

Método de medición de combustible en una embarcación fluvial

Mauricio Pardo González¹, Víctor Manotas Angulo²,
Humberto Campanella Pineda³ y Javier Páez Saavedra⁴

Recepción: 17 de junio de 2004 — Aceptación: 04 de octubre de 2005
Se aceptan comentarios y/o discusiones al artículo

Resumen

Se expone una forma de mejorar el método de medición de combustible en una embarcación fluvial, específicamente en un remolcador. El marco de referencia sobre el que se basa este artículo, es la estrategia utilizada para establecer la cantidad de combustible presente en los tanques de la embarcación. El método que hasta el momento se viene utilizando, produce un error influenciado por factores de perturbación, como la inclinación y la forma de tanqueo del remolcador. Se buscó desarrollar un método alternativo que redujera el error entre el combustible entregado y el medido en la embarcación. Este nuevo método logró ser independiente de la inclinación sin necesidad de utilizar un inclinómetro o instrumento de medida de ángulos.

Palabras claves: medición de niveles, centroide, punto de sondeo, sensores de presión.

¹ Ingeniero electrónico, mpardo@ieee.org, profesor, Universidad del Norte.

² Ingeniero electrónico, vmanotas@hotmail.com, miembro del Grupo de Investigación en Telecomunicaciones y Señales, Universidad del Norte.

³ Master en Sistemas y redes de comunicaciones, hcampanella@uninorte.edu.co, profesor, Universidad del Norte.

⁴ MBA, jpaez@uninorte.edu.co, decano de la División de Ingenierías, Universidad del Norte.

Abstract

This paper exposes a way to improve the method of fuel measurement in a river vessel, specifically a tugboat. The framework of this article is the need of a strategy to establish the amount of fuel volume that is contained in the tanks of the tugboat. The method, that have been used so far, produces errors influenced by disturbance factors such as the inclination and the shape of the tanks of the tugboat. It is needed to develop an alternative method that reduces the error between the fuel which is provided by the suppliers and the measured one in the tugboat. This new method tries to be independent of the inclination of the boat with no need of using a clinometer or instrument of angle measurement.

Key words: level measurement, centroid, test point, pressure sensors.

1 Introducción

El marco de trabajo en el cual surge este método de medida de combustible es el desarrollo de un proyecto en la modalidad universidad–empresa. El proyecto denominado “Sistema de Telemetría para Remolcadores”, involucra una empresa del sector carbonero de la región caribe colombiana y la Universidad del Norte como centro de desarrollo tecnológico, y comprende: la construcción de un sistema de adquisición de señales, el desarrollo de un sistema de posicionamiento de la embarcación y la creación de un sistema de gestión de operaciones del remolcador.

La necesidad más importante que la empresa desea suplir con el desarrollo del proyecto, es el monitoreo continuo de la cantidad de galones de combustible en los tanques de los remolcadores, que permita tomar decisiones desde el punto de vista logístico, que apunten a la reducción del rubro correspondiente a gastos operacionales del estado de pérdidas y ganancias. Este proyecto, concebido para el desarrollo de un prototipo, involucra un remolcador con seis tanques de combustible repartidos uniformemente, es decir, tres a cada lado de la embarcación. Si bien los tanques son iguales con respecto a su contraparte del otro lado, los tanques de un flanco del remolcador son diferentes entre sí y no son prismas rectangulares rectos. Adicionalmente, debido a que el medio en el cual el remolcador se encuentra trabajando permite modificaciones en el plano horizontal del marco de referencia de la embarcación, el método de medición del nivel de combustible que se seguía hasta el inicio del

proyecto, incluía errores que afectaban la operación logística de la empresa. De esta forma, se desarrolla un método experimental de medición, lo más independiente posible, de inclinaciones proa–popa y estribor–babor.

En la sección (2) se presentan la configuración de los tanques del remolcador que funcionó como prototipo, sus formas, método de medida empleado hasta entonces y los problemas que involucraba.

Posteriormente, en la sección (3), se presentan los conceptos matemáticos que permitieron la búsqueda y desarrollo de un método alternativo, así como la elección de una estrategia de sensado conveniente para el caso particular.

En la sección (4) se presenta un resumen del desarrollo de la estrategia con base en lo expuesto en la sección (3). Finalmente, en la sección (5) se muestran los resultados y conclusiones.

2 Antecedentes: tanques y sus propiedades, método de medida anterior

El remolcador utilizado para el desarrollo del sistema prototipo, cuenta con dos motores de propulsión, dos generadores eléctricos y seis tanques de almacenamiento de combustible, denominados bodegas. Las bodegas se encuentran repartidas de forma tal que las tres de un flanco sirven al motor y/o generador del lado correspondiente. Las bodegas se denominan, de proa a popa: bodega 1, bodega 2 y bodega 3, adjuntando a la clasificación la palabra estribor o babor, dependiendo de la ubicación del tanque, tal y como se muestra en la figura (1).

Para este remolcador en particular, las bodegas 1 tienen una capacidad máxima de 8.797 galones de combustible cada una, las bodegas 2 tienen una capacidad máxima de 3.831 galones cada una, y las bodegas 3 una capacidad máxima de 4.195 cada una.

El método anterior se basaba en la medida de los niveles de combustible por medio de una varilla aforada (no se disponía de ningún tipo de sensor) a través de un punto de sondeo, y con el valor encontrado de altura se determinaba el volumen mediante una tabla de equivalencias, la cual maneja el nivel en milímetros y el volumen en galones. Un detalle del procedimiento se muestra en la figura (2).

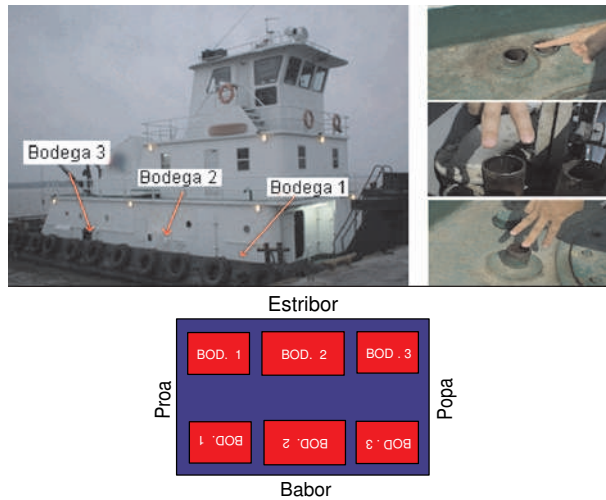


Figura 1: Ubicación e identificación de las bodegas de combustible del remolcador



Figura 2: Método de medición anterior, de la cantidad de combustible en los tanques

De la operación normal de la embarcación, las bodegas que normalmente se usan para consumo de la maquinaria son las etiquetadas con el número 2 (bodegas denominadas como **tanques de diario**), mientras que los tanques restantes se mantienen como bodegas de reserva de combustible. Cuando se requiere, se realizan traslados de combustible hacia los tanques de diario. Este procedimiento se denomina **trasiego**.

El problema principal que se presenta, con este tipo de método de medición, consiste en una diferencia muy grande ($>20\%$) entre el combustible entregado por el distribuidor y lo que los operarios de la embarcación estimaban que había sido cargado en los tanques. Adicionalmente, durante los viajes, se veía que los galones que inicialmente faltaban al momento del tanqueo, iban “apareciendo” gradualmente.

Desarrollando un análisis de las posibles causas de error, se logró determinar que los puntos de sondeo (por donde se introducía la varilla aforada) tienen una posición inconveniente, como se puede observar en la figura (3), ya que la medida de nivel se ve afectada por inclinaciones tipo proa–popa y estribor–babor, debido a que el medio en el que se encuentra apoyado el remolcador es el agua; por la distribución no uniforme del combustible dentro de las diferentes bodegas y por la disposición de otros compartimientos que modifican su peso a razón del aumento o disminución del volumen, como es el caso del tanque séptico y tanque de agua potable, los cuales están ubicados en la parte frontal de la embarcación.

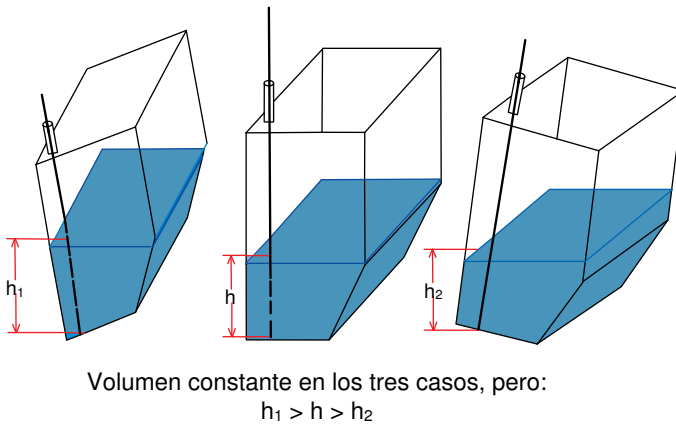


Figura 3: Muestra de la ubicación de los puntos de sondeo

En la figura (4) se observa la inclinación proa–popa. Nótese cómo, aunque sólo se consuma combustible del tanque 1, por ejemplo, la medida del tanque 3 variará.

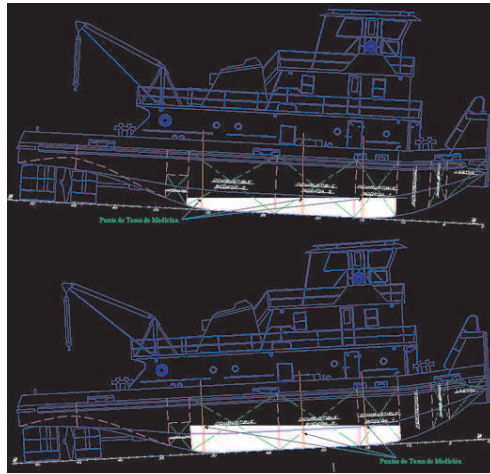


Figura 4: Perturbación en la medida debida a la inclinación proa–popa

3 Búsqueda de un método alternativo: conceptos teóricos

Desde el punto de vista tecnológico, el problema a solucionar es la obtención del nivel de combustible por medio de un(os) transductor(es) que determi-ne(n) la altura del líquido dentro del tanque, y con esto se calcule el volumen contenido dentro del mismo, pero que minimice los efectos de inclinación.

Desarrollando una investigación de los distintos tipos de sensores y su costo, y conociendo que para la empresa el prototipo se considera exitoso si la diferencia entre el combustible entregado y lo que los operarios de la embarcación determinan que ha sido recibido es menor o igual al 10 %, se plantea la posibilidad de solucionar este problema con el uso de un único sensor de presión, el cual, con el valor de señal entregado y la densidad del combustible, permita determinar la altura. Un transductor de presión es el más adecuado para remolcadores, pues con este tipo de sensado se pueden obviar pequeños oleajes o rizos dentro del tanque, los cuales son comunes en este tipo de máquinas de potencia, las cuales vibran continuamente en operación normal [1].

El sensor de presión seleccionado fue un transductor de la serie PXMS de la compañía Murphy [1]. En la figura (5) se muestra un detalle.



Figura 5: Sensor de presión de la serie PXMS de Murphy

Este tipo de sensores produce una salida analógica de corriente, directamente proporcional a la presión ejercida por la columna de líquido dentro del tanque. La selección de este transductor se debe a la trayectoria de dicha compañía en el desarrollo de instrumentos cuyo ambiente de trabajo está relacionado con maquinaria.

Para la selección del transductor fue necesario especificar el rango de presión. En el caso del remolcador, se conoce que es la embarcación cuyos tanques de combustibles presentan mayor altura de columna (3,2 m); con la densidad del ACPM ($854,98 \text{ Kg/m}^3$) se determinó que, para cualquier embarcación de la empresa con un sensor de 5 PSI máximo, se logra un rango adecuado para las medidas de nivel de combustible.

Finalmente, es posible continuar con el uso de la tabla de equivalencias de nivel en milímetros *versus* volumen en galones, siempre y cuando éstas sean verificadas y ajustadas en caso de ser necesario.

El concepto matemático que indica que esta alternativa es factible, se basa en tomar la forma real del tanque y rebanar el sólido equivalente en tajadas de espesor infinitesimal, de modo que puedan considerarse planos [2], y de esta forma tomar la medida de presión de la columna de combustible en la recta que intersecte los centroides correspondientes a dichas áreas infinitesimales [3], de forma tal que se elimine la dependencia de la medida de nivel de ángulos de inclinación, como se muestra en la figura (6).

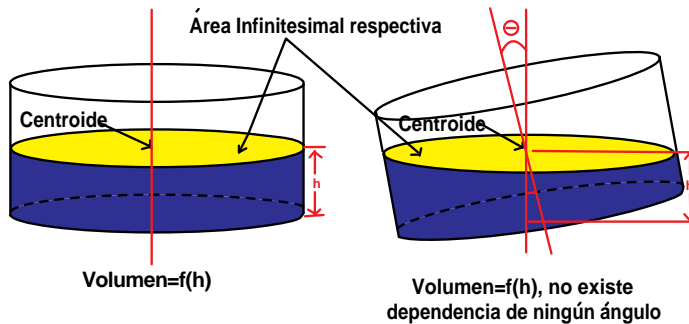


Figura 6: Eliminación de la dependencia del ángulo en el cálculo del volumen, por medio de los centroides de áreas infinitesimales

Si el tanque es un cilindro como el de la figura (6), la intersección de los centroides es una línea recta y si el área infinitesimal es un polígono regular, se puede decir que el centroide de cada área se ubica en su centro, y el error en la medida sería 0 %.

En el caso del remolcador seleccionado, la forma de los tanques del remolcador sigue el contorno del casco de la embarcación. Por lo tanto, los tanques no tienen forma de prisma recto, pero su base sigue siendo un polígono regular. La forma típica de los tanques es similar al de una cuña, como puede observarse en la figura (3). Para este tipo de forma, la línea que intersectaría los centroides sería una línea quebrada (ver figura 7), lo cual indica que cualquier intento de instalación de un sensor para medir la columna de líquido necesariamente va a incluir errores en la medida. Por lo tanto, bajo el escenario planteado de uso de un solo sensor, se necesita basarse en un esquema que, si bien no elimine el error por inclinación, sí permita que éste sea minimizado y se logre cumplir con el objetivo impuesto de una tolerancia en la determinación del volumen menor o igual al 10 %.

Como el sensor de presión mide la columna de combustible, y ésta es recta, se requiere entonces determinar aquella que reduzca al mínimo la dispersión con respecto a la recta quebrada que intersecta los centroides de las áreas infinitesimales en las que ha sido dividido el volumen [4, 5]. Estadísticamente, si las ubicaciones de los centroides se clasifican de forma que correspondan a muestras de una distribución gaussiana, entonces una línea recta que se acerque a la media de esta distribución producirá el error más bajo con respecto a la línea quebrada, si se compara con la selección al azar de cualquier otra

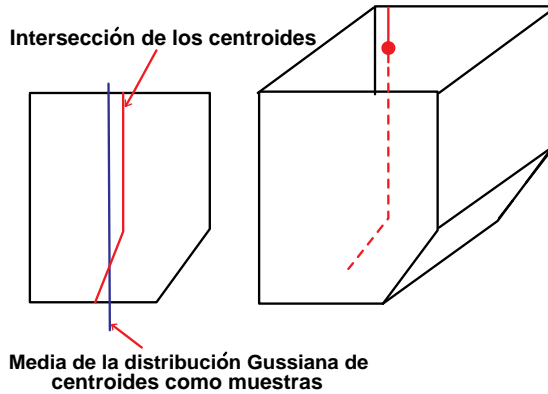


Figura 7: Modelo de ubicación de un sensor para medir la altura de combustible minimizando los efectos por inclinación

recta. Por lo tanto, la ubicación que se dé al sensor, debe ser aquella en la que la columna de combustible concuerde con la recta que se determine como valor medio de la distribución [6].

4 Descripción del desarrollo del método alternativo

Determinada la recta que corresponde con la media de la distribución, el siguiente paso es establecer si las tablas de equivalencias que usan los operarios pueden seguir utilizándose, es decir, que ellas no introduzcan errores en la determinación del volumen.

Para esta comprobación se desarrolló un estudio de la construcción de las tablas usadas hasta el momento, mediante la gráfica de la función de las equivalencias. Dicho análisis se inició con el tanque 1.

Como se trata del tanque más grande utilizado con fines de reserva, la tabla que debería tener medidas desde 0 mm hasta 3.200 mm, que es el máximo nivel, sólo cuenta con equivalencias hasta 2.500 mm, de acuerdo con la información entregada por la empresa. Los resultados obtenidos son los mostrados en la tabla (1) y la figura (8).

Tabla 1: Equivalencias mm-gls para el tanque 1

Altura (mm)	Galones tabla
10	22
100	219
500	1153
700	1655
1000	2451
1200	3007
1700	4400
2000	5236
2200	5793
2500	6629
2800	N.A.
2950	N.A.
3000	N.A.
3100	N.A.
3190	N.A.

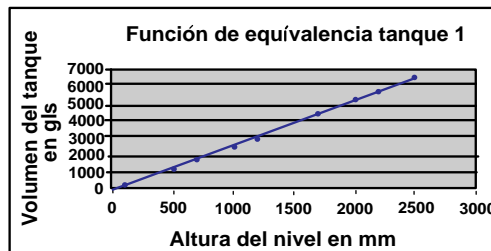


Figura 8: Función de equivalencia mm-gls para el tanque 1

Como puede observarse, la función arrojó una línea recta. De acuerdo con la forma de “cuña” del tanque, se concluye que este comportamiento no es posible, sobre todo a valores bajos de nivel de combustible. Para los tanques 2 y 3 se observó el mismo comportamiento que en el tanque 1, por lo que se concluye que es necesario el desarrollo de nuevas funciones de equivalencia entre nivel y volumen. Para el desarrollo de las fórmulas matemáticas correspondientes se toman las dimensiones de los tanques. Estas medidas se extraen de los planos del remolcador.

4.1 Cálculo del volumen del tanque 2

El desarrollo de cálculos matemáticos se inicia con la determinación del volumen del tanque 2, el cual es el más regular de todos. Las vistas del tanque se muestran en la figura (9).

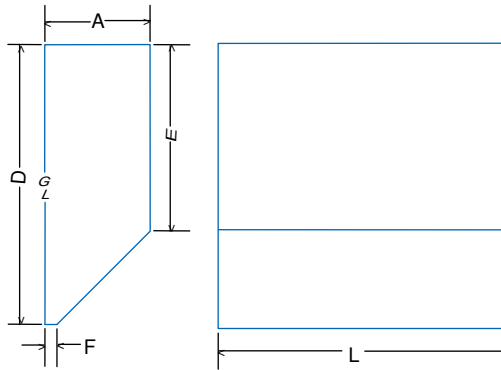


Figura 9: Vistas del tanque 2

Las medidas correspondientes se observan en la tabla (2).

Tabla 2: Dimensiones para el cálculo de la función de volumen para el tanque 2

	A	D	E	F	L
En mm	1209,6	3200,4	2133,6	152,4	4419,6

Debido a la regularidad del tanque visto desde arriba, se define que el volumen puede obtenerse hallando el área de la vista con forma de “cuña” y luego multiplicando por 4.419,6 mm (L) [3]. El volumen resultante se obtiene en mm^3 , por lo que el producto debe ser convertido a galones, que es la unidad que se utiliza por convención.

La construcción geométrica para el cálculo del área es la que se muestra en la figura (10).

Dada la forma de “cuña”, se tienen dos casos:

1. La altura del líquido es menor o igual que la coordenada y del punto

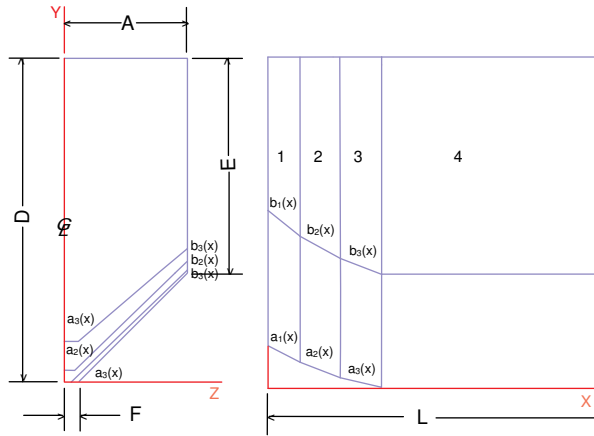


Figura 10: Construcción geométrica de la vista transversal del tanque 2

$(Y, Z) = ((D - E), A)$. En este caso, el área es igual a la región encerrada entre las funciones $Z = ((A - F)/(D - E)) * Y + F$ y $Z = 0$. Se desarrolla entonces una integración desde $Y = 0$ hasta $Y = h$.

- La altura del líquido es mayor que la coordenada y del punto $(Y, Z) = ((D - E), A)$. En este caso, el área es igual a la resta de las regiones: el total del área encerrada por las funciones $Z = ((A - F)/(D - E)) * Y + F$ y $Z = 0$, menos el total del área encerrada por las funciones $Z = ((A - F)/(D - E)) * Y + F$ y $Z = A$. Se desarrolla entonces una integración desde $Y = 0$ hasta $Y = h$. El límite superior de integración es $Y = D$.

Todas las unidades que se manejan para el cálculo del área son las consignadas en la tabla (1). El área calculada por integración se multiplica después por 4.419,6 mm (L) y el resultado se convierte a galones, lo cual se desarrolla dividiendo por 1×10^6 y luego entre 3,78541184.

Resta del volumen ocupado por estructuras internas

El volumen determinado por medio del método anterior, produce el volumen total de una cavidad sin ningún tipo de cuerpo o sólido dentro del tanque, lo cual no se cumple para el caso de los tanques del remolcador. Se debe

recordar que el tanque sigue el contorno de la embarcación y, debido a las técnicas de construcción de embarcaciones, el casco necesita de una serie de refuerzos estructurales que ocupan volumen dentro de la cavidad del tanque, los cuales deben ser sustraídos del valor que arroja la función de volumen hallada previamente.

Dentro de los refuerzos estructurales de una embarcación, se tienen:

- Baos: perfiles de acero que, puestos de un costado a otro del remolcador, sirven de consolidación y sostén de las cubiertas.
- Varengas: perfiles de acero que se colocan atravesadas sobre el fondo del remolcador para formar la cuaderna o sección del remolcador, visto de proa a popa.
- L's: perfiles de acero ubicados desde baos hasta varengas, que refuerzan la estructura del remolcador.
- Cartelas: estructuras de acero de forma triangular, que sirven de refuerzos en esquinas formadas por L-L, L-Bao, L-Varenga.

Utilizando los planos de los tanques de combustible, y de acuerdo con lo interpretado, se calculó el volumen total de las estructuras internas correspondientes a Baos, Varengas, L's y Cartelas dentro del tanque 2. Cuando el tanque se encuentra totalmente lleno, es decir, cuando la altura es igual a 3.200,4 mm, el volumen total por estructuras internas es igual a 29,5701 galones.

El tanque completamente lleno sin estructuras tiene un volumen total de 3.861,4 galones, por lo que, dada la relación, se toma el siguiente enfoque para el cálculo del volumen neto de combustible del tanque 2: se toma el volumen total de las estructuras internas y se construye un cilindro con altura de 3.200,4 mm y se determina el radio del mismo de forma que el volumen total sea 29,5701 galones. El radio hallado se mantiene constante y para cualquier valor de h se tendrá un valor aproximado del volumen ocupado por las estructuras. Este volumen se resta al volumen bruto hallado por medio de integración. Este proceso se usa para facilitar la determinación de la cantidad de volumen a restar. Ver figura (11).

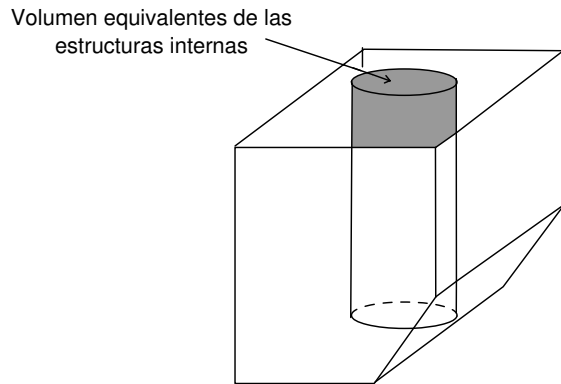


Figura 11: Escenario de trabajo para determinar el volumen de líquido dentro del tanque

4.2 Cálculo de volumen del tanque 3

El tanque 3 posee una forma similar a la del 2, sólo que en este caso la vista longitudinal varía debido a que uno de los extremos conforma la cavidad de las propelas. La figura (12) muestra el detalle.

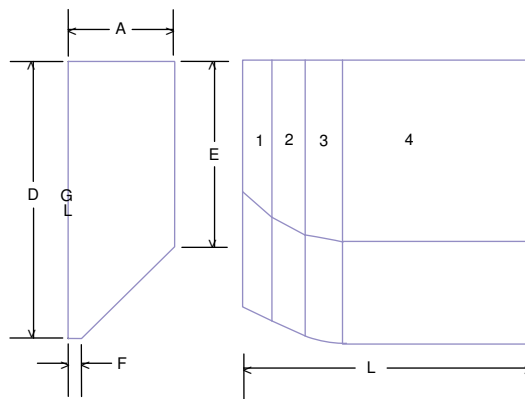


Figura 12: Vistas utilizadas en el tanque 3

Como puede observarse, por medio de la división por cuadernas se definen cuatro regiones. La región 4 es igual a un tanque 2 recortado. Las regiones

1 a 3 muestran pequeñas pendientes. La vista transversal sigue siendo una cuña; sin embargo, debido a que las pendientes superior e inferior de la vista longitudinal no son las mismas, la cuña se va haciendo menos inclinada a medida que se desarrolla un acercamiento al final de la embarcación.

El cálculo del volumen inicia nuevamente con la determinación del área de la región de la cuña, siguiendo un procedimiento similar al mostrado en la figura (10). La diferencia es que la recta inclinada no puede hallarse con facilidad, ya que su pendiente es variable a medida que se desarrolla un acercamiento a las propelas. De esta forma, se debe hallar una relación entre la pendiente de esta recta y la longitud del tanque. La figura (13) muestra las pendientes que deben ser halladas.

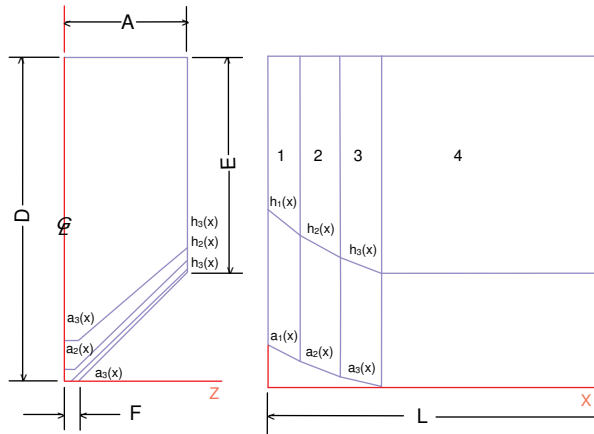


Figura 13: Pendientes para determinar límites de integración

Para el cálculo del volumen de la sección 4 se sigue un proceso idéntico al descrito para el tanque 2. Para el resto de secciones se sigue un procedimiento similar, sólo que las rectas inclinadas tendrán la forma $Z = m(X) * Y + OFFSET$. El término $m(X)$ será la pendiente correspondiente a los límites de cada zona, teniendo en cuenta los valores de $a(x)$ y $b(x)$ en cada sección.

Cabe resaltar que dependiendo del valor de h , un sector se puede hacer cero o, lo que es igual, no contribuir en el cálculo del volumen. Como ejemplo obsérvese la figura (14), en donde sólo los sectores 3 y 4 contribuirían en el volumen.

Comparación de las tablas iniciales con las tablas generadas por el método matemático

Una vez se ha determinado la función de cálculo de volumen, la construcción de tablas de equivalencia es directa si se consideran valores predeterminados de nivel, de esta forma es posible construir nuevas tablas de equivalencias para cada tanque.

En la figura (8) se observa que las antiguas tablas mostraban una relación lineal. En las tablas (3), (4) y (5) se desarrolla un análisis comparativo a partir del error entre las anteriores tablas y las nuevas, donde se puede observar un comportamiento esperado de la función en las tablas desarrolladas durante la ejecución del proyecto. Nótese el comportamiento esperado a valores bajos de nivel.

Tanque 1

Tabla 3: Comparativo de volumen calculado para el tanque 1

Altura (mm)	Galones tabla	Galones calculado	Error
10	22	6,51	238 %
100	219	131,21	67 %
500	1153	1075,3	7 %
700	1655	1592,5	4 %
1000	2451	2411,7	2 %
1200	3007	2984,9	1 %
1700	4400	4437,7	1 %
2000	5236	5309,5	1 %
2200	5793	5890,8	2 %
2500	6629	6762,6	2 %
2800	N.A.	7634,5	N.A.
2950	N.A.	8070,4	N.A.
3000	N.A.	8215,7	N.A.
3100	N.A.	8506,4	N.A.
3190	N.A.	8767,9	N.A.

Tanque 2

Tabla 4: Comparativo de volumen calculado para el tanque 2

Altura (mm)	Galones tabla	Galones calculado	Error
10	2	1,74	15 %
100	22	22,65	3 %
500	221	228,97	3 %
700	388	401,55	3 %
1000	724	747,21	3 %
1200	996	1025,2	3 %
1700	1683	1726,7	3 %
2000	2096	2147,6	2 %
2200	2371	2428,2	2 %
2500	2783	2849,1	2 %
2800	3196	3270	2 %
2950	3402	3480,5	2 %
3000	3471	3550,6	2 %
3100	3608	3690,9	2 %
3190	3732	3767,9	1 %

Tanque 3

Tabla 5: Comparativo de volumen calculado para el tanque 3

Altura (mm)	Galones tabla	Galones calculado	Error
10	2	1,11	80 %
100	25	18,31	37 %
500	246	232,96	6 %
700	431	417,77	3 %
1000	800	791,87	1 %
1200	1101	1096,6	0 %
1700	1867	1871,2	0 %
2000	2326	2335,9	0 %
2200	2633	2645,7	0 %
2500	3092	3110,5	1 %
2800	3552	3575,2	1 %
2950	3782	3807,6	1 %
3000	3858	3885	1 %
3100	4011	4039,9	1 %
3190	4149	4179,3	1 %

Obsérvese el hecho de que el error más grande se presenta en el tanque 1, debido a dos factores: el primero es la capacidad más grande de éste con respecto a los otros y el segundo se debe a su irregularidad con respecto al 2. Este último punto se ve reflejado en la comparación de los tanques 2 y 3 que, si bien tienen capacidad similar, el 3 muestra mayor error debido a que es más irregular que el 2.

5 Resultados y conclusiones

La instalación del sensor de presión se desarrolló de forma exterior al tanque y sólo se permite que, a través de una válvula, llegue líquido a la zona de prueba del transductor, como se observa en la figura (15).

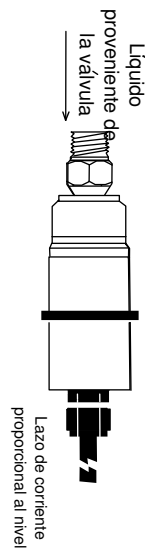


Figura 15: Acoplamiento del sensor al tanque de combustible

Como el proyecto involucra un circuito de adquisición, y éste monitorea una señal de voltaje, se necesita conectar una resistencia de carga para desarrollar el monitoreo de una señal del voltaje ya que, como se mencionó previamente, este tipo de sensores produce una salida analógica de corriente directamente proporcional a la presión ejercida. Dicha resistencia de carga se

determina de acuerdo con la recta de la figura (16) que es proporcionada por el fabricante del transductor.

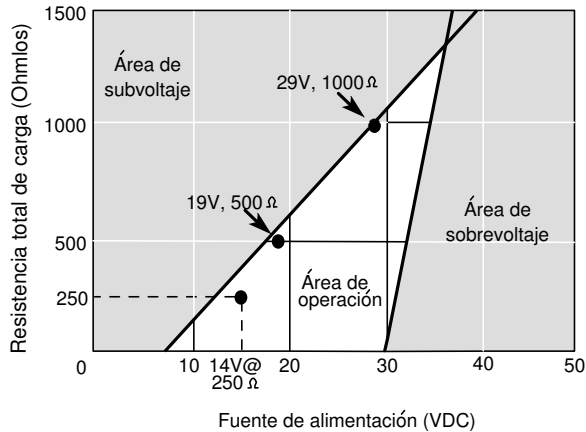


Figura 16: Recta de carga para determinar la resistencia (modificada de Murphy Inc.)

Dado que los sensores de presión se alimentan con una fuente de voltaje de 12VDC, se seleccionó una resistencia de 220Ω . El voltaje producido es conectado a un amplificador de instrumentación con el objetivo de no variar la resistencia del lazo, ya que el circuito se conecta en paralelo.

Para iniciar el proceso de verificación del nuevo método, los datos de la tabla (6) muestran los cambios encontrados con el cálculo del volumen por medio de la función de equivalencias, pero desarrollando la medida del nivel con la varilla aforada y por los puntos de sondeo convencionales, por lo tanto, en esta primera prueba se tiene el problema de la inclinación.

La segunda prueba consistió en la obtención del nivel a partir de un sensor de presión, instalado en uno de los tanques 2 de la embarcación. Se realizó un tanqueo y, por medio de la varilla aforada, se halló un nivel de 318,5 cm. El sensor de presión disponible posee una señal de salida de 0,5V a 5,5V, que corresponde a un rango de presión de 0 a 5 PSI. Por condiciones de instalación física del transductor, éste se encuentra a una altura de 27 cm con respecto al fondo del tanque. La señal de salida del sensor con el tanque 2 lleno, fue igual a 4,06V.

Tabla 6: Resultados de la primera prueba
Sistema anterior de medición

Medidas iniciales

Bodegas babor			Bodegas estribor		
	cms	gls		cms	gls
1	7.5	164	1	8	175
2	164	1601	2	188	1931
3	16	45	3	0	0
1810			2106		

Total 3916 gls

Tanqueo según marcador EDS. CODIS 23.000 gls

Medidas de aforo final

Bodegas babor			Bodegas estribor		
	cms	gls		cms	gls
1	296	7911	1	297	7952
2	315	3677	2	316	3694
3	147	1515	3	120	1104
13103			12750		

Total 25853 gls, según aforo A/B

Med. final - med. inic. = recibido por aforo => 25853 - 3916 = 21937

Recib. por aforo - recib. por CODIS = faltante por aforo => 21937 - 23000 = -1063, (4,62 %)

Método matemático

Medidas iniciales

Bodegas babor			Bodegas estribor		
	cms	gls		cms	gls
1	7,5	85	1	8	94
2	164	1643	2	188	1979
3	16	37	3	0	0
1765			2073		

Total 3838 gls

Tanqueo según marcador EDS. CODIS 23000 gls

Medidades finales

Bodegas babor			Bodegas estribor		
	cms	gls		cms	gls
1	296	8100	1	297	8129
2	315	3761	2	316	3775
3	147	1515	3	102	1097
13376			13001		

Total 26377 gls, según Aforo A/B

Med. final - med. inic. = recibido por aforo => 26377 - 3838 = 22539

Recib. por aforo - recib. por CODIS = faltante por aforo => 22539 - 23000 = -461 (2,00 %)

En la tabla (7) se presentan los cálculos necesarios para determinar el volumen contenido en el tanque 2 en esta situación.

Tabla 7: Determinación del volumen del tanque con base en la lectura del sensor de presión

Lectura del sensor	4,06	voltios
Medida de presión	3,56	PSI
Conversión unidades	24545,33596	Pa
Densidad ACPM	854,98	Kg/m ³
Nivel de combustible	3199,455799	mm
Redondeo nivel	3199	mm
Combustible tanque 2	3817	gls

Es de resaltar que el método propuesto permite disminuir las diferencias entre los aforos y las mediciones, en más del 2,62 % con respecto al método anterior, tal como se infiere de la figura (16). Esto se refleja en más de 600 galones por aforo para la embarcación piloto de la instalación del sistema. Dado que el consumo de combustible mensual es aproximadamente de 40.000 galones, esto representa un ahorro en la operación de 1.048 galones/mes, equivalente a \$3'144.000/mes (ó \$37'728.000/año, galón de ACPM a \$3.000). Como se puede apreciar, es debido al gran volumen que se consume como se obtiene una economía con el nuevo proceso, más que en términos porcentuales, donde la diferencia aparenta ser pequeña.

De las pruebas realizadas, se observa que existe una mejora en el cálculo del volumen de combustible debido a la parametrización que se hizo de los tanques y al consiguiente modelo propuesto; todo ello a pesar de que se desarrollaron medidas con la varilla aforada y en los puntos de sondeo convencionales, los cuales, como se mostró, presentan inconvenientes por concepto de inclinación. En este aspecto vale la pena anotar que la calidad de la evaluación del nivel de combustible se podría mejorar instalando más de un sensor por tanque. De hecho, con este principio se podrían evaluar las inclinaciones popa-proa y babor-estribor. De igual manera, existen sensores que permiten 3 grados de libertad en la medida. Sin embargo, el diseño aquí presentado se centró en encontrar el punto del tanque insensible a dichas inclinaciones, obviando la necesidad de instalar más de un sensor por tanque. Se presenta ésta como una solución elegante que se refleja en disminución de los costos de instalación,

dado que el remolcador cuenta con 6 tanques y se espera instalar la solución en al menos 10 remolcadores más del mismo tipo.

Referencias

- [1] FW Murphy. Instrumentation & Control Solutions. Pressure Transmitters and Pressure, <http://www.fwmurphy.com/>, 2001.
- [2] Tom M. Apostol. Calculus. Vol I. Bogotá: Reverté, 2 ed., 137–140 (1988).
- [3] Louis Leithold. El Cálculo con Geometría Analítica. México: Harla, 6 ed., 488–547 (1992).
- [4] William Mendenhall et al. Estadística Matemática con Aplicaciones. México: Grupo Editorial de Iberoamérica de C.V., 2 ed., 313–398 (1994).
- [5] Francisco J. Cortijo. La función de densidad de probabilidad normal, http://www-etsi2.ugr.es/depar/ccia/rf/www/tema2_0001_www/node3.html#SECTION00032100000000000000, 2000.
- [6] J. C. Azzimonti. Teoría de la inferencia estadística. Universidad Nacional de Misiones: Misiones, Argentina, <http://www.bioestadistica.com.ar>, 2000