

# ANÁLISIS DE LAS LIMITACIONES DEL CANAL DE OLAS DE LA UCSC PARA LA GENERACIÓN DE TSUNAMIS Y OLAS REGULARES

Valentina Bravo T<sup>1</sup>, Rafael Aránguiz M<sup>2</sup>, Mauricio Villagrán V<sup>3</sup>

## RESUMEN:

Debido a que Chile tiene una costa de más de 6,000km de longitud, se hace de vital importancia poder estudiar todos los fenómenos que ocurren en ésta, con el fin de ayudar a un mejor entendimiento de estos y construir infraestructuras acordes a las necesidades que se requiere. Es por esto que, en este trabajo se estudia poder generar olas regulares y tipo tsunamis a escala en el canal de olas de la facultad de ingeniería de la UCSC, mediante la evaluación de las limitaciones que este posee y configurando un programa que permitirá mover el generador de ondas para ensayar las olas.

Para cumplir el objetivo de este trabajo, se realizaron tres tandas de ensayos; ensayos para la corroboración del cumplimiento de las condiciones asociadas al movimiento del generador de ondas, ensayos para olas tipo tsunamis y ensayos de olas regulares, donde las últimas dos tandas fueron comparadas posteriormente con la teoría de generación de olas conocida.

**PALABRAS CLAVES:** canal de olas, Tsunamis, ola solitaria, ola regular, servomotor, paleta, carrera

## ABSTRACT:

Since Chile has a coastline of more than 6,000km long, it is of vital importance to be able to study all the phenomena that occur in it, in order to help a better understanding of these and build infrastructures according to the needs that are required. For this reason, in this work we study the possibility of generating regular and tsunami waves at scale in the wave flume of the UCSC engineering faculty, by evaluating the limitations that it has and configuring the Windproladder program that will allow to move the wave generator to test the waves.

In order to fulfill the objective of this work, three batches of tests were carried out; tests to corroborate the fulfillment of the conditions associated with the wave generator movement, tests for tsunami-type waves and tests for regular waves, where the last two rounds were subsequently compared with the known wave generation theory.

**KEYWORDS:** wave flume, Tsunamis, solitary wave, regular wave, servomotor, paddle, stroke

## 1. INTRODUCCION:

La realidad de los fenómenos hidráulicos es algo muy complejo y no tan fácil de estudiar, todas las ecuaciones que intentan interpretar la física de estos, son aproximaciones que buscan describir de la mejor manera lo que pasa realmente. Por lo cual disponer de tecnología que permita analizar físicamente el comportamiento del mar y mostrar aproximaciones mucho más empíricas de lo que son estos fenómenos es de vital importancia para entenderlos de mejor manera y proponer soluciones mucho más certeras.

Es por esto que la generación de olas en laboratorio se vuelve necesaria para estudiar los fenómenos hidráulicos, ya que nos ayuda a representarlos a una escala reducida. Uno de los fenómenos más importantes que se desea replicar en este trabajo son los tsunamis, los cuales durante años se han analizado en laboratorio a través de la ola solitaria planteada por Goring (1978).

A lo largo de los años distintos autores han investigado la generación de tsunamis a escala en el laboratorio, como, Biéssel y Suquet (1951) discutieron y resolvieron la relación que existe entre la carrera del generador de olas y la amplitud de la ola; obteniendo esta relación para diferentes tipos de generadores de ondas. Años más tarde, Goring (1978) desarrolló un método numérico utilizando técnicas de elementos finitos para resolver las ecuaciones unidimensionales de Boussinesq en profundidad constante, esta teoría fue aplicada a un generador de ola tipo pistón el cual contaba de tres partes: un sistema hidráulico, servosistema eléctrico y la paleta. Con esto, logró comprobar que las ondas solitarias generadas en laboratorio coinciden con las teorías (Boussinesq (1872) y McCowan (1891)), pero con limitaciones de olas relativas pequeñas ( $H/h \ll 1$ ). Además, varios autores como Guizien y Barthelemy (2002), Madsen et al (2008) y Wu et al. (2014) ocuparon la teoría de Goring (1978) y la fueron complementando para que esta se adecuara mejor a los ensayos. En el presente trabajo se analizará si la ola tipo tsunami generada en el canal responde a lo planteado por Goring (1978).

Para la generación de olas regulares en el laboratorio se ha ocupado la relación entre la carrera de la paleta y el generador de ondas encontrada por Biéssel y Suquet (1951) donde se ha encontrado que las ondas generadas más que responder a la teoría lineal de olas, se asemejan mejor a las ondas de Stokes de segundo orden. Para lograr tener ondas que respondan a la teoría lineal de olas, se debe contar en el canal con absorción activa del oleaje.

Es importante que todos los ensayos de laboratorio se realicen con absorción de energía, ya que la reflexión que puede generar el oleaje propagado al chocar con la pared al final del canal puede perturbar los ensayos y afectar la calidad de estos. Para evitar esto existe la disipación pasiva y activa del oleaje; la disipación activa consiste en algoritmos de control que ayudan a modificar la generación de ondas de manera que el movimiento de la paleta se vaya modificando de modo que ayude a una mejor generación de las ondas, mientras que en la disipación pasiva la idea es amortiguar las ondas que llegan al final del canal mediante cambios de profundidad o filtración de agua.

El objetivo general de este trabajo es analizar las limitaciones del canal de olas de la facultad de ingeniería de la UCSC para la generación de tsunamis y olas regulares mediante la configuración del programa Windproladder. Para cumplir el objetivo general se deberán resolver los siguientes objetivos específicos:

1. Evaluar las limitaciones físicas tanto del generador como del canal de olas.
2. Analizar condiciones y restricciones tanto para olas solitarias como regulares.
3. Configurar del programa Windproladder para la generación de tsunamis y olas regulares.

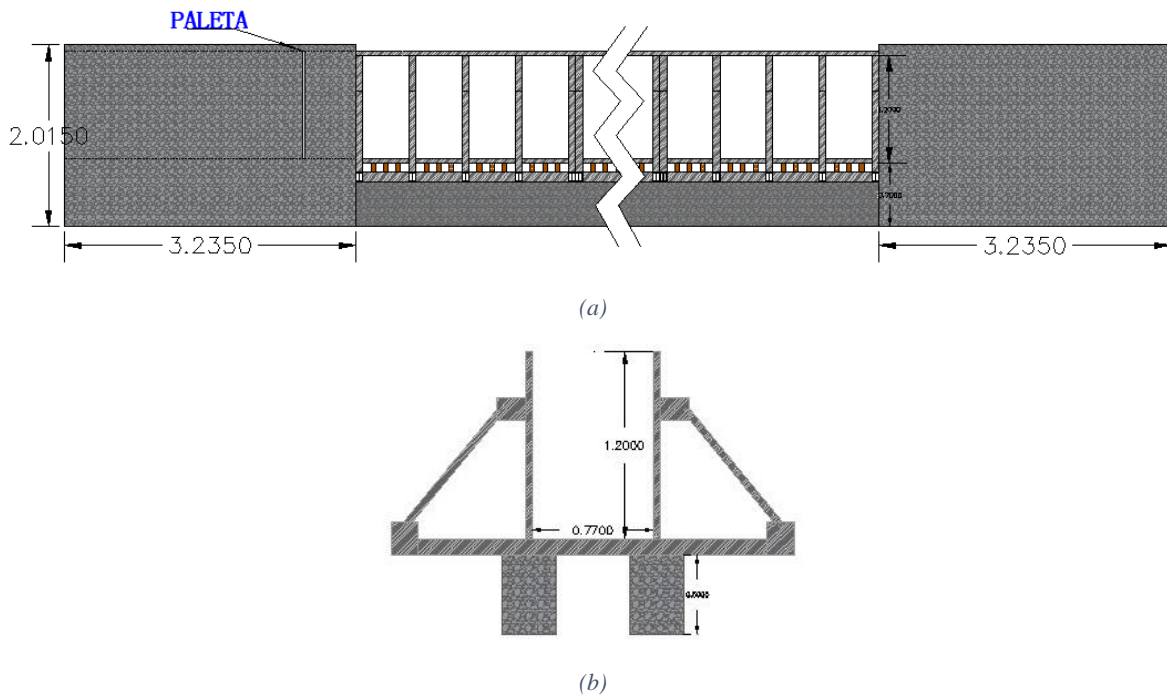
## 2. METODOLOGIA:

El canal de olas de la UCSC es una estructura compuesta de hormigón, el cual cumple la función de base y conforma los límites del canal; en la parte central, montado sobre el hormigón, están las paredes de vidrio las cuales cuentan con un refuerzo metálico en toda su extensión como se muestra en la **Figura 1**.



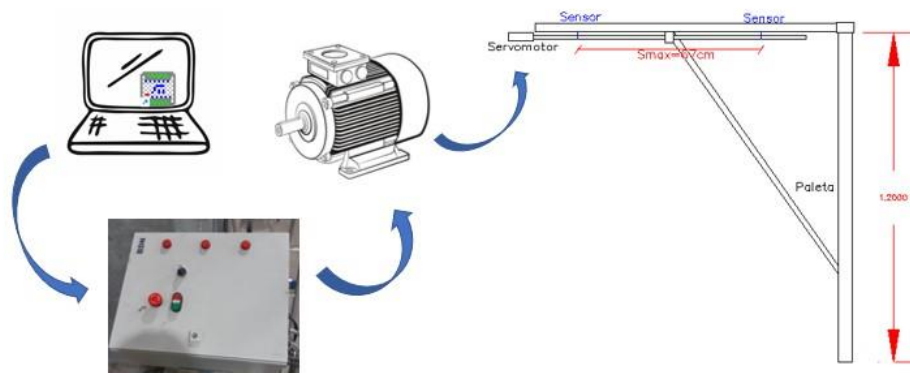
**Figura 1.** Fotografía del canal de olas UCSC. Elaboración Propia

El canal cuenta con una longitud completa de 24m, el cual se divide en tres segmentos, en un extremo se encuentra una estructura de hormigón de 3.235m de largo en la cual está el generador de olas, al otro extremo tenemos otra estructura de hormigón con las mismas características, donde se encuentran los disipadores de energía, el resto lo conforman las paredes de vidrio con una longitud de 17m, una sección transversal constante de 1.2m de alto por 0.77m de ancho que es donde se propaga la ola. Todo lo mencionado se ilustra en la **Figura 2**.



**Figura 2.** Esquema Canal Completo (a) Vista en elevación del canal UCSC (b) Corte transversal del canal UCSC.  
 Elaboración Propia

La generación de olas se realiza mediante un generador tipo pistón de 1.2m de alto por 0.77m de ancho, esta paleta está conectada a un servomotor a través de un tornillo sin fin lo que permite el paso de movimiento rotacional a traslacional de ésta, a su vez también está conectada a rieles que permiten su movimiento axial, este movimiento está limitado por sensores ubicados a ambos costados que restringen la carrera de la paleta a máximo 67 cm (esto por condiciones físicas del canal). La conexión entre el servomotor y la paleta se ilustra en la **Figura 3**.



**Figura 3.** Conexión entre el servomotor y la paleta. Elaboración Propia

Como ya se mencionó anteriormente para que la paleta se pueda mover está conectada a un servomotor y a rieles que permiten su carrera. En la **Figura 3** podemos observar el circuito de funcionamiento del servomotor antes de que éste haga mover la paleta, esto comienza primeramente en el computador, donde mediante el programa Windproladder ingresamos las variables asociadas a los requerimientos eléctricos que deben transformarse en señales de movimiento para la paleta. Luego esto se codifica y es enviado a través de una señal al PLC el que transforma la señal recibida y la envía al servomotor.

El Windproladder funciona con dos variables carrera y velocidad, medidas en unidades de “pasos” y “pasos/s” respectivamente, estas variables están ligadas a las características del servomotor las cuales se enlistan a continuación:

- Potencia = 3kW
- Torque = 14.5Nm
- Corriente = 16A
- RPM = 2,000

El servomotor al estar conectado al tornillo sin fin permite hacer la conversión de desplazamiento rotacional a traslacional y juntándolo con las unidades del Windproladder nos dan las siguientes relaciones asociadas a carrera y la velocidad:

$$\text{Carrera: } 1\text{vuelta} \rightarrow 4.8\text{cm} \rightarrow 10,000 \text{pasos}$$

$$\text{Velocidad: } 1\text{rps} \rightarrow 4.8\text{cm/s} \rightarrow 10,000\text{pasos/s}$$

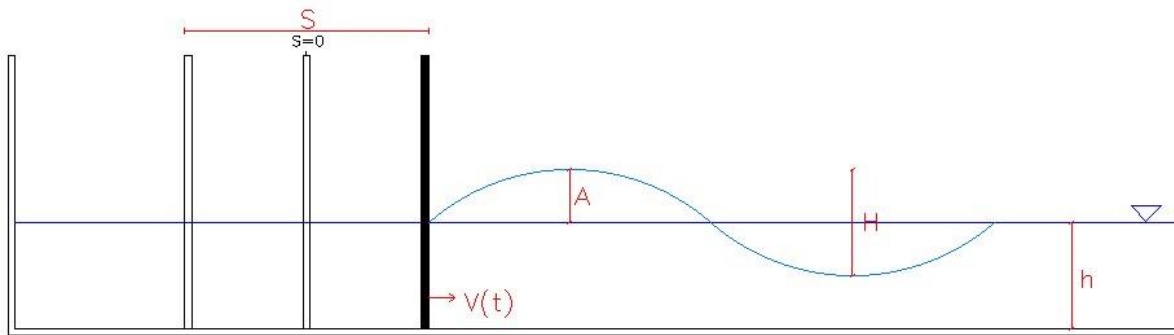
Con esto podemos definir las limitaciones de carrera y velocidad de nuestro canal, como se dijo antes, la paleta tiene una carrera limitada de 67cm y el servomotor en sus características nos dice que tiene un máximo de 2,000rpm. Haciendo la conversión a unidades del Windproladder nos da una carrera máxima de 139,900pasos y una velocidad máxima de 333,333pasos/s (esta velocidad se alcanza cuando no hay restricción de carrera).

El movimiento tipo pistón permite el desplazamiento horizontal de una pared vertical, este movimiento puede ser hacia adelante o hacia atrás. El Windproladder permite mover el servomotor de dos maneras distintas; uno de ellos es un movimiento cíclico que mueve la paleta de atrás hacia delante la cantidad de veces que uno le indique y el otro movimiento se debe escribir línea por línea según la forma en la cual se desea que se mueva la paleta, ya sea hacia atrás o hacia adelante.

Debido a que en este trabajo se desean realizar olas solitarias y regulares, estos dos movimientos nos ayudarán a ejecutarlas, el movimiento cíclico lo ocuparemos para la realización de olas regulares y, por su parte, se escribirá un movimiento para ola solitaria. Por simplicidad desde ahora a estos los llamaremos, movimiento ola regular y movimiento ola solitaria, respectivamente.

### Condiciones del Canal para los Ensayos

Para la realización de los ensayos se deben describir las variables  $S$ ,  $V(t)$  mostradas en la **Figura 4**, las cuales muestran las condiciones asociadas al movimiento de la paleta, donde la amplitud de la ola generada se propagará a una profundidad constante  $h$  (**Figura 4**) en el canal.



**Figura 4.** Esquema de ensayo con variables asociados. Elaboración Propia

Donde cada una de estas variables se describen a continuación:

- $S$ : Desplazamiento axial o Carrera de la paleta (“stroke”, en inglés)
- $V(t)$ : Velocidad a la que se mueve la paleta, definida por el servomotor
- $H$ : altura total de la ola generada
- $A$ : Amplitud de la ola generada
- $h$ : Profundidad o altura del agua definida y constante en cada ensayo

Todos los ensayos se realizaron con disipación pasiva del oleaje variando la profundidad mediante una pendiente, colocando suelo al final del canal y paneles plásticos que filtran el agua, esto nos ayuda a disminuir la reflexión de las ondas generadas.

### Ensayos Previos para Asegurar Cumplimiento de Condiciones

Para la realización de los ensayos se instalaron dos sensores ultrasónicos tipo Arduino; el primero apuntando a la paleta a 1.40m de la posición cero de esta (la posición cero se encuentra a la mitad de su máximo desplazamiento, ver **Figura 3**) con el fin de poder medir su carrera, el segundo a 4.10m de la posición cero de la paleta para medir en tiempo real la amplitud de la ola que se está generando.

Los primeros 12 ensayos se realizaron con un movimiento ola solitaria midiendo la carrera de la paleta y la amplitud de ola generada, en los primeros seis se mantuvo la velocidad máxima del servomotor constante y se variaron seis carreras; la segunda tanda de ensayos fue a carrera máxima constante y seis distintas velocidades. Todos estos ensayos se realizaron a una profundidad de 30cm la cual fue definida según condiciones que permitía el canal.

Los siguientes ensayos fueron cuatro, donde se midió el movimiento de la paleta, en estos se mantuvo una carrera constante y se variaron las velocidades desde la máxima hasta una muy

pequeña; dos de estos ensayos se hicieron con un movimiento ola solitaria y los otros dos con un movimiento ola regular, todos estos con una profundidad de 30cm.

### Ensayos Ola Solitaria

Goring (1978) demostró en su tesis “Tsunamis-The Propagation Of Long Waves Onto A Shelf” la relación que existe entre la velocidad de la paleta y la velocidad de las partículas de agua con el fin de encontrar la relación para generar olas solitarias con una paleta.

En aguas someras se puede suponer que las velocidades horizontales de las partículas son constantes a lo largo de esta profundidad y la velocidad a la que se mueve la paleta es igual a esta, con esto se puede obtener el desplazamiento temporal del generador de ondas:

$$\frac{dX^{sw}(t)}{dt} = \vec{u}(X^{sw}, t) \dots \mathbf{Ec (1)}$$

Donde  $X^{sw}(t)$  es el desplazamiento del generador de ondas tipo pistón o paleta. A partir de la ecuación de continuidad, perfil de superficie ( $\eta$ ), velocidad de fase ( $c$ ), Svendsen (1974) pudo encontrar la velocidad horizontal de las partículas:

$$\vec{u}(x, t) = \frac{c\eta(x,t)}{h+\eta(x,t)} \dots \mathbf{Ec (2)}$$

Insertando la **Ec (2)** en la **Ec (1)** se obtiene la siguiente ecuación del desplazamiento del generador de ondas:

$$\frac{dX^{sw}(t)}{dt} = \frac{c\eta(x,t)}{h+\eta(x,t)} \dots \mathbf{Ec (3)}$$

Una ola solitaria no es oscilante ni presenta un valle como lo es la ola regular, esta presenta solo una cresta por sobre el nivel del agua en calma donde las partículas se desplazan siempre en la dirección de propagación, el perfil de elevación de una onda solitaria se define como:

$$\eta(\theta) = \frac{H}{\cosh^2(k\theta)} \dots \mathbf{Ec (4)}$$

Donde  $H$  es la amplitud de la ola,  $k$  y  $\theta$  son el coeficiente de decaimiento y la fase respectivamente definidas por Goring (1978) como:

$$k = \sqrt{\frac{3H}{4h^3}} \dots \mathbf{Ec (5)}$$

$$\theta = ct - x \dots \mathbf{Ec (6)}$$

Donde la velocidad de fase  $c$ , se definió como:

$$c = \sqrt{g(h + H)} \dots \mathbf{Ec (7)}$$

Goring (1978) tomo el  $x$  de la fase como la posición  $X^{sw}(t)$  de la paleta y la incluyó en las expresiones  $c$  y  $\eta$  de la **Ec (3)** donde después de algunos cálculos se obtuvo la siguiente expresión:

$$X^{sw}(t) = \frac{H}{kh} \tanh(k\theta) \dots \mathbf{Ec (8)}$$

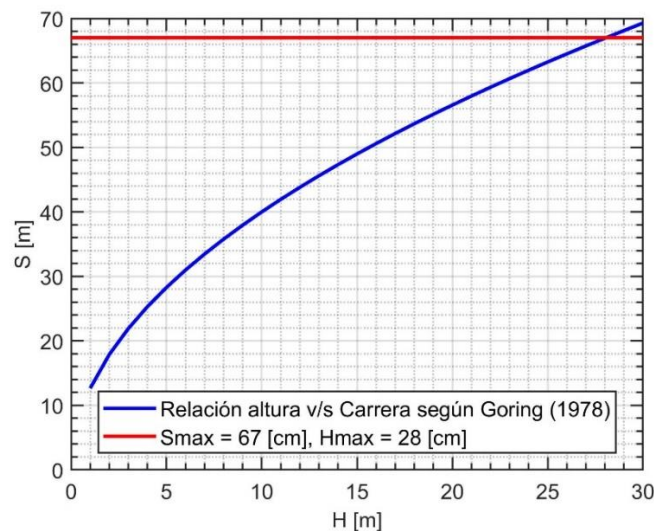
Como  $\theta$  también depende de la posición de la paleta la solución se encuentra mediante un proceso iterativo resolviendo la **Ec (8)** igualándola a cero y utilizando la regla de Newton con la solución del paso del tiempo  $i-1$ , donde se obtuvieron valores para  $\theta = \pm\infty$ :

$$X^{sw}(\pm\infty) = \pm \frac{H}{kh} = \frac{2H}{kh} \dots \mathbf{Ec (9)}$$

Con esta expresión ya se puede obtener el valor del desplazamiento de la paleta; el cual aquí se denomina como carrera “S” para generar una ola solitaria, el valor teórico de la velocidad se obtiene derivando la **Ec (8)** con respecto al tiempo. Por lo cual, para la obtención de las variables asociadas a la carrera de la paleta de manera teórica solo se debe tener en conocimiento los valores de profundidad ( $h$ ) y amplitud de ola ( $H$ ).

En base a esta teoría Goring (1978) generó ondas solitarias en un modelo físico con alturas relativas de ola  $0,05 < H/h < 0,65$  encontrando que, mientras menor es el valor de altura relativa mejor se asemeja lo generado a la teoría. Es por esto que las olas solitarias que se generaron en los ensayos deben cumplir que  $H/h \ll 1$ .

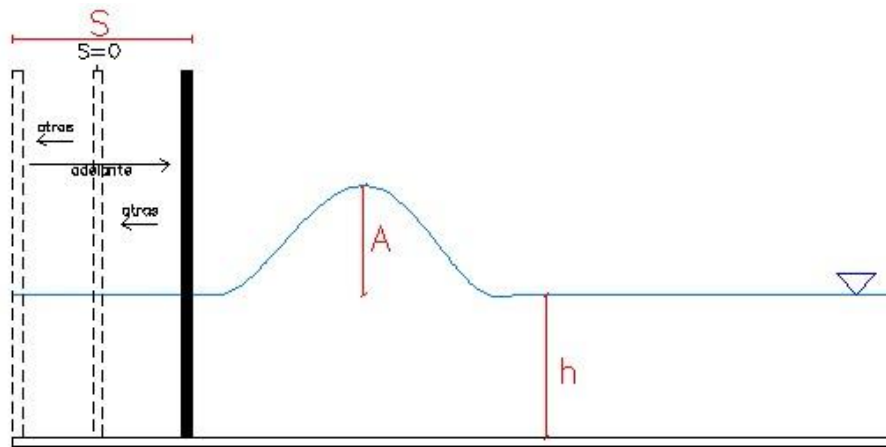
Como se comentó anteriormente, dadas las condiciones del canal los ensayos para olas solitarias se realizaron a una profundidad fija de 30cm y con la carrera máxima de la paleta podemos encontrar las amplitudes teóricas que se podrían generar en el canal. Estas son mostradas en el **Gráfico 1** y están asociadas a una cierta carrera de la paleta.



**Gráfico 1.** Relación teórica de Goring (1978) entre  $H$  y  $S$  para  $h = 30\text{cm}$  y  $S_{\text{máx}}$ . Elaboración Propia

La teoría nos dice que a una profundidad de 30cm y con la carrera máxima reemplazando en la **Ec (9)** obtenemos que se puede generar una amplitud de ola de 28cm. Con estos valores y la derivada de la **Ec (8)** se obtiene que se necesita una velocidad de 115cm/s para generar esta amplitud de ola. En los ensayos a realizar se resolverá si el servomotor es capaz de generar tal velocidad.

Para realizar los ensayos de ola solitaria se ocupó el movimiento ola solitaria y las condiciones de profundidad recientemente mencionadas, un esquema de estos ensayos se ve en la **Figura 5**.



**Figura 5.** Esquema ensayo ola solitaria. Elaboración Propia

Donde A es la amplitud de la ola generada, definida por Goring (1978) como H, h es la profundidad del agua en el canal y S es la carrera de la paleta.

### Ensayos Ola Regular

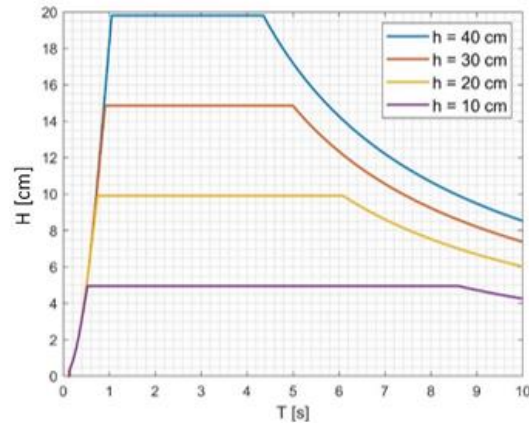
Biéssel y Suquet (1951) encontraron la función de transferencia entre la carrera del generador de ondas y la amplitud de la onda a generar, esto para varios generadores de ondas. En la **Ec (10)** se muestra la función de transferencia para un generador tipo pistón, que es nuestro caso.

$$\frac{H}{S} = \frac{4\sinh^2(kh)}{\sinh(2kh) + 2kh} \dots \mathbf{Ec(10)}$$

Donde H es la amplitud de la onda, S la carrera de la paleta, k el número de onda y h la profundidad del agua en el canal. Con esta ecuación podemos obtener de manera teórica la carrera necesaria de la paleta para generar una cierta amplitud de onda, es importante destacar que esta ecuación depende netamente de dos variables h y k, donde h es un valor constante y k depende de la longitud de onda; y, a su vez esta última depende del periodo de la onda.

Las olas regulares a generar deberán cumplir esta relación teórica y dos condiciones más; una asociada al criterio de rotura ( $H/L < 1/8$ , Miche 1944) y la otra asociada a la ola máxima dada las condiciones físicas del canal. Si analizamos estas tres condiciones para una

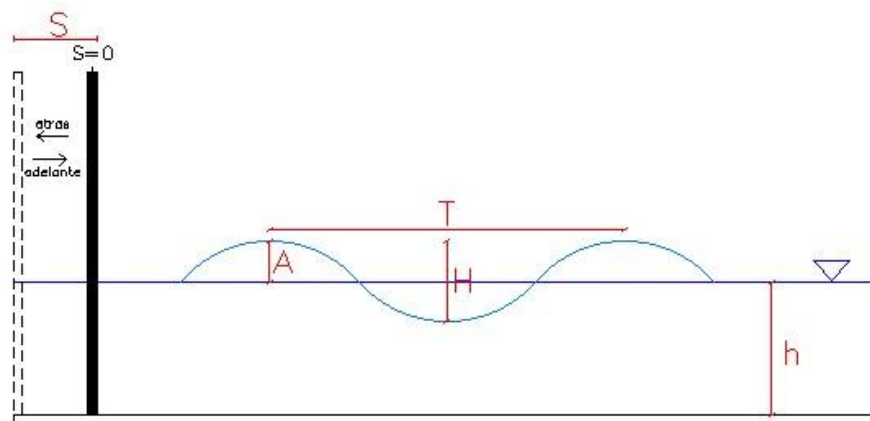
profundidad determinada obtenemos la curva de amplitudes máximas que se podrán generar en el canal a esa profundidad, en el **Gráfico 2** podemos ver estas curvas para todas las profundidades ensayadas.



**Gráfico 2.** Curvas teóricas de amplitudes máximas para  $h = 40, 30, 20$  y  $10\text{cm}$  respectivamente, con  $H_{\text{máx}} = 19.8, 14.9, 9.9$  y  $4.95\text{cm}$  respectivamente. Elaboración Propia

La amplitud máxima mostrada en las curvas como se dijo anteriormente depende de las condiciones físicas del canal (profundidad del agua, largo del canal y carrera máxima paleta) mientras menor sea la profundidad a utilizar menor amplitud de ola se podrá generar. Finalmente, todas las olas regulares que se quieran generar a una profundidad determinada deben cumplir que estén dentro de esta curva.

En el caso los ensayos para ola regular se ocupó el movimiento ola regular, al igual que en los ensayos de ola solitaria se llena el canal a una profundidad constante, pero se probaron cuatro distintas profundidades, un esquema de los ensayos se ve en la **Figura 6**.



**Figura 6.** Esquema ensayo ola regular. Elaboración Propia

Donde  $S$  es la carrera de la paleta,  $h$  la profundidad del agua en el canal,  $A$  es la amplitud,  $H$  es la altura total y  $T$  es el periodo de la ola generada.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Todos los ensayos realizados en este trabajo fueron con el fin de obtener las limitaciones que existen en el canal de olas de la UCSC para la generación de tsunamis y olas regulares. En esta sección primeramente se presentan y analizan los resultados de los ensayos para asegurar cumplimiento de las condiciones del canal, luego se pasan a presentar y analizar, por separado los resultados obtenidos de los ensayos de ola solitaria y olas regulares, respectivamente.

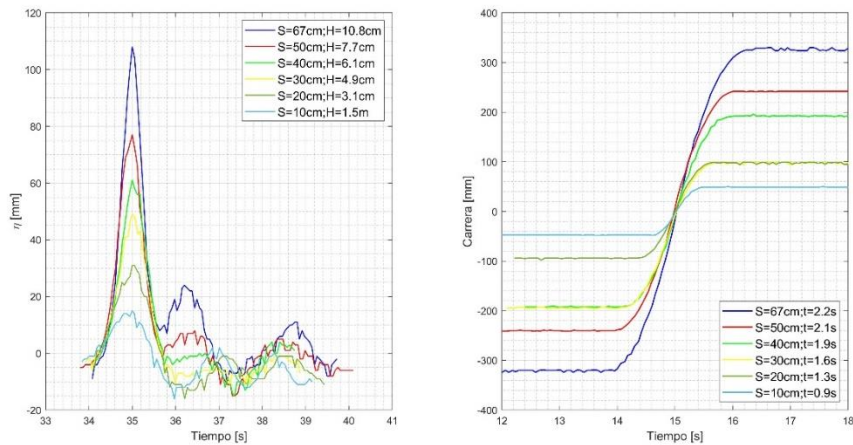
#### Resultados de ensayos Previos Para Asegurar Cumplimiento De Condiciones

Para conocer la influencia de las variables asociadas al movimiento de la paleta (carrera y velocidad) en la amplitud de ola generada, es que se realizaron los primeros 12 ensayos, en los cuales se mantuvo una profundidad constante de 30cm y se dividieron en dos partes; primero, manteniendo la velocidad máxima del servomotor constante y variando seis carreras, después manteniendo la carrera máxima de la paleta constante y variando seis velocidades, los valores de carrera y velocidad mencionados anteriormente se muestran en la **Tabla 1**.

| <b>h = 30 cm</b>                                  |                  |  |                    |
|---|------------------|--|--------------------|
| <b>V<sub>máx</sub> = 1.6m/s = 333,333 pasos/s</b> |                  | <b>S<sub>máx</sub> = 67cm = 139,900pasos</b> |                    |
| <b>S (cm)</b>                                     | <b>S (pasos)</b> | <b>V (cm/s)</b>                              | <b>V (pasos/s)</b> |
| 67  | 139,900          | 160  | 333,333            |
| 50  | 104,167          | 120  | 250,000            |
| 40  | 83,333           | 60   | 125,000            |
| 30  | 62,500           | 48   | 100,000            |
| 20  | 41,667           | 40   | 83,333             |
| 10  | 20,833           | 24   | 50,000             |

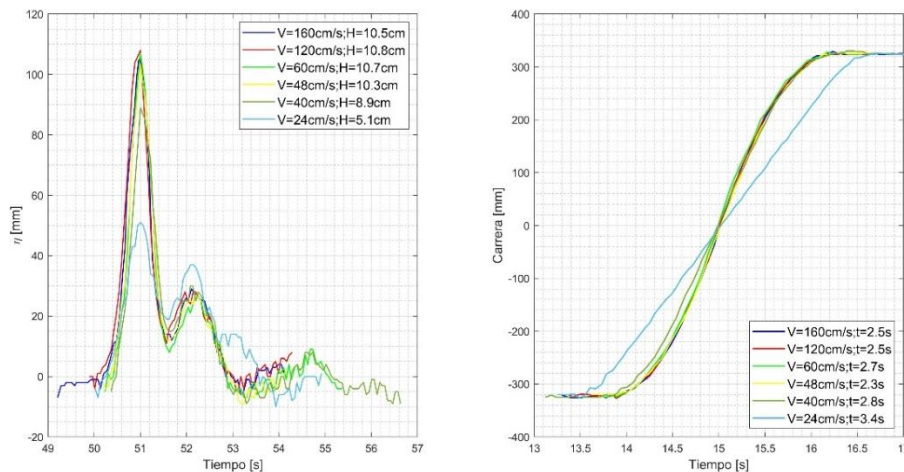
**Tabla 1.** Datos de velocidad y carrera usados para conocer la influencia de la carrera y velocidad de la paleta en la amplitud de la ola a generar. *Elaboración Propia*

Los valores de la **Tabla 1** son ingresados al Windproladder y gracias a los sensores instalados podemos medir en tiempo real la ola que se está generando y el movimiento de la paleta, los resultados de esta tabla se presentan en las **Figuras 7 y 8** donde podemos ver la amplitud de las olas generadas y las carreras de la paleta, ambos para velocidad y carrera constante, respectivamente.



**Figura 7.** Resultados obtenidos de los ensayos de la Tabla 1 para velocidad máxima del servomotor constante, a la izquierda el perfil de las olas generadas y a la derecha las carreras de la paleta. Elaboración Propia

En la **Figura 7** (lado izquierdo) podemos observar una notable disminución en la amplitud de la ola generada al ir disminuyendo la carrera de la paleta, esto se puede explicar teóricamente ya que si observamos la **Ec (9)** notamos que la carrera de la paleta es directamente proporcional a la amplitud de la ola, por lo que es normal que esta disminuya al disminuir la carrera. En el lado derecho de la figura podemos observar las distintas carreras ensayadas donde cada color responde a los seis ensayos realizados, se ve una clara disminución de la carrera y del tiempo en que se ejecuta esta.



**Figura 8.** Resultados obtenidos de los ensayos de la Tabla 1 para carrera máxima de la paleta constante, a la izquierda el perfil de las olas generadas y a la derecha las carreras de la paleta. Elaboración Propia

En la **Figura 8** (lado izquierdo) notamos que cuatro de los seis ensayos generaron amplitudes de ola muy parecidas solo tienen milímetros de diferencia, lo cual se puede explicar si observamos el lado derecho, las carreras generadas y sus tiempos de ejecución son prácticamente iguales en cinco de los seis ensayos. Esto lo podemos seguir analizando con

los datos de la **Tabla 2** donde se muestran los valores de carrera y velocidad generados en los ensayos mostrados en las dos figuras anteriores.

| <b>V<sub>máx</sub> = 160cm/s = 333,333 pasos/s</b> |              |                 | <b>S<sub>máx</sub> = 67cm = 139,900pasos</b> |              |                 |
|--|--------------|-----------------|--|--------------|-----------------|
| <b>S (cm)</b>                                      | <b>t (s)</b> | <b>V (cm/s)</b> | <b>S (cm)</b>                                | <b>t (s)</b> | <b>V (cm/s)</b> |
| 64   | 2.2          | 29              | 65   | 2.5          | 26              |
| 48   | 2.0          | 24              | 64   | 2.5          | 26              |
| 39   | 2.0          | 20              | 65   | 2.7          | 24              |
| 29   | 1.5          | 19              | 65   | 2.3          | 28              |
| 19   | 1.4          | 14              | 65   | 2.8          | 23              |
| 10   | 0.9          | 11              | 65   | 3.4          | 19              |

*Tabla 2. Datos generados de carrera y velocidad de los ensayos con los datos de la Tabla 1. Elaboración Propia*

Si analizamos de izquierda a derecha los datos de la **Tabla 2**; recordando que tenemos dos tandas de seis ensayos cada una, vemos lo siguiente:

- La carrera generada es un poco menor a la ingresada con un error de 1cm en cinco de seis ensayos.
- La velocidad generada no se mantiene constante como fue ingresada de 160cm/s si no que va disminuyendo al disminuir la carrera lo cual no concuerda con lo ingresado.
- Se cumple la carrera constante en los ensayos con un error de 2cm en cinco de los seis.
- Las velocidades en cinco de seis ensayos son muy parecidas lo que genera que los datos de la **Figura 8** (lado derecho) presenten ese comportamiento; solo el último ensayo disminuye su velocidad, pero ninguna de las seis es la ingresada lo que nos vuelve a demostrar que de alguna manera no se están alcanzando las velocidades que se ingresan.

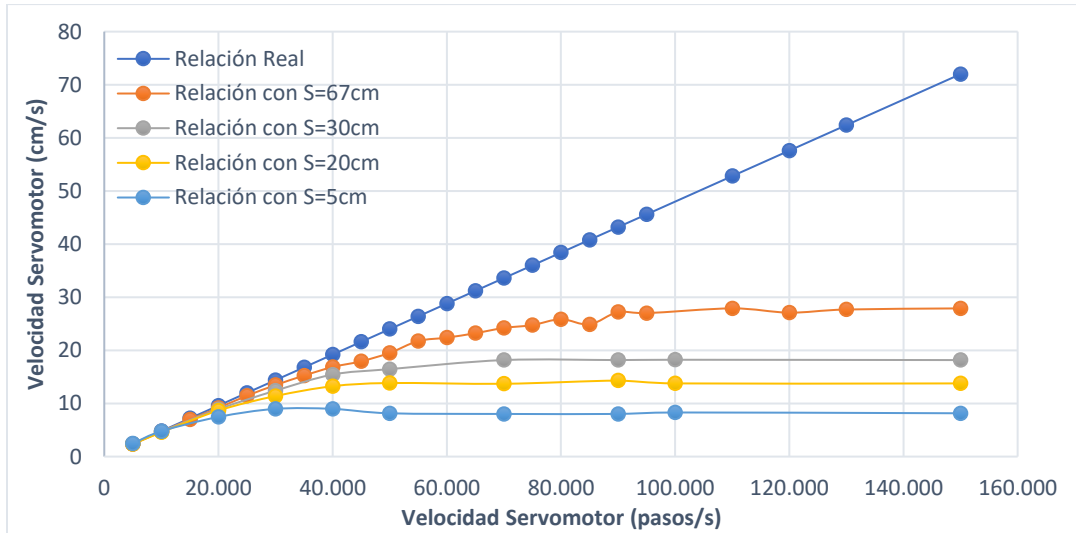
En el comportamiento de los datos con respecto a la carrera, notamos que, se cumple que los valores de carrera ingresados coinciden con lo que se está generando, pero con ciertos errores de centímetros, que tampoco son muy grandes, teniendo en consideración el ruido que pueden generar los sensores, el cual puede hacer variar los datos hasta en 10mm. En relación a la velocidad tenemos que los datos elegidos (**Tabla 1**) en unidades de pasos/s están generando la misma velocidad desde los 83,333pasos/s hacia arriba, esto nos podría estar indicando que existe una velocidad limitada a la que puede llegar el servomotor. Para seguir analizando el tema de la velocidad es que se realizaron la siguiente tanda de ensayos.

En la **Tabla 3** tenemos los datos utilizados de velocidad para corroborar el cumplimiento de la relación de conversión de velocidad del servomotor con el Windproladder. Se ensayaron cuatro distintas carreras; dos de ellas con un movimiento de ola solitaria y las otras dos con un movimiento de ola regular, esto con el fin de conocer si el comportamiento de la velocidad depende del tipo de ola a generar o es independiente de si se genera una ola solitaria o una ola regular.

| h = 30 cm        |            |
|------------------|------------|
| S = 67-30-20-5cm |            |
| V(cm/s)          | V(pasos/s) |
| 144              | 300,000    |
| 96               | 200,000    |
| 72               | 150,000    |
| 48               | 100,000    |
| 43.2             | 90,000     |
| 33.6             | 70,000     |
| 24               | 50,000     |
| 19.2             | 40,000     |
| 14.4             | 30,000     |
| 9.6              | 20,000     |
| 4.8              | 10,000     |
| 2.4              | 5,000      |

**Tabla 3.** Datos de velocidad usados para conocer el comportamiento de la velocidad del servomotor. Elaboración Propia

Los datos de la **Tabla 3** fueron ensayados para cada carrera, desde la velocidad más pequeña hasta la máxima, con el fin de conocer si se cumple la velocidad que se está ingresando al Windproladder. Los valores obtenidos se muestran en el **Gráfico 3** donde, se grafica la relación de la conversión de la velocidad de unidades de cm/s a pasos/s.



**Gráfico 3.** Datos obtenidos para la verificación de la velocidad del servomotor. Elaboración Propia

Los datos mostrados en el **Gráfico 3** muestran la relación de conversión de la velocidad en las unidades de cm/s y pasos/s (Relación Esperada), luego las dos carreras ensayadas con un movimiento de ola solitaria (Relación con S=67cm y S=30cm) y finalmente, las dos carreras ensayadas con un movimiento de ola regular (Relación con S=20cm y S=5cm).

En el gráfico se presentan los valores ensayados solo hasta la velocidad de 150,000pasos/s en vez de llegar al valor máximo mostrada en la **Tabla 3** de 300,000pasos/s, esto se explica a continuación. Al realizar los ensayos con  $S=67\text{cm}$  constante y varias velocidades desde la mínima en adelante, notamos que ni siquiera debemos llegar a valores muy altos de velocidad para que esta se salga del comportamiento esperado pues al realizar este mismo ensayo con carreras más pequeñas notamos que siguen el mismo comportamiento de la carrera antes mencionada, resumiéndose en que, mientras menor sea la carrera, se necesitará menos velocidad para perder el comportamiento esperado y volverse constante.

Notamos también que el comportamiento que sigue la velocidad es independiente de cómo se mueva la paleta (ola solitaria u ola regular) es por esto que este análisis de las cuatro carreras la podemos extender tanto a los ensayos de ola solitaria como a los de ola regular. Los valores obtenidos de velocidad máxima o constante asociada a cada carrera ensayada se resumen en la **Tabla 4**.

| S(cm) | Vmáx(cm/s) | V(pasos/s) |
|-------|------------|------------|
| 66.8  | 27.9       | 131,332    |
| 29.9  | 18.2       | 90,450     |
| 19.7  | 13.8       | 71,905     |
| 5.3   | 8.3        | 48,724     |

**Tabla 4.** Velocidad máxima obtenida para cada Carrera. Elaboración Propia

Con los resultados mostrados en la **Tabla 4** podemos tener un valor aproximado en unidades de pasos/s desde donde empieza a volverse constante cada velocidad asociada a cada carrera, lo cual nos ayuda a entender el comportamiento que estábamos viendo en la **Tabla 2** para los ensayos con  $S=67\text{cm}$ , que nos mostraba que, desde los 83,333pasos/s, la velocidad era la misma. El no cumplimiento de la velocidad puede ser debido al límite de carrera máxima que tiene como condición de borde la paleta, no importa que uno le ingrese la velocidad máxima del servomotor, esta nunca va a poder desarrollarse por completo ya que no tiene la distancia necesaria que permita alcanzar esta velocidad, dado que, el servomotor antes de poder desarrollar toda esa velocidad ya tiene que comenzar su proceso de frenado. Este comportamiento nos estaría limitando la generación de ondas a una velocidad máxima para cada carrera, la cual es mayor mientras mayor sea la carrera; sin embargo, del análisis realizado en las **Figuras 7 y 8** (lado izquierdo) notamos que lo que más influye en la amplitud de ola a generar, es el cambio en la carrera de la paleta.

Sabemos que, por el análisis del **Gráfico 3**, cada carrera tiene asociado una curva de comportamiento para la velocidad, por lo que, si quisiéramos ensayar una carrera con una velocidad que no sea su máxima asociada tendríamos que guiarnos por esta curva, pero en caso de no usar la carrera máxima ( $S=67\text{cm}$ ) no obtendremos velocidades lo suficientemente grandes para generar amplitudes de ola relevantes, esto considerando que ya a  $S\leq 30\text{cm}$  se generan  $A\leq 5\text{cm}$ . Es por esto, que cada carrera está asociada a prácticamente una sola

velocidad ( $V_{\text{máx}}$  de **Tabla 4**) y con ella podremos estar seguros de que se generará una amplitud de ola relevante.

### Ensayos Ola Solitaria

Con el fin de saber que amplitudes de ola solitaria se podrán generar en el canal de olas de la UCSC y comprobar si se logrará generar la máxima planteada con la teoría de Goring (1978), es que se realizaron 24 ensayos con un movimiento ola solitaria, con cuatro velocidades distintas y para cada una de ellas seis carreras, a una profundidad de 30cm. Los datos se muestran en la **Tabla 5**.

| h = 30 cm          |          |
|--------------------|----------|
| V=160-48-38-29cm/s |          |
| S(cm)              | S(pasos) |
| 66                 | 137,500  |
| 50                 | 104,167  |
| 40                 | 83,333   |
| 30                 | 62,500   |
| 20                 | 41,667   |
| 10                 | 20,833   |

**Tabla 5.** Datos de carrera y velocidad para ensayos de ola solitaria. Elaboración Propia

De las cuatro velocidades ensayadas, la mínima es 29cm/s que en unidades del Winproladder corresponden a 60,000pasos/s, y, según el análisis realizado en la sección anterior sabemos que a carreras bajas a esta velocidad ya alcanzaron su velocidad constante, pero para carreras mayores puede que se genere más de una velocidad. Los datos obtenidos de los ensayos de la **Tabla 5** se muestran en la **Tabla 6**.

|           | S (cm) | t (s) | V (cm/s) | H (cm) | T (s) |
|-----------|--------|-------|----------|--------|-------|
| V=160cm/s | 66     | 2.4   | 27.5     | 11.3   | 3.17  |
|           | 49     | 2.03  | 24.1     | 8.6    | 3.11  |
|           | 39.2   | 1.85  | 21.2     | 7.4    | 1.85  |
|           | 29.2   | 1.66  | 17.6     | 5.8    | 1.98  |
|           | 19.3   | 1.31  | 14.7     | 4.3    | 2.07  |
|           | 9.6    | 0.86  | 11.2     | 2      | 1.7   |
| V=48cm/s  | 66.0   | 2.38  | 27.7     | 11.2   | 2.79  |
|           | 49.0   | 2.03  | 24.1     | 8.7    | 2.69  |
|           | 39.3   | 1.8   | 21.8     | 7.4    | 1.37  |
|           | 29.2   | 1.57  | 18.6     | 6.0    | 1.85  |
|           | 19.9   | 1.34  | 14.9     | 4.3    | 2.08  |
|           | 9.9    | 0.88  | 11.3     | 2.4    | 1.8   |
| V=38cm/s  | 66.1   | 2.67  | 24.8     | 9      | 2.45  |
|           | 48.7   | 2.05  | 23.8     | 8      | 2.57  |
|           | 39.3   | 1.88  | 20.9     | 7.3    | 1.61  |
|           | 29.3   | 1.59  | 18.4     | 6      | 1.45  |
|           | 19.4   | 1.32  | 14.7     | 4.3    | 1.66  |
|           | 9.8    | 0.88  | 11.1     | 2.2    | 1.4   |
| V=29cm/s  | 66.1   | 2.93  | 22.6     | 8      | 2.31  |
|           | 48.9   | 2.2   | 22.2     | 7.2    | 1.18  |
|           | 38.8   | 1.87  | 20.7     | 6.6    | 2.09  |
|           | 29.5   | 1.59  | 18.6     | 5.9    | 1.5   |
|           | 19.3   | 1.31  | 14.7     | 4.4    | 1.53  |
|           | 9.9    | 0.87  | 11.4     | 2.2    | 1.64  |

Tabla 6. Datos obtenidos de ensayos de ola solitaria de la Tabla 5. Elaboración Propia

La **Tabla 6** muestra las mediciones obtenidas de carrera y velocidad generada en los ensayos, junto con los valores de amplitud de ola y su periodo, si analizamos estos valores tenemos que, primeramente, todas las amplitudes de ola generadas están en un rango de altura relativa baja ( $0.07 < H/h < 0.4$ ), al ver las velocidades generadas notamos que estas cumplen el comportamiento que analizamos anteriormente con el **Gráfico 3** y la **Tabla 4**, solo para el caso de  $S > 39\text{cm}$  en las últimas dos velocidades de la **Tabla 6** se ve que tienen una velocidad menor que la máxima asociada a su carrera (ver **Tabla 4**), esto se debe a que mientras mayor es la carrera de la paleta (ver **Gráfico 3**) más velocidades se pueden generar antes de que esta se vuelva constante. Por lo que, para estas carreras, en los ensayos con velocidades entre 60,000 y 80,000pasos/s aún no se alcanzaba la velocidad máxima asociada a su respectiva carrera. Por esta razón de las cuatro velocidades generadas en los ensayos (ver **Tabla 6**) solo las primeras dos corresponden a la velocidad máxima (constante) de cada carrera y las dos últimas son velocidades menores asociadas a la curva del comportamiento registrado en el **Gráfico 3** para cada carrera. Adicionalmente, si miramos las amplitudes generadas, notamos

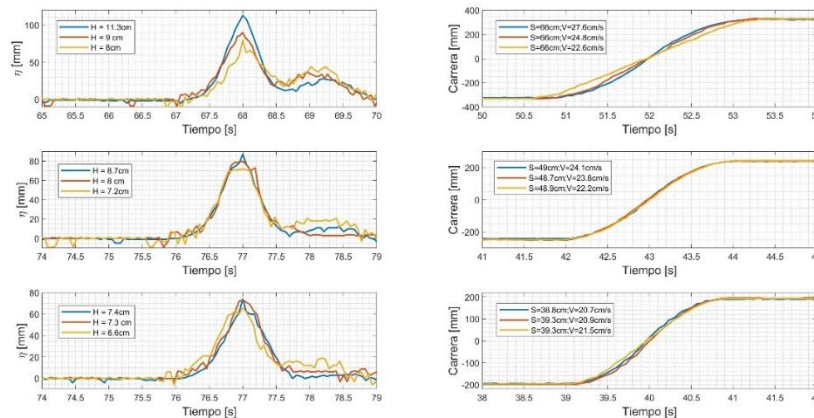
que, para la misma carrera, si disminuimos la velocidad, también disminuye la amplitud de ola que se puede generar.

En relación al periodo, este se estimó observando la elevación de la superficie por lo que su valor no es exacto. En la **Tabla 6** al ser algunos valores iguales podemos disminuir la cantidad de datos, estos se presentan en la **Tabla 7**.

| S(cm) | V(cm/s) | H(cm) | T(s) |
|-------|---------|-------|------|
| 66.0  | 27.6    | 11.3  | 3.0  |
| 66.1  | 24.8    | 9.0   | 2.5  |
| 66.1  | 22.6    | 8.0   | 2.3  |
| 49.0  | 24.1    | 8.7   | 2.9  |
| 48.7  | 23.8    | 8.0   | 2.6  |
| 48.9  | 22.2    | 7.2   | 1.2  |
| 39.3  | 21.5    | 7.4   | 1.6  |
| 39.3  | 20.9    | 7.3   | 1.6  |
| 38.8  | 20.7    | 6.6   | 2.1  |
| 29.3  | 18.3    | 5.9   | 1.7  |
| 19.5  | 14.8    | 4.3   | 1.8  |
| 9.8   | 11.2    | 2.2   | 1.6  |

*Tabla 7. Datos reducidos de la Tabla 7. Elaboración Propia*

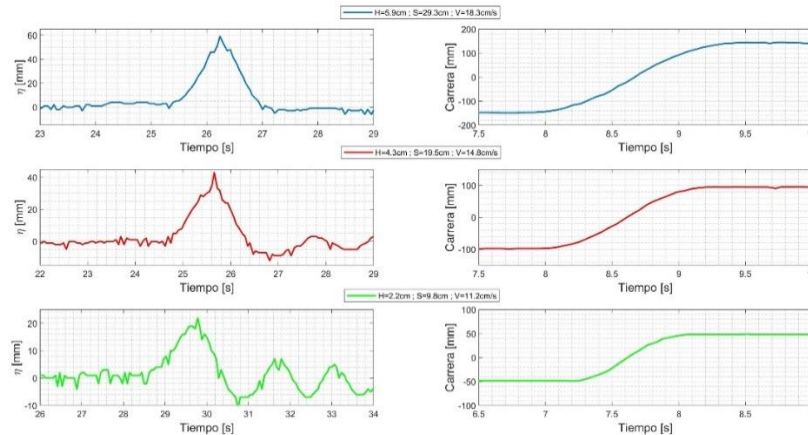
Los datos de la **Tabla 7** se grafican en las figuras a continuación, para analizar de mejor manera lo obtenido, en la **Figura 9** se muestran los datos de la **Tabla 7** para  $S \geq 38.8\text{cm}$  y en la **Figura 10** los  $S < 38.8\text{cm}$ .



*Figura 9. Datos de amplitud y carrera de la paleta para  $S \geq 38.8\text{cm}$  de la Tabla 7. Elaboración Propia*

En la **Figura 9** tenemos al lado izquierdo los perfiles de ola obtenidos, si analizamos estos perfiles, notamos que para el caso de  $S=66\text{cm}$  existe una mayor diferencia en las amplitudes de ola generadas a comparación de las otras dos carreras mostradas, lo cual está directamente ligado con las diferencias de velocidades que se obtuvieron, ya que si miramos el lado

derecho de la **Figura 9**, notamos que, para este mismo caso, se aprecia que las tres velocidades varían en 3cm aproximadamente, a diferencia de las otras dos carreras que sus velocidades varían en menos de 1cm, provocando que las curvas de carrera de la paleta esten exactamente una encima de la otra.



**Figura 10.** Datos de amplitud y carrera de la paleta para  $S < 38.8\text{cm}$  de la Tabla 7. Elaboración Propia

En la **Figura 10** podemos notar que, a diferencia de las carreras mostradas en la **Figura 9** estas generaron solo una amplitud de ola en las cuatro velocidades ensayadas, ya que, las cuatro correspondían a su máxima velocidad asociada (ver **Tabla 4**). Se sigue cumpliendo el hecho de que a menor carrera menores amplitudes de ola se pueden generar.

Con respecto al periodo de las olas de la **Tabla 7**, notamos que este, varía de 1s a máximo 3s, donde el valor de 3s se genera en las amplitudes mayores, debido a la poca variación del periodo de la ola no se hace relevante analizar este, ya que no se obtienen grandes diferencias.

Si comparamos las amplitudes mostradas en la **Tabla 7** con la teoría planteada en la metodología, podemos obtener de manera teórica la carrera y velocidad necesaria para generar tal amplitud de ola, esto se obtiene sustituyendo el valor de la amplitud de la ola y la profundidad a la cual se genera en la **Ec (9)** obteniendo el valor de carrera teórico, para la velocidad teórica debemos derivar la **Ec (8)** y sustituir los mismos valores mencionados anteriormente.

Debido a que distintos autores han ocupado la metodología de Goring (1978) pero variando ciertos factores para lograr llegar a la que encaje mejor con los ensayos, por ejemplo, Guizien y Barthelemy (2002) ocuparon la metodología para generar ondas solitarias de tipo Boussinesq y Rayleigh encontrando que las ondas tipo Rayleigh encajaban mejor, Madsen (2008) demostró que las ondas solitarias no son adecuadas para simular tsunamis por lo que Madsen y Schaffer (2010) sugirieron un cambio de esta onda por ondas simples donde se define  $k = \Omega/c$ ,  $\Omega = 2\pi/T$ , T es el periodo de la onda y la velocidad de fase queda definida como  $c = \sqrt{g(h + H)}$ , con estos cambios la carrera puede seguir siendo calculada con la **Ec (9)**.

En la **Tabla 8** mostramos los valores obtenidos de los ensayos y los asociados a la teoría de Goring (1978) y Madsen y Schaffer (2010).

| Ensayos |         |       | Goring (1978) |         | Madsen y Schaffer (2010) |       |
|---------|---------|-------|---------------|---------|--------------------------|-------|
| S(cm)   | V(cm/s) | H(cm) | S(cm)         | V(cm/s) | K                        | S(cm) |
| 66.0    | 27.6    | 11.3  | 42.4          | 55.1    | 0.012                    | 65.4  |
| 49.0    | 24.1    | 8.7   | 37.2          | 43.8    | 0.011                    | 51.8  |
| 39.3    | 21.5    | 7.4   | 34.3          | 37.9    | 0.012                    | 40.6  |
| 29.3    | 18.3    | 5.9   | 30.8          | 30.8    | 0.013                    | 29.8  |
| 19.5    | 14.8    | 4.3   | 26.3          | 21.0    | 0.014                    | 21.1  |
| 9.8     | 11.2    | 2.2   | 18.8          | 12.1    | 0.015                    | 10.0  |

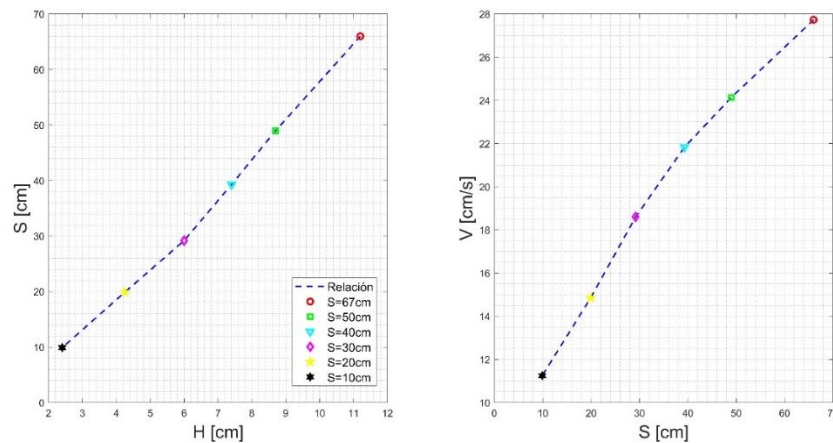
**Tabla 8.** Datos de carrera y velocidad teóricos para las amplitudes de la Tabla 7. Elaboración Propia

Al analizar los datos de la **Tabla 8** notamos que los valores de carrera y velocidad asociados a la teoría de Goring (1978) difieren mucho de cómo se generaron esas amplitudes en los ensayos, básicamente ninguna concuerda con la teoría. Con respecto a Madsen y Schaffer (2010) notamos que estos son más cercanos a los valores obtenidos en los ensayos respecto a la carrera de la paleta, por lo que las ondas generadas en estos ensayos responderían más a lo planteado por Madsen y Schaffer en el 2010. Ellos sugieren un cambio en el uso de ola solitaria por ondas simples para describir tsunamis, el perfil de la onda simple se define como:

$$\eta(x_0, t) = H \operatorname{sech}^2(\Omega(t - t_1)) \dots \dots Ec(11)$$

Donde H es la altura de la onda,  $\Omega = 2\pi/T$  define la duración efectiva de la onda y  $t_1$  es el desfase de la onda, que puede elegirse arbitrariamente.

Finalmente, las olas para simular tsunamis que se podrán realizar en el canal están limitadas a las carreras que se pueden generar y su respectiva velocidad, como se muestra en la **Figura 11**.



**Figura 11.** Olas tipo Tsunamis que se pueden generar en el canal. a la derecha la relación entre la altura de ola v/s la carrera, a la izquierda la carrera v/s su respectiva velocidad, en colores todas las carreras ensayadas. Elaboración Propia

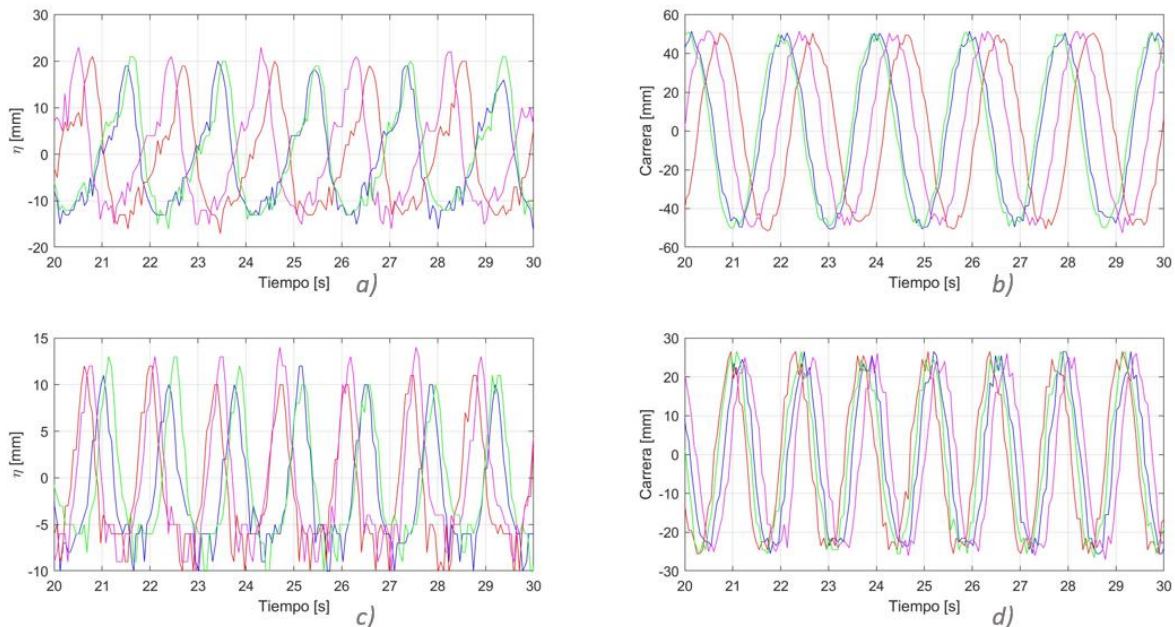
## Ensayos Ola Regular

Los ensayos de ola regular son con el fin de probar si en el canal de la UCSC se pueden generar este tipo de olas y que forma tendrán, para este caso se decidió probar distintas profundidades (limitadas a las condiciones del canal) con el fin de obtener distintas ondas para futuros estudios. Se realizaron un total de 80 ensayos, con cuatro profundidades distintas, cuatro velocidades y cinco carreras. Los datos utilizados se muestran en la **Tabla 9**

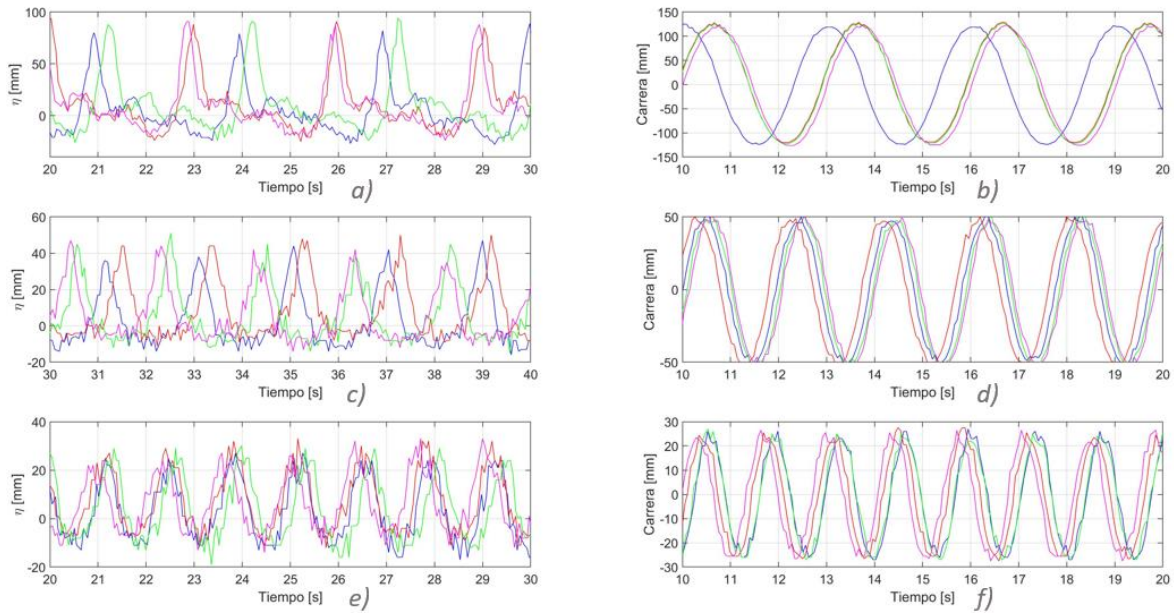
| h=10-20-30-40cm    |          |
|--------------------|----------|
| V=160-48-38-29cm/s |          |
| S(cm)              | S(pasos) |
| 45                 | 93,75    |
| 30                 | 62,5     |
| 25                 | 52,083   |
| 10                 | 20,833   |
| 5                  | 10,417   |

**Tabla 9.** Datos de carrera, velocidad y profundidad para ensayos de ola regular. Elaboración Propia

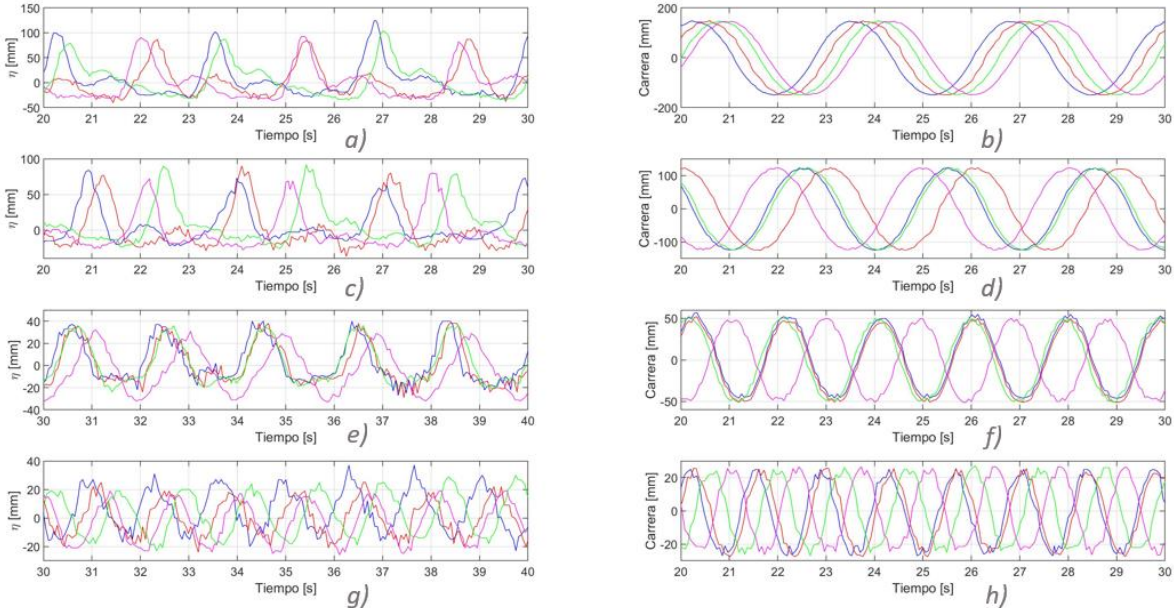
Los resultados obtenidos de los ensayos de la **Tabla 9** se muestran en las **Figuras** de la **12** a la **15** para las profundidades de 10cm, 20cm, 30cm y 40cm respectivamente.



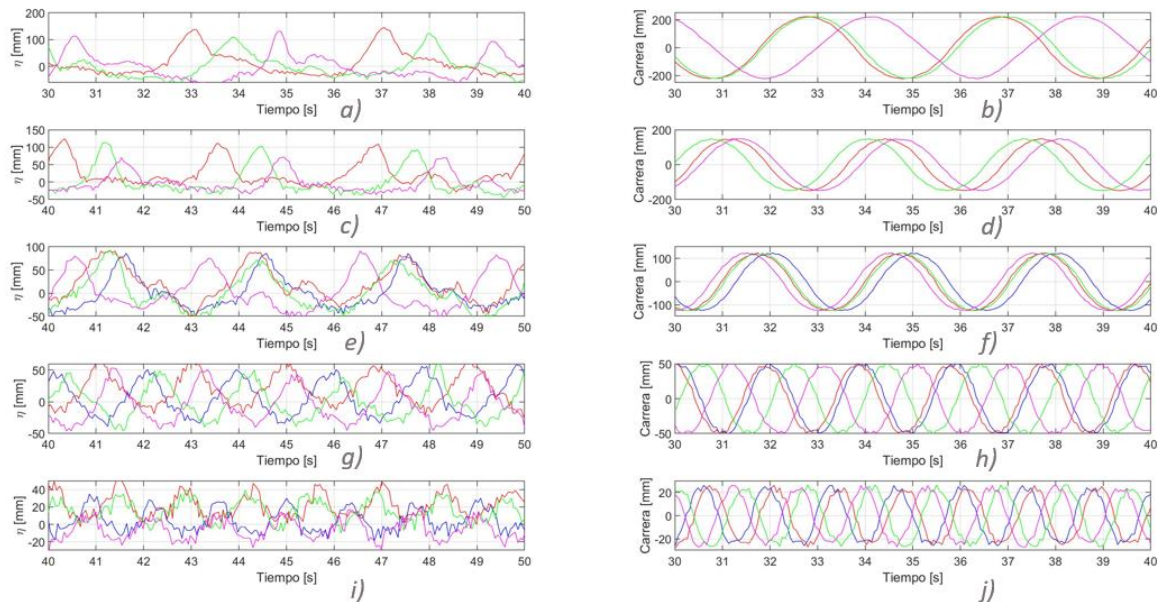
**Figura 12.** Datos obtenidos de ensayos ola regular para  $h = 10\text{cm}$ , los colores (azul, rojo, verde y rosa) representan las cuatro velocidades ensayadas, a) serie de tiempo para  $S=10\text{cm}$ , b) movimiento de la paleta para  $S=10\text{cm}$ , c) serie de tiempo para  $S=5\text{cm}$ , d) movimiento de la paleta para  $S=5\text{cm}$ . Elaboración Propia



**Figura 13.** Datos obtenidos de ensayos ola regular para  $h = 20\text{cm}$ , los colores (azul, rojo, verde y rosa) representan las cuatro velocidades ensayadas, a) serie de tiempo para  $S=25\text{cm}$ , b) movimiento de la paleta para  $S=25\text{cm}$ , c) serie de tiempo para  $S=10\text{cm}$ , d) movimiento de la paleta para  $S=10\text{cm}$ , e) serie de tiempo para  $S=5\text{cm}$ , f) movimiento de la paleta para  $S=5\text{cm}$ . Elaboración Propia



**Figura 14.** Datos obtenidos de ensayos ola regular para  $h = 30\text{cm}$ , los colores (azul, rojo, verde y rosa) representan las cuatro velocidades ensayadas, a) serie de tiempo para  $S=30\text{cm}$ , b) movimiento de la paleta para  $S=30\text{cm}$ , c) serie de tiempo para  $S=25\text{cm}$ , d) movimiento de la paleta para  $S=25\text{cm}$ , e) serie de tiempo para  $S=10\text{cm}$ , f) movimiento de la paleta para  $S=10\text{cm}$ , g) serie de tiempo para  $S=5\text{cm}$ , h) movimiento de la paleta para  $S=5\text{cm}$ . Elaboración Propia



**Figura 15.** Datos obtenidos de ensayos ola regular para  $h = 40\text{cm}$  los colores (azul, rojo, verde y rosa) representan las cuatro velocidades ensayadas, a) serie de tiempo para  $S=45\text{cm}$ , b) movimiento de la paleta para  $S=45\text{cm}$ , c) serie de tiempo para  $S=30\text{cm}$ , d) movimiento de la paleta para  $S=30\text{cm}$ , e) serie de tiempo para  $S=25\text{cm}$ , f) movimiento de la paleta para  $S=25\text{cm}$ , g) serie de tiempo para  $S=10\text{cm}$ , h) movimiento de la paleta para  $S=10\text{cm}$ , i) serie de tiempo para  $S=5\text{cm}$ , j) movimiento de la paleta para  $S=5\text{cm}$ . Elaboración Propia

Lo primero que podemos notar es que en las figuras anteriores no se presentan todos los datos que se dijeron que se ensayarían en la **Tabla 9**, esto se debe a una de las condiciones que debe cumplir la generación de olas regulares en el laboratorio, el criterio de rotura, ya que para cada una de las profundidades ensayadas a cierta carrera las olas generadas sobrepasaban el valor límite de rotura ( $H/L < 1/8$ , Miche 1944), es por esto que no se ensayaron todas las carreras establecidas a las distintas profundidades.

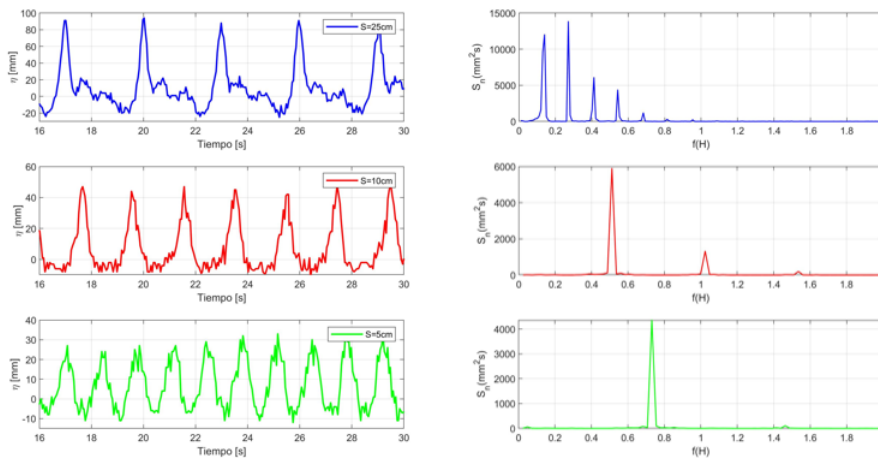
Como ya se ha explicado anteriormente la paleta está centrada a la mitad de su carrera máxima y el movimiento ola regular al permitir solo mover la paleta de atrás hacia adelante limita su movimiento a máximo la mitad de la carrera máxima establecida (33.5cm). Cabe destacar que en la profundidad de 40cm se realizaron ensayos con una carrera mayor a ésta, ya que manualmente se puede mover la posición de la paleta, aunque esto no es recomendable ya que el motor se bloquee generando un movimiento abrupto, que no tiene relación alguna, con la instrucción ingresada.

Recordando que el comportamiento analizado en el **Gráfico 3** lo podemos extender a olas solitarias y regulares, notamos que la mayor cantidad de los datos de las figuras siguen este comportamiento, que a pesar de ingresar cuatro velocidades distintas la carrera tiene asociada una velocidad máxima constante (ver **Tabla 4**), y al igual que en los ensayos anteriores en los casos donde no se cumple, esto puede asociarse a errores de ruido en las mediciones que generan variaciones de los datos de hasta 10mm.

El valor de  $H$  mostrado en las **Figuras 12 a la 15** representan la altura total de la ola generada y el valor máximo que se generó a la profundidad  $h=10\text{cm}$  (**Tabla 10**) son  $3.5\text{cm}$ , no se seguirán tomando en cuenta estos datos para análisis posteriores, ya que al ser muy pequeños no ayudarían a representar a una muy buena escala los fenómenos que ocurren en la realidad.

A pesar de haber ensayado cuatro distintas velocidades, sabemos por el análisis del **Gráfico 3**, que cada una de las carreras de las **Figuras 12 a la 15**, tienen asociada una única velocidad, por lo que, si miramos las alturas de ola, vemos que estas son casi idénticas cuando se ocupó la misma carrera, por lo cual, sus series de tiempo son prácticamente iguales. Es por esto, que se analizará solo una serie de tiempo para cada carrera, la que será representativa de las demás.

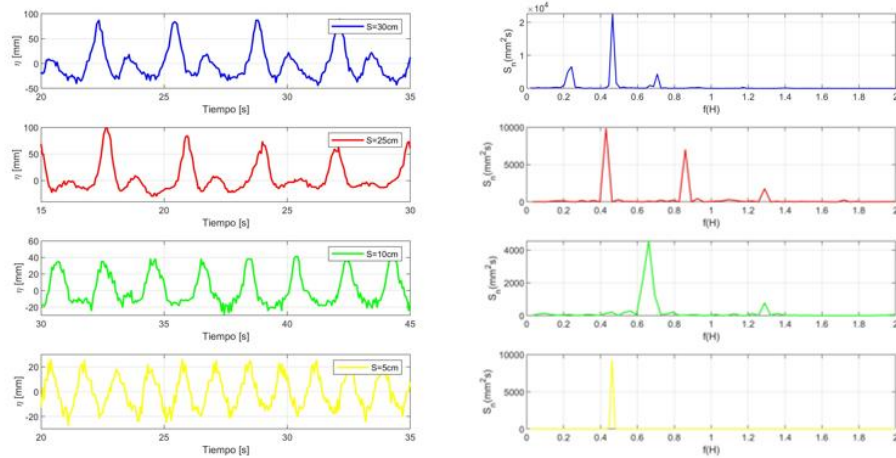
En la **Figura 16** se muestran las series de tiempo y sus respectivos espectros para los ensayos asociados a la profundidad  $h=20\text{cm}$ .



**Figura 16.** Datos de ensayo para  $h=20\text{cm}$ , a la derecha las series de tiempo y a la izquierda sus respectivos espectros.  
 Elaboración Propia

De los espectros mostrados en la **Figura 16** podemos notar que el asociado a  $S=25\text{cm}$  presenta un comportamiento multimodal, a diferencia de los otros dos, que tienen un solo picos asociado, esto se puede explicar si miramos las series de tiempo de la figura, donde en la carrera  $S=25\text{cm}$  se observa, que la ola viene arrastrando otra un poco más pequeña, por lo que, con esta carrera a esta profundidad tendremos siempre este comportamiento, a no ser que se ocupe disipación activa para eliminar esa ola producto de la reflexión en la paleta. Para los perfiles asociados a  $S=10$  y  $5\text{cm}$ , esto no es tan marcado, lo que hace que sus espectros sean unimodales. Las series de tiempo mantienen un comportamiento regular en todo el tiempo del ensayo.

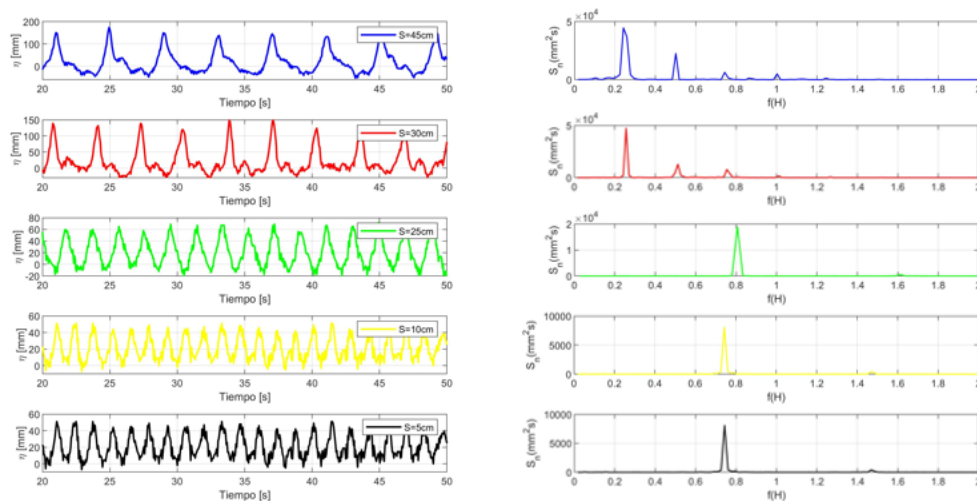
En la **Figura 17** pasamos a mostrar las series de tiempo y sus respectivos espectros para los ensayos asociados a la profundidad  $h=30\text{cm}$ .



**Figura 17.** Datos de ensayo para  $h=30\text{cm}$  s, a la derecha las series de tiempo y a la izquierda sus respectivos espectros.  
 Elaboración Propia

En la **Figura 17** podemos observar que, tanto los espectros como las series de tiempo, responden al mismo comportamiento de la **Figura 16**, donde para  $S \geq 25\text{cm}$  tenemos un espectro multimodal, ya que la ola generada va acompañada de una más pequeña y para  $S < 25\text{cm}$  esto no es tan marcado lo que se corrobora con los espectros unimodales. Notamos que para  $S \geq 25\text{cm}$  las series de tiempo varían un poco su altura de ola a lo largo del ensayo.

La **Figura 15** a diferencia de las anteriores nos entrega algunos valores no tan parecidos para cada carrera, esto es debido a que a la profundidad de  $h=40\text{cm}$  se ensayaron carreras mayores, por lo que, recordando el comportamiento del **Gráfico 3** se está generando más de una velocidad para algunas carreras. En la **Figura 18** pasamos a graficar las series de tiempo y espectros de los ensayos a esta profundidad.



**Figura 18.** Datos de los ensayos a  $h=40\text{cm}$ , a la derecha las series de tiempo y a la izquierda sus respectivos espectros.  
 Elaboración Propia

La **Figura 18** nos muestra a diferencia de las anteriores que los espectros tienden a ser multimodales en  $S \geq 30\text{cm}$  y las series de tiempo a partir de esas carreras no mantienen de buena manera siempre la misma altura de ola en todo el tiempo del ensayo.

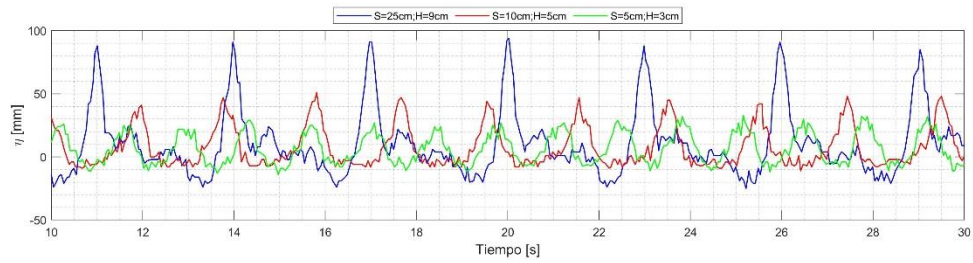
Del análisis de las **Figuras 16** a la **18** podemos destacar que, a mayor profundidad se pueden usar carreras más grandes y estas entregarán olas regulares, a diferencia de si uso esa carrera grande en una profundidad menor, donde se generará una ola con ondas de arrastre más pequeñas, debido a la reflexión en la paleta.

Finalmente, con el análisis anterior se decide que, de todas las carreras ensayadas nos quedaremos con las  $S < 25\text{cm}$ , debido a que son las que muestran un comportamiento más regular, los datos para  $S = 25\text{cm}$  también se considerarán, ya que para la profundidad  $h = 40\text{cm}$ , esta carrera si presenta olas regulares. Los datos a ocupar se muestran en la **Tabla 10**.

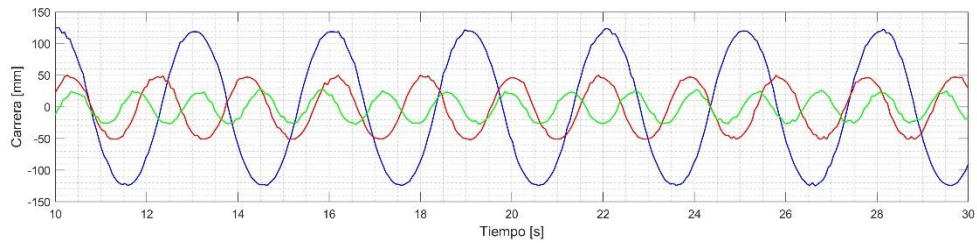
| <b>h = 20 cm</b> |                |               |             |
|------------------|----------------|---------------|-------------|
| <b>S(cm)</b>     | <b>V(cm/s)</b> | <b>H (cm)</b> | <b>T(s)</b> |
| 24.8             | 16.45          | 9.1           | 3.01        |
| 10.2             | 9.16           | 5.0           | 2.22        |
| 5.3              | 7.55           | 3.0           | 1.40        |
| <b>h = 30 cm</b> |                |               |             |
| <b>S(cm)</b>     | <b>V(cm/s)</b> | <b>H (cm)</b> | <b>T(s)</b> |
| 24.8             | 15.94          | 10.4          | 3.11        |
| 10.1             | 9.91           | 7.0           | 2.04        |
| 5.2              | 7.20           | 4.8           | 1.45        |
| <b>h = 40 cm</b> |                |               |             |
| <b>S(cm)</b>     | <b>V(cm/s)</b> | <b>H (cm)</b> | <b>T(s)</b> |
| 24.8             | 16.46          | 13.8          | 3.01        |
| 10.0             | 10.31          | 9.3           | 1.94        |
| 5.3              | 7.78           | 6.0           | 1.36        |

**Tabla 10.** Datos resumidos de las Tablas 11 a la 14. Elaboración Propia

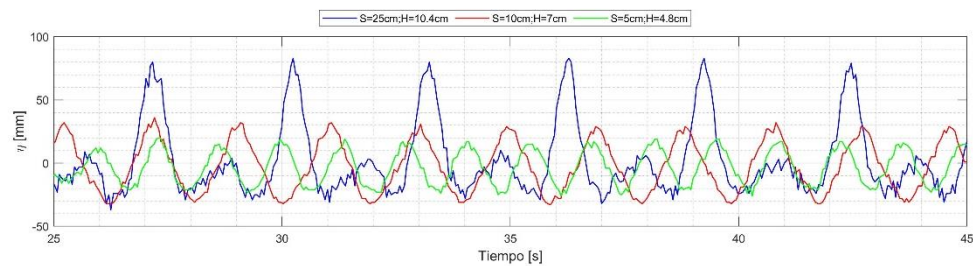
De manera gráfica se presentan los datos de la **Tabla 10** en las **Figuras 19** a la **21**, donde se presentan las series de tiempo y la carrera de la paleta asociada a cada una, los espectros de estas olas no se van a ser mostrados, pues ya fueron presentados en las figuras anteriores.



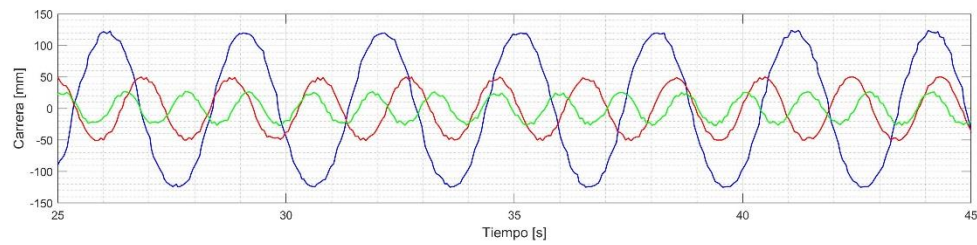
(a)



(b)

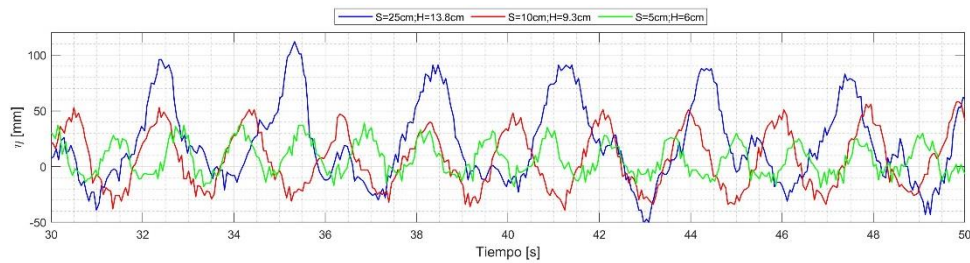
**Figura 19.** Datos de ensayos para  $h = 20\text{cm}$  (a) Perfil de olas generadas (b) carreras de la paleta. Elaboración Propia


(a)

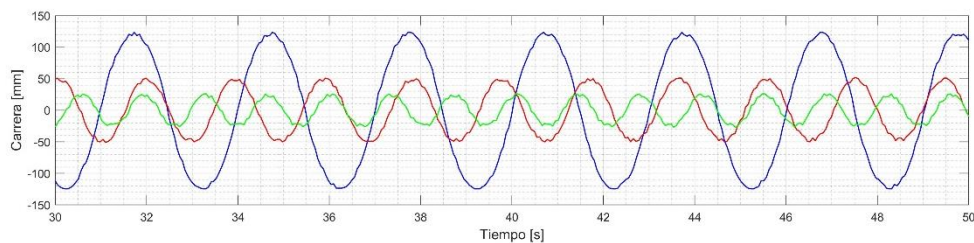


(b)

**Figura 20.** Datos de ensayos para  $h = 30\text{cm}$  (a) Perfil de olas generadas (b) carreras de la paleta. Elaboración Propia



(a)



(b)

**Figura 21.** Datos de ensayos para  $h = 40\text{cm}$  (a) Perfil de olas generadas (b) carreras de la paleta. *Elaboración Propia*

Al analizar las series de tiempo de las **Figuras 19** a la **21**, podemos notar que, estos no responden a lo que es el perfil de una ola regular de la teoría lineal de olas, donde la onda es mucho más simétrica y la altura total de la ola es igual a dos veces la amplitud, en este caso las ondas obtenidas responden mejor a la teoría de Stokes de segundo orden, con crestas más altas y senos más planos, éstas se asemejan mejor a olas de aguas intermedias. Si calculamos con los datos de la **Tabla 10** en que tipos de agua nos encontramos obtenemos que todos los ensayos (menos  $S=25\text{cm}$  para  $h=20\text{cm}$ ) se encuentran en aguas intermedias, lo cual nos ayuda a comprobar que las olas generadas se parecen más a las de Stokes ya mencionadas.

El hecho de que no se estén generando olas más regulares también puede deberse al tipo de disipación de energía ocupada, ya que, si se utilizara disipación activa, esta podría ayudar a reprogramar el movimiento de la paleta y generar ondas mucho más regulares.

Pasando a comparar los datos de la **Tabla 10** con la teoría Biéssel y Suquet (1951), tomamos los valores de la carrera ocupada y el periodo de la ola generado para obtener la amplitud de la ola teórica y compararla con la que se generó. Los datos obtenidos se muestran en la **Tabla 11**.

| h(cm) | ENSAYOS |         |        |      | Biésel y Suquet (1951) |         |      |      |
|-------|---------|---------|--------|------|------------------------|---------|------|------|
|       | S(cm)   | V(cm/s) | H (cm) | T(s) | H(cm)                  | V(cm/s) | V/V  | A/H  |
| 20    | 24.8    | 16.45   | 9.1    | 3.01 | 7.49                   | 16.42   | 100% | 103% |
| 20    | 10.2    | 9.16    | 5      | 2.22 | 4.21                   | 10.93   | 84%  | 102% |
| 20    | 5.3     | 7.55    | 3      | 1.4  | 3.61                   | 8.94    | 84%  | 80%  |
| 30    | 24.8    | 15.94   | 10.4   | 3.11 | 8.94                   | 16.42   | 97%  | 91%  |
| 30    | 10.1    | 9.91    | 7      | 2.04 | 5.71                   | 10.91   | 91%  | 82%  |
| 30    | 5.2     | 7.2     | 4.8    | 1.45 | 4.34                   | 8.92    | 81%  | 88%  |
| 40    | 24.8    | 16.46   | 13.8   | 3.01 | 10.76                  | 16.43   | 100% | 105% |
| 40    | 10      | 10.31   | 9.3    | 1.94 | 7.01                   | 10.87   | 95%  | 90%  |
| 40    | 5.3     | 7.78    | 6      | 1.36 | 5.64                   | 8.95    | 87%  | 89%  |

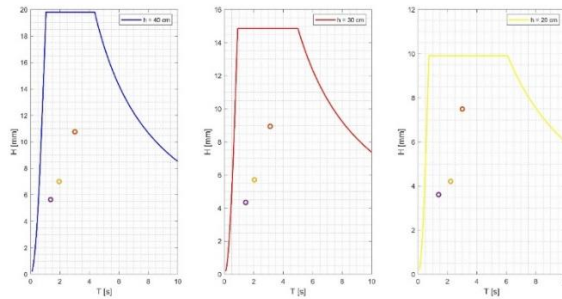
*Tabla 11. Comparación de los datos de la Tabla 14 con la teoría. Elaboración Propia*

En la **Tabla 11** tenemos que, reemplazando los valores de profundidad ensayada, carrera obtenida en los ensayos y el periodo de ola generada en la **Ec (10)**, obtenemos la amplitud de ola teórica que se generaría con esa carrera.

Al comparar la amplitud obtenida notamos que, es un poco menor a la altura total H de los ensayos, esto se debe a que el valor de H que nos entrega la **Ec (10)** corresponde a la amplitud de la ola que, en el caso ideal, será la mitad de su altura total. Para el caso de estos ensayos, las ondas generadas presentaron crestas altas y valles mucho más planos, provocando que la altura total sea un porcentaje mucho menor que el doble de la amplitud. Esto se observa en las **Figuras 19, 20 y 21**, donde la amplitud de la onda es más o menos parecida a la calculada de manera teórica.

Para el caso de la velocidad, la teoría sería el comportamiento mostrado en el **Gráfico 3** y la **Tabla 4**, donde si lo comparamos con los ensayos tenemos cierta variabilidad, pero no son tan relevantes teniendo en cuenta errores de ruido de los sensores, que pueden generar variaciones en los datos de hasta 10mm.

Como se dijo en la metodología, las olas regulares a generar en el canal a una profundidad determinada, deben cumplir que estén dentro de las curvas mostradas en el **Gráfico 2** para cada profundidad, por lo que, en la **Figura 22** se grafican los datos de la **Tabla 14** para corroborar si están dentro de su respectiva curva.

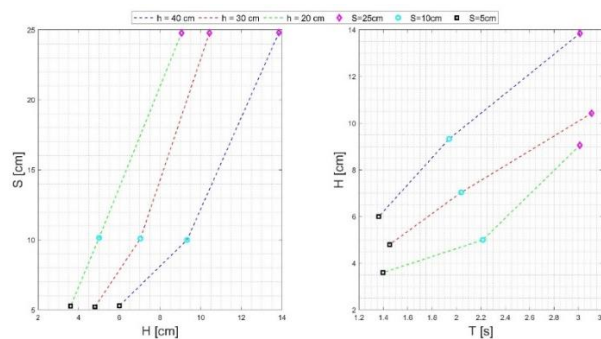


**Figura 22.** Curva de amplitudes máximas del Gráfico 2 donde los puntos de colores representan los datos de ola regular mostrados en la Tabla 15 para cada profundidad (rojo  $\rightarrow S=25\text{cm}$ , amarillo  $\rightarrow S=10\text{cm}$ , morado  $\rightarrow S=5\text{cm}$ ).  
 Elaboración Propia

En la **Figura 22**, podemos ver que las olas obtenidas de los ensayos para cada profundidad, están dentro de su respectiva curva de amplitudes máximas, por lo que, los ensayos estarían acordes con lo que dice la teoría.

Si comparamos las tres profundidades graficadas en la **Figura 22**, notamos que el mayor cambio se da en la amplitud de la ola generada, ya que el periodo de cada ola generada con una misma carrera, pero, a una profundidad distinta, es prácticamente el mismo. Esto se debe a que todos los ensayos se hicieron a la velocidad máxima asociada a cada carrera.

Finalmente, debido a las limitaciones del movimiento de la paleta, las olas que se podrán generar en el canal, estarán limitadas a la velocidad que está generando el servomotor y a la carrera máxima definida de 25cm para cualquiera de las profundidades ensayadas. El comportamiento de las olas se muestra en la **Figura 23**.



**Figura 23.** Olas regulares que se pueden generar en el canal. a la derecha la relación entre la altura de ola v/s la carrera, a la izquierda el periodo que se podrá generar v/s su altura de ola, en colores se presentan las distintas profundidades y las carreras ensayadas. Elaboración Propia

Como podemos observar en la **Figura 23**, solo se podrán generar las olas que respondan al comportamiento mostrado, las cuales entran en lo mencionado en la **Figura 22**, pero no son todas las que permite generar la teoría, esto debido a que no podemos variar la velocidad del servomotor, para una determinada carrera. Entonces, la ola que se generará dependerá únicamente de la carrera que se utilice.

#### 4. CONCLUSIÓN

En este trabajo se ha estudiado la generación de olas tipo tsunamis y olas regulares a escala en laboratorio, esto mediante el análisis de las limitaciones del canal de olas de la facultad de ingeniería de la UCSC, sumado a la configuración del programa Windproladder para la generación de estas olas. Se realizaron ensayos para comprobar el cumplimiento de las condiciones de movimiento de la paleta, ensayos para ola solitaria y ensayos para olas regulares. Las observaciones para cada uno de estos ensayos se fueron analizando a medida que se presentaban los resultados y finalmente de aquello podemos concluir lo siguiente:

1. En los ensayos para corroborar el cumplimiento de las condiciones asociadas al movimiento de la paleta, los resultados nos arrojaron una notable tendencia, los valores ingresados asociados a la carrera de la paleta, son acordes a lo medido con ciertos centímetros de error, y, con respecto a la velocidad, ésta no genera el comportamiento esperado según las especificaciones del servomotor.
2. El servomotor puede mover la paleta a una velocidad máxima de 160cm/s según sus especificaciones técnicas, pero, lo que se pudo medir en los ensayos muestra que no es posible llegar a esta velocidad, debido a la restricción en la carrera que posee la paleta, si esta pudiera desplazarse infinitamente podríamos llegar a esta velocidad, pero no es nuestro caso. Es por esto que la velocidad a la que se mueve la paleta está limitada por la carrera ingresada, a menor carrera, menor velocidad se podrá generar.
3. Sabemos que los ensayos de ola solitaria se hicieron a una profundidad constante de 30cm. En los 24 ensayos pudimos notar que, a pesar de ingresar una velocidad constante en cada tanda, esta no era la generada, ya que al igual que en el análisis de los ensayos anteriores, la velocidad depende de la carrera utilizada, por lo que, a pesar de haber realizado esta cantidad de ensayos, solo se generaron seis amplitudes de ola, donde al disminuir la carrera ingresada, disminuye la amplitud de ola que se puede generar.
4. Con respecto a la teoría de Goring (1978), las olas generadas en los ensayos no responden bien a lo que él plantea, pero si a la versión modificada por Madsen y Schaffer (2010), que ocuparon el mismo método de Goring (1978) pero cambiando la forma de calcular el factor 'k' y reemplazando el perfil de la ola solitaria por el de una onda simple.
5. Las olas tipo tsunamis que se podrán generar en el canal de olas, serán las que sigan el comportamiento mostrado en la **Figura 11**, donde para una profundidad de 30cm, la amplitud de la ola a generar, dependerá netamente de la carrera que se utilice.
6. De los ensayos realizados para olas regulares, se utilizaron cuatro profundidades distintas, con el fin de obtener cual sería la diferencia entre las olas generadas. De los 80 ensayos, se apreció el mismo comportamiento que se observó con respecto a la velocidad, es por esto que, a pesar de haber realizado esta cantidad de ensayos, solo se generó una serie de tiempo asociada a cada carrera (5 series), dándose el mismo

caso que para ola solitaria, donde al disminuir la carrera, se disminuye la altura de ola que se puede generar.

7. Las series de tiempo generadas mostraban que, a una profundidad mayor, se pueden generar olas más regulares con carreras más grandes, por otro lado, en profundidades menores esa misma carrera no genera una ola muy regular. Esto no se podrá cambiar, a no ser que, se ocupe disipación activa para eliminar la pequeña ola que se genera por la reflexión en la paleta.
8. Los datos obtenidos de los ensayos para ola regular, se ajustan relativamente bien a la teoría de Biéssel y Suquet (1951), generando amplitudes de ola muy parecidas con las condiciones de carrera y velocidad.
9. Para cada profundidad existe una curva de amplitudes máximas teóricas, que corresponden a las que se podrán generar en el canal. Los datos obtenidos están dentro de los límites de estas curvas, solo que debido a no tener disipación activa y no poder variar la velocidad del servomotor para distintas carreras, no se podrán realizar todas las olas posibles, sino más bien, las que responden al comportamiento mostrado en la

**Figura 23.**

## **5. AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo se realizó mediante el apoyo y financiamiento en el marco del proyecto FONDECYT 1210496.

Se agradece a Gonzalo Tampier por compartir información teórica para la realización de este trabajo.

## 6. REFERENCIAS

- Andersen, T. L., & Frigaard, P. (2014). *Wave Generation In Physical Models*.
- C, G. (2016). *Modelación Numérica de los Fenómenos de Propagación del Oleaje* .  
Sevilla.
- D., F. J. (2020). *Investigación Experimental con Ondas Solitarias y N - waves de la Forma del Perfil Inicial de la Onda del Tsunami ocurrido en 1995 entre las Costas de Jalisco y Colima*. México .
- G, C. (2006). *Puesta en Marcha de Canal con Generador de Olas y Caracterización Hidrodinámica* . Santiago.
- Goring, D. (1978). *Tsunamis - The Propagation of Long Waves onto A Shelf*. California.
- Goseberg, N. (2013). *Laboratory - Scale Generation of Tsunami and Long Waves* .
- Madsen. (2008). *On the Solitary Wave Paradigm for Tsunamis* .
- S., C. C. (2018). *Diseño y Construcción de un Tanque de Olas para el Laboratorio de ING. NAVAL* . Ecuador .
- T, E. (2018). *Fundamentos del Funcionamiento de un Canal de Olas*.