{ k}\Omega$. Los termistores tienen tamaño reducido que hacen que la respuesta a los cambios de temperatura sea rápida. Esta elevada sensibilidad a variaciones de temperatura hace que el termistor resulte muy adecuado para mediciones precisas de temperatura. El precio que se paga por la alta sensibilidad es la pérdida de la linealidad. El termistor es un dispositivo extremadamente no lineal que es altamente dependiente de los parámetros del proceso, otra desventaja que presentan los termistores es que sufren de autocalentamiento [27, 28].

2. Detectores de temperatura resistivos (RTD): como su nombre lo indica, las RTD son sensores utilizados para medir la temperatura mediante la correlación de la resistencia del elemento RTD con la temperatura. La mayoría de las RTD consisten en un alambre de una determinada longitud en forma de espiral envuelta alrededor de un núcleo de cerámica o de vidrio. El elemento suele ser bastante frágil, por lo que a menudo se coloca dentro de una sonda de enfundado, llamada termopozo, para protegerlo. Las características que deben tener los metales con los que se fabrican las RTD son un alto coeficiente de resistencia y una alta resistividad para que tenga mayor sensibilidad y que haya una relación lineal entre la resistencia y la temperatura. El platino es el metal más óptimo, ya que, además de cumplir las características, tiene un rango de temperatura mayor; pero al tener un alto costo, se utilizan otros metales como el níquel o cobre [29].

Las ventajas de utilizar los sensores tipo RTD es que tienen un margen de temperatura muy amplio y alta sensibilidad; como presentan gran sensibilidad, las medidas son dadas con mucha exactitud y repetitividad, presentan derivas en la medida de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ al año por lo que son muy estables en el tiempo, otro de los beneficios de las RTD es que son relativamente inmunes al ruido eléctrico. Los inconvenientes que presentan estos sensores es que son frágiles ante vibraciones, golpes y presentan autocalentamiento. Al comparar las RTD con los termistores se pueden encontrar desventajas como mayor costo y menor velocidad de reacción [29].

1.2.3. Metodología e instrumentación para la medición de la profundidad en el mar

En las exploraciones oceanográficas generalmente no se mide directamente la profundidad, se mide la presión del mar en el punto donde se encuentran. La presión es la fuerza ejercida por la columna de agua de mar sobre un área unitaria. En el sistema mks la unidad de la presión es el pascal (Pa). Sin embargo, la presión atmosférica es usualmente medida en Bar y la presión del océano en deciBar (dBar).

La fuerza asociada al campo de presión se genera por la diferencia de presión de un

punto a otro, esto es por el gradiente de presión. Esta fuerza tiene la dirección del punto de presión alta al punto de presión baja. En el océano la componente vertical de la fuerza de gravedad está aproximadamente en balance con la componente vertical de la fuerza del gradiente de presión, por ello la presión se incrementa casi en la misma proporción que se incrementa la profundidad. La variación vertical total de la presión en el océano es en promedio de 0 a 4000 dBar, y la máxima del orden de 10.000 dBar. Los gradientes horizontales de presión (fuerza interna) generan los flujos horizontales en el océano interior, los cuales son mucho más intensos que los flujos verticales. Las variaciones horizontales de la presión se deben a las variaciones en la distribución de masa (densidad). Por eso en oceanografía física interesa mucho conocer la densidad en cada uno de los puntos de los océanos [30].

En los dispositivos CTD para medir la presión generalmente se utilizan sensores basados en el efecto piezoresistivo que consiste en una variación de la resistencia en el semiconductor, causado por su expansión y compresión que influye en la movilidad de los electrodos bajo carga mecánica. En este caso se aplica una membrana de un material semiconductor con estructuras selectivamente distribuidas, cuando se estira, su resistencia aumenta. Estos sensores se montan en la misma dirección que la tensión y a menudo en grupos de cuatro para formar un completo Puente de Wheatstone [31].

La profundidad en metros para aguas marinas se puede calcular en función de la presión, la variación de la gravedad y la latitud y se representa por.

$$Depth = \frac{(((aP + b)P - c)P + d)P}{GR}, \quad (1)$$

donde $a = -1.82 \times 10^{-15}$, $b = 2.279 \times 10^{-10}$, $c = 2.2512 \times 10^{-5}$ y $d = 9.721559$, P es la presión en dBar y GR representa la variación de la gravedad con la latitud, que está dada por:

$$GR = e(1 + (5.2788 \times 10^{-3} + 2.36 \times 10^{-5}X)X) + fP, \quad (2)$$

donde $X = \sin^2(LAT/57.29578)$, $e = 9.780318$, $f = 1.092 \times 10^{-6}$ [32].

2. CÁLCULO DE LA SALINIDAD, DENSIDAD, VELOCIDAD DEL SONIDO Y PUNTO DE CONGELACIÓN EN EL AGUA DE MAR A PARTIR DE LAS MEDICIONES REALIZADAS CON LOS SENSORES DE CONDUCTIVIDAD, TEMPERATURA Y PRESIÓN

El Grupo de Automática y Diseño A+D se encuentra desarrollando un proyecto de exploración oceanográfica. Una de las etapas del proyecto consiste en desarrollar un software de procesamiento para los datos de los sensores de conductividad, temperatura y presión, para luego procesar estos datos obtenidos y calcular variables del agua de mar relacionadas a estas tres mediciones. El desarrollo del software para la obtención y procesamiento de las variables conductividad, temperatura y presión, ayudará a observar y estudiar algunas propiedades fundamentales del agua del mar como salinidad, conductividad, temperatura, profundidad, presión, densidad, punto de congelación y velocidad del sonido.

2.1. DESCRIPCIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS DEL PROYECTO

Para la realización del proyecto “Desarrollo de un software de procesamiento para la obtención de datos de un sensor CTD”, se diseñó una rutina en la plataforma de LabVIEW® para la lectura, registro y monitoreo de los valores entregados por los sensores de temperatura, conductividad y presión.

Luego de registrar los valores de temperatura, conductividad y presión, se implementaron funciones para el cálculo de otras propiedades del agua de mar como salinidad, profundidad, densidad, punto de congelación y velocidad del sonido.

Finalmente se implementan rutinas para almacenar y monitorear las propiedades del agua de mar salinidad, profundidad, densidad, punto de congelación y velocidad del sonido. Es importante mencionar que para el cálculo de la profundidad es necesario conocer el valor en grados ($^{\circ}$) de la latitud donde se desea realizar el muestreo de las propiedades del agua de mar.

La salinidad, velocidad de sonido, punto de congelación y densidad del agua de mar se obtienen utilizando los algoritmos y ecuaciones descritos en los documentos técnicos de la UNESCO en las ciencias marinas No. 44 “*Algorithms for computation of fundamental properties of seawater*” [32, 33, 34].

2.2. CÁLCULO DE SALINIDAD DEL AGUA DE MAR

La medición hecha por el sensor de conductividad entrega un valor que representa la cantidad de iones disueltos en el agua de mar. La salinidad se puede calcular con el valor de conductividad entregado por el CTD, teniendo en cuenta también los valores de la temperatura y presión ambiente. La escala de salinidad práctica está dada en unidades de salinidad práctica (PSU).

La salinidad en el mar varía generalmente entre 33 PSU a 37 PSU. La salinidad es superior en latitudes medias mientras que en regiones de intensa lluvia o donde hay dilución por ríos puede disminuir considerablemente. En mares aislados de latitudes medias, como el Mar Rojo, donde ocurre una alta evaporación, la salinidad puede llegar a 40 PSU o más [35]. Las ecuaciones que se usan en la actualidad para el cálculo de la salinidad práctica a partir de la conductividad y viceversa fue presentado por la UNESCO en 1983. Las ecuaciones utilizadas están basadas en la Escala Práctica de Salinidad 1978 (PSS-78) y son válidas dentro del rango de temperaturas entre -2°C y 40°C , rango de presión entre 0 y 10.000 dBar y una amplia gama de salinidad práctica entre 2 y 42 PSU de la respectiva conductividad eléctrica y la proporción de conductividad. Aunque los valores de salinidad práctica menores a 2 PSU no están definidas, las ecuaciones ofrecen resultados distintos de cero válidos hasta los umbrales

de los coeficientes de salinidades mayores que 0,02 PSU.

La Escala de Salinidad Práctica PSS-78 se basa en una ecuación que relaciona la salinidad a la relación de la conductividad eléctrica del agua de mar a 15 °C y la presión de una atmósfera estándar, a la de una solución estándar de cloruro de potasio (KCl). Un agua de mar estándar de 35 PSU tiene, por definición, una relación de la conductividad de la unidad a 15 °C con una solución de KCl que contiene 32,4356 g de KCl en una masa de 1 kg de solución. A partir de mediciones de peso diluido (con agua pura) o peso evaporado para aguas superficiales del Atlántico Norte, se estableció la siguiente relación [32, 36]:

$$S = a_0 + a_1 R_T^{1/2} + a_2 R_T + a_3 R_T^{3/2} + a_4 R_T^2 + a_5 R_T^{5/2} + \frac{(T - 15)}{1 + k(T - 15)} \left(b_0 + b_1 R_T^{1/2} + b_2 R_T + b_3 R_T^{3/2} + b_4 R_T^2 + b_5 R_T^{5/2} \right), \quad (3)$$

donde:

$$\begin{aligned} a_0 &= 0.008, & b_0 &= 0.0005, \\ a_1 &= -0.1692, & b_1 &= -0.0056, \\ a_2 &= 25.3851, & b_2 &= -0.0066, \\ a_3 &= 14.0941, & b_3 &= -0.0375, \\ a_4 &= -7.0261, & b_4 &= 0.0636, \\ a_5 &= 2.7081, & b_5 &= -0.0144, \end{aligned}$$

$$k = 0.0162,$$

esta ecuación se utiliza para el cálculo de la salinidad práctica medida sólo por salinómetros de laboratorio, donde R_T es un valor medido. La UNESCO también estableció una ecuación complementaria para convertir coeficientes de conductividad medidos a presión mayor que una atmósfera (es decir, para mediciones con CTD). Dando mediciones *in situ* de la relación de conductividad R_T [37]:

$$R = \frac{C(S, T, P)}{C(35, 15, 0)}, \quad (4)$$

donde $C(S, T, P)$ es la conductividad eléctrica medida por el sensor de conductividad a una salinidad S en PSU, temperatura T en °C y presión P en dBar; y $C(35, 15, 0)$ es la conductividad eléctrica del agua de mar estándar a una salinidad de 35, a 15 °C y presión atmosférica y tiene un valor de $42.914 \text{ mS/cm} = 4.2914 \text{ S/m}$ [37].

La relación de conductividad se puede factorizar en tres partes, es decir,

$$R = R_p R_T r_T, \quad (5)$$

entonces

$$R_T = \frac{R}{r_T R_p}.$$

La relación R_p está dada por:

$$R_p = 1 + \frac{P(e_1 + e_2 P + e_3 P^2)}{1 + d_1 T + d_2 T^2 + d_3 R + d_4 T R}, \quad (6)$$

donde

$$\begin{aligned} e_1 &= 2.070 \times 10^{-5}, & d_1 &= 3.426 \times 10^{-2}, \\ e_2 &= -6.370 \times 10^{-10}, & d_2 &= 4.464 \times 10^{-4}, \\ e_3 &= 3.989 \times 10^{-15}, & d_3 &= 4.215 \times 10^{-1}, \\ d_4 &= -3.107 \times 10^{-3}. \end{aligned}$$

El coeficiente de temperatura del agua de mar estándar r_T , puede ser obtenido a partir de la ecuación polinómica:

$$r_T = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 + c_3 T^3 + c_4 T^4, \quad (7)$$

donde

$$c_0 = 6.766097 \times 10^{-1}, \quad c_3 = -6.9698 \times 10^{-7},$$

$$c_1 = -2.00564 \times 10^{-2}, \quad c_4 = 1.0031 \times 10^{-9},$$

$$c_2 = 1.104259 \times 10^{-4}.$$

Los valores de los coeficientes utilizados en las ecuaciones de la Escala de Salinidad Práctica PSS-78, están basados en experimentos llevados a cabo en aguas de mar estándar que fueron diluidas y evaporadas por peso. Esto asegura el conservatismo de una salinidad definida y su reproductividad local [37].

2.3. CÁLCULO DE DENSIDAD DEL AGUA DE MAR

La densidad se define como la masa por unidad de volumen y es uno de los parámetros más importantes en el estudio de la dinámica oceánica. Las pequeñas diferencias horizontales de la densidad pueden producir corrientes muy fuertes. Por lo tanto, la determinación de la densidad ha sido una tarea muy importante en oceanografía. El símbolo para la densidad es la letra griega rho (ρ) y sus unidades son kg/m^3 . La densidad del agua de mar depende de la temperatura, salinidad y presión. La densidad disminuye con el aumento de la temperatura y aumenta con el aumento de la presión y la salinidad. El cincuenta por ciento de las aguas de los océanos tienen una densidad entre 1027.7 y 1027.9 kg/m^3 . La más grande influencia en la densidad es la compresibilidad con la profundidad [35, 38].

La densidad (ρ , kg/m^3) de agua de mar como una función de la salinidad práctica (S), la temperatura (T) y una presión (P) está dada por [39]:

$$\rho(S, T, P) = \rho(S, T, 0) / [1 - P/K(S, T, P)], \quad (8)$$

donde $K(S, T, P)$ es el módulo de compresibilidad secante para agua de mar y está dado por:

$$K(S, T, P) = K(S, T, 0) + AP + BP^2, \quad (9)$$

el módulo de compresibilidad secante para la temperatura T , salinidad S y presión atmosférica está representado por:

$$K(S, T, 0) = K_w + (f_0 + f_1T + f_2T^2 + f_3T^3)S + (g_0 + g_1T + g_2T^2)S^{3/2}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} f_0 &= 54.6746, & g_0 &= 7.944 \times 10^{-2}, \\ f_1 &= -0.603459, & g_1 &= 1.6483 \times 10^{-2}, \\ f_2 &= 1.09987 \times 10^{-2}, & g_2 &= -5.3009 \times 10^{-4}, \\ f_3 &= -6.1670 \times 10^{-5}, \end{aligned}$$

A y B son parámetros dependientes de salinidad y temperatura, estos parámetros están dados por:

$$A = A_w + (2.2838 \times 10^{-3} - 1.0981 \times 10^{-5}T - 1.6078 \times 10^{-6}T^2)S + 1.91075 \times 10^{-4}S^{3/2}. \quad (11)$$

$$B = B_w + (-9.9348 \times 10^{-7} + 2.0816 \times 10^{-8}T - 9.1697 \times 10^{-10}T^2)S. \quad (12)$$

Los términos K_w , A_w y B_w son parámetros dependientes de la temperatura para el agua pura. Los términos para agua pura del módulo de compresibilidad secante están dados por [39]:

$$K_w = 19652.21 + 148.4206T - 2.327105T^2 + 1.360477 \times 10^{-2}T^3 - 5.155288 \times 10^{-5}T^4. \quad (13)$$

$$A_w = 3.239908 + 1.43713 \times 10^{-3}T + 1.16092 \times 10^{-4}T^2 - 5.77905 \times 10^{-7}T^3. \quad (14)$$

$$B_w = 8.50935 \times 10^{-5} - 6.12293 \times 10^{-6}T + 5.2787 \times 10^{-8}T^2. \quad (15)$$

El término $\rho(S, T, 0)$ de la Ecuación 8, representa la densidad del agua de mar en el sitio de medición a una temperatura T , salinidad S y presión atmosférica, $\rho(S, T, 0)$ está dado por [39]:

$$\rho(S, T, 0) = \rho_w(b_0 + b_1T + b_2T^2 + b_3T^3 + b_4T^4)S + (c_0 + c_1T + c_2T^2)S^{3/2} + d_0S^2, \quad (16)$$

$$\begin{aligned} b_0 &= 8.24493 \times 10^{-1}, & c_0 &= -5.72466 \times 10^{-3}, \\ b_1 &= -4.0899 \times 10^{-3}, & c_1 &= 1.0227 \times 10^{-4}, \\ b_2 &= 7.6438 \times 10^{-5}, & c_2 &= -1.6546 \times 10^{-6}, \\ b_3 &= -8.2467 \times 10^{-7}, & & \\ b_4 &= 5.3875 \times 10^{-9}, & d_0 &= 4.8314 \times 10^{-4}. \end{aligned}$$

La densidad de referencia para el agua pura ρ_w depende de la temperatura y está representada por:

$$\rho_w = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4 + a_5T^5, \quad (17)$$

donde

$$\begin{aligned} a_0 &= 999.842594, & a_3 &= 1.001685 \times 10^{-4}, \\ a_1 &= 6.793952 \times 10^{-2}, & a_4 &= -1.120083 \times 10^{-6}, \\ a_2 &= -9.095290 \times 10^{-3}, & a_5 &= 6.536332 \times 10^{-9}. \end{aligned}$$

Debido a que la variación máxima de la densidad del agua de mar es de menos de 7 % en el rango de variables oceánicas, se perdería precisión numérica al utilizar la magnitud numérica completa. Una mejora en dos órdenes de magnitud en el rango oceanográfico se obtiene calculando la anomalía de la densidad σ definida por [39]:

$$\sigma = \rho - 1000 \text{ Kg/m}^3. \quad (18)$$

Los valores de los parámetros utilizados en las ecuaciones o fórmulas empleadas en el cálculo de la densidad del agua de mar en función de la salinidad, temperatura y

presión, son obtenidos de la ecuación internacional de estado para el agua de mar (EOS 80). Estos valores se obtuvieron de análisis hechos en laboratorios utilizando con agua pura o concentrada por evaporación [39].

2.4. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DEL SONIDO EN EL AGUA DE MAR

En el agua, el sonido viaja más rápidamente y con menos absorción de energía que en el aire. Por lo tanto, es un medio eficiente para la transmisión de sonido en comparación con el aire. Esta característica permite el desarrollo de una amplia gama de aplicaciones acústicas submarinas con beneficio para la navegación. La velocidad del sonido en el agua varía con la densidad y la elasticidad del medio, los cuales son dependientes de la salinidad, temperatura, y la presión. Con la información de los sensores de conductividad, temperatura y presión es posible calcular la velocidad del sonido en el agua a diferentes profundidades. En 1977 Chen y Millero desarrollaron una fórmula a partir de mediciones en agua de mar estándar, muestras de agua de mar diluida y concentrada por evaporación [40]. A continuación se presenta una función para determinar la velocidad del sonido en el agua de mar en metros por segundo para una masa de agua mar, teniendo en cuenta su salinidad, temperatura y presión:

$$U(S, T, P) = C_w(T, P) + A(T, P)S + B(T, P)S^{3/2} + D(T, P)S^2, \quad (19)$$

donde S es la salinidad en PSS78, T la temperatura en °C y P la presión en dBar. A , B , C_w y D son parámetros dependientes de la presión y la temperatura. El término C_w está definido como:

$$\begin{aligned}
C_w(T, P) &= C_{00} + C_{01}T + C_{02}T^2 + C_{03}T^3 + C_{04}T^4 + C_{05}T^5 \\
&+ (C_{10} + C_{11}T + C_{12}T^2 + C_{13}T^3 + C_{14}T^4)P \\
&+ (C_{20} + C_{21}T + C_{22}T^2 + C_{23}T^3 + C_{24}T^4)P^2 \\
&+ (C_{30} + C_{31}T + C_{32}T^2)P^3.
\end{aligned} \tag{20}$$

El término A está definido por:

$$\begin{aligned}
A(T, P) &= A_{00} + A_{01}T + A_{02}T^2 + A_{03}T^3 + A_{04}T^4 \\
&+ (A_{10} + A_{11}T + A_{12}T^2 + A_{13}T^3 + A_{14}T^4)P \\
&+ (A_{20} + A_{21}T + A_{22}T^2 + A_{23}T^3)P^2 \\
&+ (A_{30} + A_{31}T + A_{32}T^2)P^3.
\end{aligned} \tag{21}$$

El término B está definido como:

$$B(T, P) = B_{00} + B_{01}T + (B_{10} + B_{11}T)P. \tag{22}$$

El término D está definido como:

$$D(T, P) = D_{00} + B_{10}P. \tag{23}$$

Los coeficientes de los términos anteriormente dados son:

$$\begin{aligned}
C_{00} &= 1402.388, & A_{00} &= 1.389, & B_{00} &= -1.922 \times 10^{-02}, \\
C_{01} &= +5.03711, & A_{01} &= -1.262 \times 10^{-02}, & B_{01} &= -4.42 \times 10^{-05}, \\
C_{02} &= -5.80852 \times 10^{-02}, & A_{02} &= +7.164 \times 10^{-05}, \\
C_{03} &= +3.3420 \times 10^{-04}, & A_{03} &= +2.006 \times 10^{-06}, \\
C_{04} &= -1.47800 \times 10^{-06}, & A_{04} &= -3.21 \times 10^{-08}, \\
C_{05} &= +3.1464 \times 10^{-09},
\end{aligned}$$

$$C_{10} = +0.153563, \quad A_{10} = +9.4742 \times 10^{-05}, \quad B_{10} = +7.3637 \times 10^{-05},$$

$$\begin{aligned}
C_{11} &= + 6.8982 \times 10^{-04}, & A_{11} &= - 1.2580 \times 10^{-05}, & B_{11} &= + 1.7945 \times 10^{-07}, \\
C_{12} &= - 8.1788 \times 10^{-06}, & A_{12} &= - 6.4885 \times 10^{-08}, \\
C_{13} &= + 1.3621 \times 10^{-07}, & A_{13} &= + 1.0507 \times 10^{-08}, \\
C_{14} &= - 6.1185 \times 10^{-10}, & A_{14} &= - 2.0122 \times 10^{-10}, \\
\\
C_{20} &= + 3.1260 \times 10^{-05}, & A_{20} &= - 3.9064 \times 10^{-07}, \\
C_{21} &= - 1.7107 \times 10^{-06}, & A_{21} &= + 9.1041 \times 10^{-09}, \\
\\
C_{22} &= + 2.5974 \times 10^{-08}, & A_{22} &= - 1.6002 \times 10^{-10}, \\
C_{23} &= - 2.5335 \times 10^{-10}, & A_{23} &= + 7.988 \times 10^{-12}, \\
C_{24} &= + 1.0405 \times 10^{-12}, \\
\\
C_{30} &= - 9.7729 \times 10^{-09}, & A_{30} &= + 1.100 \times 10^{-10}, \\
C_{31} &= + 3.8504 \times 10^{-10}, & A_{31} &= + 6.649 \times 10^{-12}, \\
C_{32} &= - 2.3643 \times 10^{-12}, & A_{32} &= - 3.389 \times 10^{-13}, \\
\\
D_{00} &= 1.727 \times 10^{-03}, & D_{10} &= - 7.9836 \times 10^{-06}.
\end{aligned}$$

Los rangos de validez para esta ecuación son: salinidad práctica entre 0 y 40 PSU, la temperatura entre 0 y 40 °C y la presión entre 0 y 10000 dBar. La desviación estándar es de 0.19 m/s [32, 41, 40].

2.5. CÁLCULO DE LA TEMPERATURA DEL PUNTO DE CONGELACIÓN DEL AGUA DE MAR

La temperatura de congelación del agua de mar es aproximadamente -1.8 °C, este valor de temperatura de congelación se ve afectado por los valores de salinidad y la presión. Normalmente en la superficie el agua de mar tiene 34.5 mg de sal por litro de agua; pero cuanto más salada es el agua, más cuesta que se congele. En 1976 Millero y Leung basados en mediciones desarrollaron una fórmula para el cálculo del punto de congelación del agua de mar. La temperatura del punto de congelación se da como una función de la salinidad S y la presión P por:

$$t_f = a_0S + a_1S^{3/2} + a_2S^2 + bP, \quad (24)$$

donde

$$\begin{aligned} a_0 &= -0.0575, \\ a_1 &= 1.710523 \times 10^{-3}, \\ a_2 &= -2.154996 \times 10^{-4}, \\ b &= -7.53 \times 10^{-4}, \end{aligned}$$

S es el valor de la salinidad práctica en PSS78 (PSU) y P el valor de la presión en dBar.

La ecuación para el calcular la temperatura del punto de congelación del agua de mar es válida en el rango de salinidad práctica de 4 a 40 PSU a la presión atmosférica. Las mediciones a presiones elevadas no presentan dependencia significativa del coeficiente de presión sobre la salinidad en el rango de 27 a 35 PSU. El error estimado a la presión de 500 dBar es de 0,003 °C [32, 42, 43].

3. DESARROLLO DE SOFTWARE Y PUESTA A PUNTO

En este capítulo se muestra el desarrollo de los módulos para el cálculo de las propiedades del agua de mar salinidad, profundidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación a partir de las mediciones hechas por los sensores de conductividad, temperatura y presión.

3.1. ANÁLISIS

El proyecto “Desarrollo de un software de procesamiento para la obtención de datos de un sensor CTD” consiste en desarrollar un software que permita obtener los datos de los sensores de conductividad, temperatura y presión, para luego procesar estos datos obtenidos y calcular variables del agua de mar relacionadas a estas tres mediciones como son salinidad, conductividad, temperatura, profundidad, presión, densidad, punto de congelación y velocidad del sonido. Se requiere desarrollar un software que permita al usuario monitorear cada una de las variables medidas y calculadas a través de una interfaz. Para el desarrollo del software se tienen las siguientes especificaciones: debe leer los datos de las mediciones hechas por los sensores de conductividad, temperatura y presión, permitir el ingreso del valor de la latitud del lugar donde se realizan las mediciones, calcular salinidad, profundidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación del agua de mar utilizando los datos de las mediciones realizadas, visualización de datos numéricos, visualización gráfica de las variables asociadas a las mediciones realizadas con el CTD, borrado de datos ingresados, opciones de pausa y salida del programa y posibilidad de configuración y mantenimiento del software a través del acceso a funciones de labores específicas.

3.2. DESARROLLO

Partiendo de las especificaciones deseadas para el desarrollo del software, se desarrolla una interfaz gráfica de usuario, en la cual se realiza la captura y visualización de los datos, la interfaz también permite configurar algunos parámetros de simulación. Otra etapa del software se encarga del procesamiento de los datos capturados y de realizar cálculos matemáticos para obtener los valores de profundidad, salinidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación del agua de mar, este desarrollo del software permite la verificación de código de la interfaz y de cada uno de los módulos de cálculo implementados, también permite la detección de errores por componentes, lo cual simplifica la etapa de validación.

3.3. IMPLEMENTACIÓN DEL SOFTWARE PARA ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

El software de adquisición de datos se implementó en la plataforma de LabVIEW® Figura 2, en el cual fueron creadas un listado de tareas de lectura y escritura que debían ser ejecutadas de manera simultánea sin interferir en las demás tareas. El procesamiento de datos se desarrolló en la plataforma de LabVIEW® Figura 3, esta parte se encarga de recibir los datos de temperatura, conductividad, presión y latitud. Posteriormente hace el muestreo de estas cuatro variables y calcula algunas propiedades del agua de mar asociadas a las cuatro variables anteriormente mencionadas, finalmente todos los datos (variables recibidas y calculadas) son enviados a módulos de monitoreo y almacenamiento para su posterior análisis. Para el monitoreo de las variables fue creada una interfaz gráfica Figura 4 de la misma plataforma.

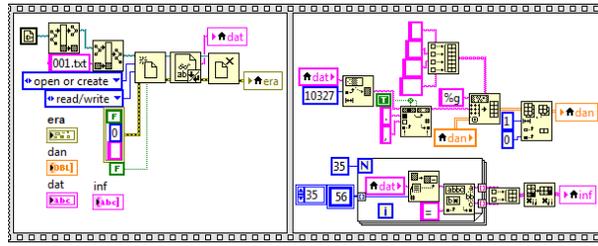


Figura 2. Adquisición de datos en la plataforma de LabVIEW®

En el módulo de adquisición de datos se realizan, direccionamientos, definición de las variables temperatura, conductividad y presión y se ejecutan las tareas asociadas con la adquisición de datos. Los datos que se leen en este módulo son de mediciones hechas con sensores CTD y publicadas por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) [44].

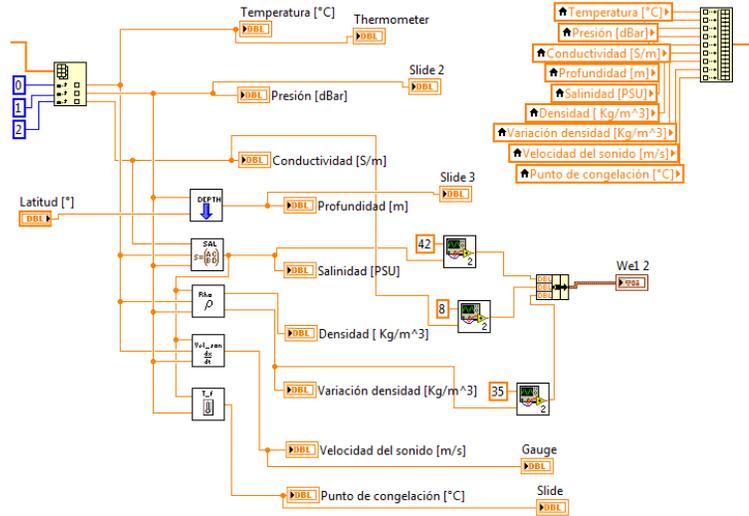


Figura 3. Etapa de procesamiento de datos

La interfaz gráfica del CTD Figura 4 fue diseñada para obtener los valores de la presión de la columna de agua (dBar), conductividad eléctrica del agua de mar (S/m), temperatura del agua en ($^{\circ}\text{C}$), profundidad a la cual se está realizando la medición (m), salinidad del agua (PSU), densidad del agua de mar (Kg/m^3), variación de la densidad del agua de mar (Kg/m^3), velocidad del sonido en el agua (m/s) y temperatura del punto de congelación del agua ($^{\circ}\text{C}$); controlar en encendido y apagado de la prueba

o simulación; realizar el monitoreo y la captura de los datos de presión, temperatura, conductividad, profundidad, salinidad, densidad, variación de la densidad, velocidad del sonido y punto de congelación del agua, para ser llevados a una carpeta de archivos en los que puedan ser verificados posteriormente. También cuenta con un botón de parar en el caso que se presente un error en las comunicaciones o cuando se haya terminado el proceso, un botón de pausa y uno de reanudación de la prueba.

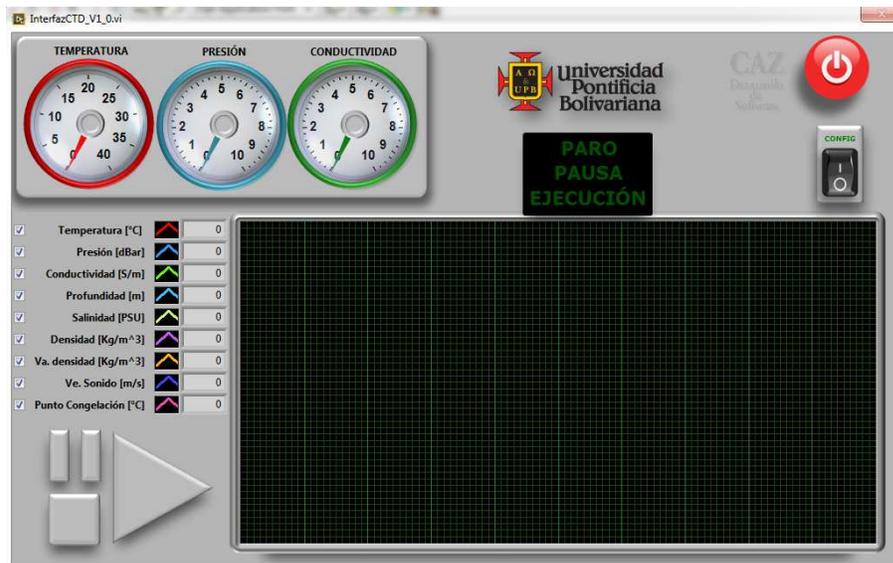


Figura 4. Interfaz gráfica CTD

3.4. IMPLEMENTACIÓN DE LOS MÓDULOS PARA EL CÁLCULO DE PROFUNDIDAD, SALINIDAD, DENSIDAD, VELOCIDAD DEL SONIDO Y PUNTO DE CONGELACIÓN A PARTIR DE LA PRESIÓN, CONDUCTIVIDAD Y TEMPERATURA DEL AGUA DE MAR

Los módulos implementados para el cálculo de la profundidad, salinidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación del agua de mar, están basados en los modelos matemáticos estudiados en el capítulo anterior. Estos modelos son válidos para los rangos de temperatura entre -2 y 40 °C, presión entre 0 y 10000 dBar, salinidad práctica entre 2 y 40 PSU de la respectiva conductividad eléctrica [32].

3.4.1. Módulo para el cálculo de la profundidad

Como se mencionó en el capítulo anterior, en las exploraciones oceanográficas generalmente no se mide directamente la profundidad, lo que se mide es la presión del mar en el punto donde se encuentran. El programa para el cálculo de la profundidad se desarrolló en la plataforma de LabVIEW® Figura 5, este utiliza el dato entregado por el sensor de presión y el valor de la latitud del lugar donde se está realizando la medición (este valor debe ser ingresado por el usuario) y entrega la profundidad en metros, Las entradas y salidas del bloque de programa encargado del cálculo de la profundidad se muestra en la Figura 6.

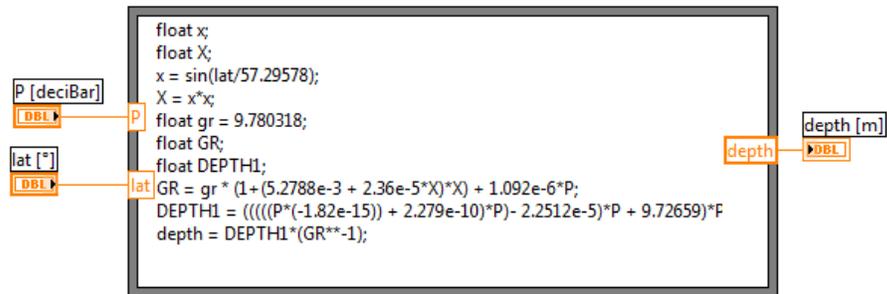


Figura 5. Cálculo de la profundidad en la plataforma de LabVIEW®

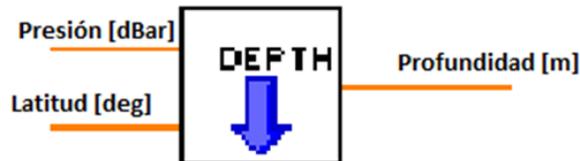


Figura 6. Módulo para el cálculo de la profundidad

3.4.2. Módulo para el cálculo de la salinidad

La medición hecha por el sensor de conductividad entrega un valor que representa la cantidad de iones disueltos en el agua de mar. La salinidad se puede calcular con el valor de conductividad entregado por el CTD, teniendo en cuenta también los valores de la temperatura y presión ambiente. La escala de salinidad práctica está dada en unidades

de salinidad práctica (PSU). El módulo para el cálculo de la salinidad se implementó en la plataforma de LabVIEW® Figura 7. Las entradas y salida del módulo utilizado para el cálculo de la salinidad práctica se muestra en la Figura 8.

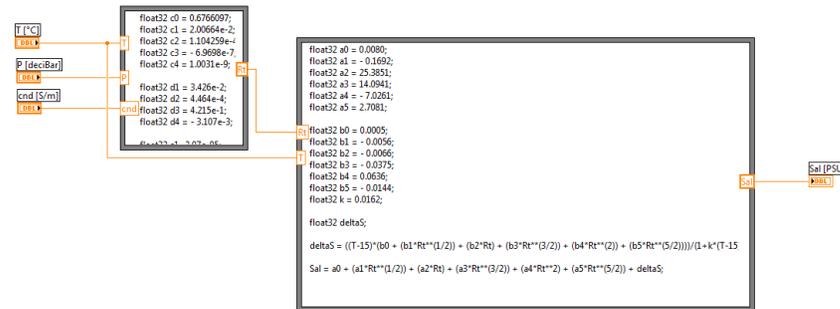


Figura 7. Cálculo de la salinidad en la plataforma de LabVIEW®



Figura 8. Módulo para el cálculo de la salinidad

3.4.3. Módulo para el cálculo de la densidad

La variación máxima de la densidad del agua de mar es de menos de 7% en el rango de variables oceánicas, se perdería precisión numérica al utilizar la magnitud numérica completa. Una mejora en dos órdenes de magnitud en el rango oceanográfico se obtiene calculando la anomalía o variación de la densidad (σ). El módulo implementado para el cálculo de la densidad se desarrolló en la plataforma de LabVIEW® Figura 9 y entrega el valor completo de la densidad y el valor de la variación de la densidad, las entradas y salidas de este módulo se muestran en la Figura 10.

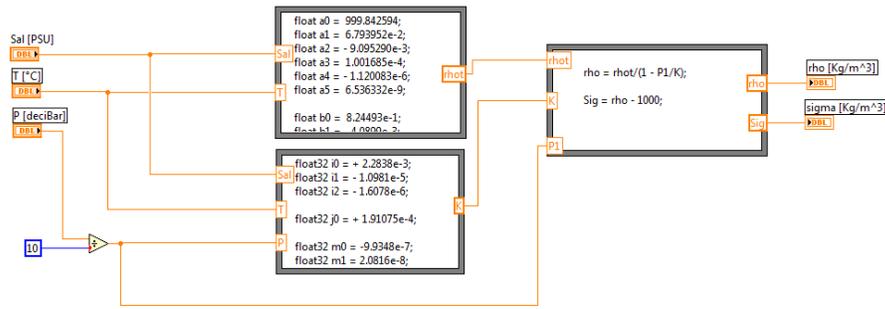


Figura 9. Cálculo de la densidad en la plataforma de LabVIEW®



Figura 10. Módulo para el cálculo de la densidad

3.4.4. Módulo para el cálculo de la velocidad del sonido

La velocidad del sonido en el agua varía con la densidad y la elasticidad del medio, los cuales son dependientes de la salinidad, temperatura, y la presión. Con la información de los sensores de conductividad, temperatura y presión se desarrolló un módulo en la plataforma de LabVIEW® Figura 11 que hace posible calcular la velocidad del sonido en el agua a diferentes profundidades. La descripción general de entradas y salida del módulo utilizado para el cálculo de la velocidad del sonido se muestra en la Figura 12.

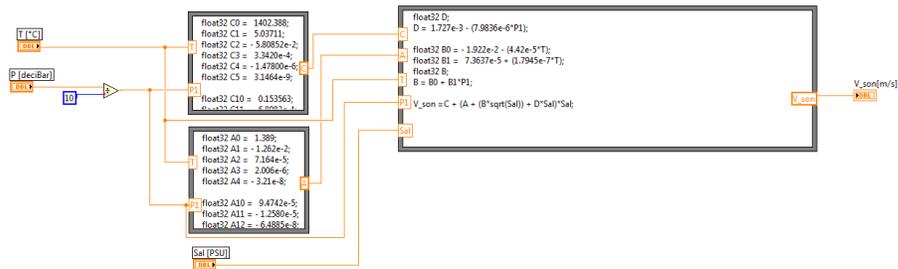


Figura 11. Cálculo de la velocidad del sonido en la plataforma de LabVIEW®



Figura 12. Módulo para el cálculo de la velocidad del sonido

3.4.5. Módulo para el cálculo del punto de congelación del agua de mar

La temperatura de congelación del agua de mar es aproximadamente $-1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, este valor de temperatura de congelación se ve afectado por los valores de salinidad y la presión. Normalmente en la superficie el agua de mar tiene 34.5 mg de sal por litro de agua; pero cuanto más salada es el agua, más cuesta que se congele. Teniendo en cuenta esto, se desarrolló en la plataforma de LabVIEW® un módulo que realiza el cálculo de la temperatura del punto de congelación del agua de mar Figura 13. La descripción general de entradas y salida del módulo utilizado para el cálculo de la velocidad del sonido se muestra en la Figura 14.

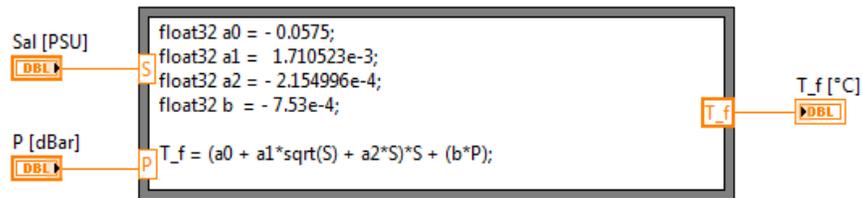


Figura 13. Cálculo del punto de congelación del agua en la plataforma de LabVIEW®



Figura 14. Módulo para el cálculo del punto de congelación del agua de mar

3.5. VALIDACIÓN

En esta etapa del proyecto se procede a verificar que el software desarrollado satisface cada una de las especificaciones planteadas, además, genera soluciones correctas desde el punto de vista oceanográfico. En la etapa de validación se realizaron pruebas tomando como referencia datos publicados por la UNESCO y la NOAA, los resultados de estas pruebas fueron satisfactorios como se pueden ver en el siguiente capítulo.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

En la etapa final del proyecto se hace entrega de los módulos para el cálculo de las propiedades del agua de mar salinidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación, además se entrega el módulo que hace el cálculo de la profundidad a la cual se está trabajando. También se hace entrega del programa de adquisición de los datos entregados por los sensores de conductividad, temperatura y presión, la interfaz gráfica para el monitoreo y almacenamiento de los datos generados por los sensores y los módulos de cálculo utilizados.

Se realizan las pruebas correspondientes a cada uno de los módulos de cálculo, los valores arrojados por los módulos se comparan gráficamente con datos de mediciones proporcionados por la NOAA, las gráficas obtenidas en las pruebas para cada una de las variables calculadas por los módulos están en función de la presión, ya que la presión es un valor medido por el sensor y es fundamental para el cálculo de la profundidad, salinidad, densidad y velocidad del sonido.

La gráfica obtenida de la prueba del módulo de profundidad se muestra en la Figura 15, en esta gráfica se observa que a medida que aumenta la profundidad en la columna de agua la presión también aumenta, al comparar los datos entregados por el módulo con los datos de profundidad proporcionados por la NOAA, se puede notar que no hay mucha diferencia en los valores. El promedio del porcentaje de error de los datos entregados por el módulo para el cálculo de la profundidad con respecto a los datos que proporciona la NOAA es de 0.00631411%. Este valor se calcula haciendo el promedio de los porcentajes de error de los valores que entrega el módulo con respecto a los valores de profundidad proporcionados por la NOAA.

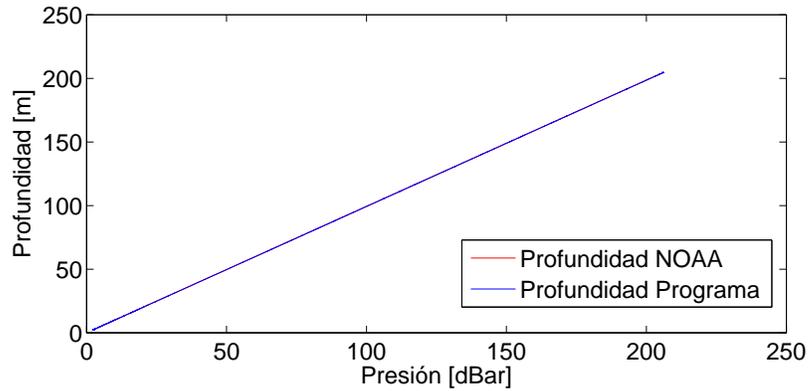


Figura 15. Gráfica profundidad vs. presión

Para la prueba realizada al módulo utilizado para el cálculo de la salinidad se obtiene la Figura 16, de la cual se puede inferir que cambios en el valor de la presión producen cambios en el valor de la salinidad, pero también se puede ver que la presión no es la variable que más afecte el valor de la salinidad. Ahora bien, el objetivo principal de la prueba realizada al módulo de salinidad es saber si está funcionando correctamente, para esto se comparan los datos entregados por este módulo con los datos de mediciones publicados por la NOAA, de esta comparación se puede decir que las gráficas son similares, el promedio del porcentaje de error entre los datos de la NOAA y los datos del módulo es 0.00956367%. Este valor se calcula haciendo el promedio de los porcentajes de error de los valores que entrega el módulo con respecto a los valores de salinidad proporcionados por la NOAA.

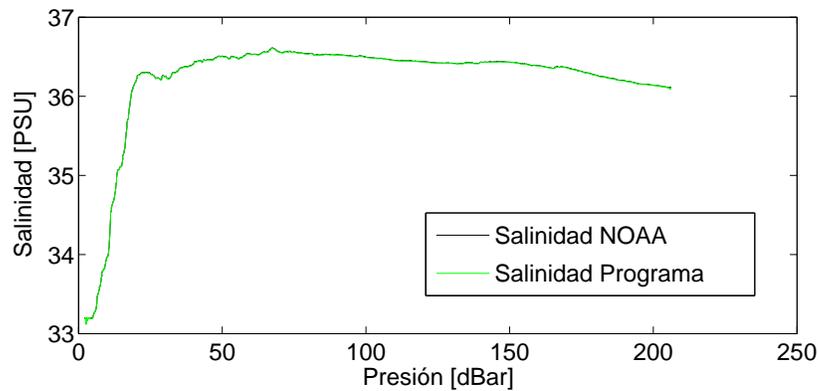


Figura 16. Gráfica salinidad vs. presión

La gráfica obtenida de la prueba del módulo de densidad Figura 17 muestra que a medida que aumenta el valor de la presión también aumenta el valor de la densidad, al comparar los datos entregados por el módulo con los datos de profundidad proporcionados por la NOAA, se puede notar que no hay mucha diferencia en los valores. El promedio del porcentaje de error de los datos entregados por el módulo para el cálculo de la densidad con respecto a los datos que proporciona la NOAA es de $5.24913 \times 10^{-5}\%$. Valor obtenido del promedio de los porcentajes de error de los valores que entrega el módulo con respecto a los valores de densidad proporcionados por la NOAA.

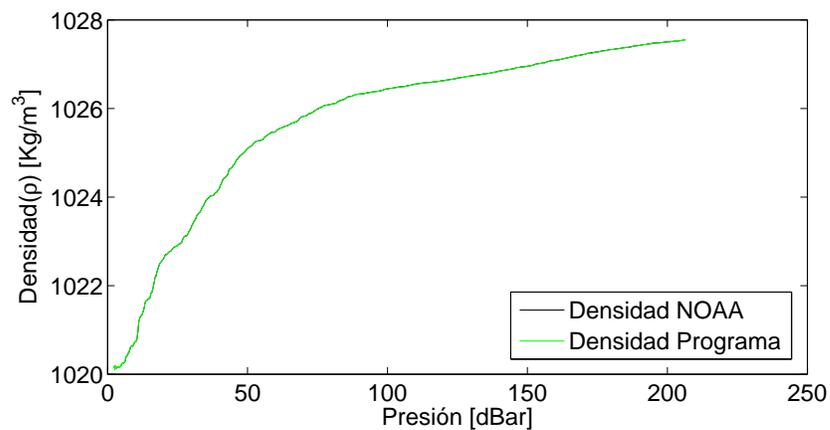


Figura 17. Gráfica densidad vs. presión

Para la prueba realizada al módulo utilizado para el cálculo de la velocidad del sonido se obtiene la Figura 18, de la cual se puede deducir que cambios en el valor de la presión producen cambios en el valor de la velocidad del sonido, pero también se puede ver que la presión no es la variable que más afecte el valor de la velocidad del sonido. Ahora bien, el objetivo principal de la prueba realizada al módulo que calcula la velocidad del sonido es saber si está funcionando de manera adecuada, es decir si sus valores concuerdan con valores de referencia obtenidos en mediciones anteriores, para esto se comparan los datos entregados por este módulo con los datos de mediciones publicados por la NOAA, de esta comparación se puede decir que las gráficas son similares, el promedio del porcentaje de error entre los datos de la NOAA y los datos del módulo es 0.00115911% . Este valor se calcula haciendo el promedio de los porcentajes de error de los valores que entrega el módulo con respecto a los valores proporcionados por la NOAA.

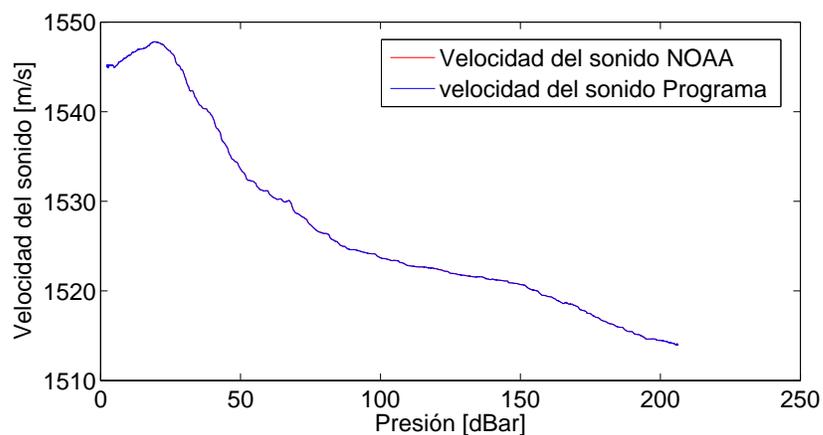


Figura 18. Gráfica velocidad del sonido vs. presión

Los promedios de los porcentajes de error que arrojaron las pruebas realizadas a los módulos utilizados para el cálculo de profundidad, salinidad, densidad y velocidad del sonido, con respecto a los datos proporcionados por la NOAA, se muestran en la Tabla 2

Tabla 2. Porcentaje de error módulos

Módulo	% error
Profundidad	0.006314115
Salinidad	0.009563665
Densidad	5.24913×10^{-5}
Velocidad del sonido	0.00115911

Teniendo en cuenta las tareas de actualización de software o de modelos matemáticos en los programas desarrollados, se dispone de memorias de los diseños de programas implementados y material bibliográfico de referencia para los modelos matemáticos utilizados en los módulos de cálculos de profundidad, salinidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación son fundamentales para lograr los alcances del proyecto “Desarrollo de un software de procesamiento para la obtención de datos de un sensor CTD”, que se orientaron en monitorear *in situ* variables de gran importancia en las exploraciones oceanográficas como son la presión, conductividad, temperatura, profundidad, salinidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación del agua de mar. Estas variables o más bien propiedades del agua de mar son de gran importancia a nivel energético ya que indican la viabilidad de explotación y buen uso de los recursos naturales de una zona, también son de gran valor a nivel ambiental debido a que los océanos cumplen un papel muy importante para el planeta ya que en estos se producen procesos biológicos, físicos y químicos que ayudan a mantener su estructura y movimiento.

El óptimo desarrollo de las etapas de instrumentación para la medición de temperatura, salinidad y profundidad en exploraciones oceanográficas e ingeniería conceptual, en las que se estudió el sensor CTD como herramienta principal en las exploraciones oceanográficas y los modelos matemáticos para el cálculos de las propiedades del agua de mar, permitieron que el desarrollo del software de adquisición de datos y de los módulos de cálculo para profundidad, salinidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación se hiciera de manera adecuada, de tal manera que el módulo de adquisición de los datos de los sensores de conductividad, temperatura y presión y los módulos utilizados para el cálculo de las propiedades de agua de mar funcionen correctamente como se pudo observar en el Capítulo 4.

El desarrollo de la interfaz humano máquina crea una interacción entre el operario y el proceso, lo cual da respuesta a la necesidad de monitorear en tiempo real las propiedades del agua de mar presión, salinidad, conductividad, temperatura, densidad, profundidad, velocidad del sonido y punto de congelación, esta interfaz se desarrolló en la plataforma

de LabVIEW®), lo que permite el incremento de la interfaz a medida que crecen las necesidades o requerimientos del proyecto.

Se puede decir que la ejecución de cada una de las etapas del proyecto se hizo de manera apropiada, lo cual trae beneficios al proyecto como lo es la eficiencia de cada uno softwares desarrollados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] MATLAB. (2015, January) Matlab. [Online]. Available: <http://es.mathworks.com/products/matlab/>
- [2] LabVIEW. (2015, January) Labview fundamentals. National Instruments. [Online]. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374029a.pdf>
- [3] R. A. Española. (2015, January) software. [Online]. Available: <http://www.rae.es/>
- [4] N. Instruments. (2015, January) ¿qué es adquisición de datos? [Online]. Available: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>
- [5] O. Instrument. (2015, January) Conductivity, temperature, depth (ctd) sensor. [Online]. Available: <http://www.whoi.edu/instruments/viewInstrument.do?id=1003>
- [6] Sensing. (2015, January) Transductores de presión. [Online]. Available: http://www.sensing.es/Transductores_de_presion_Cm.htm
- [7] E. Navas. (2011) Definicion de sensor. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/doc/50052577/Definicion-de-sensor>
- [8] medirtemperatura.com. Sensor de temperatura. [Online]. Available: <http://medirtemperatura.com/index.php>
- [9] Medidores de temperatura. [Online]. Available: <http://medidorestemperatura.blogspot.com/>
- [10] N. AUTOMACION. (2015, January) Medidores de conductividad. [Online]. Available: <http://www.nikron.com.ar/automacion/index.php>

- [11] N. Posada, C. Zuluaga, J. Correa, R. Valencia, D. Flórez, and C. Arias, “Instrumentación para la medición de salinidad, temperatura y corrientes en océanos,” *Revista Educación en Ingeniería*, vol. 6, no. 11, p. 9, 2011. [Online]. Available: <http://www.educacioningenieria.org/index.php/edi/article/view/118>
- [12] L. Zambrano, “Importancia del manejo de datos oceanograficos,” *ACTA OCEANOGRÁFICA DEL PACÍFICO*, vol. 15, p. 7, 2009. [Online]. Available: http://www.inocar.mil.ec/docs/ACTAS/OCE15/OCE1501_16.pdf
- [13] J. Jaimes and R. López, “Biomasa y abundancia de copepoda (crustacea) en aguas superficiales del océano pacífico colombiano durante septiembre de 2007,” *Revista de biología marina y oceanografía*, vol. 41, pp. 31–41, 2014.
- [14] L. Boehme, P. Lovell, M. Biuw, F. Roquet, J. Nicholson, S. E. Thorpe, M. P. Meredith, and M. Fedak, “Technical note: Animal-borne ctd-satellite relay data loggers for real-time oceanographic data collection,” *Ocean Science*, vol. 5, no. 4, pp. 685–695, 2009. [Online]. Available: <http://www.ocean-sci.net/5/685/2009/>
- [15] Conductivity, temperature, depth (CTD) sensors. Ocean Instruments. [Online]. Available: <http://www.whoi.edu/instruments/viewInstrument.do?id=1003>
- [16] A. WilliamsIII, “CTD (conductivity, temperature, depth) profiler,” in *Encyclopedia of Ocean Sciences (Second Edition)*, 2nd ed., J. H. Steele, K. K. Turekian, , and S. A. Thorpe, Eds. Oxford: Academic Press, 2009, pp. 708 – 717. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123744739007244>
- [17] J. Bergman. (2001, December) Instrumento CTD. Asociación Nacional de Maestros de Ciencias de la Tierra. [Online]. Available: <http://www.windows2universe.org/earth/Water/CTD.html&lang=sp>
- [18] K. Lawson and N. Larson, “Ctd,” in *Encyclopedia of Ocean Sciences*, J. H. Steele, Ed. Oxford: Academic Press, 2001, pp. 579 – 588. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B012227430X00324X>
- [19] M. Rosón, “Humidificación isotérmica v/s humidificación adiabática,” *Frío y*

- Calor*, vol. 87, p. 4, 2007. [Online]. Available: http://www.frioycalor.cl/87/rev_87.pdf
- [20] J. Gómez. (2010, February) Salinidad y conductividad. [Online]. Available: <http://oceanofisica.blogspot.com/2008/09/lectura-22.html>
- [21] hydroacoustics. Conductivity temperature depth - ctd. [Online]. Available: <http://www.hydroacoustics.com/library/docs/CTD.pdf>
- [22] Guemisa, *SENSORES DE CONDUCTIVIDAD*, Electronica Guerra y Miró Guemisa Sl., 2006. [Online]. Available: <http://www.guemisa.com/ambien/docus/completo%20conductividad.pdf>
- [23] Fisicanet. (2013) Sensor de conductividad. [Online]. Available: http://www.fisicanet.com.ar/quimica/industrial/ap02_sensores.php
- [24] C. Lalli and T. Parsons, *Biological Oceanography An Introduction*., T. O. University, Ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2006.
- [25] J. CIFUENTES, P. TORRES, and M. FRÍAS, *EL OCÉANO Y SUS RECURSOS III. LAS CIENCIAS DEL MAR: OCEANOGRAFÍA FÍSICA, MATEMÁTICAS E INGENIERÍA*, F. D. C. ECONÓMICA, Ed. Fondo De Cultura Economica USA, 2000. [Online]. Available: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/17/\htm/oceano.htm>
- [26] *Manual de Hidrografía*, ORGANIZACIÓN HIDROGRÁFICA INTERNACIONAL, 2010. [Online]. Available: http://www.iho.int/iho_pubs/CB/C-13/spanish/C-13_Capitulo_3.pdf
- [27] (2013) Introduction to thermistors. OMEGA Engineering inc. [Online]. Available: <http://www.omega.com/prodinfo/thermistor.html>
- [28] Ingeniatic. Termistor. Universidad Politécnica de Madrid. [Online]. Available: <http://ingeniatic.euitt.upm.es/index.php/tecnologias/item/629-termistor>
- [29] ——. Sensores de temperatura (rtd). Universidad Politécnica de Madrid. [Online]. Available: <http://ingeniatic.euitt.upm.es/index.php/tecnologias/item/588-sensores-de-temperatura-rtd>

- [30] J. Maddison, D. Marshall, C. Pain, and M. Piggott, “Accurate representation of geostrophic and hydrostatic balance in unstructured mesh finite element ocean modelling,” *Ocean Modelling*, vol. 39, no. 3-4, pp. 248 – 261, 2011. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1463500311000825>
- [31] (2013, July) How it works - strain gauge pressure transducer. RDP Electrosense. [Online]. Available: www.rdpe.com/us/hiw-sgpt.htm
- [32] UNESCO, “Algorithms for computation of fundamental properties of seawater,” *Unesco technical papers in marine science*, vol. 44, pp. 6–46, 1983.
- [33] IDRONAUT S.r.l., “Ocean seven 316plus ctd multiparameter probe,” IDRONAUT S.r.l., Tech. Rep., August 2013.
- [34] code10. (2009, January) Algorithms on seawater. [Online]. Available: <http://www.code10.info/>
- [35] (2012) Propiedades físicas del mar. Universidad Nacional Agraria - La Molina. [Online]. Available: <http://tarwi.lamolina.edu.pe/licochea/propiedad1.html>
- [36] I. Shkvorets. (2015) Practical salinity scale - 1978. Salinometry. [Online]. Available: <http://salinometry.com/pss-78/>
- [37] UNESCO, “Background papers and supporting data on the practical salinity scale 1978,” Unesco technical paper in marine science N° 37, Tech. Rep., 1981.
- [38] Y. Marzieh and L. Kamran, “Variations of temperature and salinity in the southwestern coastal waters of the caspian sea, north of iran,” *Coastal and Marine Research*, vol. 2, pp. 13–18, 2014.
- [39] Unesco, “Background papers and supporting data on the international equation of state of seawater 1980,” Unesco technical paper in marine science N° 38, Tech. Rep., 1981.
- [40] C.-T. Chen and F. J. Millero, “Speed of sound in seawater at high pressures.” *Journal of the Acoustic Society of America*, vol. 62(5), pp. 1129–1135, 1977.

- [41] J. Schulz. (2008, June) Calculating the speed of sound in seawater. code10. [Online]. Available: <http://www.code10.info>
- [42] ——. (2011, March) Calculating the freezing point of seawater. code10. [Online]. Available: <http://www.code10.info>
- [43] F. M. W. Leung, “Thermodynamics of seawater at one atmosphere,” *American Journal of Science*, vol. 276:9, pp. 1035–1077, 1976.
- [44] Ship data : Deepwater horizon support. NOAA. [Online]. Available: <http://www.nodc.noaa.gov/deepwaterhorizon/ship.html#gordongunter>

ANEXOS

A. ARTÍCULO PUBLICABLE

DESARROLLO DE UN SOFTWARE DE PROCESAMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS DE UN SENSOR CTD

Francisco BARREIRO; Carlos A. ZULUAGA

*Cir. 1 #70-01, Medellín, Colombia
francisco.barreiro@upb.edu.co*

Resumen: En este trabajo de grado se presenta el desarrollo y puesta a punto de un software diseñado para la adquisición y procesamiento de datos que entregan los sensores de conductividad, temperatura y profundidad, utilizados en exploraciones oceanográficas, del proyecto “Desarrollo de un software de procesamiento para la obtención de datos de un sensor CTD”. Cada uno de los datos entregados por estos sensores serán procesados y utilizados para calcular variables del agua de mar relacionadas a estas tres mediciones como son salinidad, conductividad, temperatura, profundidad, presión, densidad, punto de congelación y velocidad del sonido. Para darle solución a estos requerimientos en el desarrollo del software, se implementarán subrutinas para la adquisición y procesamiento de las señales entregadas por los sensores. Para el cálculo de las variables salinidad, profundidad, densidad, punto de congelación y velocidad del sonido, se implementan funciones basadas en las ecuaciones descritas en los documentos técnicos de la UNESCO para las ciencias marinas No. 44. *Copyright © 2015 UPB*

Palabras clave: Mediciones oceanográficas; Propiedades del agua de mar; CTD; Software; Adquisición y procesamiento de datos.

Abstract: The aim of this paper is to describe the development and fine tuning of a software designed for the acquisition and processing of data supplied by conductivity, temperature and depth sensors, used in oceanographic exploration, from the “Desarrollo de un software de procesamiento para la obtención de datos de un sensor CTD” project. Through this software, the data given by the sensors will be processed and used to calculate properties of seawater related to these three measurements such as salinity, conductivity, temperature, depth, pressure, density, freezing point and speed sound. To provide solutions to these requirements in software development, subroutines for the acquisition and processing of the signals delivered by the sensors are implemented. For the calculation of salinity, depth, density, freezing point and sound velocity; functions based on the equations described in the UNESCO technical papers in marine science No. 44 are applied.

Keywords: Oceanographic measurements; Properties of seawater; CTD; software; Acquisition and data processing.

1. INTRODUCCIÓN

La población mundial está en constante crecimiento al igual que su consumo energético, esto trae como consecuencia el agotamiento de los recursos naturales, generando así un impacto irreparable en el medio ambiente. Por esta razón uno de los principales temas de estudio en la actualidad es la explotación y buen uso de los recursos naturales de los océanos. Por tal motivo, la medición y el estudio de variables como salinidad, conductividad, temperatura y presión del agua en los océanos es de gran importancia, ya que estas variables indican la viabilidad de la explotación de los recursos naturales de una zona (1).

Los océanos cumplen un papel muy importante para el planeta ya que en estos se producen procesos biológicos, físicos y químicos que ayudan a mantener su estructura y movimiento. Por esta razón el monitoreo de las variables oceanográficas salinidad, temperatura y presión, no es sólo importante para la explotación de recursos naturales, sino que también ayuda a comprender los procesos que ocurren en el entorno, calcular la probabilidad de inundaciones costeras, predicción de los efectos del calentamiento global y desastres naturales, ya que estos fenómenos en la actualidad afectan la calidad de vida y la de las próximas generaciones (2; 3).

La herramienta principal para determinar las propiedades físicas esenciales del agua en los océanos es un sensor de conductividad, temperatura y profundidad, conocidos por sus siglas en inglés como CTD. Con los datos proporcionados por el sensor

y el uso de un software de procesamiento de señales diseñado para el CTD, los científicos pueden obtener gráficos precisos y completos de la distribución y la variación de la temperatura del agua, salinidad y densidad que ayuda a entender cómo los océanos afectan a la vida en la tierra (4).

Los modelos matemáticos para el cálculo de las propiedades de agua de mar tales como salinidad, profundidad, densidad y punto de congelación entre otras, han facilitado tener en forma digital los datos de las mediciones de conductividad, presión y temperatura. Estos modelos matemáticos fueron desarrollados originalmente en FORTRAN, sin embargo estas pueden ser implementadas en Matlab® y otros motores computacionales. (5).

Este trabajo presenta beneficios asociados a las exploraciones oceanográficas, ya que está enfocado en la medición y cálculos de algunas de las propiedades fundamentales del agua de mar, a través de las cuales se puede estudiar la posibilidad de explotación de sus recursos naturales. Además posibilita la reducción de costos en la obtención del dispositivo CTD y su software de procesamiento, ya que comercialmente tienen un alto costo. La utilización de sensores de conductividad, temperatura y presión en exploraciones oceanográficas reduce la complejidad en la medición de variables del agua de mar, ya que con los valores de estas tres mediciones (conductividad, temperatura y presión), se pueden monitorear otras propiedades del agua de mar como son salinidad, profundidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación sin tener que utilizar sensores para cada una de estas propiedades.

2. CÁLCULO DE LA SALINIDAD, DENSIDAD, VELOCIDAD DEL SONIDO Y PUNTO DE CONGELACIÓN EN EL AGUA DE MAR A PARTIR DE LAS MEDICIONES REALIZADAS CON LOS SENSORES DE CONDUCTIVIDAD, TEMPERATURA Y PRESIÓN.

El Grupo de Automática y Diseño A+D se encuentra desarrollando un proyecto de exploración oceanográfica. Una de las etapas del proyecto consiste en desarrollar un software de procesamiento para los datos de los sensores de conductividad, temperatura y presión, para luego procesar estos datos obtenidos y calcular variables del agua de mar relacionadas a estas tres mediciones. El desarrollo del software para la obtención y procesamiento de las variables conductividad, temperatura y presión, ayudará a observar y estudiar algunas propiedades fundamentales del agua del mar como salinidad, conductividad, temperatura, profundidad, presión, densidad, punto de congelación y velocidad del sonido.

2.1. Descripción de los requerimientos del proyecto.

Para la realización del proyecto “Desarrollo de un software de procesamiento para la obtención de datos de un sensor CTD”, se diseñó una rutina en la plataforma de LabVIEW® para la lectura, registro y monitoreo de los valores entregados por los sensores de temperatura, conductividad y presión.

Luego de registrar los valores de temperatura, conductividad y presión, se implementaron funciones para el cálculo de otras

propiedades del agua de mar como salinidad, profundidad, densidad, punto de congelación y velocidad del sonido.

Finalmente se implementan rutinas para almacenar y monitorear las propiedades del agua de mar salinidad, profundidad, densidad, punto de congelación y velocidad del sonido. Es importante mencionar que para el cálculo de la profundidad es necesario conocer el valor en grados (°) de la latitud donde se desea realizar el muestreo de las propiedades del agua de mar.

La salinidad, velocidad de sonido, punto de congelación y densidad del agua de mar se obtienen utilizando los algoritmos y ecuaciones descritos en los documentos técnicos de la UNESCO en las ciencias marinas No. 44 “*Algorithms for computation of fundamental properties of seawater*” (6; 7; 8).

2.2. Cálculo de salinidad del agua de mar

La medición hecha por el sensor de conductividad entrega un valor que representa la cantidad de iones disueltos en el agua de mar. La salinidad se puede calcular con el valor de conductividad entregado por el CTD, teniendo en cuenta también los valores de la temperatura y presión ambiente. La escala de salinidad práctica está dada en unidades de salinidad práctica (PSU).

La salinidad en el mar varía generalmente entre 33 PSU a 37 PSU. La salinidad es superior en latitudes medias mientras

que en regiones de intensa lluvia o donde hay dilución por ríos puede disminuir considerablemente. En mares aislados de latitudes medias, como el Mar Rojo, donde ocurre una alta evaporación, la salinidad puede llegar a 40 PSU o más (9). Las ecuaciones que se usan en la actualidad para el cálculo de la salinidad práctica a partir de la conductividad y viceversa fue presentado por la UNESCO en 1983. Las ecuaciones utilizadas están basadas en la Escala Práctica de Salinidad 1978 (PSS-78) y son válidas dentro del rango de temperaturas entre $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, rango de presión entre 0 y 10.000 dBar y una amplia gama de salinidad práctica entre 2 y 42 PSU de la respectiva conductividad eléctrica y la proporción de conductividad. Aunque los valores de salinidad práctica menores a 2 PSU no están definidas, las ecuaciones ofrecen resultados distintos de cero válidos hasta los umbrales de los coeficientes de salinidades mayores que 0,02 PSU.

La Escala de Salinidad Práctica PSS-78 se basa en una ecuación que relaciona la salinidad a la relación de la conductividad eléctrica del agua de mar a $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la presión de una atmósfera estándar, a la de una solución estándar de cloruro de potasio (KCl). Un agua de mar estándar de 35 PSU tiene, por definición, una relación de la conductividad de la unidad a $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una solución de KCl que contiene 32,4356 g de KCl en una masa de 1 kg de solución. A partir de mediciones de peso diluido (con agua pura) o peso evaporado para aguas superficiales del Atlántico Norte, se estableció la siguiente

relación (6; 10):

$$S = a_0 + a_1 R_T^{1/2} + a_2 R_T + a_3 R_T^{3/2} + a_4 R_T^2 + a_5 R_T^{5/2} + \frac{(T - 15) \left(b_0 + b_1 R_T^{1/2} + b_2 R_T + b_3 R_T^{3/2} + b_4 R_T^2 + b_5 R_T^{5/2} \right)}{1 + k(T - 15)}, \quad (1)$$

donde:

$$\begin{aligned} a_0 &= 0.008, & b_0 &= 0.0005, \\ a_1 &= -0.1692, & b_1 &= -0.0056, \\ a_2 &= 25.3851, & b_2 &= -0.0066, \\ a_3 &= 14.0941, & b_3 &= -0.0375, \\ a_4 &= -7.0261, & b_4 &= 0.0636, \\ a_5 &= 2.7081, & b_5 &= -0.0144, \end{aligned}$$

$$k = 0.0162,$$

esta ecuación se utiliza para el cálculo de la salinidad práctica medida sólo por salinómetros de laboratorio, donde R_T es un valor medido. La UNESCO también estableció una ecuación complementaria para convertir coeficientes de conductividad medidos a presión mayor que una atmósfera (es decir, para mediciones con CTD). Dando mediciones *in situ* de la relación de conductividad R_T (11):

$$R = \frac{C(S, T, P)}{C(35, 15, 0)}, \quad (2)$$

donde $C(S, T, P)$ es la conductividad eléctrica medida por el sensor de conductividad a una salinidad S en PSU, temperatura T en $^{\circ}\text{C}$ y presión P en dBar; y $C(35, 15, 0)$ es la conductividad eléctrica del agua de mar estándar a una salinidad de 35, a 15°C y presión atmosférica y tiene un valor de $42.914 \text{ mS/cm} = 4.2914 \text{ S/m}$ (11).

La relación de conductividad se puede factorizar en tres partes, es decir,

$$R = R_p R_T r_T, \quad (3)$$

entonces

$$R_T = \frac{R}{r_T R_p}.$$

La relación R_P está dada por:

$$R_P = 1 + \frac{P(e_1 + e_2 P + e_3 P^2)}{1 + d_1 T + d_2 T^2 + d_3 R + d_4 T R}, \quad (4)$$

donde

$$\begin{aligned} e_1 &= 2.070 \times 10^{-5}, & d_1 &= 3.426 \times 10^{-2}, \\ e_2 &= -6.370 \times 10^{-10}, & d_2 &= 4.464 \times 10^{-4}, \\ e_3 &= 3.989 \times 10^{-15}, & d_3 &= 4.215 \times 10^{-1}, \\ d_4 &= -3.107 \times 10^{-3}. \end{aligned}$$

El coeficiente de temperatura del agua de mar estándar r_T , puede ser obtenido a partir de la ecuación polinómica:

$$r_T = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 + c_3 T^3 + c_4 T^4, \quad (5)$$

donde

$$\begin{aligned} c_0 &= 6.766097 \times 10^{-1}, & c_3 &= -6.9698 \times 10^{-7}, \\ c_1 &= -2.00564 \times 10^{-2}, & c_4 &= 1.0031 \times 10^{-9}, \\ c_2 &= 1.104259 \times 10^{-4}. \end{aligned}$$

Los valores de los coeficientes utilizados en las ecuaciones de la Escala de Salinidad Práctica PSS-78, están basados en experimentos llevados a cabo en aguas de mar estándar que fueron diluidas y evaporadas por peso. Esto asegura el conservatismo de una salinidad definida y su reproductividad local (11).

2.3. Cálculo de densidad del agua de mar

La densidad se define como la masa por unidad de volumen y es uno de los parámetros más importantes en el estudio de la dinámica oceánica. Las pequeñas diferencias horizontales de la densidad pueden producir corrientes muy fuertes. Por lo tanto, la determinación de la densidad ha sido una tarea muy importante en oceanografía. El símbolo para la densidad es la letra griega rho (ρ) y sus unidades son kg/m^3 . La densidad del agua de mar depende de la temperatura, salinidad y presión. La densidad disminuye con el aumento de la temperatura y aumenta con el aumento de la presión y la salinidad. El cincuenta por ciento de las aguas de los

océanos tienen una densidad entre 1027.7 y 1027.9 kg/m³. La más grande influencia en la densidad es la compresibilidad con la profundidad (9; 12).

La densidad (ρ , kg/m³) de agua de mar como una función de la salinidad práctica (S), la temperatura (T) y una presión (P) está dada por (13):

$$\rho(S, T, P) = \rho(S, T, 0) / [1 - P/K(S, T, P)], \quad (6)$$

donde $K(S, T, P)$ es el módulo de compresibilidad secante para agua de mar y está dado por:

$$K(S, T, P) = K(S, T, 0) + AP + BP^2, \quad (7)$$

el módulo de compresibilidad secante para la temperatura T , salinidad S y presión atmosférica está representado por:

$$K(S, T, 0) = K_w + (f_0 + f_1T + f_2T^2 + f_3T^3)S + (g_0 + g_1T + g_2T^2)S^{3/2}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} f_0 &= 54.6746, & g_0 &= 7.944 \times 10^{-2}, \\ f_1 &= -0.603459, & g_1 &= 1.6483 \times 10^{-2}, \\ f_2 &= 1.09987 \times 10^{-2}, & g_2 &= -5.3009 \times 10^{-4}, \\ f_3 &= -6.1670 \times 10^{-5}, & & \end{aligned}$$

A y B son parámetros dependientes de salinidad y temperatura, estos parámetros están dados por:

$$A = (2.2838 \times 10^{-3} - 1.0981 \times 10^{-5}T - 1.6078 \times 10^{-6}T^2)S + A_w + 1.91075 \times 10^{-4}S^{3/2}. \quad (9)$$

$$B = (-9.9348 \times 10^{-7} + 2.0816 \times 10^{-8}T - 9.1697 \times 10^{-10}T^2)S + B_w. \quad (10)$$

Los términos K_w , A_w y B_w son parámetros dependientes de la temperatura para el agua pura. Los términos para agua pura del módulo de compresibilidad secante están dados por (13):

$$K_w = 19652.21 + 148.4206T - 2.327105T^2 + 1.360477 \times 10^{-2}T^3 - 5.155288 \times 10^{-5}T^4. \quad (11)$$

$$A_w = 3.239908 + 1.43713 \times 10^{-3}T + 1.16092 \times 10^{-4}T^2 - 5.77905 \times 10^{-7}T^3. \quad (12)$$

$$B_w = 8.50935 \times 10^{-5} - 6.12293 \times 10^{-6}T + 5.2787 \times 10^{-8}T^2. \quad (13)$$

El término $\rho(S, T, 0)$ de la Ecuación 6, representa la densidad del agua de mar en el sitio de medición a una temperatura T , salinidad S y presión atmosférica, $\rho(S, T, 0)$ está dado por (13):

$$\begin{aligned} \rho(S, T, 0) &= \rho_w(b_0 + b_1T + b_2T^2 + b_3T^3 + b_4T^4)S \\ &+ (c_0 + c_1T + c_2T^2)S^{3/2} + d_0S^2, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} b_0 &= 8.24493 \times 10^{-1}, & c_0 &= -5.72466 \times 10^{-3}, \\ b_1 &= -4.0899 \times 10^{-3}, & c_1 &= 1.0227 \times 10^{-4}, \\ b_2 &= 7.6438 \times 10^{-5}, & c_2 &= -1.6546 \times 10^{-6}, \\ b_3 &= -8.2467 \times 10^{-7}, & & \\ b_4 &= 5.3875 \times 10^{-9}, & d_0 &= 4.8314 \times 10^{-4}. \end{aligned}$$

La densidad de referencia para el agua pura ρ_w depende de la temperatura y está representada por:

$$\rho_w = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4 + a_5T^5, \quad (15)$$

donde

$$\begin{aligned} a_0 &= 999.842594, & a_3 &= 1.001685 \times 10^{-4}, \\ a_1 &= 6.793952 \times 10^{-2}, & a_4 &= -1.120083 \times 10^{-6}, \\ a_2 &= -9.095290 \times 10^{-3}, & a_5 &= 6.536332 \times 10^{-9}. \end{aligned}$$

Debido a que la variación máxima de la densidad del agua de mar es de menos de 7 % en el rango de variables oceánicas, se perdería precisión numérica al utilizar la magnitud numérica

completa. Una mejora en dos órdenes de magnitud en el rango oceanográfico se obtiene calculando la anomalía de la densidad σ definida por (13):

$$\sigma = \rho - 1000 \text{ Kg/m}^3. \quad (16)$$

Los valores de los parámetros utilizados en las ecuaciones o fórmulas empleadas en el cálculo de la densidad del agua de mar en función de la salinidad, temperatura y presión, son obtenidos de la ecuación internacional de estado para el agua de mar (EOS 80). Estos valores se obtuvieron de análisis hechos en laboratorios utilizando con agua pura o concentrada por evaporación (13).

2.4. Cálculo de la velocidad del sonido en el agua de mar

En el agua, el sonido viaja más rápidamente y con menos absorción de energía que en el aire. Por lo tanto, es un medio eficiente para la transmisión de sonido en comparación con el aire. Esta característica permite el desarrollo de una amplia gama de aplicaciones acústicas submarinas con beneficio para la navegación. La velocidad del sonido en el agua varía con la densidad y la elasticidad del medio, los cuales son dependientes de la salinidad, temperatura, y la presión. Con la información de los sensores de conductividad, temperatura y presión es posible calcular la velocidad del sonido en el agua a diferentes profundidades. En 1977 Chen y Millero desarrollaron una fórmula a partir de mediciones en agua de mar estándar, muestras de agua de mar diluida y concentrada por evaporación (14). A continuación se presenta una función para determinar la velocidad del sonido en el agua de mar en

metros por segundo para una masa de agua mar, teniendo en cuenta su salinidad, temperatura y presión:

$$U(S, T, P) = C_w(T, P) + A(T, P)S + B(T, P)S^{3/2} + D(T, P)S^2, \quad (17)$$

donde S es la salinidad en PSS78, T la temperatura en °C y P la presión en dBar. A , B , C_w y D son parámetros dependientes de la presión y la temperatura. El término C_w está definido como:

$$C_w(T, P) = C_{00} + C_{01}T + C_{02}T^2 + C_{03}T^3 + C_{04}T^4 + C_{05}T^5 + (C_{10} + C_{11}T + C_{12}T^2 + C_{13}T^3 + C_{14}T^4)P + (C_{20} + C_{21}T + C_{22}T^2 + C_{23}T^3 + C_{24}T^4)P^2 + (C_{30} + C_{31}T + C_{32}T^2)P^3. \quad (18)$$

El término A está definido por:

$$A(T, P) = A_{00} + A_{01}T + A_{02}T^2 + A_{03}T^3 + A_{04}T^4 + (A_{10} + A_{11}T + A_{12}T^2 + A_{13}T^3 + A_{14}T^4)P + (A_{20} + A_{21}T + A_{22}T^2 + A_{23}T^3)P^2 + (A_{30} + A_{31}T + A_{32}T^2)P^3. \quad (19)$$

El término B está definido como:

$$B(T, P) = B_{00} + B_{01}T + (B_{10} + B_{11}T)P. \quad (20)$$

El término D está definido como:

$$D(T, P) = D_{00} + B_{10}P. \quad (21)$$

Los coeficientes de los términos anteriormente dados son:

$$\begin{aligned} C_{00} &= 1402.388, & A_{00} &= 1.389, \\ B_{00} &= -1.922 \times 10^{-02}, \\ C_{01} &= 5.03711, & A_{01} &= -1.262 \times 10^{-02}, \\ B_{01} &= -4.42 \times 10^{-05}, \\ C_{02} &= -5.80852 \times 10^{-02}, & A_{02} &= 7.164 \times 10^{-05}, \\ C_{03} &= 3.3420 \times 10^{-04}, & A_{03} &= 2.006 \times 10^{-06}, \\ C_{04} &= -1.47800 \times 10^{-06}, & A_{04} &= -3.21 \times 10^{-08}, \\ C_{05} &= 3.1464 \times 10^{-09}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_{10} &= 0.153563, & A_{10} &= 9.4742 \times 10^{-05}, \\
B_{10} &= 7.3637 \times 10^{-05}, \\
C_{11} &= 6.8982 \times 10^{-04}, & A_{11} &= - 1.2580 \times 10^{-05}, \\
B_{11} &= + 1.7945 \times 10^{-07}, \\
C_{12} &= - 8.1788 \times 10^{-06}, & A_{12} &= - 6.4885 \times 10^{-08}, \\
C_{13} &= 1.3621 \times 10^{-07}, & A_{13} &= 1.0507 \times 10^{-08}, \\
C_{14} &= - 6.1185 \times 10^{-10}, & A_{14} &= - 2.0122 \times 10^{-10}, \\
C_{20} &= + 3.1260 \times 10^{-05}, & A_{20} &= - 3.9064 \times 10^{-07}, \\
C_{21} &= - 1.7107 \times 10^{-06}, & A_{21} &= + 9.1041 \times 10^{-09}, \\
C_{22} &= + 2.5974 \times 10^{-08}, & A_{22} &= - 1.6002 \times 10^{-10}, \\
C_{23} &= - 2.5335 \times 10^{-10}, & A_{23} &= + 7.988 \times 10^{-12}, \\
C_{24} &= + 1.0405 \times 10^{-12}, \\
C_{30} &= - 9.7729 \times 10^{-09}, & A_{30} &= + 1.100 \times 10^{-10},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_{31} &= + 3.8504 \times 10^{-10}, & A_{31} &= + 6.649 \times 10^{-12}, \\
C_{32} &= - 2.3643 \times 10^{-12}, & A_{32} &= - 3.389 \times 10^{-13}, \\
D_{00} &= 1.727 \times 10^{-03}, & D_{10} &= - 7.9836 \times 10^{-06}.
\end{aligned}$$

Los rangos de validez para esta ecuación son: salinidad práctica entre 0 y 40 PSU, la temperatura entre 0 y 40 °C y la presión entre 0 y 10000 dBar. La desviación estándar es de 0.19 m/s (6; 15; 14).

2.5. Cálculo de la temperatura del punto de congelación del agua de mar

La temperatura de congelación del agua de mar es aproximadamente -1.8 °C, este valor de temperatura de congelación se ve afectado por los valores de salinidad y la presión. Normalmente en la superficie el agua de mar tiene 34.5 mg de sal por litro de agua; pero cuanto más salada es el agua, más cuesta que se congele. En 1976 Millero y Leung basados en mediciones desarrollaron una fórmula para el cálculo del punto de congelación del agua de mar. La temperatura del punto de congelación se da como una función de la salinidad S y la presión P por:

$$t_f = a_0S + a_1S^{3/2} + a_2S^2 + bP, \quad (22)$$

donde

$$\begin{aligned}a_0 &= -0.0575, \\a_1 &= 1.710523 \times 10^{-3}, \\a_2 &= -2.154996 \times 10^{-4}, \\b &= -7.53 \times 10^{-4},\end{aligned}$$

S es el valor de la salinidad práctica en PSS78 (PSU) y P el valor de la presión en dBar.

La ecuación para el calcular la temperatura del punto de congelación del agua de mar es válida en el rango de salinidad práctica de 4 a 40 PSU a la presión atmosférica. Las mediciones a presiones elevadas no presentan dependencia significativa del coeficiente de presión sobre la salinidad en el rango de 27 a 35 PSU. El error estimado a la presión de 500 dBar es de 0,003 °C (6; 16; 17).

3. DESARROLLO DE SOFTWARE Y PUESTA A PUNTO

En este capítulo se muestra el desarrollo de los módulos para el cálculo de las propiedades del agua de mar salinidad, profundidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación a partir de las mediciones hechas por los sensores de conductividad, temperatura y presión.

3.1. Análisis

El proyecto “Desarrollo de un software de procesamiento para la obtención de datos de un sensor CTD” consiste en desarrollar un software que permita obtener los datos de los

sensores de conductividad, temperatura y presión, para luego procesar estos datos obtenidos y calcular variables del agua de mar relacionadas a estas tres mediciones como son salinidad, conductividad, temperatura, profundidad, presión, densidad, punto de congelación y velocidad del sonido. Se requiere desarrollar un software que permita al usuario monitorear cada una de las variables medidas y calculadas a través de una interfaz. Para el desarrollo del software se tienen las siguientes especificaciones: debe leer los datos de las mediciones hechas por los sensores de conductividad, temperatura y presión, permitir el ingreso del valor de la latitud del lugar donde se realizan las mediciones, calcular salinidad, profundidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación del agua de mar utilizando los datos de las mediciones realizadas, visualización de datos numéricos, visualización gráfica de las variables asociadas a las mediciones realizadas con el CTD, borrado de datos ingresados, opciones de pausa y salida del programa y posibilidad de configuración y mantenimiento del software a través del acceso a funciones de labores específicas.

3.2. Desarrollo

Partiendo de las especificaciones deseadas para el desarrollo del software, se desarrolla una interfaz gráfica de usuario, en la cual se realiza la captura y visualización de los datos, la interfaz también permite configurar algunos parámetros de simulación. Otra etapa del software se encarga del procesamiento de los datos capturados y de realizar cálculos matemáticos para obtener los valores de profundidad, salinidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación del agua de mar, este desarrollo del software permite la verificación de código de

la interfaz y de cada uno de los módulos de cálculo implementados, también permite la detección de errores por componentes, lo cual simplifica la etapa de validación.

3.3. Implementación del software para adquisición y procesamiento de datos.

El software de adquisición de datos se implementó en la plataforma de LabVIEW® Figura 1, en el cual fueron creadas un listado de tareas de lectura y escritura que debían ser ejecutadas de manera simultánea sin interferir en las demás tareas. El procesamiento de datos se desarrolló en la plataforma de LabVIEW® Figura 2, esta parte se encarga de recibir los datos de temperatura, conductividad, presión y latitud. Posteriormente hace el muestreo de estas cuatro variables y calcula algunas propiedades del agua de mar asociadas a las cuatro variables anteriormente mencionadas, finalmente todos los datos (variables recibidas y calculadas) son enviados a módulos de monitoreo y almacenamiento para su posterior análisis. Para el monitoreo de las variables fue creada una interfaz gráfica Figura 3 de la misma plataforma.

En el módulo de adquisición de datos se realizan, direccionamientos, definición de las variables temperatura, conductividad y presión y se ejecutan las tareas asociadas con la adquisición de datos. Los datos que se leen en este módulo son de mediciones hechas con sensores CTD y publicadas por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (18).

La interfaz gráfica del CTD Figura 3 fue diseñada para obtener los valores de la presión de la columna de agua (dBar), conductividad eléctrica del agua de mar (S/m), temperatura del

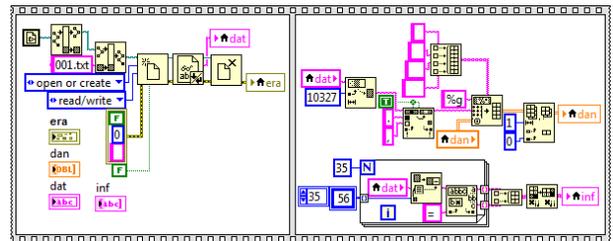


Figura 1. Adquisición de datos en la plataforma de LabVIEW®

agua en ($^{\circ}\text{C}$), profundidad a la cual se está realizando la medición (m), salinidad del agua (PSU), densidad del agua de mar (Kg/m^3), variación de la densidad del agua de mar (Kg/m^3), velocidad del sonido en el agua (m/s) y temperatura del punto de congelación del agua ($^{\circ}\text{C}$); controlar en encendido y apagado de la prueba o simulación; realizar el monitoreo y la captura de los datos de presión, temperatura, conductividad, profundidad, salinidad, densidad, variación de la densidad, velocidad del sonido y punto de congelación del agua, para ser llevados a una carpeta de archivos en los que puedan ser verificados posteriormente. También cuenta con un botón de parar en el caso que se presente un error en las comunicaciones o cuando se haya terminado el proceso, un botón de pausa y uno de reanudación de la prueba.

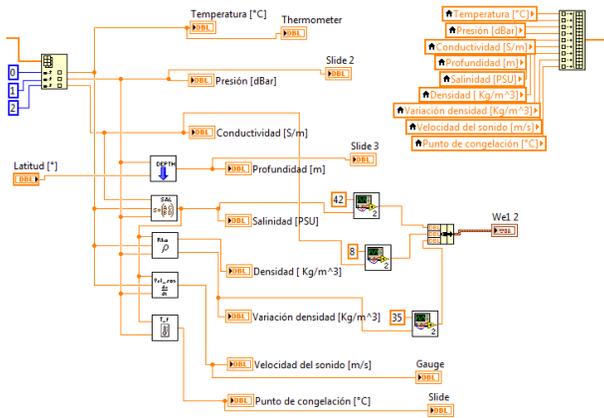


Figura 2. Etapa de procesamiento de datos

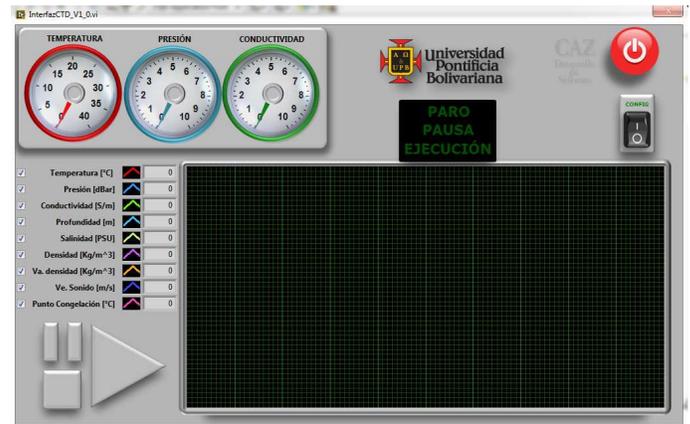


Figura 3. Interfaz gráfica CTD

3.4. Implementación de los módulos para el cálculo de profundidad, salinidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación a partir de la presión, conductividad y temperatura del agua de mar

Los módulos implementados para el cálculo de la profundidad, salinidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación del agua de mar, están basados en los modelos matemáticos estudiados en el capítulo anterior. Estos modelos son válidos para los rangos de temperatura entre -2 y 40 °C,

presión entre 0 y 10000 dBar, salinidad práctica entre 2 y 40 PSU de la respectiva conductividad eléctrica (6).

3.4.1. Módulo para el cálculo de la profundidad Como se mencionó en el capítulo anterior, en las exploraciones oceanográficas generalmente no se mide directamente la profundidad, lo que se mide es la presión del mar en el punto donde se encuentran. El programa para el cálculo de la profundidad se desarrolló en la plataforma de LabVIEW® Figura 4, este utiliza el dato entregado por el sensor de presión y el valor de la latitud del lugar donde se está realizando la medición

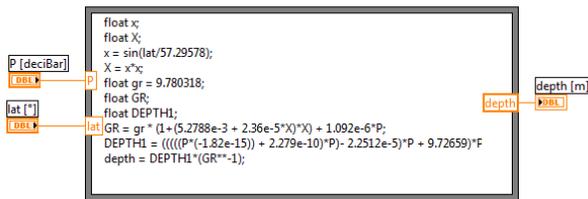


Figura 4. Cálculo de la profundidad en la plataforma de LabVIEW®

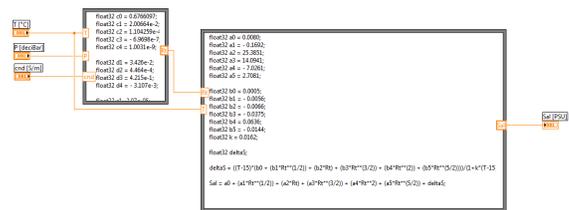


Figura 6. Cálculo de la salinidad en la plataforma de LabVIEW®

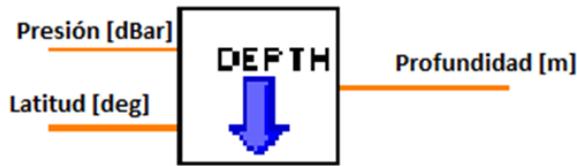


Figura 5. Módulo para el cálculo de la profundidad

(este valor debe ser ingresado por el usuario) y entrega la profundidad en metros, Las entradas y salidas del bloque de programa encargado del cálculo de la profundidad se muestra en la Figura 5.

3.4.2. *Módulo para el cálculo de la salinidad* La medición hecha por el sensor de conductividad entrega un valor que

representa la cantidad de iones disueltos en el agua de mar. La salinidad se puede calcular con el valor de conductividad entregado por el CTD, teniendo en cuenta también los valores de la temperatura y presión ambiente. La escala de salinidad práctica está dada en unidades de salinidad práctica (PSU). El módulo para el cálculo de la salinidad se implementó en la plataforma de LabVIEW® Figura 6. Las entradas y salida del módulo utilizado para el cálculo de la salinidad práctica se muestra en la Figura 7.

3.4.3. *Módulo para el cálculo de la densidad* La variación máxima de la densidad del agua de mar es de menos de 7% en el rango de variables oceánicas, se perdería precisión numérica al utilizar la magnitud numérica completa. Una mejora en dos órdenes de magnitud en el rango oceanográfico se obtiene calculando la anomalía o variación de la densidad (σ). El módulo implementado para el cálculo de la densidad se desa-



Figura 7. Módulo para el cálculo de la salinidad



Figura 9. Módulo para el cálculo de la densidad

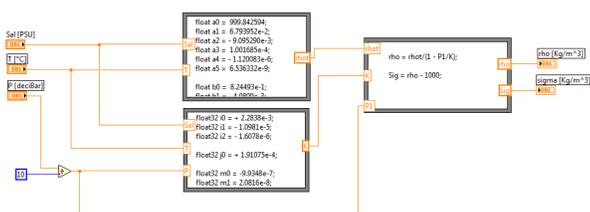


Figura 8. Cálculo de la densidad en la plataforma de LabVIEW®

rolló en la plataforma de LabVIEW® Figura 8 y entrega el valor completo de la densidad y el valor de la variación de la densidad, las entradas y salidas de este módulo se muestran en la Figura 9.

3.4.4. *Módulo para el cálculo de la velocidad del sonido* La velocidad del sonido en el agua varía con la densidad y la

elasticidad del medio, los cuales son dependientes de la salinidad, temperatura, y la presión. Con la información de los sensores de conductividad, temperatura y presión se desarrolló un módulo en la plataforma de LabVIEW® Figura 10 que hace posible calcular la velocidad del sonido en el agua a diferentes profundidades. La descripción general de entradas y salida del módulo utilizado para el cálculo de la velocidad del sonido se muestra en la Figura 11.

3.4.5. *Módulo para el cálculo del punto de congelación del agua de mar* La temperatura de congelación del agua de mar es aproximadamente -1.8 °C, este valor de temperatura de congelación se ve afectado por los valores de salinidad y la presión. Normalmente en la superficie el agua de mar tiene 34.5 mg de sal por litro de agua; pero cuanto más salada es el agua, más cuesta que se congele. Teniendo en cuenta esto, se desarrolló en la plataforma de LabVIEW® un módulo que realiza el cálculo de la temperatura del punto de congelación del agua de mar Figura 12. La descripción general de entradas

densidad, velocidad del sonido y punto de congelación, además se entrega el módulo que hace el cálculo de la profundidad a la cual se está trabajando. También se hace entrega del programa de adquisición de los datos entregados por los sensores de conductividad, temperatura y presión, la interfaz gráfica para el monitoreo y almacenamiento de los datos generados por los sensores y los módulos de cálculo utilizados.

Se realizan las pruebas correspondientes a cada uno de los módulos de cálculo, los valores arrojados por los módulos se comparan gráficamente con datos de mediciones proporcionados por la NOAA, las gráficas obtenidas en las pruebas para cada una de las variables calculadas por los módulos están en función de la presión, ya que la presión es un valor medido por el sensor y es fundamental para el cálculo de la profundidad, salinidad, densidad y velocidad del sonido.

La gráfica obtenida de la prueba del módulo de profundidad se muestra en la Figura 14, en esta gráfica se observa que a medida que aumenta la profundidad en la columna de agua la presión también aumenta, al comparar los datos entregados por el módulo con los datos de profundidad proporcionados por la NOAA, se puede notar que no hay mucha diferencia en los valores. El promedio del porcentaje de error de los datos entregados por el módulo para el cálculo de la profundidad con respecto a los datos que proporciona la NOAA es de 0.00631411%. Este valor se calcula haciendo el promedio de los porcentajes de error de los valores que entrega el módulo con respecto a los valores de profundidad proporcionados por la NOAA.

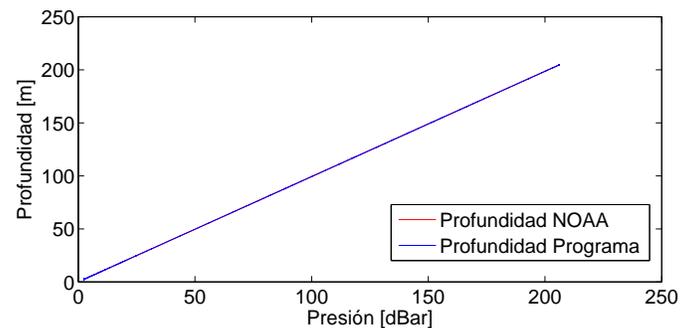


Figura 14. Gráfica profundidad vs. presión

Para la prueba realizada al módulo utilizado para el cálculo de la salinidad se obtiene la Figura 15, de la cual se puede inferir que cambios en el valor de la presión producen cambios en el valor de la salinidad, pero también se puede ver que la presión no es la variable que más afecte el valor de la salinidad. Ahora bien, el objetivo principal de la prueba realizada al módulo de salinidad es saber si está funcionando correctamente, para esto se comparan los datos entregados por este módulo con los datos de mediciones publicados por la NOAA, de esta comparación se puede decir que las gráficas son similares, el promedio del porcentaje de error entre los datos de la NOAA y los datos del módulo es 0.00956367%. Este valor se calcula haciendo el promedio de los porcentajes de error de los valores

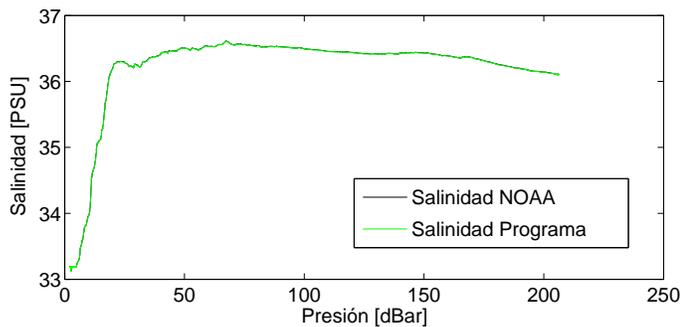


Figura 15. Gráfica salinidad vs. presión

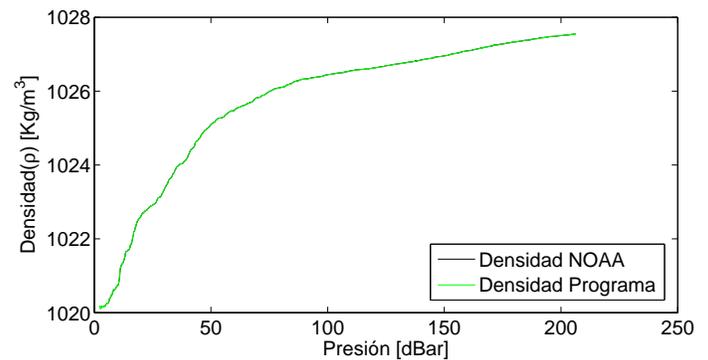


Figura 16. Gráfica densidad vs. presión

que entrega el módulo con respecto a los valores de salinidad proporcionados por la NOAA.

La gráfica obtenida de la prueba del módulo de densidad Figura 16 muestra que a medida que aumenta el valor de la presión también aumenta el valor de la densidad, al comparar los datos entregados por el módulo con los datos de profundidad proporcionados por la NOAA, se puede notar que no hay mucha diferencia en los valores. El promedio del porcentaje de error de los datos entregados por el módulo para el cálculo de la densidad con respecto a los datos que proporciona la NOAA es de $5.24913 \times 10^{-5}\%$. Valor obtenido del promedio de los porcentajes de error de los valores que entrega el módulo con respecto a los valores de densidad proporcionados por la NOAA.

Para la prueba realizada al módulo utilizado para el cálculo de la velocidad del sonido se obtiene la Figura 17, de la cual se puede deducir que cambios en el valor de la presión producen cambios en el valor de la velocidad del sonido, pero también se puede ver que la presión no es la variable que más afecte el valor de la velocidad del sonido. Ahora bien, el objetivo principal de la prueba realizada al módulo que calcula la velocidad del sonido es saber si está funcionando de manera adecuada, es decir si sus valores concuerdan con valores de referencia obtenidos en mediciones anteriores, para esto se comparan los datos entregados por este módulo con los datos de mediciones publicados por la NOAA, de esta comparación se puede decir que las gráficas son similares, el promedio del porcentaje de

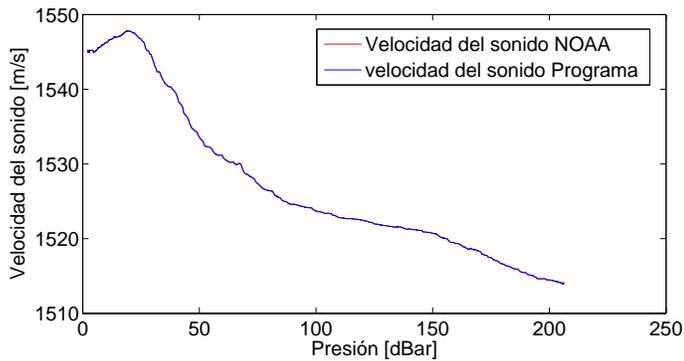


Figura 17. Gráfica velocidad del sonido vs. presión

error entre los datos de la NOAA y los datos del módulo es 0.00115911%. Este valor se calcula haciendo el promedio de los porcentajes de error de los valores que entrega el módulo con respecto a los valores proporcionados por la NOAA.

Los promedios de los porcentajes de error que arrojaron las pruebas realizadas a los módulos utilizados para el cálculo de profundidad, salinidad, densidad y velocidad del sonido, con respecto a los datos proporcionados por la NOAA, se muestran en la Tabla 1

Teniendo en cuenta las tareas de actualización de software o de modelos matemáticos en los programas desarrollados, se

Tabla 1. Porcentaje de error módulos

Módulo	% error
Profundidad	0.006314115
Salinidad	0.009563665
Densidad	5.24913×10^{-5}
Velocidad del sonido	0.00115911

dispone de memorias de los diseños de programas implementados y material bibliográfico de referencia para los modelos matemáticos utilizados en los módulos de cálculos de profundidad, salinidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación.

5. CONCLUSIONS

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación son fundamentales para lograr los alcances del proyecto “Desarrollo de un software de procesamiento para la obtención de datos de un sensor CTD”, que se orientaron en monitorear *in situ* variables de gran importancia en las exploraciones oceanográficas como son la presión, conductividad, temperatura, profundidad, salinidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación del agua de mar. Estas variables o más bien propiedades del agua de mar son de gran importancia a nivel energético ya que indican la viabilidad de explotación y buen uso de los recursos naturales de una zona, también son de gran valor a nivel ambiental debido a que los océanos cumplen un papel muy importante para el planeta ya que en

estos se producen procesos biológicos, físicos y químicos que ayudan a mantener su estructura y movimiento.

El óptimo desarrollo de las etapas de instrumentación para la medición de temperatura, salinidad y profundidad en exploraciones oceanográficas e ingeniería conceptual, en las que se estudió el sensor CTD como herramienta principal en las exploraciones oceanográficas y los modelos matemáticos para el cálculos de las propiedades del agua de mar, permitieron que el desarrollo del software de adquisición de datos y de los módulos de cálculo para profundidad, salinidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación se hiciera de manera adecuada, de tal manera que el módulo de adquisición de los datos de los sensores de conductividad, temperatura y presión y los módulos utilizados para el cálculo de las propiedades de agua de mar funcionen correctamente como se pudo observar en el Capítulo 4.

El desarrollo de la interfaz humano máquina crea una interacción entre el operario y el proceso, lo cual da respuesta a la necesidad de monitorear en tiempo real las propiedades del agua de mar presión, salinidad, conductividad, temperatura, densidad, profundidad, velocidad del sonido y punto de congelación, esta interfaz se desarrolló en la plataforma de LabVIEW®, lo que permite el incremento de la interfaz a medida que crecen las necesidades o requerimientos del proyecto.

Se puede decir que la ejecución de cada una de las etapas del proyecto se hizo de manera apropiada, lo cual trae beneficios

al proyecto como lo es la eficiencia de cada uno softwares desarrollados.

REFERENCIAS

- [1] N. Posada, C. Zuluaga, J. Correa, R. Valencia, D. Flórez, and C. Arias, "Instrumentación para la medición de salinidad, temperatura y corrientes en océanos," *Revista Educación en Ingeniería*, vol. 6, no. 11, p. 9, 2011. [Online]. Available: <http://www.educacioneningenieria.org/index.php/edi/article/view/118>
- [2] L. Zambrano, "Importancia del manejo de datos oceanograficos," *ACTA OCEANOGRÁFICA DEL PACÍFICO*, vol. 15, p. 7, 2009. [Online]. Available: <http://www.inocar.mil.ec/docs/ACTAS/OCE15/OCE1501.16.pdf>
- [3] J. Jaimes and R. López, "Biomasa y abundancia de copepoda (crustacea) en aguas superficiales del océano pacífico colombiano durante septiembre de 2007," *Revista de biología marina y oceanografía*, vol. 41, pp. 31–41, 2014.
- [4] Conductivity, temperature, depth (CTD) sensors. Ocean Instruments. [Online]. Available: <http://www.whoi.edu/instruments/viewInstrument.do?id=1003>
- [5] A. WilliamsIII, "CTD (conductivity, temperature, depth) profiler," in *Encyclopedia of Ocean Sciences (Second Edition)*, 2nd ed., J. H. Steele, K. K. Turekian, , and S. A. Thorpe, Eds. Oxford: Academic Press, 2009, pp. 708 – 717. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123744739007244>
- [6] UNESCO, "Algorithms for computation of fundamental properties of seawater," *Unesco technical papers in marine scierlce*, vol. 44, pp. 6–46, 1983.
- [7] IDRONAUT S.r.l., "Ocean seven 316plus ctd multiparameter probe," IDRONAUT S.r.l., Tech. Rep., August 2013.
- [8] code10. (2009, January) Algorithms on seawater. [Online]. Available: <http://www.code10.info/>

- [9] (2012) Propiedades físicas del mar. Universidad Nacional Agraria - La Molina. [Online]. Available: <http://tarwi.lamolina.edu.pe/licochea/propiedad1.html>
- [10] I. Shkvorets. (2015) Practical salinity scale - 1978. Salinometry. [Online]. Available: <http://salinometry.com/pss-78/>
- [11] UNESCO, "Background papers and supporting data on the practical salinity scale 1978," Unesco technical paper in marine science N° 37, Tech. Rep., 1981.
- [12] Y. Marzieh and L. Kamran, "Variations of temperature and salinity in the southwestern coastal waters of the caspian sea, north of iran," *Coastal and Marine Research*, vol. 2, pp. 13–18, 2014.
- [13] Unesco, "Background papers and supporting data on the international equation of state of seawater 1980," Unesco technical paper in marine science N° 38, Tech. Rep., 1981.
- [14] C.-T. Chen and F. J. Millero, "Speed of sound in seawater at high pressures." *Journal of the Acoustic Society of America*, vol. 62(5), pp. 1129–1135, 1977.
- [15] J. Schulz. (2008, June) Calculating the speed of sound in seawater. code10. [Online]. Available: <http://www.code10.info>
- [16] ——. (2011, March) Calculating the freezing point of seawater. code10. [Online]. Available: <http://www.code10.info>
- [17] F. M. W. Leung, "Thermodynamics of seawater at one atmosphere," *American Journal of Science*, vol. 276:9, pp. 1035–1077, 1976.
- [18] Ship data : Deepwater horizon support. NOAA. [Online]. Available: <http://www.nodc.noaa.gov/deepwaterhorizon/ship.html#gordongunter>

AUTOR

Francisco BARREIRO, Ingeniero Electrónica (2009), actualmente estudiante de Maestría en Ingeniería en el área de automática en la Universidad Pontificia Bolivariana



B. ANTEPROYECTO

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE DE PROCESAMIENTO PARA LA
OBTENCIÓN DE DATOS DE UN SENSOR CTD**

FRANCISCO BARREIRO PINTO

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN**

2015

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE DE PROCESAMIENTO PARA LA
OBTENCIÓN DE DATOS DE UN SENSOR CTD**

FRANCISCO BARREIRO PINTO

**Anteproyecto de trabajo de grado para optar al título de Magíster en
Ingeniería**

**Director
Carlos Alejandro Zuluaga Toro
Magíster en Ingeniería**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2015**

GLOSARIO

MATLAB: MATLAB® es el lenguaje de alto nivel y el entorno interactivo utilizado por millones de ingenieros y científicos en todo el mundo. permite explorar y visualizar ideas, así como colaborar interdisciplinariamente en procesamiento de señales e imagen, comunicaciones, sistemas de control y finanzas computacionales [1].

LABVIEW: Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench, sigla del inglés. Es una plataforma de desarrollo de Software propiedad de *National Instruments* que utiliza iconos en lugar de líneas de texto para crear aplicaciones. LabVIEW® utiliza la programación de flujo de datos, donde el flujo de datos a través de los nodos en el diagrama de bloques determina el orden de ejecución de los instrumentos virtuales y las funciones. Los instrumentos virtuales, son programas de LabVIEW® que imitan instrumentos físicos. Aunque pretende ser de propósito general, la plataforma LabVIEW ® es utilizada principalmente para adquisición de datos, control de instrumentación y automatización, a nivel académico, de investigación e industrial [2].

SOFTWARE: Conjunto de programas, instrucciones y reglas informáticas para ejecutar ciertas tareas en una computadora [3]

ADQUISICIÓN DE DATOS: la adquisición de datos es el proceso de medir un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema de adquisición de datos permite digitalizar, procesar, visualizar y almacenar datos de medida [4].

CTD: Conductivity, Temperature, and Depth, sigla del inglés. Es la herramienta principal para determinar propiedades físicas esenciales de agua de mar. Entrega una cartografía precisa y completa de la distribución y la variación de la temperatura del agua, salinidad y densidad de la columna de agua [5].

SENSOR DE PRESIÓN: los sensores de presión o transductores de presión son elementos que transforman la magnitud física de presión o fuerza por unidad de superficie en otra magnitud eléctrica que es la que se emplea en los equipos de automatización o adquisición estándar. Los rangos de medida son muy amplios, desde unas milésimas de Bar hasta los miles de Bar [6].

SENSOR DE TEMPERATURA: los sensores de temperatura son dispositivos que transforman los cambios de temperatura en cambios en señales eléctricas que son procesados por equipo eléctrico o electrónico. Hay tres tipos de sensores de temperatura, los termistores, los RTD y los termopares. El sensor de temperatura, típicamente suele estar formado por el elemento sensor, de cualquiera de los tipos anteriores, la vaina que lo envuelve y que está rellena de un material muy conductor de la temperatura, para que los cambios se transmitan rápidamente al elemento sensor y del cable al que se conectarán el equipo electrónico [7].

SENSOR DE CONDUCTIVIDAD: el sensor de conductividad eléctrica hace la medición de los electrolitos de una solución. Esto se define como la conductancia en un volumen dado. Conductancia es la habilidad de la solución para conducir la corriente eléctrica. La conductancia eléctrica es un indicador importante de calidad de agua [8].

1. PARTICIPANTES

1.1. ESTUDIANTE

Francisco Barreiro Pinto

Cédula: 10.784.668

Teléfono: 4110915

Id: 000066146

E-mail: francisco.barreiro@upb.edu.co

Programa: Maestría en Ingeniería

1.2. DIRECTOR

Carlos Alejandro Zuluaga Toro

Cédula: 98.562.106

Teléfono: 4488388 Opc.1— Ext. 14113

E-mail: carlos.zuluaga@upb.edu.co

Empresa: Universidad Pontificia Bolivariana

1.3. GRUPO DE AUTOMÁTICA Y DISEÑO A+D

Teléfono: 448 8388

Contacto: Rafael Vásquez

E-mail: rafael.vasquez@upb.edu.co

Empresa: Universidad Pontificia Bolivariana

2. MODALIDAD

Este trabajo de grado forma parte del proyecto “Desarrollo de un software de procesamiento para la obtención de datos de un sensor CTD”, el proyecto pertenece a la modalidad de investigación y está enfocado en el desarrollo de un sistema de adquisición de datos y procesamiento de las variables obtenidas por los sensores de conductividad, temperatura y profundidad. Este software será desarrollado por el Grupo de Automática y Diseño (A+D), con el fin de estudiar propiedades del agua de mar tales como salinidad, densidad, presión, temperatura, conductividad eléctrica, punto de congelación, velocidad del sonido y profundidad.

3. TEMAS DEL PROYECTO

El proyecto “Desarrollo de un software de procesamiento para la obtención de datos de un sensor CTD” tiene como principal objetivo el desarrollo un software que permita la adquisición y procesamiento de los datos que entregan los sensores de conductividad, temperatura y profundidad, utilizados en exploraciones oceanográficas. Estas tres variables medidas son fundamentales para el cálculo de otras propiedades del agua de mar como salinidad, densidad, profundidad, velocidad del sonido y punto de congelación, las cuales son importantes a nivel energético y ambiental. El software de procesamiento que se diseñará en este proyecto debe utilizar los valores medidos por los tres sensores (Conductividad, temperatura y presión), para calcular Salinidad, densidad, profundidad, punto de congelación y velocidad del sonido en el agua.

4. DEDICACIÓN

En la Tabla 1 se observan los porcentajes de dedicación del proyecto.

Tabla 1. Dedicación del proyecto

Tipo	%
Investigación	65
Desarrollo	25
Redacción manual	10

5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Grupo de Automática y Diseño A+D se encuentra desarrollando un proyecto de exploración oceanográfica. Una de las etapas del proyecto consiste en desarrollar un software de procesamiento para los datos de los sensores de conductividad, temperatura y presión, para luego procesar estos datos obtenidos y calcular variables del agua de mar relacionadas a estas tres mediciones. El desarrollo del software para la obtención y procesamiento de las variables conductividad, temperatura y presión, ayudará a observar y estudiar algunas propiedades fundamentales del agua del mar como salinidad, conductividad, temperatura, profundidad, presión, densidad, punto de congelación y velocidad del sonido. Las propiedades del agua de mar medidas y calculadas son de gran importancia en los estudios de:

- Aprovechamiento de la energía de las corrientes marinas.
- Exploraciones petroleras.
- Probabilidad de inundaciones costeras.
- Predicción de los efectos del calentamiento global.
- Predicción de desastres naturales.
- Permite la toma de datos *in situ* en regiones remotas.

El software de procesamiento de datos diseñado, deberá ser integrado a un software de adquisición de datos, el cual deberá leer y almacenar los datos de temperatura, presión, conductividad y latitud registrados por los sensores asociados a cada una de las magnitudes mencionadas. El objetivo es monitorear cada una de estas variables medidas (temperatura, presión, conductividad y latitud) y calcular otras propiedades del agua de mar asociadas a ellas tales como salinidad, profundidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación.

Los datos de conductividad, temperatura, presión y latitud leídos por el software de adquisición de datos serán llevados al módulo de procesamiento de datos donde se utilizarán para calcular la profundidad, salinidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación.

La interfaz gráfica permitirá ver y registrar el comportamiento de la temperatura, la presión, la conductividad, la salinidad, la profundidad, la densidad, la velocidad del sonido y el punto de congelación del agua de mar. La idea principal es monitorear las propiedades del agua de mar y tener el registro de los datos medidos y calculados para su posterior análisis.

El proyecto “Desarrollo de un software de procesamiento para la obtención de datos de un sensor CTD” presenta beneficios asociados a las exploraciones oceanográficas, específicamente en tener un programa que permita el monitoreo y cálculo de algunas propiedades del agua de mar como conductividad, temperatura, presión, profundidad, salinidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación del agua.

6. ESTADO DEL ARTE

La población mundial está en constante crecimiento al igual que su consumo energético, esto trae como consecuencia el agotamiento de los recursos naturales, generando así un impacto irreparable en el medio ambiente. Por esta razón uno de los principales temas de estudio en la actualidad es la explotación y buen uso de los recursos naturales de los océanos. Por tal motivo, la medición y el estudio de variables como salinidad, conductividad, temperatura y presión del agua en los océanos es de gran importancia, ya que estas variables indican la viabilidad de la explotación de los recursos naturales de una zona [9].

Los océanos cumplen un papel muy importante para el planeta ya que en estos se producen procesos biológicos, físicos y químicos que ayudan a mantener su estructura y movimiento. Por esta razón el monitoreo de las variables oceanográficas salinidad, temperatura y presión, no es sólo importante para la explotación de recursos naturales, sino que también ayuda a comprender los procesos que ocurren en el entorno, calcular la probabilidad de inundaciones costeras, predicción de los efectos del calentamiento global y desastres naturales, ya que estos fenómenos en la actualidad están afectando la calidad de vida y la de las próximas generaciones [10, 11].

Uno de los mayores impedimentos para la comprensión de procesos oceánicos es la falta de datos *in situ* en regiones remotas. Como consecuencia, en la actualidad existe una falta de capacidad para detectar y vigilar los cambios en las condiciones oceanográficas en algunas regiones que son importantes climáticamente, otra consecuencia es la escasez de datos con los cuales se puede cuestionar y validar los modelos climáticos. Para comprender el papel de los océanos en el sistema climático se requiere de un constante muestreo de propiedades fundamentales del agua de mar tales como temperatura, presión y salinidad [12]. La herramienta principal para determinar las propiedades físicas esenciales del agua en los océanos es un sensor de conductividad, temperatura y profundidad, conocidos por sus siglas en inglés como CTD. Con los datos proporcionados por el sensor y el uso de un software de procesamiento de señales diseñado para el CTD, los científicos pueden obtener gráficos precisos y completos de la distribución

y la variación de la temperatura del agua, salinidad y densidad que ayuda a entender cómo los océanos afectan a la vida en la tierra [13].

Los cálculos de propiedades tales como la profundidad, salinidad, densidad, temperatura y potencial eléctrico han facilitado en gran medida tener las mediciones de conductividad, la temperatura, y la presión en formato digital para la entrada directa en fórmulas estándar [14].

Los CTD incorporan sensores de medición local para conductividad eléctrica, temperatura y presión. La medición de la conductividad eléctrica se hace debido a que ésta es uno de los parámetros necesarios para calcular la salinidad. Con los datos de salinidad, temperatura y presión obtenidos a partir de las mediciones del CTD, se puede calcular la densidad y la velocidad del sonido en el agua, lo que ha impulsado el desarrollo militar y la aplicación de la tecnología CTD para submarinos [15].

En investigaciones o prácticas realizadas con los dispositivos CTD se han reportado ciertas ventajas y limitaciones.

Algunas de las ventajas que presentan los dispositivos CTD son:

- Posibilitan medición remota utilizando un sistema de almacenamiento y alimentación autónoma, esta ventaja es aprovechada cuando se realizan mediciones en boyas ancladas [16] y en pequeños CTD que son adheridos a depredadores marinos utilizados como transporte [17][18].
- Se pueden encontrar comercialmente sensores CTD de alta resolución (más de 15 bit) [19].
- Los CTD pueden ser utilizados desde pequeñas hasta grandes profundidades bajo el nivel del mar, superando los 6000 m [13].
- Se pueden conseguir CTD con peso ligero (1 kg sin plataforma) [9].

Algunas de las limitaciones que presentan estos dispositivos son:

- Los CTD de alta resolución presentan un alto consumo energético, lo que no es muy

conveniente para los CTD autónomos que necesitan estar conectados a baterías [19].

- La calibración en los CTD se debe hacer de manera frecuente y es individual para cada sensor [13].

Los sensores CTD utilizan sensores independientes para la medición de cada una de las variables, por esta razón se debe analizar cada uno de estos sensores y los métodos utilizados en las mediciones. Para realizar las mediciones de conductividad con el CTD, generalmente se emplean dos clases de sensores: tipo inductivos y tipo electrodo [20]. Para la medición de la temperatura con los CTDs se utilizan generalmente sensores de temperatura RTD o termistores [21]. Los CTDs no miden directamente la profundidad, miden la presión de la columna líquida en el punto donde se encuentran y se utiliza la ecuación proporcionada por la UNESCO para el cálculo de la profundidad en metros para aguas marinas en función de la presión, la variación de la gravedad y la latitud [22, 23]. En los dispositivos CTD para medir la presión generalmente se utilizan sensores basados en el efecto piezoresistivo que consiste en una variación de la resistencia en el semiconductor, causado por su expansión y compresión que influye en la movilidad de los electrodos bajo carga mecánica [24, 25].

La salinidad, velocidad de sonido, punto de congelación y densidad del agua de mar se obtienen utilizando los algoritmos descritos en los documentos técnicos de la UNESCO en las ciencias marinas No. 44 “*Algorithms for computation of fundamental properties of seawater*” [22, 26, 27, 28, 23].

7. OBJETIVOS

7.1. GENERAL

Desarrollar un software de procesamiento para obtener propiedades del agua de mar a partir de datos obtenidos con los sensores de conductividad, temperatura y presión en mediciones oceanográficas.

7.2. ESPECÍFICOS

- Realizar una búsqueda y revisión del estado del arte sobre los sensores utilizados en la medición de salinidad, temperatura y presión en exploraciones oceanográficas.
- Diseñar un software de adquisición de datos para las variables medidas con un CTD.
- Diseñar un software para el cálculo de las propiedades del agua de mar profundidad, salinidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación.
- Desarrollar una interfaz gráfica para monitorear las señales medidas por el CTD y las propiedades del agua de mar calculadas a partir de estas mediciones.
- Realizar pruebas del software para el sistema de procesamiento de las variables de un CTD, comparando los resultados obtenidos con valores definidos en la literatura.
- Elaborar de un reporte del desarrollo del proyecto.

8. METODOLOGÍA

A continuación se describen cada una de las etapas que deben ser realizadas para el desarrollo de este proyecto. Durante todas las etapas del proyecto, se deben hacer

consultas en libros, artículos, informes de conferencias, fabricantes y demás fuentes, sobre los temas involucrados en cada una de las actividades realizadas en el desarrollo del proyecto:

- Consultar la documentación y realizar un estado del arte sobre la instrumentación utilizada para la medición de la salinidad, temperatura y profundidad en las exploraciones oceanográficas, esto con el fin de tener claro los pasos a seguir en el desarrollo e implementación del software de adquisición de datos y el software para el cálculo de las propiedades del agua de mar.
- Para el desarrollo del software de adquisición de datos, es necesario identificar las variables a medir y manipular, estudiar los principios de funcionamiento y especificaciones requeridas para un buen funcionamiento de los sensores de conductividad, temperatura y presión.
- Consultar los modelos matemáticos que relacionan las variables medidas conductividad, temperatura y presión, con las propiedades del agua de mar que se desean calcular, esto permitirá tener una idea clara de los pasos a seguir para desarrollar los módulos de cálculo para la profundidad, salinidad, densidad, velocidad del sonido y punto de congelación del agua de mar.
- Se diseñará un software que permita monitorear el comportamiento de las variables sensadas y de otras propiedades del agua de mar como densidad, salinidad, profundidad, velocidad del sonido y punto de congelación. En este software - interfaz gráfica, se deben visualizar los valores en tiempo real de las variables mencionadas, la interfaz gráfica se implementará en la plataforma de LabVIEW®.
- En la fase final del proyecto se deben realizar pruebas del sistema contrastando con valores definidos por la literatura, para verificar el funcionamiento adecuado y finalmente realizar un informe donde se describan todas las etapas del desarrollo del proyecto.

9. JUSTIFICACIÓN Y BENEFICIOS

El proyecto presentará beneficios asociados a las exploraciones oceanográficas, ya que está enfocado en la medición y cálculos de algunas de las propiedades fundamentales del agua de mar, a través de las cuales se puede estudiar la posibilidad de explotación de sus recursos naturales. Este proyecto también presenta beneficios en la parte ambiental, ya que permite estudiar las causas del calentamiento global y predecir algunos fenómenos naturales. Además posibilita la reducción de costos en la obtención del dispositivo CTD y su software de procesamiento, ya que comercialmente tienen un alto costo. La utilización de sensores de conductividad, temperatura y presión en exploraciones oceanográficas reduce la complejidad en la medición de variables del agua de mar.

10. ALCANCES

Al finalizar este proyecto se deben entregar los siguientes productos:

- Trabajo de grado donde se muestre el proceso de diseño e implementación del software de simulación desarrollado.
- Interfaz gráfica de usuario en la plataforma de LabVIEW® que permita ver la simulación y el monitoreo de las variables del proceso
- Artículo donde se muestre el diseño de los módulos de cálculo de las variables del agua de mar asociadas a los valores de conductividad, temperatura y presión medidos por el CTD.
- Reporte de pruebas del software desarrollado.

Tabla 2. Presupuesto y recursos necesarios

Recurso	Participación (miles de pesos)		Implica desembolso	
	Estudiante	UPB	Si	No (existe)
Telecomunicaciones				
Papelería				
Equipos				7'000.000
Transporte				
Bibliografía				
Asistencia Eventos				
Gastos representación				
Trabajo 8000/h	7'000.000			7'000.000
Trabajo director 9300/h		5'000.000		5'000.000
SUBTOTAL				19'000.000
IMPREVISTOS(10%)				1'900.000
TOTAL				20'900.000
GRAN TOTAL				20'900.000

11. PRESUPUESTOS Y RECURSOS NECESARIOS

El presupuesto necesario para el desarrollo del proyecto “Desarrollo de un sistema de procesamiento para la obtención de datos de un CTD” se detalla en la Tabla 2.

12. CRONOGRAMA

El proyecto “Desarrollo de un sistema de procesamiento para la obtención de datos de un CTD” tendrá una duración de 16 meses contados a partir de 15 de Noviembre 2013. En la Tabla 3 se muestra el cronograma del proyecto, en donde se especifican las labores a realizar y los tiempos de ejecución de cada una de ellas.

Tabla 3. Cronograma de actividades del proyecto

Actividades \ Meses	Nov 2013	Dic 2013	Ene 2014	Feb 2014	Mar 2014	Abr 2014	May 2014	Jun 2014	Jul 2014	Ago 2014	Sep 2014	Oct 2014	Nov 2014	Dic 2014	Ene 2015	Feb 2015	Mar 2015
Estado del arte	■	■															
Formulación y Entrega del anteproyecto			■	■	■												
Documentación variables asociadas al proyecto				■	■	■	■										
Diseño software de adquisición y procesamiento de datos						■	■	■	■	■	■	■	■	■			
Pruebas de Software										■	■	■	■	■	■		
Desarrollo de la interfaz										■	■	■	■	■			
Pruebas de simulación												■	■	■	■	■	■
Redacción del trabajo								■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Revisión del informe final								■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

BIBLIOGRAFÍA

- [1] MATLAB. (2015, January) Matlab. [Online]. Available: <http://es.mathworks.com/products/matlab/>
- [2] LabVIEW. (2015, January) Labview fundamentals. National Instruments. [Online]. Available: <http://www.ni.com/pdf/manuals/374029a.pdf>
- [3] R. A. Española. (2015, January) software. [Online]. Available: <http://www.rae.es/>
- [4] N. Instruments. (2015, January) ¿qué es adquisición de datos? [Online]. Available: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>
- [5] O. Instrument. (2015, January) Conductivity, temperature, depth (ctd) sensor. [Online]. Available: <http://www.whoi.edu/instruments/viewInstrument.do?id=1003>
- [6] Sensing. (2015, January) Transductores de presión. [Online]. Available: http://www.sensing.es/Transductores_de_presion_Cm.htm
- [7] medirtemperatura.com. Sensor de temperatura. [Online]. Available: <http://medirtemperatura.com/index.php>
- [8] N. AUTOMACION. (2015, January) Medidores de conductividad. [Online]. Available: <http://www.nikron.com.ar/automacion/index.php>
- [9] N. Posada, C. Zuluaga, J. Correa, R. Valencia, D. Flórez, and C. Arias, “Instrumentación para la medición de salinidad, temperatura y corrientes en océanos,” *Revista Educación en Ingeniería*, vol. 6, no. 11, p. 9, 2011. [Online]. Available: <http://www.educacioningenieria.org/index.php/edi/article/view/118>
- [10] L. Zambrano, “Importancia del manejo de datos oceanograficos,” *ACTA OCEANOGRÁFICA DEL PACÍFICO*, vol. 15, p. 7, 2009. [Online]. Available: http://www.inocar.mil.ec/docs/ACTAS/OCE15/OCE1501_16.pdf

- [11] J. Jaimes and R. López, “Biomasa y abundancia de copepoda (crustacea) en aguas superficiales del océano pacífico colombiano durante septiembre de 2007,” *Revista de biología marina y oceanografía*, vol. 41, pp. 31–41, 2014.
- [12] L. Boehme, P. Lovell, M. Biuw, F. Roquet, J. Nicholson, S. E. Thorpe, M. P. Meredith, and M. Fedak, “Technical note: Animal-borne ctd-satellite relay data loggers for real-time oceanographic data collection,” *Ocean Science*, vol. 5, no. 4, pp. 685–695, 2009. [Online]. Available: <http://www.ocean-sci.net/5/685/2009/>
- [13] Conductivity, temperature, depth (CTD) sensors. Ocean Instruments. [Online]. Available: <http://www.whoi.edu/instruments/viewInstrument.do?id=1003>
- [14] A. WilliamsIII, “CTD (conductivity, temperature, depth) profiler,” in *Encyclopedia of Ocean Sciences (Second Edition)*, 2nd ed., J. H. Steele, K. K. Turekian, , and S. A. Thorpe, Eds. Oxford: Academic Press, 2009, pp. 708 – 717. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123744739007244>
- [15] K. Lawson and N. Larson, “Ctd,” in *Encyclopedia of Ocean Sciences*, J. H. Steele, Ed. Oxford: Academic Press, 2001, pp. 579 – 588. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B012227430X00324X>
- [16] A. D. I. AS, “Ctd seaguard,” Aanderaa Data Instruments AS, Tech. Rep., 2012. [Online]. Available: <http://www.sidmar.es/img/Fbdatosimagenestienda/Noticias/372Video..pdf>
- [17] S. K. Hooker and I. L. Boyd, “Salinity sensors on seals: use of marine predators to carry {CTD} data loggers,” *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, vol. 50, no. 7, pp. 927 – 939, 2003. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967063703000554>
- [18] H. A. Broadbent, T. P. Ketterl, A. M. Silverman, and J. J. Torres, “Development of a {CTD} biotag: Challenges and pitfalls,” *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, vol. 88-89, pp. 131 – 136, 2013. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967064512001166>
- [19] M. Crescentini, M. Bennati, and M. Tartagni, “Design of integrated

- and autonomous conductivity-temperature-depth (ctd) sensors,” {*AEU*} - *International Journal of Electronics and Communications*, vol. 66, no. 8, pp. 630 – 635, 2012. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1434841112000684>
- [20] hydroacoustics. Conductivity temperature depth - ctd. [Online]. Available: <http://www.hydroacoustics.com/library/docs/CTD.pdf>
- [21] J. CIFUENTES, P. TORRES, and M. FRÍAS, *EL OCÉANO Y SUS RECURSOS III. LAS CIENCIAS DEL MAR: OCEANOGRAFÍA FÍSICA, MATEMÁTICAS E INGENIERÍA*, F. D. C. ECONÓMICA, Ed. Fondo De Cultura Economica USA, 2000. [Online]. Available: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/17/\htm/oceano.htm>
- [22] UNESCO, “Algorithms for computation of fundamental properties of seawater,” *Unesco technical papers in marine science*, vol. 44, pp. 6–46, 1983.
- [23] Y. Marzieh and L. Kamran, “Variations of temperature and salinity in the southwestern coastal waters of the caspian sea, north of iran,” *Coastal and Marine Research*, vol. 2, pp. 13–18, 2014.
- [24] (2013) Pressure. AML Oceanographic. [Online]. Available: <http://www.amloceanographic.com/Technical-Demo?search=pressure>
- [25] (2012) Los principios más comunes para sensores de presión. WIKA S.A. [Online]. Available: <http://www.bloginstrumentacion.com/blog/2011/12/02/los-principios-mas-comunes-para-sensores-de-presion/>
- [26] IDRONAUT S.r.l., “Ocean seven 316plus ctd multiparameter probe,” IDRONAUT S.r.l., Tech. Rep., August 2013.
- [27] J. Castañeda. (2000) Propiedades del agua de mar. [Online]. Available: <http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/IntroOc/notes/lectura03.html>
- [28] (2012) Propiedades físicas del mar. Universidad Nacional Agraria - La Molina. [Online]. Available: <http://tarwi.lamolina.edu.pe/licochea/propiedad1.html>