

Diseño y construcción de un robot acuático para la recolección de hidrocarburos en el agua

Design and Construction of a Water Robot for Collecting Hydrocarbon in the Water

JAIRO ORLANDO MONTOYA GÓMEZ*

JOSÉ LUIS RUBIANO FERNÁNDEZ**

HUGO FERNANDO ANGARITA***

MAURICIO PIRAQUIVE****

RESUMEN

El presente artículo muestra una alternativa de recolección por medio de un robot recolector y almacenador de petróleo. Primero se realiza el diseño de un sistema de almacenamiento, el cual sirve, a su vez, de soporte a los demás subsistemas componentes del robot; se sigue con el análisis de flotabilidad y de empuje con el propósito de garantizar la plena operabilidad del robot en forma segura. Posteriormente, se hace el diseño del sistema de recolección de hidrocarburos; luego, se realiza el diseño del sistema electrónico con el cual se controla la operación del sistema de recolección y el desplazamiento del robot en el agua. Finalmente, se construye el robot para evaluar la eficiencia de recolección, cuya capacidad es de 50 l.

Palabras clave: robot acuático, petróleo, material lipofílico, limpieza acuática, diseño.

ABSTRACT

The present article shows a hydrocarbon collection alternative through an oil collection and storage robot. First, the article shows the design of a storage system, which is also used as support for other sub-systems that make up the robot. Secondly, it describes the floating and thrust analysis in order to guarantee the full and safe operation of the robot. Then, the article shows the design of the hydrocarbon collection and electronic systems that control the operation of the collection system and the movement of the robot in the water. Finally, the robot is built to assess its collection efficiency, the capacity of which is fifty liters.

Keywords: Water robot, oil, lipophilic material, water cleaning, design.

FECHA DE RECEPCIÓN: 2 DE MAYO DEL 2012 • FECHA DE APROBACIÓN: 28 DE SEPTIEMBRE DEL 2012

*Ingeniero Electromecánico, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Duitama). MSc en Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes (Bogotá). Profesor del programa de Ingeniería en Automatización, Universidad de La Salle. Correo electrónico: jamontoya@unisalle.edu.co

**Ingeniero Mecánico, Universidad de los Andes. MSc en Materiales y Procesos de Manufactura, Universidad Nacional de Colombia (Bogotá). Correo electrónico: jorubiano@unisalle.edu.co

***Ingeniero de Diseño y Automatización Electrónica, Universidad de La Salle (Bogotá). Correo electrónico: fernando4406@gmail.com

****Ingeniero de Diseño y Automatización Electrónica, Universidad de La Salle (Bogotá). Correo electrónico: mpm8808@gmail.com

Introducción

En las zonas donde se realiza explotación petrolera o por donde se transporta el petróleo por vía acuática existe el riesgo que se presenten derrames de este fluido y se genere contaminación ambiental. Existen diversos métodos para recoger o eliminar este combustible.

En el mundo se tienen registros de diversos derrames de hidrocarburos, los cuales por lo general ocurren en el mar a causa de accidentes o fugas de las plataformas petroleras y por accidentes de los barcos cisterna; también se pueden hallar en humedales y ríos, causados por fábricas o por algunas personas que arrojan desechos. Según Galán (2010), el derrame de hidrocarburos en los océanos y mares es uno de los más graves desastres sobre el ecosistema, pues afecta gran cantidad de especies.

Una mancha de hidrocarburo o aceite se amplía en la superficie cada vez más hasta formar una capa muy extensa y de un espesor muy delgado. Según Jiménez (2006), un metro cúbico de hidrocarburo en un lapso de una hora y media se expande en un radio de 50 m con un espesor de 3 mm.

Según Vista al Mar (2011) existen métodos de limpieza como: quema, químicos superficiales, elementos absorbentes, limpieza manual y recolección desde embarcaciones. Sin embargo, la mayoría causa efectos secundarios sobre el medio ambiente.

Con el fin de dar solución a este tipo de problemática, se han desarrollado algunos diseños de prototipos de robots acuáticos (Bohórquez y Cristancho, 2010), controlados de manera remota y otros con la capacidad de recoger materiales sólidos flotantes (Montoya, 2012).

Diseño mecánico del robot

El robot se puede dividir en tres subsistemas principales: sistema de almacenamiento, sistema de recolección y estructura flotante; a su vez estos cuentan con mecanismos que los conforman entre los que están: tanque, material lipofílico, ejes, rodillos, actuadores y sistema de transmisión.

Sistema de almacenamiento

Consiste en un tanque, construido en acrílico, para almacenar 50l de hidrocarburo, cuyo fondo es en forma de V (figura 1), para brindarle mayor estabilidad al sistema porque con esto el centro de masa del tanque se mantiene en la mitad de este.

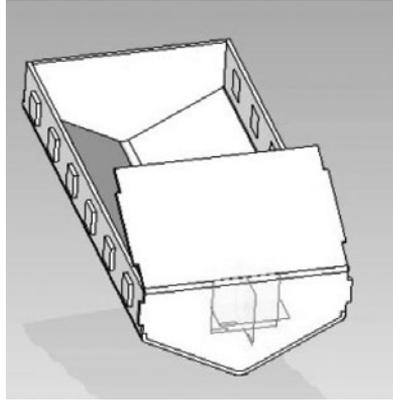


Figura 1. Tanque de almacenamiento del hidrocarburo

Fuente: elaboración propia.

Dimensionamiento del tanque. La forma seleccionada del tanque se puede observar en la figura 2. Según Sears (2004), para determinar las medidas de este tanque, se puede emplear la ecuación 1. La cual permite encontrar de forma armónica las diferentes magnitudes del tanque de acuerdo al volumen deseado.

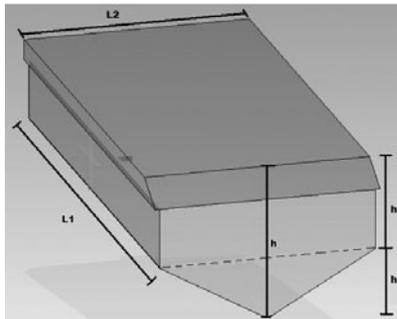


Figura 2. Dimensionamiento del tanque

Fuente: elaboración propia.

$$V_2 = \frac{L2 * h2 * L1}{2} \quad (1)$$

Donde:

$L1 = 778$ mm para obtener una mejor estabilidad del robot sin que el peso se centre en algún extremo.

$L2 = 370$ mm porque es la medida del ancho de la banda.

$h2 = 100$ mm por su forma en "V" con una inclinación de 30°

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación 1, se obtiene:

$$V_2 = 14393000 \text{ mm}^3$$

Luego sabiendo que el volumen requerido es 50 l. Se halla la altura necesaria según la ecuación 2.

$$h1 = \frac{V1}{L1 * L2} \quad (2)$$

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación 2, se calcula la altura requerida en el tanque de almacenamiento, la cual corresponde a:

$$h1 = 123,7 \text{ mm}$$

Sistema de recolección

Es una banda construida en material lipofílico, apoyado entre dos rodillos, donde el eje de uno de los rodillos está más bajo que el otro para facilitar el escurrimiento del material extraído del agua por material absorbente.

Material absorbente: el material empleado para separar el hidrocarburo del agua es conocido como material lipofílico (figura 3). De acuerdo con New Pig International, este material absorbe hidrocarburos y repele el agua de forma eficiente. Ahora, con el propósito de determinar su velocidad de absorción se realizan ensayos de capacidad de almacenamiento en función del tiempo.



Figura 3. Material lipofílico

Fuente: elaboración propia.

La prueba para calcular la capacidad de absorción del material lipofílico, consistió en tomar 10 cm de material y 0,24 l de hidrocarburo. Las pruebas consistieron en medir la cantidad de hidrocarburo que absorbió el material cada 5 min, se utilizó aceite vehicular y gasolina, por separado. Los resultados que se obtuvieron se observan en la tabla 1.

Tabla 1. Capacidad de absorción de hidrocarburo

TIEMPO (MINUTOS)	ACEITE VEHICULAR (LITROS)	GASOLINA (LITROS)
0	0	0
5	0,036	0,07
10	0,058	0,12
15	0,08	0,16
20	0,1	0,19
25	0,13	0,21
30	0,18	0,24
35	0,21	0,24
40	0,24	0,24

Fuente: elaboración propia.

Para hallar el peso total del material limpio, de acuerdo a la distancia entre ejes de los rodillos, se requiere una longitud de material absorbente de 150 cm, cuya masa es de 600 g. Esta longitud de material al absorber su capacidad máxima de aceite, va a tener una masa de 2100 g, y al absorber gasolina, tiene una masa de 1725 g.

Como la banda transportadora consta de cuatro hileras de material lipofílico, su masa, una vez absorbe el hidrocarburo, es de 8400 g con aceite y de 6900 g con

gasolina, absorbiéndose 5,4 l y 7,2 l respectivamente, cada 15 min. Por tanto en 3h recoge 64,8 l de aceite y 86,4 l de gasolina. Este análisis supone que la integridad del material lipofílico se encuentra permanentemente con hidrocarburo absorbido; sin embargo, la mitad de este material se encuentra recogiendo hidrocarburo, se exprime, y la otra mitad queda libre de hidrocarburos, por lo que en el prototipo solo se utiliza la mitad del material para recoger hidrocarburos. Con lo cual la capacidad de recolección de la banda de material lipofílico, es decir 32,4 l de aceite y 43,2 de gasolina.

El ancho del sistema de recolección, para las cuatro hileras de material lipofílico, es de 370 mm, tal como se puede observar en la figura 4. La estructura central de la banda se construye en acrílico industrial de alto impacto, por sus propiedades de dureza y facilidad de formado.

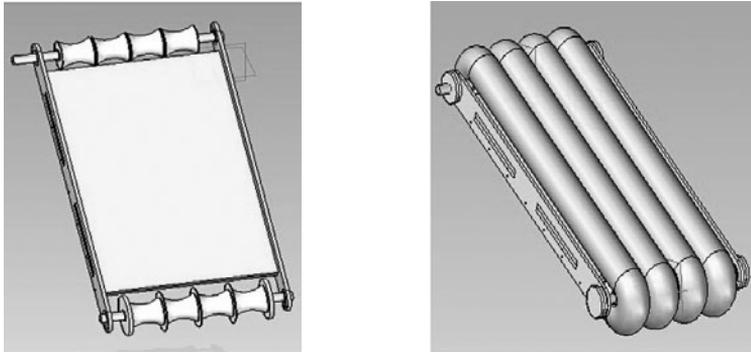


Figura 4. Mecanismo de extracción

Fuente: elaboración propia.

Según Mott (2006), el torque requerido para desplazar la banda, se calcula aplicando la ecuación 3. Considerando la condición más crítica, el material lipofílico lleno de aceite y la banda en posición vertical.

$$t_{requerido} = m * a * d * fs \quad (3)$$

Donde:

m = masa del material [8,4 kg].

a = aceleración de la gravedad [9,8 m/s²].

d = radio del rodillo [0,04 m].

fs = Factor de seguridad [1,9].

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación 3, se obtiene:

$$t_{requerido} = 6,29 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Lo siguiente que se halla es la potencia que se requiere para mover el sistema, para esto se utiliza la ecuación 4.

$$P = T \cdot w \quad (4)$$

Donde:

T = torque requerido [6,29 N*m].

W = velocidad angular [2,5 rad/s].

P = potencia requerida.

Reemplazando en la ecuación 4, se obtiene:

$$P = 141,53 \text{ w}$$

Se emplea un motorreductor DC, con torque de 30 kg*cm, velocidad de rotación de 75 rpm y potencia de 150 w.

Para el cálculo de los ejes de los rodillos (figura 5), se aplican las normas ANSI, el material empleado es acero 1020, con longitud de 420 mm, diámetro de 20 mm, con factor de seguridad de 10,8.

Para la conexión del eje al sistema de transmisión, se emplean engranajes en nylon en una primera etapa y piñón, y cadena en la segunda etapa.

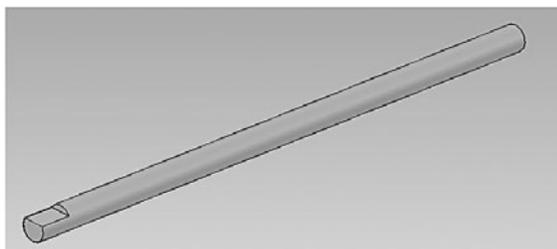


Figura 5. Eje

Fuente: elaboración propia.

Estructura flotante

Esta estructura contiene el sistema de almacenamiento, el sistema de recolección y el circuito electrónico (figura 6) y está elaborada en acrílico. Según Olivella (2001), para el cálculo de flotabilidad y estabilidad, se debe realizar un análisis en el punto más crítico de la estructura, bajo la condición más crítica, que en este caso es cuando el tanque está lleno de hidrocarburo.

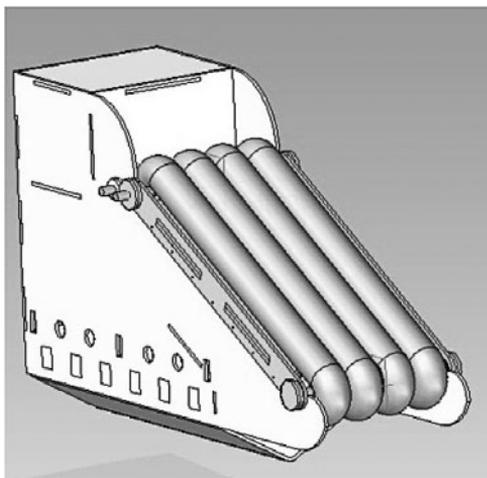


Figura 6. Estructura central

Fuente: elaboración propia.

Aplicando el principio de Arquímedes (ecuación 5), si la fuerza de empuje es mayor que el peso del cuerpo sumergido, el sistema puede flotar (Montoya, 2012).

Se debe tener en cuenta que el peso de la estructura debe considerar la carga máxima de hidrocarburo.

$$E > P \quad (5)$$

Donde:

E = fuerza de empuje [N].

P = peso del cuerpo sumergido [N].

La figura 7 muestra el diagrama de cuerpo libre para el robot, donde P corresponde al peso, y E, a la fuerza de empuje del fluido y cuya relación define si el robot puede flotar.

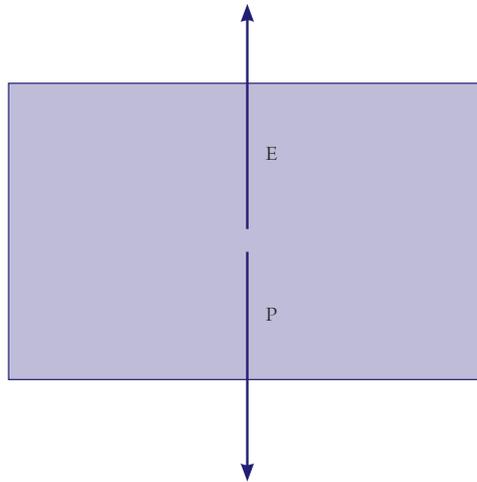


Figura 7. Diagrama de cuerpo libre

Fuente: elaboración propia.

En las ecuaciones 6 y 7 se muestran y definen los términos involucrados en el empuje y peso del cuerpo sumergido.

$$E = d_l * g * V_s \quad (6)$$

$$P = d_s * g * V_s \quad (7)$$

Donde:

d_L = densidad del agua [1000 kg/m^3].

g = aceleración de gravedad [$9,8 \text{ m/s}^2$].

V_s = volumen del cuerpo flotante [$0,13 \text{ m}^3$].

M = masa del robot [$96,8 \text{ kg}$].

d_s = densidad del robot [$744,6 \text{ kg/m}^3$].

Sustituyendo las ecuaciones 6 y 7 en la ecuación 5, se obtiene la ecuación 8:

$$d_i * g * V_s > d_s * g * V_s \quad (8)$$

Reemplazando los valores anteriores en la ecuación 8, se obtiene que:

$$1274 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 > 947 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$$

Esto comprueba que el robot flota; sin embargo, es necesario aclarar que este cálculo se realice con base en la densidad del agua dulce con la cual se realizan los ensayos. Si se emplea en agua salada, al tener mayor densidad, se puede contar con mayor flotabilidad.

En la figura 8 se muestra el centro de masa y la línea de flotabilidad. Como se puede observar, la línea amarilla corresponde a la línea de flotación; según la teoría de barcos, lo que se encuentra por debajo de esta línea correspondiente a la sección en contacto con el agua, se le llama "obra viva" y a la sección que se encuentra por arriba de esta línea se le denomina obra muerta. Como se ve, el centro de masa se encuentra sobre la obra viva lo que indica que el sistema tiene estabilidad.

Además de requerirse flotabilidad del sistema, es necesario instalar motores para dar propulsión al robot. Para este caso se emplean hélices conectadas a motores DC que giran a 1000 RPM.

Según Ingenieros Navales (2012), para la selección de las hélices, se debe tener en cuenta el tipo de hélices que se consiguen comercialmente, el número de palas

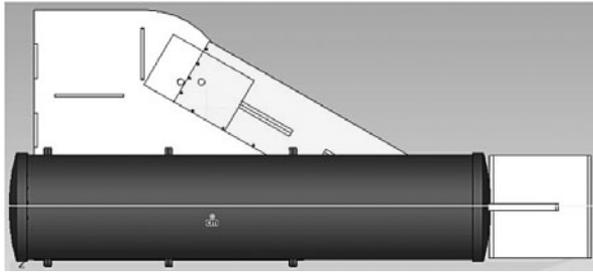


Figura 8. Centro de masa y línea de flotación del sistema

Fuente: elaboración propia.

o alerones, considerando que entre más palas se disminuye la vibración del barco y aumenta la velocidad de este pero disminuye su fuerza de empuje. Con base en lo anterior, se selecciona la siguiente hélice:

Angulo de la pala: 30°

Diámetro: 12 cm

Diámetro núcleo: 5,4 cm

Diámetro del eje: 6 mm

Número de aspas: 4

Sentido de giro: diestra

Para posicionar adecuadamente la hélice, bajo el casco del robot, se debe tener en cuenta que esta pueda realizar un movimiento libre sin tener contacto con el flotador, dejando un área libre para la circulación del agua utilizada para la propulsión (figura 9).

Las distancias requeridas son: $A = 30$ mm; $B = 18$ mm y $C = 24$ mm.

Diseño electrónico

Para la implementación del circuito electrónico se identifican tres factores: las señales, las cuales van a interactuar para el movimiento del robot; el sistema de control; y por último, los elementos de acople del sistema con los actuadores.

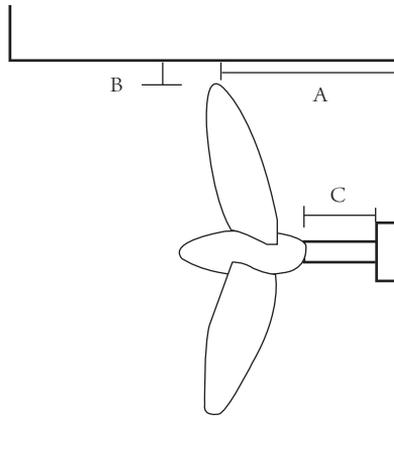


Figura 9. Posición de la Hélice

Fuente: ingenieros navales: Tecnología de las hélices.

Señales

Las señales que se manipulan en el sistema se dividen en dos tipos: señales de entrada, para dar la orden de movimiento del robot y el control de la banda; señales de salida, las cuales permiten activar a los actuadores.

Dentro de las señales de entrada se tienen: nivel del tanque, utilizando un sensor de nivel; direccionamiento, generadas manualmente desde un módulo de control remoto; encendido y apagado de la banda, por medio de un control remoto. Dentro de las señales de salida se tienen: señales para encendido y apagado de los motores de las hélices y de los timones; encendido y apagado del motor de la banda.

Se emplea para el control un microprocesador Pic 16f88, el cual se puede programar para ocho entradas y ocho salidas, dependiendo de las funciones a realizar. Se asignan los puertos de entrada del microprocesador Pic (RB0, RB1, RB2, RB3, RB4, RB5) y las salidas (RA0, RA1, RA2, RA3), los cuales van a servir para el accionamiento de los actuadores, la salida (RA4) encargada de dar el pulso para encender y apagar la banda.

La figura 10 muestra la conexión del microprocesador a los motores por medio de relevos, los cuales permiten separar el control de la parte de potencia, así como

hacer los cambios de giro de los motores de propulsión para controlar la trayectoria del prototipo; así como los voltajes en los actuadores (12 V), receptor del control remoto (8 V) y alimentación del microprocesador (5 V).

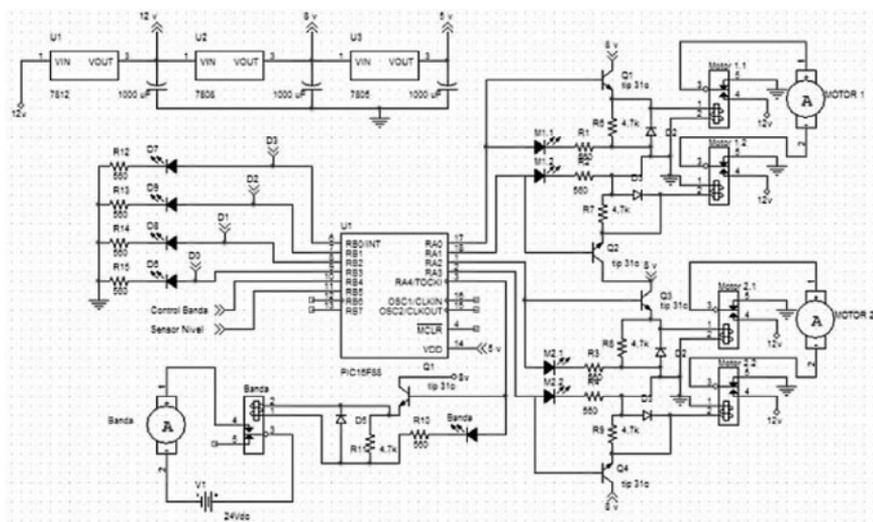


Figura 10. Circuito electrónico

Fuente: elaboración propia.

Resultados

Diseñados y construidos los diferentes elementos, se procede al ensamble. En la figura 11 se puede observar la banda de material lipofílico montada en la estructura flotante. Luego se instalan los flotadores y la pala para direccionar el hidrocarburo antes de su recolección (figura 12).

Prueba de flotación

Se ubicó el robot en el agua (figura 13), moviéndolo en diferentes direcciones con carga y sin carga, para determinar su flotabilidad. Se aplicó una carga hasta completar 80 kg, pasando la estructura satisfactoriamente la prueba.

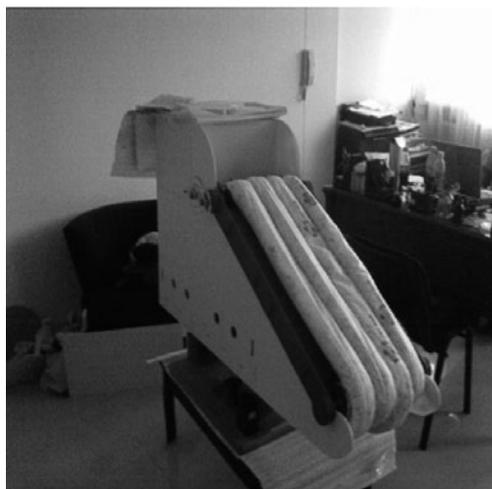


Figura 11. Ensamble de la banda con la estructura

Fuente: elaboración propia.



Figura 12. Ensamble de la estructura central con los flotadores

Fuente: elaboración propia.

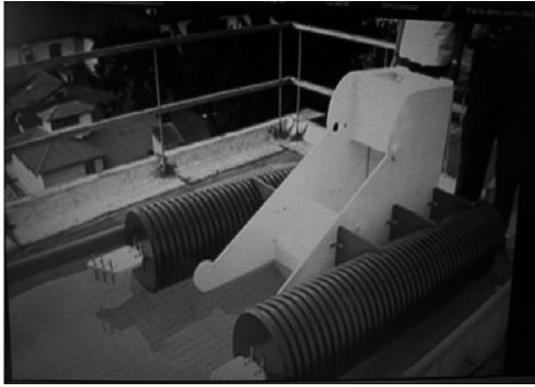


Figura 13. Prueba de flotación

Fuente: elaboración propia.

Prueba de hélice

Se encendieron una y dos hélices independientemente, para determinar su eficiencia de impulsión (figura 14).

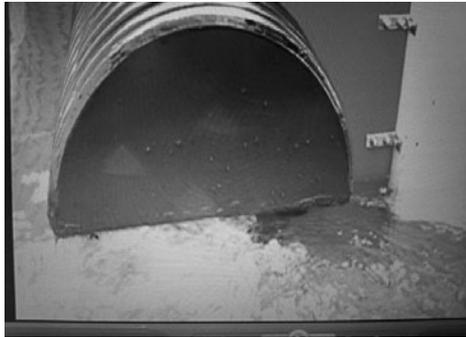


Figura 14. Prueba de las hélices

Fuente: elaboración propia.

Se realizan cinco ensayos para definir la velocidad lograda con estas hélices, desplazando el robot una distancia de 0,81 m y registrando los tiempos para cada ensayo. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Velocidad lineal del robot

ENSAYO	DISTANCIA (m)	TIEMPO (s)
1	0,81	3,4
2	0,81	3,0
3	0,81	3,6
4	0,81	3,3
5	0,81	3,4
Promedio	0,81	3,34

De acuerdo con los datos de la tabla 2, se calcula la velocidad lineal cuyo resultado es de 0,24 m/s (0,471 nudos) y que permite obtener una eficiencia en la recolección del 80 al 90 %.

Prueba de recolección

Esta consistió en esparcir medio galón de aceite en una piscina llena de agua y posteriormente poner en marcha el robot dejándolo en funcionamiento hasta que recogiera el aceite. Se repitió varias veces este procedimiento, con el propósito de conocer el comportamiento del material lipofílico a medida que recogía el hidrocarburo. La figura 15 muestra el material lipofílico recogiendo el aceite de la superficie del agua.



Figura 15. Sistema de recolección

Fuente: elaboración propia.

La tabla 3 muestra la eficiencia de recolección de aceite en función del tiempo de permanencia en contacto entre el robot y el hidrocarburo, empleando una muestra

de 1772 g (1/2 galón). Las pruebas realizadas permiten concluir que el material empleado va reduciendo la capacidad de absorción, lo cual se evidencia en la reducción de hidrocarburo recolectado con el tiempo.

Tabla 3. Prueba de recolección de aceite

	TIEMPO (s)	HIDROCARBURO RECOLECTADO (g)	PORCENTAJE
Dato de control	0	0	0
Prueba 1	580	1569	91
Prueba 2	580	1594	92
Prueba 3	580	1528	88
Prueba 4	580	1486	86

Conclusiones y recomendaciones

Debido a características de los agentes contaminantes, como evaporación, disolución, oxidación, emulsificación, sedimentación y biodegradación, estos empiezan a actuar después de un periodo que varía, y está determinado, principalmente, por los factores ambientales del ecosistema afectado. En consecuencia, el robot diseñado se acondicionó para realizar la limpieza del hidrocarburo tan pronto como se presente el derrame, antes de que estos agentes entren en acción y afecten el medio ambiente de forma irreversible.

El empleo de un microcontrolador permite controlar los sistemas de locomoción del robot, orientándolo y activando el sistema de recolección con un rango de control de 100 metros debido a la utilización de un sistema remoto de corto alcance.

La presentación del material lipofílico permite utilizarlo en forma de banda; así se recoge entre un 80 % y 90 % de hidrocarburo. Este material debe ser recambiado periódicamente debido a su saturación. La capacidad de absorción se redujo un 2 % cada 10 min.

Con las pruebas realizadas se observó que el prototipo cumple con todos los requisitos de funcionamiento, ya que con una velocidad lineal aproximada de 0,24 m/s, cuenta con una efectividad promedio del 90 % en la recolección de hidrocarburos, en un periodo de tiempo de 10 min.

Referencias

- Barrientos, A. (2007). *Fundamentos de robótica* (2ª. ed.). Madrid: McGraw-Hill.
- Bohórquez, A. y Cristancho de la Rosa, J. (2010). *Diseño y construcción de un bote a escala guiado con radiocontrol y GPS para recolección de muestras de agua en estanques y lagos* [tesis de ingeniería]. Bogotá: Universidad de La Salle. Colombia.
- Dehmlow, M. y Kiel, E. (1980). *Diseño mecánico*. México: Trillas.
- Dorf, R.; Dorf, C. y Svoboda, J. (2000). *Circuitos eléctricos: introducción al análisis y diseño* (3ª. ed.). Marcombo.
- Galán, P. (2010). *Contaminación petrolera*. Disponible en <http://www.ambiente-ecologico.com>.
- Ingenieros Navales. *Geometría de la hélice*. Disponible en <http://www.ingenierosnavales.com>
- Jiménez, D. (2006). *Estudio de un impacto ambiental generado por un derrame de hidrocarburos sobre la zona estuarina aledaña a la terminal de Ecopetrol en Tumaco*. Bogotá: Universidad de La Salle.
- Montoya, G. J.; Pérez C.; Garnica, E.; Salamanca, D. y Simanca, J. (2012). Diseño y construcción de un robot para limpieza acuática. *Épsilon* (17), 73-86.
- Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. México: Pearson.
- New Pig International. *Pig oil-only absorbent socks*. Disponible en <http://www.newpig.com>.
- Olivella, J. (2001). *Teoría del buque: flotabilidad y estabilidad* (3ª. ed.). Barcelona: Ediciones UPC.
- Sears, Y. y Zemansky, F. (2004). *Física universitaria* (11ª. ed.). México: Pearson.
- Valdés, F. y Pallás, R. (2007). *Microcontroladores: fundamentos y aplicaciones con PIC*. Marcombo.
- Vista al Mar (2011). *Doce maneras (imperfectas) de limpiar el petróleo del golfo*. Disponible en <http://www.vistaalmar.es>