

## ROBOT AUTONOMO LIMPIADOR DE PISCINAS<sup>1</sup>

Cristian Martín Meinl<sup>2</sup>; Cristian Wdowiak<sup>3</sup>; Leonardo Szmandiuk<sup>4</sup>; Sergio Pacheco<sup>5</sup>; Lucas Vignolles<sup>6</sup>; Cesar Baez<sup>7</sup>; Samanta Avalos<sup>8</sup>; Rubén Syniuk<sup>9</sup>

<sup>1</sup> Trabajo de Cátedra, Proyecto del Programa Universidad, Diseño y Desarrollo Productivo Convocatoria 2015, D9-UNAM2033

<sup>2</sup> Director de Proyecto, Ingeniero Electromecánico, [meinlcristian@fio.unam.edu.ar](mailto:meinlcristian@fio.unam.edu.ar)

<sup>3</sup> Integrante de Proyecto, Estudiante de Ingeniería Industrial, [cristian.w93@gmail.com](mailto:cristian.w93@gmail.com)

<sup>4</sup> Integrante de Proyecto, Estudiante de Ingeniería Electromecánica, [leonardoszmandiuk1.0@gmail.com](mailto:leonardoszmandiuk1.0@gmail.com)

<sup>5</sup> Integrante de Proyecto, Estudiante de Ingeniería Electrónica, [sergio.pache08@hotmail.com](mailto:sergio.pache08@hotmail.com)

<sup>6</sup> Integrante de Proyecto, Estudiante de Ingeniería Industrial, [lucasvignolles@hotmail.com](mailto:lucasvignolles@hotmail.com)

<sup>7</sup> Integrante de Proyecto, Estudiante de Ingeniería Electromecánica, [baezcesar4@gmail.com](mailto:baezcesar4@gmail.com)

<sup>8</sup> Integrante de Proyecto, Estudiante de Ingeniería Industrial, [samyrios5245@gmail.com](mailto:samyrios5245@gmail.com)

<sup>9</sup> Integrante de Proyecto, Estudiante de Ingeniería Electricista, [syniukro@gmail.com](mailto:syniukro@gmail.com)

### Resumen

Es un vehículo de inmersión, portátil y autónomo que cuenta con un mecanismo de succión y remoción de sedimentos adheridos al piso y pared. El desplazamiento se realiza con dos ruedas con tracción lateral independiente para soportar el giro y adherencia al piso, mas una libre para apoyo. Un cilindro rotativo horizontal, con una cobertura de escobillas tiene la finalidad de raspar el piso y las paredes para remover sedimentos. Estos son absorbidos por la boca de succión de una bomba central. El agua con sedimentos circula a través de un filtro contenedor e intercambiable. El desplazamiento vertical se logra con ayuda de un mecanismo de flotadores para ubicar el vehículo paralelo a la pared. Sensores de nivel y posición permiten el cálculo de la trayectoria.

La autonomía se implementa con una computadora, software y sensores para explorar, controlar la limpieza y el estado de los componentes. La alimentación es de corriente continua, de bajo voltaje y externa mediante un cable flotante.

**Palabras Clave:** *Robot; Piscina; Limpiador*

### Introducción

El mercado de productos industriales para mantenimiento de piscinas de natación se presenta atractivo para el desarrollo de inversiones por su gran desarrollo comercial. Sin embargo, una buena parte de los dispositivos que se emplean para los servicios de mantenimiento que se ofrecen en el ámbito regional requieren alto grado de operación manual. Específicamente limpieza y purificación del agua. En el caso de los automáticos, se adquieren vía importación, con precios elevados.

La limpieza de piletas de natación es una tarea periódica y habitual. Generalmente, la operación comienza con un tratamiento químico que provoca la decantación de sedimentos.

Cuando estos se concentran en el fondo, se procede al barrido mediante un sistema de succión y filtrado.

El desarrollo de un dispositivo automático que además posea un costo competitivo con la oferta actual sería una buena solución para la demanda de hogares, residencias y lugares con piletas públicas.

Por lo tanto se decide diseñar un autómata destinado a la limpieza de sedimentos en pisos y paredes de natatorios o piscinas de similares características.

## **Metodología**

La metodología del proyecto está definida de acuerdo a un prototipo experimental para el diseño y prueba de concepto.

Las etapas del proyecto se pueden describir de la siguiente manera:

Requerimientos y Relevamiento: Análisis de productos y técnicas existentes en el mercado con el fin de relevar requerimientos, modelos y parámetros guía para el diseño.

Conceptualización: Definición y realización de bosquejos preliminares para cierre de conceptos de diseño en función del relevamiento de requerimientos.

Diseño: Desarrollo de modelos hidrodinámico, mecánico, electrónico y de software con el auxilio de herramientas CAD 3D, kit de prototipado electrónico y ensayos parciales de partes y componentes.

Prototipo: Construcción de un prototipo funcional para la realización de pruebas de diseño y de concepto.

Pruebas: Verificación de objetivos de diseño y validación del concepto del producto.

## **Resultados y Discusión**

A partir de la conceptualización del producto se definieron las siguientes características:

Desplazamiento: Soportado por dos ruedas con tracción lateral independiente y otra libre para soportar el giro y las características del terreno. Las ruedas son suficientemente anchas con un recubrimiento adecuado para lograr una tracción adherente y eficaz. Sensores permitirán a la computadora obtener su posición respecto del perímetro y calcular el recorrido mediante un sistema de posicionamiento heurístico. De esta manera los primeros desplazamientos son de reconocimiento y los sucesivos de barrido. En los dos casos se encuentra activo el mecanismo de limpieza

Succión: Esta operación fundamental es realizada con una bomba. Tiene como fin hacer circular el agua de la piscina a través de un filtro contenedor de sedimentos. Un sensor adecuado permitirá determinar si el filtro estuviera obstruido o el repositorio completo. La boca de succión se encuentra en la parte media del vehículo de manera que capture principalmente los sedimentos removidos por el cilindro barredor.

Remoción de Sedimentos: Dos cilindros rotativos horizontales, al frente y atrás, con una cobertura de escobillas raspan el piso y las paredes de la pileta para remover sedimentos adheridos. Estos serán absorbidos por la boca de succión.

Arrastre de Pared: Consiste en un control de posición vertical basado en flotadores para ubicar el vehículo paralelo a la pared. Sensores de nivel y posición permitirán que la computadora calcule la trayectoria.

Porta Cable: Sistema que mantiene un sector del cable sumergido de manera perpendicular al vehículo y el resto flotando hasta la fuente de alimentación.

Hardware de Control: Se emplea una placa minicomputadora de hardware libre, a la cual se conectarán circuitos para sensado y accionamiento.

Software de Control: Se desarrolla e integra librerías existentes para implementar el funcionamiento autónomo en los tres aspectos principales:

Sistema para explorar y determinar el área de limpieza de la pileta. Incluye la determinación de forma y dimensiones de la superficie horizontal, así como de la superficie sumergida vertical (paredes).

Sistema de monitoreo de limpieza. Incluye detección de llenado y obstrucción de filtro. Estado de la bomba y cilindro de barrido. Estado de posición del robot (horizontal y vertical).

Sistema Control de Limpieza. Incluye heurística de barrido y modos de remoción de sedimentos. Posicionamiento y desplazamiento en paredes. Señales de inicio, parada y fallas.

Alimentación: Regulador y Conversor de CA a CC (220v a 24v y 12v)

En las etapas de diseño y construcción se desarrollaron diferentes componentes. A continuación se describen los detalles:

## ELECTRÓNICA

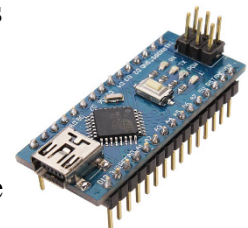
La condición de su diseño ha de ser la de proveer completa autonomía, empleo de circuitos sencillos, mínimo número de componentes, económicos, muy accesibles para su reemplazo.

Se utiliza el microcontrolador *Arduino Nano* como nodo de proceso.

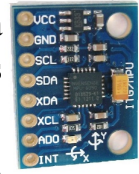
La metodología de trabajo fue modular e incremental, donde se desarrolló en primer lugar las operaciones básicas del dispositivo, como ser el movimiento y la lectura de los diversos sensores, luego se avanzó sobre la lógica de ubicación espacial y la autonomía, y finalmente se incluyó las rutinas de limpieza.

A continuación se describen algunas características técnicas y componentes:

Motores y controladores: Se emplean dos motores paso a paso Nema 17 para tracción y un motor de corriente continua para rotación del rodillo limpiador. Se utilizaron dos *Pololu DRV8825* como interfaz de potencia para los motores paso a paso y relés para comandar el motor del rodillo limpiador y la bomba de succión.



Sensores: Acelerómetro (con giróscopo): Provee ubicación espacial del dispositivo, cuyo microcontrolador calcula a partir de los valores de aceleración y ángulos la posición en la que se encuentra, guardando en su memoria interna un mapa de las dimensiones de la piscina y de las áreas que ya fueron limpiadas.

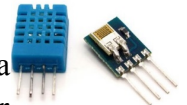


Sensor de inmersión: Su importancia radica en el hecho de que la bomba utilizada para filtrar el agua debe ser activada única y exclusivamente cuando el dispositivo se encuentra bajo el agua, para evitar daños en la misma.



Sensores de Presión: Indican contacto con alguna pared, obteniéndose de esta manera las dimensiones de la piscina.

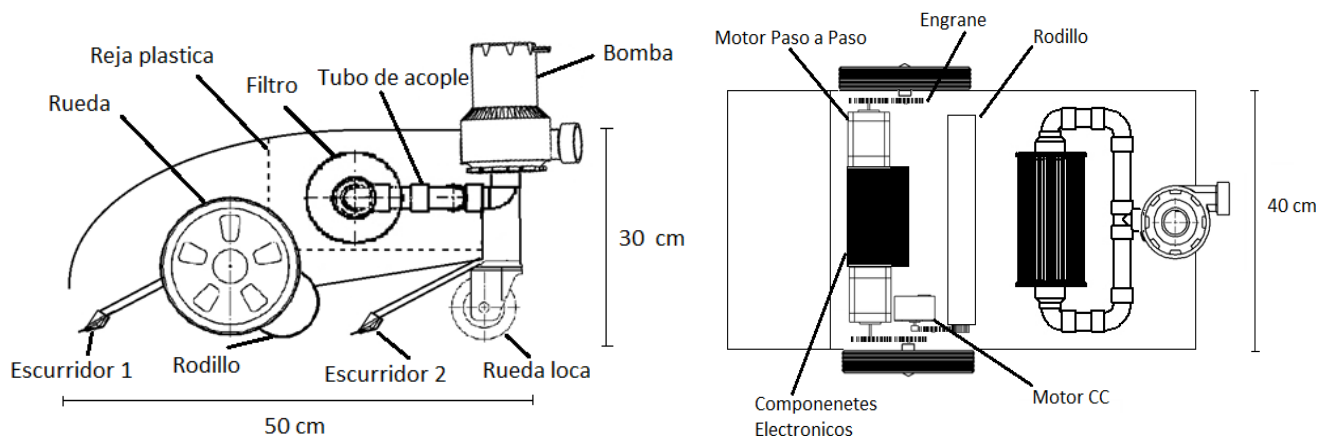
Sensor de humedad y temperatura: Se planteó su utilización en un principio para la monitorización de las condiciones de trabajo del circuito impreso, a fin de velar para los componentes no resulten dañados ante condiciones ciertas condiciones imprevistas.



Alimentación: Fuente conmutada de 500 W con salidas de 12 V, 5 V y 3,5 V.



## MECÁNICA



### Cinemática:

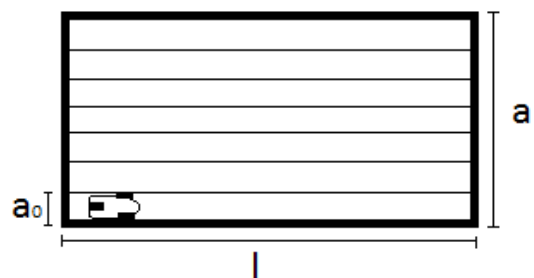
Se ha supuesto una trayectoria como la observada en la figura. Esta depende de las dimensiones de la piscina, como del ancho de la maquina limpia fondo. A continuación se presenta las formulas y consideraciones implementadas para el análisis:

$$\text{Longitud recorrida por barrido} : l \left[ \frac{m}{\text{barrido}} \right]$$

$$N^\circ \text{ de barrido por vuelta} : N_B = \frac{a}{a_0} \left[ \frac{\text{barrido}}{\text{vuelta}} \right]$$

$$\text{Recorrido por vuelta} : x = \frac{a}{a_0} * l \left[ \frac{m}{\text{vuelta}} \right]$$

$$N^\circ \text{ de vueltas} : N_V [\text{vuelta}]$$



Trayectoria total recorrida por el limpiador:  $Trayectoria\ Total: S = \frac{a}{a_0} * l * N_v [m]$

El cambio de dirección al toparse con una pared se realiza en un tiempo determinado.

$$Tiempo\ de\ Giro : t_G \left[ \frac{s}{giro} \right]$$

La cantidad de giros que debe realizar el limpiador está relacionada con la cantidad de barridos realizados por vuelta y la cantidad de vueltas a realizar:

$$N^\circ\ de\ Giros : N_G = (N_B - 1) * N_v [giros]$$

El tiempo que tarda el limpiador en realizar un barrido de un extremo a otro depende de su velocidad. Para un movimiento de barrido:

$$Velocidad\ limpiador : v_0 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad Tiempo\ Barrido : t_B = \frac{l}{v_0} \left[ \frac{s}{barrido} \right]$$

El tiempo que tardara en limpiar la piscina depende de la geometría de la misma, el ancho del limpiador y la velocidad del mismo.

$$Tiempo\ de\ limpiado : t_T = t_B * N_B * N_v + t_G * (N_B - 1) * N_v$$

### Dinámica:

Requerimientos del motor para movimiento del limpiador.

Por modelo de cuerpo libre:

En el cual se representan las fuerzas actuantes en el sistema:

Peso del limpiador :  $W$

Fuerza Normal a la superficie :  $N$

Fuerza de Rozamiento de contacto :  $F_R = \mu * N$

Teniendo en cuenta que el limpiador ejerce su trabajo en el seno de un fluido se presentan las siguientes fuerzas:

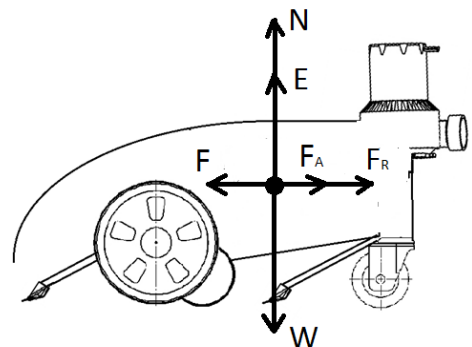
Empuje (Arquimedes) :  $E = \rho_{fluido} * g * V_{solido}$

Fuerza de arrastre :  $F_A = 2 * c_d * \rho_{fluido} * v_0^2 * A_{contacto}$

Dónde:

$\mu$  : coeficiente de rozamiento       $\rho_{fluido}$  : densidad del fluido

$A_{contacto}$  : area de contacto frontal



$g$  : aceleracion de la gravedad cte para el sistema considerado       $c_d$  : coeficiente de forma

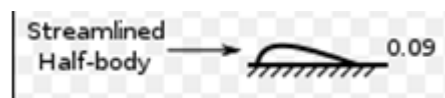
Consideraciones:

Debido a que el limpiador tiene como objetivo su uso doméstico, se ha considerado un peso apropiado para su transporte, sin exigir al usuario ejercer fuerza significativa. Se tomó como base un peso de 10 kilogramos.

El volumen ocupado por los componentes sólidos en el diseño se ha determinado mediante el programa Solid Works, en el cual se obtuvo que el volumen total ocupado sea de  $7.58 \times 10^{-3}$  metros cúbicos.

Para el caso del coeficiente de rozamiento se decidió considerar un caso desfavorable en el que el rozamiento ejercido se asemeje al producido entre el caucho y el concreto, por lo que  $\mu=0.8$ .

En cuanto al coeficiente de forma para la determinación de la fuerza de arrastre producido en el aparato, se tomó como forma de diseño la siguiente forma hidrodinámica:



Por lo que se tiene que:  $c_d = 0.09$

El área de contacto se calcula a través del diseño del limpiador, por lo que se obtuvo un área de contacto  $A = 0.4 \times 0.3 = 0.12$  metros cuadrados.

Al tener dos ruedas motorizadas, el torque necesario será otorgado por los dos motores, cada uno de ellos ejerciendo la mitad de la fuerza necesaria.

La transmisión de la potencia desde el motor a la rueda será realizado a través de una relación de engranaje entre dos engranes.

Hidrodinámica:

A continuación se presenta el análisis energético y del caudal involucrado en el filtrado del agua por parte del limpiador.

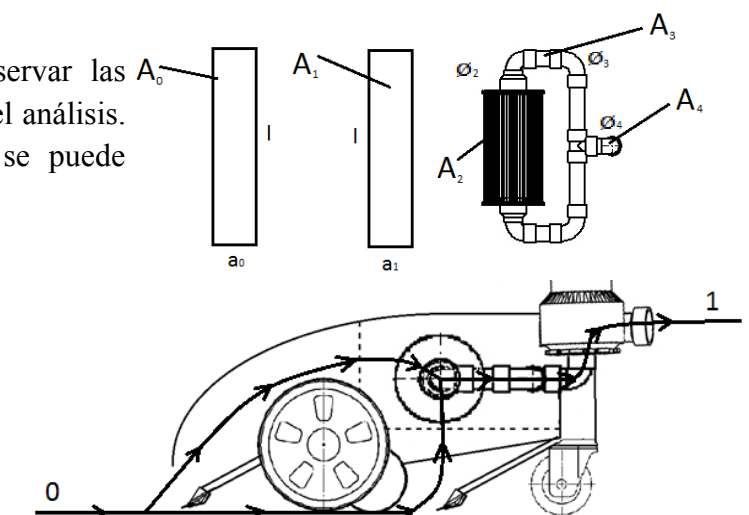
Las ecuaciones que se utilizarán serán:

$$Ec. de energía: \frac{p_0}{\gamma} + z_0 + \frac{v_0^2}{2g} + H_B = \frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + H_p$$

$$Continuidad (Caudal): Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = A_0 * v_0 = A_1 * v_1$$

En la siguiente Figura se puede observar las líneas de corrientes consideradas para el análisis. El caudal que ingresa al limpiador se puede calcular de la siguiente forma:

$$Q_0 = (A_0 + A_1) * v_0 = (a_0 + a_1) * l * v_0$$



Y el caudal que ingresa a la bomba viene determinada por:  $Q_1 = A_4 * v_1$

**Aclaración:** se han omitido las pérdidas de carga presentes en la bomba.

Aplicando la ecuación de conservación de energía en los puntos considerados:

$$\frac{v_0^2 - v_1^2}{2g} - H_p = \frac{p_1 - p_0}{\gamma} + (z_1 - z_0) - H_B$$

Considerando que  $\Delta p, \Delta z$  no presentan cambios significantes comparados con la velocidad:

$$\frac{v_0^2 - v_1^2}{2g} - H_p = -H_B$$

Calculo experimental de perdida de carga:

Experimento: para obtener la energía perdida a través de los diferentes dispositivos utilizados en el diseño se ha realizado el siguiente experimento.

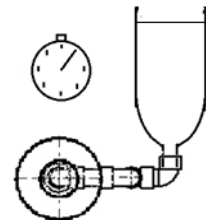
Se tiene un volumen de control de referencia:  $V_{control}$  en este caso se ha llenado una botella con un nivel determinado de agua.

A continuación se ha tomado el tiempo en que tarda la botella en vaciarse simplemente por la acción de la gravedad.

Luego se procedió a introducir el sistema de filtrado diseñado y se tomó el tiempo de vaciado del mismo volumen de agua dentro de la botella.

$$Ideal: \frac{v_{ideal}^2}{2g} = -(z_1 - z_0) \quad Real: \frac{v_{real}^2}{2g} + H_p = -(z_1 - z_0)$$

$$\frac{v_{ideal}^2}{2g} = \frac{v_{real}^2}{2g} + H_p \quad \frac{v_{ideal}^2 - v_{real}^2}{2g} = H_p \quad \frac{v_{ideal}^2}{2g} \left( 1 - \left( \frac{v_{real}}{v_{ideal}} \right)^2 \right) = H_p$$



El cociente de velocidades se puede obtener considerando que el volumen y el área por el cual atraviesa el fluido son iguales.

Caudal y Potencia de Bomba:

Se establece una relación entre las velocidades de entrada y salida:

$$\text{Teniendo en cuenta continuidad: } \frac{v_0^2 - v_1^2}{2g} - H_p = -H_B \quad A_0 * v_0 = A_1 * v_1$$

Entonces se despeja la velocidad de salida en función de la de entrada:

$$v_1 = \frac{A_0}{A_1} * v_0 \quad \frac{A_0}{A_1} = \frac{(a_0 + a_1) * l}{\frac{\emptyset^2 \pi}{4}} = \dot{c} \quad \frac{v_0^2}{2g} \left( 1 - \left( \frac{A_0}{A_1} \right)^2 \right) - \frac{v_0^2}{2g} \left( 1 - \left( \frac{v_{real}}{v_{ideal}} \right)^2 \right) = -H_B$$

$$\frac{v_0^2}{2g} \left( \left( \frac{v_{real}}{v_{ideal}} \right)^2 - \left( \frac{A_0}{A_1} \right)^2 \right) = -H_B \quad \text{Donde } v_0 \text{ es la velocidad lineal del limpiador .}$$

## Conclusiones

Los objetivos que se definieron al inicio se cumplen en general, si bien es necesario continuar con el trabajo para cubrir todas las expectativas. Estas tienen que ver con lograr un prototipo completamente funcional para pruebas exhaustivas en la mayoría de los tipos de piscinas. Con los resultados actuales se han determinado las prioridades del diseño, las dificultades más importantes, especialmente las relacionadas con la característica de la inmersión acuática, la importancia de la referencia espacial y las dificultades de la limpieza. El desarrollo se considera de valor por la experiencia adquirida en el campo de la robótica y en la gestión de este tipo de proyectos.

## Referencias

- Física Universitaria Vol. 1 12Ed. Francis W. Sears; Mark W. Zemansky; Hugh D. Young. Autor-Editor, 2009.
- Mecánica de los fluidos y maquinas hidráulicas Vol.1 2Ed. Claudio Mataix. By Claudio Mataix y plana ediciones del castillo, S.A.
- Catálogo general SKF. SKF 2006.
- Diseño de ingeniería mecánica de Shigley 8va Ed. Richard G. Budynas y J. Keith Nisbett. McGraw-Hill, 2012.