

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE VALPARAISO  
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES  
ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR

Análisis del desempeño de un módulo de balsas jaulas en términos de  
fuerzas resistivas y volúmenes de cultivo

Proyecto para optar al título de Ingeniero Acuicultor  
Por  
Jesús Arturo López Alarcón

Valparaíso  
2013

**Comité de Titulación:**

**Profesor Guía : Dr. Carlos Hurtado Ferreira**

**Profesor : Dr. Dante Queirolo Palma**

**Profesor : Dr. Jaime Orellana Hurtado**

## AUTORIZACIÓN DE USO

Al presentar este Proyecto como último requisito para la obtención del título de Ingeniero Acuicultor, autorizo a la biblioteca de la Escuela de Ciencias del Mar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, para que disponga libremente de ella. Autorizo además reproducciones parciales o totales de este Proyecto sólo con fines académicos.

---

Jesús Arturo López Alarcón

## **DEDICATORIA**

A mis Padres.

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mi familia, por apoyarme en cada paso que he dado en mi desarrollo como profesional.

Expreso además, mi profundo agradecimiento a cada profesor que fue parte de este largo proceso.

Ecosea farming por el apoyo prestado en el facilitamiento de los software involucrados en el análisis.

Finalmente, agradezco a mis amigos, de los cuales siempre recibí un apoyo incondicional.

SALUD!!

## CONTENIDO

	<b>pág.</b>
<b>Portada de presentación</b>	
Comité de Titulación	i
Autorización de uso	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	v
Listado de tablas	viii
Listado de figura	ix
Resumen	x
Abstract	xi
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>2</b>
2.1 Objetivo general	2
2.2 Objetivos específicos	2
<b>3. Antecedentes</b>	<b>3</b>
3.1 El sistema Balsa-Jaula	3
3.1.1 Sistemas balsa-jaula flotantes flexibles	3
3.1.2 Principales componentes de una balsa-jaula	3
3.1.3 Pesos o anillo cortacorrientes	4
3.2 Parámetros relevantes para el análisis	5
3.2.1 Fuerza de arrastre	5
3.2.2 Coeficiente resistivo	5

3.2.3 Factor de solidez	6
3.2.4 Efecto sombra	6
3.2.5 Condiciones climáticas	6
3.2.5.1 Corrientes y mareas	7
3.2.5.2 Oleaje	7
3.2.5.3 Viento	7
3.2.6 Fondeo	8
3.3 Métodos involucrados en el análisis	9
3.3.1 Método estático	9
3.3.1.1 Teoría de paños	10
3.3.2 Método de elementos finitos (MEF)	11
<b>4. Materiales y métodos</b>	<b>14</b>
4.1 Sistema de cultivo y condiciones ambientales en estudio	14
4.2 Análisis estático	14
4.2.1 Determinación de la resistencia hidrodinámica	14
4.2.2 Determinación del área sólida y solidez	14
4.2.3 Estimación del coeficiente resistivo	16
4.3 Análisis dinámico	16
4.3.1 La simulación dinámica	16
4.3.2 Características del sistema del cultivo	17
4.3.3 Resultados de la simulación	20
4.4 Estimación de volúmenes de cultivo	20
<b>5. Resultados</b>	<b>23</b>
5.1 Análisis estático	23
5.2 Análisis dinámico	23
5.3 Comparación de los resultados	26
5.4 Cambio en los volúmenes de cultivo	27

<b>6. Discusión</b>	<b>30</b>
<b>7. Conclusiones</b>	<b>34</b>
<b>8. Referencias</b>	<b>35</b>
<b>9. Anexos</b>	<b>39</b>
9.1 Anexo 1	39
9.2 Anexo 2	40



## LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones de los principales componentes del sistema balsa-jaula-fondeo utilizados en la simulación. HDPE: Polietileno de alta densidad T <sub>b</sub> : Longitud de barra. PA: Poliamida. PE: Polietileno.	19
Tabla 2. Fuerza de arrastre en Newton (N) resultante para el modelo estático, según las distintas velocidades de corriente (m/s).	23
Tabla 3. Fuerza de arrastre (N) para cada módulo de balsa-jaula modelado a distintas velocidades de corriente (m/s). A <sub>c</sub> : Anillo cortacorriente.	23
Tabla 4. Fuerza de arrastre según magnitud de corriente (m/s) y tipo de análisis. Todas las unidades se encuentran en Newton (N). ME: Método estático. Ac: Anillo cortacorriente.	27
Tabla 5. Pérdida (%) del volumen interno de una jaula en función al peso lineal del anillo cortacorriente y la velocidad de la corriente.	29
Tabla 6. Coeficientes resistivos utilizados por algunos autores.	30
Tabla 7. Estimación de pérdida de volumen en jaulas de cultivo obtenida por diversos autores.	32

## LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Jaulas circulares de polietileno de alta densidad (HPDE).	3
Figura 2. Diagrama esquemático de un sistema balsa-jaula-fondeo.	4
Figura 3. Anillo cortacorrientes de una balsa-jaula circular.	4
Figura 4. Sistema de fondeo ortogonal para un módulo de balsas-jaulas circulares.	9
Figura 5. Detalle de una malla.	10
Figura 6. Esquematización de un sistema a analizar.	11
Figura 7. Ejemplo de una viga con una carga puntual.	12
Figura 8. Discretización de una viga indicando los nodos para el elemento.	12
Figura 9. Detalle y nomenclatura de la balsa-jaula.	17
Figura 10. Dimensiones del fondeo, dirección de la corriente ( $V_c$ ) y numero de línea de fondeo ( $L_n$ ).	18
Figura 11. Imágenes destinadas al cálculo de volumen de cultivo.	21
Figura 12. Secuencia de procedimientos para obtener el volumen de cultivo.	22
Figura 13. Comparación visual de la fuerza de arrastre para los cuatro Ac utilizados a una $v_c$ de 0,25 m/s.	24
Figura 14. Comparación visual de la fuerza de arrastre para los cuatro Ac utilizados a una $v_c$ de 0,5 m/s.	25
Figura 15. Comparación visual de la fuerza de arrastre para los cuatro Ac utilizados a una $v_c$ de 0,75 m/s.	25
Figura 16. Comparación de fuerzas resistivas resultantes para distintas velocidades de corriente (m/s) y diferentes tipos de construcción de balsa-jaula.	26
Figura 17. Deformación de la jaula con distintos pesos en su anillo cortacorriente (Ac) y velocidades de corriente ( $v_c$ ).	28
Figura 18. Ángulos de deformación para distintas combinaciones de peso lineal en el anillo cortacorriente y velocidades de corriente.	28

## Resumen

Un análisis del desempeño físico en relación a fuerzas resistivas y volúmenes de cultivo fue realizado sobre un módulo típico de balsas jaulas con red de nylon para el cultivo de peces en su fase de engorda. Para esto se realizó una comparación de las fuerzas resistivas estimadas a través de una metodología teórica estática y otra dinámica con un sistema experto en simulación. A su vez se analizaron los cambios de volúmenes según la velocidad de corriente y el peso lineal del anillo cortacorriente.

Al variar la velocidad de la corriente de agua se obtuvieron importantes diferencias en las fuerzas resistivas, mientras que variaciones en el peso lineal del anillo cortacorriente no mostraron grandes variaciones en estas fuerzas resistivas. Sin embargo, al eliminar el peso lineal del anillo corta corriente las diferencias observadas en las fuerzas resistivas aumentaron bajo distintas velocidades de corriente.

Los resultados del modelo estático mostraron diferencias con todos los otros modelos, sin embargo, a mayores velocidades de corriente probadas, este modelo presentó una menor diferencia en relación a los resultados obtenidos en los modelos dinámicos.

Variaciones en la velocidad de la corriente generaron deformaciones significativas en la red de la jaula, llegando hasta pérdidas de un 50% del volumen de cultivo en el rango de corrientes evaluado. Sin embargo, un uso adecuado del peso lineal del anillo cortacorriente permite reducir de manera significativa la pérdida de volumen. Finalmente, a partir de estos resultados, se obtuvo una función lineal que permite predecir el porcentaje de pérdida de volumen sujeta a las restricciones propias del modelo.

## Abstract

A physical performance analysis for drag forces and water volume was conducted on a typical grow out nylon net pen module for finfish aquaculture. For this, estimates of resistive forces, calculated through both a static theoretical method and a dynamic simulation expert system, were obtained and compared. In turn, changes in volume due to current speed and variations on the linear weight of the sinker ring were estimated.

Variations in water current speed induced relevant differences in drag forces while variations on the linear weight of the sinker ring did not showed significant effects. Nonetheless, elimination of the sinker ring generated even larger differences in drag forces under different current speeds.

Results from the static theoretical model were quite different from all other models applied, nonetheless at larger current speeds estimates from this model presented less difference from those obtained from the dynamic models.

Variations in water current speed resulted in significant net pen deformations ranging up to a 50% volume loss under the range of speeds assessed. Nonetheless, obtained results also showed that proper use of the sinker ring linear weight helps to significantly reduce the loss in volume.

Finally, from these results and subject to model restrictions, a linear function allowing prediction of aquaculture grow out nylon net pen volume loss, was obtained.

## 1. INTRODUCCIÓN

Dentro de la actividad pesquera chilena, el sector industrial acuícola ha logrado un importante crecimiento en los últimos 30 años, lo cual se demuestra en el alto desarrollo tecnológico de la mayoría de los procesos productivos. Esto queda en evidencia al tomar en cuenta la cantidad cosechada anualmente, la que aumentó de 245.000 toneladas en 1991 a 713.000 toneladas el año 2010 (Sernapesca, 2011).

El desarrollo ingenieril involucrado en la construcción de balsas jaulas, ha logrado realizar una compleja y sofisticada labor con el fin de conseguir los niveles de producción alcanzados.

Actualmente, en la etapa de engorda, las unidades de cultivo son diseñadas, construidas e instaladas por empresas externas, donde el proceso de diseño y dimensionamiento puede ser realizado por medio de métodos clásicos (realizando un análisis estático) o bien a través de métodos numéricos, los cuales son aplicados mediante sofisticados programas de análisis.

El método estático (ME) consiste en determinar teóricamente la fuerza total que se ejerce sobre un sistema balsa jaula, provocada por la acción de la corriente sobre la estructura. Sin embargo, para alcanzar un alto nivel de precisión, es necesario incurrir en extensos y complejos cálculos. Además no existe una metodología simple de este tipo para determinar los cambios que ocurren en los volúmenes de agua en el cual se mantienen confinados los peces.

Por otra parte, existe una metodología basada en el método de elementos finitos (MEF) para la estimación de las fuerzas resistivas que se generan en un sistema balsa-jaula, en donde uno de los software que utiliza esta metodología es AquaSim®, herramienta desarrollada por la empresa Aquastructures para el cálculo y simulación en tiempo real de la respuesta estructural de construcciones ligeras, configuraciones flexibles y sistemas de variados elementos expuestos a cargas ambientales tales como olas, corrientes, viento, además de cargas distribuidas y puntuales, entre otros. Además, el hecho que AquaSim® se base en "simulaciones en tiempo real" implica que el programa toma en cuenta efectos no lineales para mantener de manera continua la correcta relación entre las fuerzas aplicadas y los desplazamientos resultantes. De acuerdo a esto último, es posible estimar los volúmenes internos de las jaulas que quedan disponibles para el confinamiento de peces, lo cual es de suma importancia ya que ésta influye directamente en la densidad de cultivo con la cual se pretende trabajar.

Hasta ahora, no existe un análisis comparativo de ambas metodologías. Por lo que se vuelve de gran interés analizarlas, considerando las virtudes de cada una de ellas.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

Analizar el desempeño de un módulo de balsas jaulas para el cultivo de peces en su fase de engorda en términos de fuerzas resistivas y volúmenes de cultivo.

### 2.2 Objetivos específicos

Estimar por medio de un análisis estático, las fuerzas resistivas que se generan en el módulo de balsas jaulas.

Estimar la magnitud de las fuerzas resistivas que se generan sobre un módulo de balsas jaulas por medio de un sistema experto de simulación dinámica.

Comparar las fuerzas resistivas estimadas a través del análisis estático con las obtenidas por medio del sistema experto de simulación.

Estimar y comparar los cambios en los volúmenes de cultivo en una balsa jaula por medio del sistema experto en simulación, según las condiciones ambientales y del anillo cortacorrientes.

### 3. ANTECEDENTES

#### 3.1 El sistema Balsa-Jaula

##### 3.1.1 Sistemas balsa-jaula flotantes flexibles

Este tipo de jaulas utiliza tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE) (Fig. 1) originalmente diseñadas para el traslado de fluido. El objetivo que persigue este diseño es que la balsa “cabalque” sobre la ola, adaptándose a la forma de la misma. Al aumentar la distancia de los centros de cultivo con la costa, los fabricantes se han visto obligados a diseñar jaulas que se adapten mejor a las condiciones de mar abierto: olas de mayor tamaño, fuertes corrientes y viento, entre otras (Troncoso, 2006).

El sistema consiste básicamente en una base de doble o triple anillo flotante unidos a través de un *bracket* donde en su parte alta pasa otro anillo de HDPE que puede servir de pasamano. Las dimensiones de estos tubos dependerá del peso que tenga que sostener la estructura, principalmente el tamaño de la jaula y el material utilizado para la confección de la malla.



Figura 1. Jaulas circulares de polietileno de alta densidad (HPDE) (Fuente: Troncoso, 2004).

##### 3.1.2 Principales componentes de una balsa-jaula

Si bien un sistema balsa-jaula presenta una variada cantidad de componentes, configuraciones y formas de funcionamiento, para lograr ejemplificar de forma clara y general este sistema de cultivo, se describe una balsa-jaula gravitatoria de superficie (Fig. 2). Este sistema es el más utilizado a nivel mundial (Pavez, 2011).

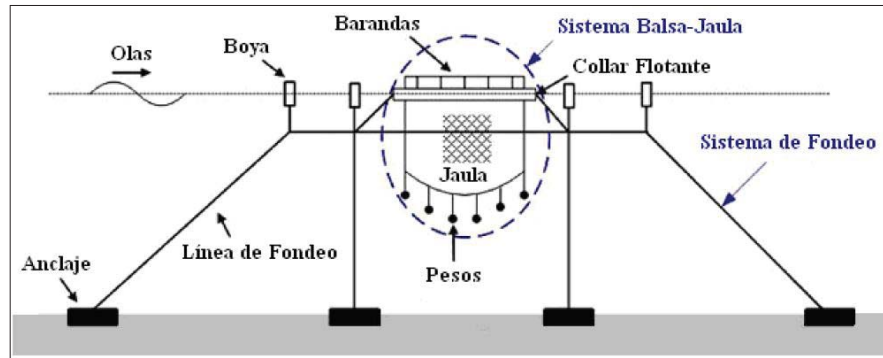


Figura 2. Diagrama esquemático de un sistema balsa-jaula-fondeo (Fuente: Huang, 2006).

### 3.1.3 Pesos o Anillo cortacorrientes

Los pesos o anillo cortacorriente ( $A_c$ ) (Fig. 3) son de suma importancia en la mantención de la forma de la jaula al ser constantemente afectada por fuerzas externas. De no mantener la forma, el pez cultivado se aglomera en el interior de la red pecera, produciéndose estrés y altas mortalidades producto de un aumento en la densidad de cultivo (Lawson, 1994).

Los anillos cortacorrientes permiten mantener la red pecera estirada verticalmente, a su vez distribuyen homogéneamente las cargas en la red, a diferencia de los pesos que generan cargas puntuales (Berstad, *et al.*, 2005).

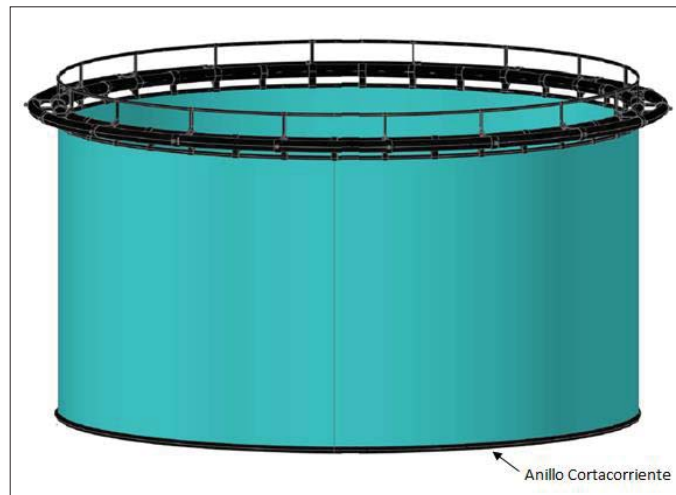


Figura 3: Anillo cortacorrientes de una balsa-jaula circular.



## 3.2 Parámetros relevantes para el análisis

### 3.2.1 Fuerza de arrastre

La ecuación general de la fuerza arrastre descrita por Morrison *et al.* (1950) es:

$$F_d = 0.5 * (C_d * D * A * V^2) \quad (1)$$

donde los términos de la ecuación son:

$C_d$ : Coeficiente resistivo;  $D$ : Densidad del agua de mar ( $\text{Kg/m}^3$ );  $A$ : Área solida normal al flujo ( $\text{m}^2$ ) y  $V$ : Velocidad de la corriente incidente ( $\text{m/s}$ ). El coeficiente de resistencia depende de la forma del objeto, el área sólida, y el nivel de rugosidad de la superficie.

### 3.2.2 Coeficiente resistivo

El coeficiente resistivo es un factor adimensional. Su magnitud depende de diversos factores, siendo los más importantes: la forma física del cuerpo, el número de Reynolds del flujo, la rugosidad de la superficie, la influencia de otros cuerpos o superficies en la vecindad y su orientación con la relación a la corriente del fluido (Mott, 1996).

Milne (1979) y Aarsnes *et al.* (1990) establecieron empíricamente las fórmulas para determinar el coeficiente resistivo de las redes con una corriente constante. Milne (ecuaciones (2) y (3)) consideró el factor de nudo y Aarsnes *et al.* (Ec. (4)) incluyó el ángulo de ataque. Además, Danilov & Fridman (1967) desarrollaron una fórmula que incorpora el número de Reynolds y la solidez (Ec. (5)).

$$C_d = 1 + 1.89 * S_d + 2.34 * S_d^2 \quad \text{Para paños con nudo} \quad (2)$$

$$C_d = 1 + 1.37 * S_d + 0.78 * S_d^2 \quad \text{Para paños sin nudo} \quad (3)$$

$$C_d = 0.04 + (-0.04 + S_d - 1.24 * S_d^2 + 13.7 * S_d^3) * \cos(\alpha) \quad (4)$$

$$C_d = 3 * \left[ 2 * \frac{S_d}{Re} \right]^{0.07} \quad (5)$$

dónde:

$S_d$ : Solidez.

$Re$ : Número de Reynolds.

$\alpha$ : Ángulo entre la dirección de la corriente y el plano de la red.

### 3.2.3 Factor de solidez

Una red de una malla determinada construida ya sea con o sin nudos independiente del material, se le puede asignar un "factor de solidez" que es la relación del área total del hilo, con la superficie total del paño de la red (Carson, 1988; Rudi *et al.*, 1988, Beveridge, 1996).

### 3.2.4 Efecto sombra

Las redes de cultivo construidas con fibras sintéticas utilizan pesos, para así, producto de la gravedad, mantengan su volumen. De esta manera, se disminuye la deformación de las redes cuando están sujetos a los movimientos horizontales del agua generado por las corrientes (Lader, 2008).

El grado en que las redes se deforman cuando se someten a una corriente ha sido modelada por autores como Aarsnes *et al.*, 1990, Lader *et al.*, 2003, Tsukrov *et al.*, 2003, Zhao *et al.*, 2007, Huang *et al.*, 2007, Lee *et al.*, 2005, este último incluyendo la acción del oleaje. En cuanto a las deformaciones de las redes probadas a escala piloto Lader & Enerhaug (2005) estudiaron en un estanque de flujo el grado de intensidad del efecto sombra a diversas intensidades de flujo y diferentes pesos en los muertos. En éstos, el volumen total de la red se redujo hasta en un 35% a una velocidad de corriente de 0,5 m/s (Lader & Enerhaug, 2005, Lee *et al.*, 2005).

Es importante destacar que a menor peso de la red, mayor es la deformación. Puesto que en la relación entre la resistencia al flujo y el peso de la red, es más relevante la fuerza aplicada en sentido horizontal, que en el sentido vertical. A su vez, a velocidades mayores de 1 m/s, la pérdida de volumen supera el 50% y si la velocidad excede los 1,44 m/s la pérdida de volumen aumenta considerablemente. Esto es debido a que el cálculo de la resistencia tiene un comportamiento exponencial, ya que en la función de resistencia la velocidad de la corriente es elevada al cuadrado. Lo mismo ocurre en la relación de fuerzas verticales y horizontales, las que también cambian de manera exponencial cuadrática (Reyes, 1993).

### 3.2.5 Consideraciones climáticas

La identificación de un adecuado emplazamiento para el desarrollo de un proyecto acuícola es un elemento gravitante para el éxito de este, tanto desde el punto de vista de la ingeniería como desde el comercial (Goudey *et al.*, 2003). En la evaluación de un sitio es esencial definir las condiciones ambientales predominantes con respecto a las características físicas del potencial sistema de cultivo para determinar si este es o no factible de ser considerado, y si no lo es proceder con modificaciones en el diseño o en su configuración para lograr los objetivos propuestos, siendo los elementos más importantes la fuerza de las olas, viento y corrientes (Turner, 2000a).

### **3.2.5.1 Corrientes y mareas**

Las corrientes oceánicas generalmente son producidas por el viento, diferencias de densidad entre masas de agua o desnivel del mar. La influencia de la marea en las corrientes oceánicas no tiene gran importancia, debido a que las variaciones de altura son de escasa amplitud en esta zona, respecto a las variaciones del nivel del mar en zonas costeras (Silva & Palma, 2006), donde las corrientes forzadas por la oscilación de marea son de mayor importancia, donde las corrientes de marea se definen como movimientos horizontales asociados a la elevación (pleamar) y depresión (bajamar) del nivel del mar. En la zona costera estos movimientos, generalmente, son elípticos y rotatorios, mientras que en zonas donde la dirección de la circulación es restringida como en ríos, estrechos, canales y fiordos, las corrientes son reversibles. Debido a este comportamiento reversible se genera un momento donde la magnitud de la corriente es cero, conocido como estoa (Silva & Palma, 2006). Lo que se debe tener presente con respecto a las corrientes es que estas ejercen un arrastre sobre las estructuras, siendo las fuerzas resultantes dependientes de la geometría y del tamaño de estos objetos (Turner, 2000a).

### **3.2.5.2 Oleaje**

Las olas pueden tener variados orígenes o causas, siendo los más importantes el viento, las actividades realizadas por personas (navegación marítima), fenómenos naturales (terremotos, deslizamientos de tierra y erupciones volcánicas submarinas) y las mareas (Lekang, 2007).

Las olas que se presentan tanto en zonas oceánicas como costeras pueden clasificarse en tres grandes grupos según su rango de períodos. En el primero están las denominadas olas de onda corta, las que frecuentemente corresponden a las olas generadas por el viento. El segundo grupo corresponde a las olas de onda larga, siendo ejemplos típicos de estas los Tsunamis u olas generadas por volcanes o explosiones submarinas. Y finalmente el tercer grupo cuenta con un rango de períodos muy superior, que corresponde a las mareas y fenómenos análogos (Castelló, 1993).

### **3.2.5.3 Viento**

El viento ejerce presión sobre la parte expuesta del sistema, la cual debe ser resistida por los fondeos y anclajes (Turner, 2000a), siendo esta presión alrededor de 40 veces menor que el efecto producido por las corrientes debido a la menor densidad del aire y área expuesta de la estructura (Thoms, 1989).

### 3.2.6 Fondeo

En general los sistemas de fondeos entre un centro de cultivo y otro no varían sustancialmente. Básicamente cuentan con fondeo, línea, boyas y amortiguadores (en algunos casos).

Existen dos tipos de fondeos: ancla y muerto. El muerto o ancla de bloque, es el tipo de ancla marina más simple y barata, el cual consiste en un bloque de hormigón. Los muertos son ineficientes en teoría porque tienen un bajo poder de agarre en comparación con las modernas anclas que pueden llegar a tener un poder de agarre de 50-70 veces su masa. Aunque, en determinadas ocasiones, como cuando el sustrato del fondo marino es fangoso, los bloques son más efectivos dado que tienden a enterrarse con lo que aumentan el mencionado poder de agarre. El ancla se utiliza a causa de su versatilidad de operación así como por su facilidad de instalación y a la capacidad de poder recuperarlas (Izaguirre *et al.*, 2006).

Respecto a las líneas de fondeo, existen diversos tipos, las más comunes son cables y cadenas, suele ser conveniente usar una pequeña cadena desde el muerto o ancla hasta la línea del cable para producir una catenaria más pronunciada en el fondo. Cabe destacar que la resistencia que poseen los distintos cables afecta directamente al tipo de sistema flotante a fondear, por lo que es importante realizar un estudio previo para la correcta elección del cable a ocupar (Olivares, 2004). Algunos estudios acabados sobre este tema fueron realizados por Kimura & Munekage (1982) y Lisac (1996), donde se midió el efecto de la tensión de líneas de fondeo en balsas jaulas fondeadas en zonas expuestas en altamar.

En la superficie el cable está unido a una boya la que tiene como objetivo amortiguar los movimientos de las líneas de anclajes (Buffer ambiental), además de permitir mover las balsas cuando se requiera, sin perder el fondeo (Luco, 2003).

La cantidad y la disposición del grupo de jaulas depende principalmente de la renovación de agua en las jaulas que se ubican detrás de otras en la dirección de la corriente. En Chile es común la utilización de set entre 12 a 24 jaulas. Las principales ventajas son que el agrupamiento reduce las fuerzas que actúan sobre las jaulas individuales, suavizando sus movimientos lineales y rotacionales. Las uniones entre cada jaula deben estar diseñadas para amortiguar el movimiento de cabeceo y mantener en el mínimo el balance producto de la pasada de las olas. El sistema de fondeo más usado en el agrupamiento de jaulas es el ortogonal, se denomina así debido a que las líneas de fondeo de los lados contiguos de la cuadrícula forman 90° unas con otras (Sanhueza, 2006) (Fig. 4).

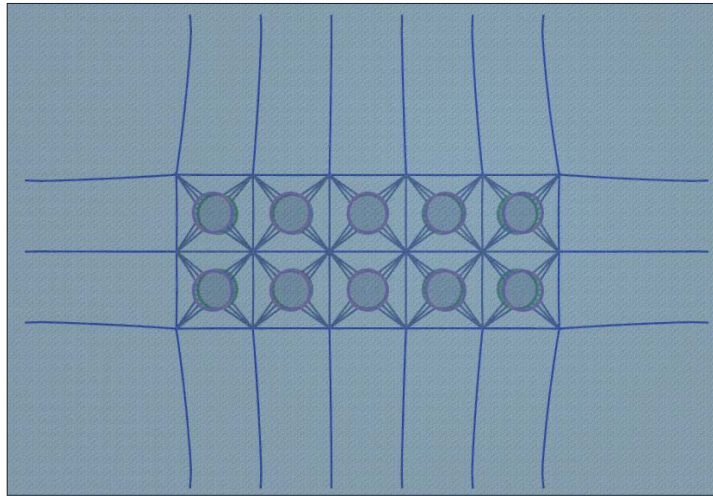


Figura 4: Sistema de fondeo ortogonal para un módulo de balsas-jaulas circulares.

### 3.3 Métodos involucrados en el análisis

#### 3.3.1 Método estático

Este modelo se basa en la metodología básica de resistencia hidrodinámica propuesta por Kawakami (1964). Donde para determinar la resistencia del sistema se debe conocer la acción del fluido circundante a la estructura, el coeficiente resistivo y el área sólida expuesta al flujo.

El modelo también considera los siguientes supuestos:

- Se considera sólo el efecto de la corriente sobre los paños y no sobre la estructura.
- Se asume que el flujo de agua ataca con un ángulo de  $90^\circ$  a los paños.
- No se consideran deformaciones en los paños de red.
- La velocidad de la corriente es constante.
- No se consideran pesos distribuidos sobre el módulo de balsa-jaula.

La fuerza de resistencia actúa sobre el paño asumiendo que es proporcional al área proyectada y que el fluido alrededor del paño no provoca disturbios. Tampoco existe interacción con otros elementos del paño. Esta aseveración es válida sólo cuando los factores de solidez no sean altos, como por ejemplo en presencia de *fouling*.

La fórmula propuesta por Kawakami (1964) entrega la fuerza que se ejerce sobre la estructura producto de la acción de la corriente la cual actúa perpendicular a un solo paño. Por lo tanto, el resultado no considera las resistencias con alguna dirección distinta a la perpendicular ni las fuerzas resultantes de los paños paralelos a la dirección de la corriente.

Tomando en cuenta lo propuesto por Kawakami (1964) y la teoría de paños, se puede estimar la resistencia total del sistema, considerando la fuerza ejercida por el fluido sobre el frente de un módulo de balsa-jaula.

### 3.3.1.1 Teoría de paños

La malla (Fig. 5) es la unidad básica del paño y le transfiere todas sus propiedades a éste (Fridman *et al.*, 1979), permitiendo con ello su estudio a través de los componentes básicos o grupos de estos, siendo la malla un polímero regular de cuatro o más lados, generalmente romboidal o hexagonal (Reyes, 1993). Cada malla posee 2 barras y 1 nudo, utilizando el concepto de malla continua (Melo *et al.*, 2002).

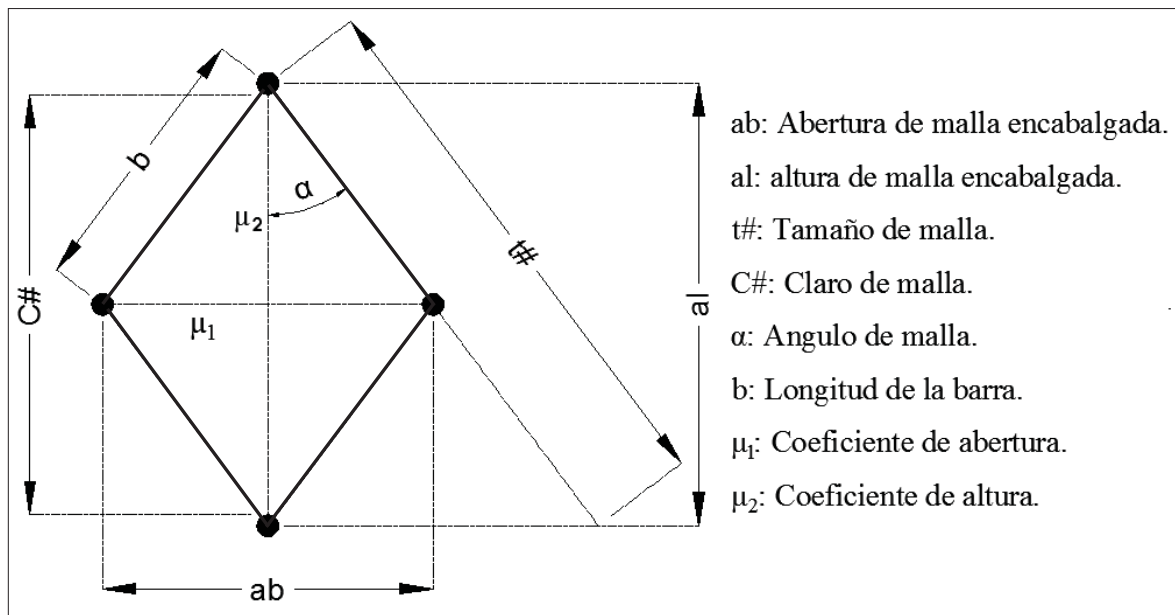


Figura 5: Detalle de una malla (Fuente: Nedelec *et al.*, (1979); Masatsune, (1985); Reyes, (1993)).

Existen algunas definiciones y relaciones matemáticas que deben ser consideradas para entender la teoría de paños las cuales son:

- Claro de malla ( $C\#$ ): Corresponde al tamaño interior de la malla (para efectos de selectividad) (Melo *et al.*, 2002).
- Tamaño de malla ( $t\#$ ): Corresponde al tamaño total de una malla medida entre el centro de dos nudos consecutivos (Melo *et al.*, 2002).
- Longitud de la barra ( $b$ ): Es la distancia entre medios nudos, siempre y cuando estos sean colineales (Melo *et al.*, 2002).

- Área máxima: Corresponde a una malla que forma un ángulo de 45° entre las barras.
- Coeficiente de área = área real malla / área máxima.
- Área proyectada = 0,5 x longitud barra x  $\mu_1$  x  $\mu_2$

Cuando la malla trabaja a máxima área, entonces:  $\mu_1 = \mu_2 \approx 0,707$ , donde  $\mu_1$  y  $\mu_2$  varían entre 0 y 1, siendo  $\mu_1^2 + \mu_2^2 = 1$  (Melo *et al.*, 2002).

### 3.3.2 Método de elementos finitos (MEF)

La idea general del MEF es la división de un elemento continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del elemento continuo regirán también a cada uno de los pequeños elementos que lo compongan. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no-lineales (Carnicero, 2001).

En cualquier sistema a analizar podemos distinguir entre:

- Dominio: Espacio geométrico donde se va a analizar el sistema.
- Condiciones de contorno: Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: cargas, desplazamientos, temperaturas, voltajes, focos de calor, entre otras.
- Incógnitas: Son variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema: desplazamientos, tensiones, temperaturas, entre otras.

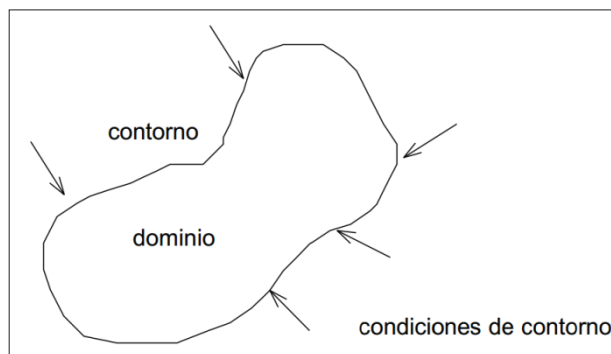


Figura 6: Esquemización de un sistema a analizar. Cambios que afectan al dominio se presentan como flechas ( $\rightarrow$ ) (Modificado de Carnicero, 2001).

El MEF supone que para solucionar el problema, el dominio es discretizado en subdominios, denominados elementos. El dominio se divide mediante puntos (en el caso lineal), mediante líneas (en el caso bidimensional) o en superficies (en el caso tridimensional) imaginarias, de forma que el dominio total del estudio se aproxime mediante el conjunto de porciones (elementos) en que se subdivide. Los elementos se definen por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre si los elementos. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema. En el caso de los elementos estructurales estas incógnitas son los desplazamientos nodales, ya que a partir de éstos podemos calcular el resto de incógnitas que sea interesantes para el problema: tensiones, deformaciones, entre otros. A estas incógnitas se les denomina grados de libertad de cada nodo del modelo. Los grados de libertad de un nodo son las variables que nos determinan el estado y/o posición del nodo (Carnicero, 2001).

- P. ej. si el sistema a estudiar es una viga en voladizo con una carga puntual en el extremo y una distribución de temperaturas (Fig. 7), mientras que el sistema discretizado queda representado por el conjunto de nodos y elementos (Fig. 8), donde uno de los grados de libertad serían: desplazamiento en dirección x, desplazamiento en dirección y, giro en el eje z y temperatura.

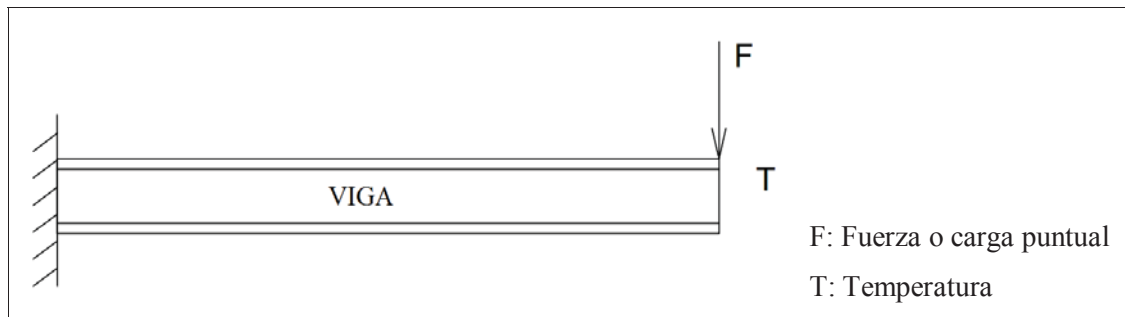


Figura 7: Ejemplo de una viga con una carga puntual (Fuente: Modificado de Carnicero, 2001).

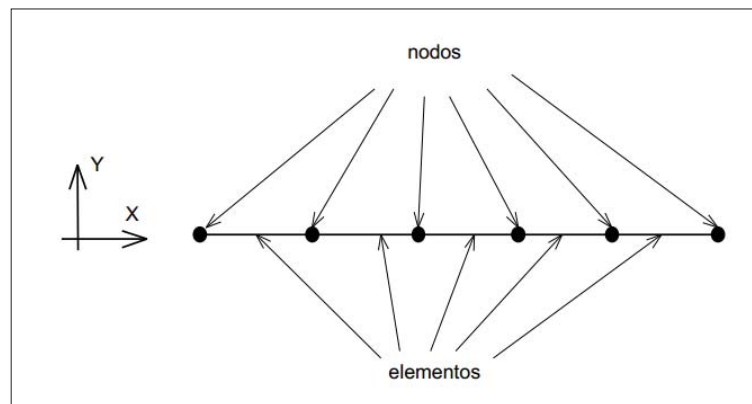


Figura 8: Discretización de una viga indicando los nodos para el elemento (Fuente: Carnicero, 2001).



El sistema, debido a las condiciones de contorno (empotramiento, fuerza puntual y temperatura), evoluciona hasta un estado final, momento en el cual conocidos los valores de los grados de libertad de los nodos del sistema, podemos determinar cualquier otra incógnita deseada (tensiones, deformaciones, compresiones, entre otros) así como la evolución temporal de cualquiera de los grados de libertad (Carnicero, 2001).

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Sistema de cultivo y condiciones ambientales en estudio

El sistema de cultivo empleado en el estudio corresponde a un módulo de 10 balsas jaulas circulares de 30 m de diámetro por 15 m de profundidad de la red. El paño utilizado es de Poliamida (PA) de 3 mm de diámetro con tamaño de malla 2 pulgadas. Respecto a las condiciones ambientales, se emplearon velocidades de corriente de 0,25 m/s 0,5 m/s y 0,75 m/s. En este análisis no se consideró la acción del viento ni del oleaje, con el fin de someter ambos modelos a condiciones ambientales idénticas. No se incluyó el efecto de estas variables ya que el modelo estático no lo considera.

### 4.2 Análisis estático

El análisis estático considera supuestos que restringen la metodología. Los resultados e interpretaciones estarán sujetos a las siguientes consideraciones:

- El fluido ataca con un ángulo de 90° a los paños de la balsa jaula.
- No se consideraron deformaciones en los paños de red ni el anillo cortacorrientes.
- No se consideraron pesos distribuidos sobre el módulo de balsas jaula.
- Solo se considera el efecto de las redes en el cálculo de la resistencia hidrodinámica del módulo de jaulas.

#### 4.2.1 Determinación de la resistencia hidrodinámica

Considerando las restricciones del modelo, se utilizó la fórmula básica de resistencia hidrodinámica propuesta por Morison *et al.* (1950) (Ec. (1)).

#### 4.2.2 Determinación del área sólida y solidez

Las ecuaciones empleadas en el cálculo del área sólida y solidez propuestas por Aarsnes *et al.* (1990) para cada paño son:

$$N^{\circ}\#_v = \frac{HRJ}{\lambda * 0.707} \quad (6)$$

donde:

$N^{\circ}\#_v$ : Número de mallas verticales

HRJ: Altura de la red de la jaula (m)

$\lambda$ : Tamaño de malla (m)

$$N^{\circ}\#_h = \frac{LPJ}{\lambda * 0.707} \quad (7)$$

donde:

$N^{\circ}\#_h$ : Número de mallas perimetrales

LPJ: Longitud perimetral de la jaula (m)

$$N^{\circ}\#_t = N^{\circ}\#_v * N^{\circ}\#_h \quad (8)$$

donde:

$N^{\circ}\#_t$ : Número de mallas totales de una jaula

$$N^{\circ}_b = N^{\circ}\#_t * 2 \quad (9)$$

donde:

$N^{\circ}_b$ : Número de barras de la jaula

$$L_b = \frac{\lambda}{2} \quad (10)$$

donde:

$L_b$ : Longitud de una barra (m)

$$A_b = L_b * \phi \quad (11)$$

donde:

$A_b$ : Área de la barra (m<sup>2</sup>)

$\phi$ : Diámetro del hilo (m)

$$A_s = A_b * N^{\circ}_b \quad (12)$$

donde:

$A_s$ : Área solida (m<sup>2</sup>)

$$S_d = 2 * \frac{\phi}{\lambda} + \frac{1}{2} * \left(\frac{\phi}{\lambda}\right)^2 \quad (13)$$

donde:

$S_d$ : Solidez

#### 4.2.3 Estimación del coeficiente resistivo

El coeficiente resistivo para obtener la fuerza de arrastre fue determinado según la aproximación obtenida por Milne (1979), en la cual considera la solidez para un paño sin nudos. Esto es:

$$C_d = 1 + 1.37 * S_d + 0.78 * S_d^2 \quad (14)$$

Sin embargo, el modelo estático incorpora un coeficiente de reducción de la velocidad de corriente ( $R$ ) producto de la resistencia que ponen los paños, según lo descrito por Loland (1991). Entonces:

$$R = 1.0 - 0.46 * C_d' \quad (15)$$

Donde  $C_d'$  es el coeficiente resistivo, el cual depende tanto de la solidez de la red ( $S_n$ ) como del ángulo ( $\alpha$ ) existente entre la corriente y el paño, según se indica en la siguiente relación:

$$C_d' = 0.04 + (-0.04 + 0.33 * S_d + 6.54 * S_d^2 - 4.88 * S_d^3) * \cos(\alpha) \quad (16)$$

### 4.3 Análisis dinámico

#### 4.3.1 La simulación dinámica

Se realizó la simulación dinámica de un sistema de balsas de cultivo mediante el uso del programa de análisis numérico AquaSim®, el cual se basa en el método de elementos finitos (MEF). Este programa realiza un análisis global de las interacciones en las fuerzas de transmisión entre los componentes rígidos y flexibles, junto con calcular las fuerzas locales y tensiones en cada componente, proporcionando resultados tales como desplazamiento, aceleración y deformación del sistema, entre otros (Berstad *et al.*, 2004). El proceso de simulación se realizó mediante tres aplicaciones complementarias, las que corresponden a:

i) *Superdraw*, es la etapa de dibujo de la estructura en base a una serie de elementos determinados por el usuario según la naturaleza del estudio. En esta aplicación se establecen los elementos *beam*, *truss* y *membrane*. Los elementos *beam* son elementos que

presentan una resistencia a la flexión y torsión. Los elementos *truss* son componentes que no presentan resistencia a la torsión ni a la flexión pero si a las fuerzas axiales. Por último, los elementos *membrane* consisten en redes formadas por cuatro nodos.

ii) *Aquabase*, que permite incorporar al modelo las variables físicas tanto del medio ambiente como de la estructura.

iii) *Aquaview*, que corresponde a la interfaz de salida de los resultados requeridos por el usuario, tales como desplazamientos, fuerzas axiales, esfuerzos de corte y rotación de los elementos.

El programa incorpora en sus modelos un coeficiente de reducción de velocidad de corriente (Ec. 15) debido a la resistencia hidrodinámica que generan los paños (Ec. 16).

#### 4.3.2 Características del sistema de cultivo

El sistema de cultivo se compone de un módulo de 10 balsas circulares de 30 m de diámetro, con jaulas de paños de poliamida de 15 m de profundidad. El sistema de flotación lo conforman dos tubos de HDPE (polietileno de alta densidad) de 0,4 m de diámetro, cuya separación es de 0,7 m (de centro a centro). El tubo interior posee un perímetro de 94,25 m mientras que el exterior es de 98,64 m. El pasamano se ubica a 1 m de altura desde los tubos de flotación. La unión entre los tubos de flotación (*clamp*) fue modelado como un perfil de acero con forma de T y el poste vertical como un perfil de acero cuadrado (Fig. 9).

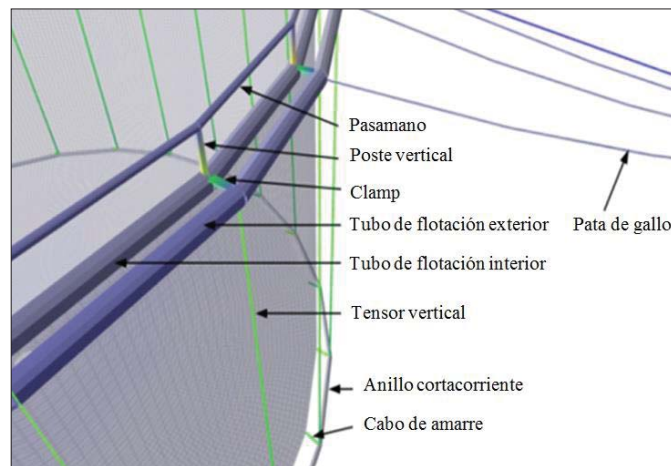


Figura 9: Detalle y nomenclatura de la balsa-jaula.

Un total de 24 *brackets* se distribuyen en el perímetro de la balsa, cada uno de los cuales está constituido por un *clamp* y su respectivo poste vertical. Por su parte, el anillo cortacorriente ( $A_c$ ) corresponde a un tubo de HDPE perforado de 98,6 m de perímetro cuyo peso lineal es variable según la cantidad de lastre usado en su interior. Todos los elementos

descritos anteriormente fueron modelados como elementos viga (*beam*). En la Fig. 10 se observan las principales dimensiones del sistema de fondeo, el cual fue configurado ortogonalmente. Todos los componentes del sistema de fondeo fueron modelados como elementos barra (*truss*).

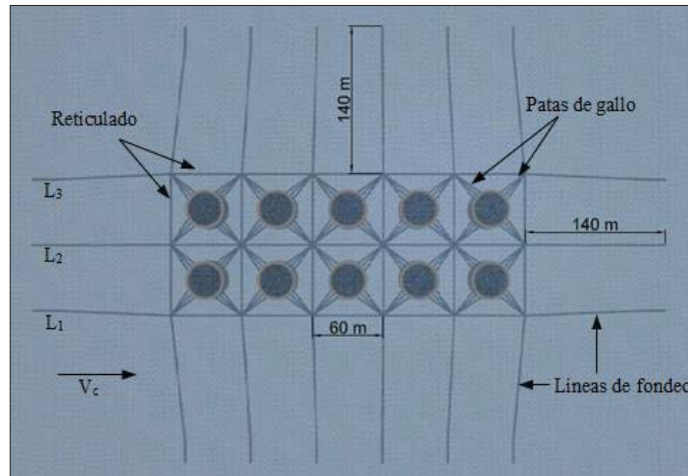


Figura 10: Dimensiones del fondeo, Dirección de la corriente ( $v_c$ ) y número de línea de fondeo ( $L_n$ ).  $n= 1, 2, 3$ .

Las líneas de fondeo correspondieron a cabos de polipropileno (PP) de 48 mm de diámetro y de 126,5 m de largo. Los extremos de las líneas de fondeo fueron unidos a cadenas estándar ( $\phi$  36 mm) de 20 m de largo a una profundidad de 45 m. El reticulado se ubicó a 5 m de profundidad y estuvo compuesto de cabos de PP de 40 mm de diámetro. En cada vértice del reticulado se ubicaron 3 patas de gallo que permiten unir cada balsa al sistema de anclaje.

Dada la complejidad del sistema a modelar y la alta demanda de nodos que implica el simular las redes de las jaulas, se realizó una reducción del número de nodos para poder resolver los cálculos involucrados en el análisis. Por este motivo se dividió la red pecera en 24 secciones a largo del perímetro y en 10 secciones en su altura. Los paños de la jaula fueron modelados como elementos *membrane*.

Desde cada *clamp* nace un tensor vertical, el cual fue modelado como una cadena estándar del tipo elemento *truss*. Cada tensor vertical fue conectado al anillo cortacorrientes ubicado a 0,6 m de profundidad desde el fondo de la red. La unión entre la red y el  $A_c$  se realizó mediante un cabo de amarre en el mismo punto donde se conecta con el tensor vertical. Las boyas fueron modeladas como un vector que ejerce una fuerza positiva de 24.500 N en dirección al eje z. Estas se ubicaron al nivel del mar conectadas por medio de una cadena estándar a la intersección del reticulado con el cabo de fondeo. Las características de los principales componentes del sistema balsa-jaula-fondeo se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones de los principales componentes del sistema balsa-jaula-fondeo utilizados en la simulación. HDPE: Polietileno de alta densidad  $T_b$ : Longitud de barra. PA: Poliamida. PE: Polietileno.

Ítems	Característica	Tipo de elemento
<b>Balsa</b>		
<b>Tubos de flotación</b>	HDPE $\phi$ 400 mm	<i>Beam</i>
<b>Pasamanos</b>	HDPE $\phi$ 140 mm	<i>Beam</i>
<b>Anillo cortacorriente</b>	HDPE $\phi$ 225 mm	<i>Beam</i>
<b>Bracket: poste y clamp</b>	Acero estándar	<i>Beam</i>
<b>Tensores: cadenas estándar</b>	Acero estándar	<i>Truss</i>
<b>Jaula</b>		
<b>Redes</b>	Mallas cuadradas $T_b=2,54$ mm (PA $\phi$ 3 mm)	<i>Membrane</i>
<b>Fondeo</b>		
<b>Cabos de fondeo</b>	PE $\phi$ 48 mm	<i>Truss</i>
<b>Reticulado</b>	PE $\phi$ 40 mm de 60 x 60 m	<i>Truss</i>
<b>Patas de gallo</b>	PE $\phi$ 40 mm	<i>Truss</i>
<b>Cadena de fondeo</b>	Acero estándar	<i>Truss</i>

Se utilizaron tres magnitudes de peso lineal del  $A_c$  para evaluar su efecto sobre la fuerza de arrastre que se genera, correspondiente a 30, 40 y 50 kg/m, además de un modelo en el cual no se consideró este elemento. Tanto las magnitudes de peso lineal del  $A_c$  como la  $v_c$  se encuentran en un rango común en el cual se desarrolla el cultivo de salmónidos en aguas interiores del sur de Chile. De esta forma, el efecto combinado del peso lineal y la velocidad de corriente correspondieron a los dos únicos factores involucrados en la modelación dinámica para estimar la fuerza de arrastre total que se genera sobre el módulo de balsa-jaula.

El método utilizado para llevar a cabo las simulaciones de las series de tiempo son descritas por Berstad *et al.* (2004), mientras que la aplicación de cargas a los elementos membrana son descrita por Tronstad (2000).

### 4.3.3 Resultados de la simulación

Los resultados de la simulación son entregados por Aquaview, plataforma en la cual se obtienen las tensiones en las líneas de fondeo. Dado la naturaleza del estudio, sólo se consideraron las tensiones de las 3 líneas de fondeo del cabezal del módulo ( $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$ ) el cual recibe el impacto directo de la corriente y por ende son las líneas que sostienen en mayor parte la estructura flotante (Fig. 10).

### 4.4 Estimación de volúmenes de cultivo

El volumen de cultivo se considera como el volumen de agua disponible para el confinamiento de peces en el interior de una balsa-jaula, el cual se encuentra delimitado por la red pecera.

En el estudio se consideró 3 balsas-jaulas circulares de 30 m diámetro y 15 m de profundidad, las que en sus anillos cortacorrientes consideraron un lastre de 30, 40 y 50 kg/m y cada una de ellas se sometió a una  $v_c$  de 0,25, 0,5 y 0,75 m/s.

El modelo utilizado es el idéntico al utilizado en la obtención de tensiones en el análisis dinámico (4.3.2). Sin embargo, para obtener el volumen de cultivo, se utilizó sólo la primera jaula del cabezal que enfrenta la corriente, ya que ésta es la más afectada en términos de cambios volumétricos, entendiéndose que el resto de las balsas-jaula tienen una deformación menor producto de una disminución en la velocidad de la corriente.

El procedimiento para obtener el volumen de cultivo comenzó por conseguir dos imágenes laterales de la jaula, una donde se pudiera apreciar el efecto de la corriente sobre el sistema de cultivo (Fig. 11A) y otra sin este efecto (Fig. 11B), con el objetivo de obtener una diferencia de volúmenes producto de la acción de la corriente.



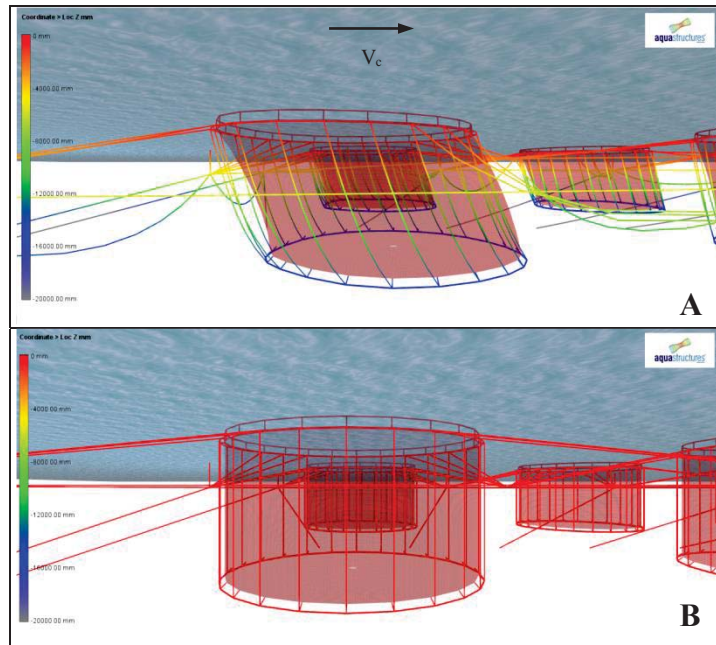


Figura 11: Imágenes destinadas al cálculo del volumen de cultivo. A: Deformación de la jaula afectada por la  $v_c$ . B: Jaula sin el accionar de las fuerzas externas.

Una vez obtenidas las imágenes, éstas se exportaron al programa AutoCAD® donde se dibujó el contorno de la red pecera (Fig. 12A y 12B). Posteriormente, a partir de éste dibujo, se generaron sólidos en 3D para así obtener tanto el ángulo de deformación (Fig. 12C) como el volumen interno de la jaula (Fig. 12D). Del mismo modo se estimó el volumen patrón de la jaula ( $V_0$ ), pero en este caso considerando la velocidad de la corriente igual a 0. La pérdida relativa porcentual de volumen (PRV) correspondió entonces a:

$$PRV_{ij} = \left(1 - \frac{V_{ij}}{V_0}\right) * 100 \quad (17)$$

donde:

$V_0$ : volumen interno de la jaula sin el efecto de la corriente (patrón).

$V_{ij}$ : volumen interno de la jaula deformada con velocidad de corriente  $i$  y peso lineal  $j$ .

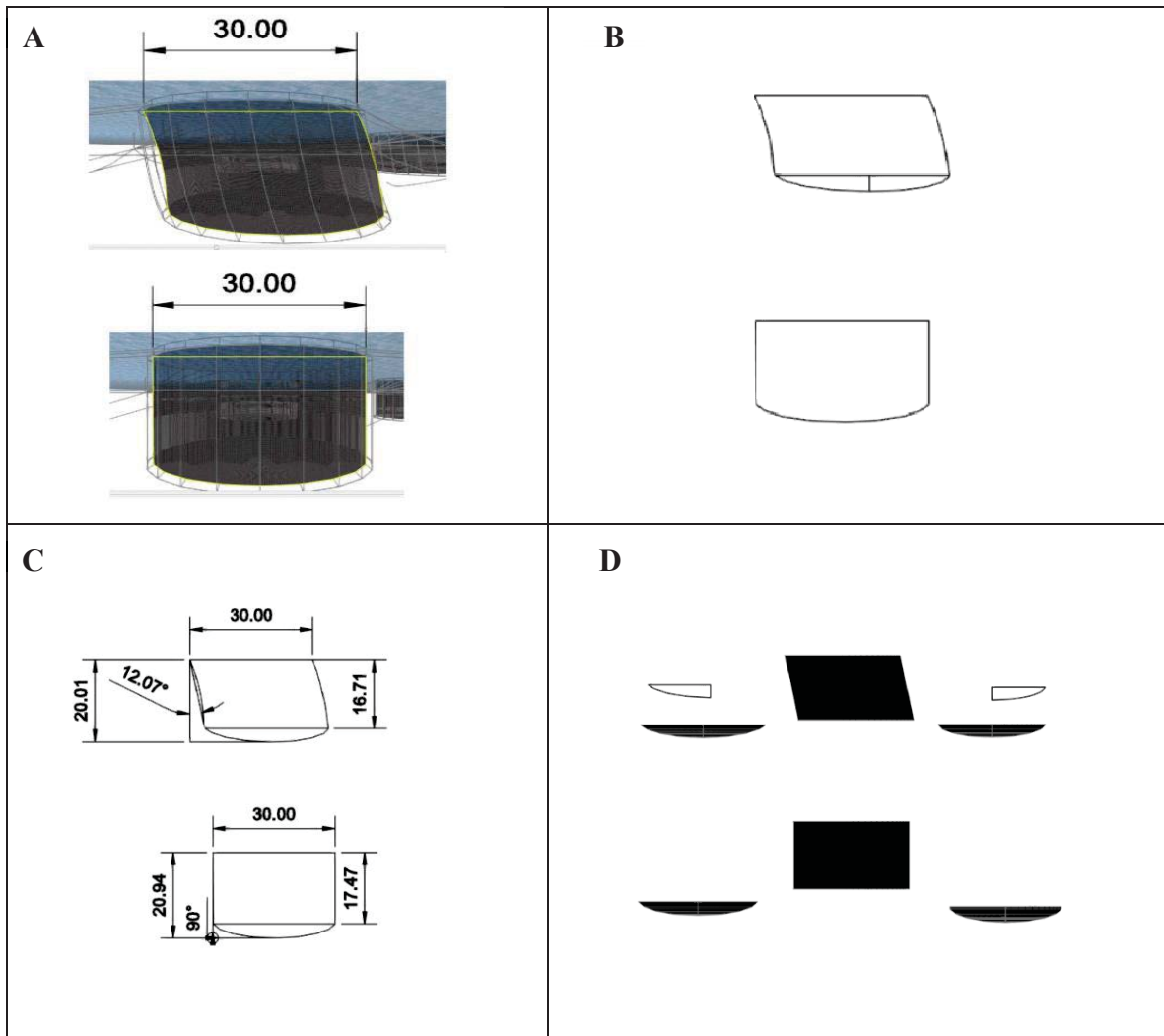


Figura 12: Secuencia de procedimientos para obtener el volumen de cultivo. A: Marcación del contorno de la red pecera; B: Contorno de la red y la división del fondo; C: Ángulos de desplazamiento y dimensiones; D: volúmenes de los cilindros y del fondo.

Una vez obtenido los volúmenes de las figuras, se realizó una comparación graficando los porcentajes de pérdidas de volúmenes para cada una de las jaulas respecto a sus volúmenes estáticos.

A partir de los resultados obtenidos, se estimó una regresión lineal que explica la pérdida porcentual de volumen de una jaula en función a la  $v_c$  y el peso lineal del  $A_c$ . Esto se realizó mediante la función *SOLVER* de MS Excel®.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Análisis estático

La fuerza de arrastre calculada sobre el módulo de la balsa-jaula para cada  $v_c$ , determinó que a medida que aumenta la  $v_c$  también lo hace la fuerza a la cual se somete la estructura, existiendo una relación directamente proporcional entre éstas (Tabla 2).

Tabla 2. Fuerza de arrastre en Newton (N) resultante para el modelo estático, según las distintas velocidades de corriente (m/s).

Velocidad de corriente (m/s)	Arrastre total (N)
0,25	39.052
0,5	155.893
0,75	351.406

### 5.2 Análisis dinámico

Para cada modelo sometido a las velocidades de corriente ya mencionadas, se precisó que la fuerza de arrastre aumenta con la  $v_c$ . Equivalente a lo que ocurre al aumentar el peso lineal del  $A_c$  pero en una menor proporción. La combinación  $A_c$ - $v_c$  que mostró una mayor fuerza de arrastre fue la 50 kg/m y 0,75 m/s respectivamente, mientras que la menor fue la 30 kg/m y 0,25 m/s. Sin embargo, la fuerza de arrastre es aún menor cuando no se utiliza  $A_c$  para las tres magnitudes de  $v_c$  (Tabla 3).

Tabla 3. Fuerza de arrastre (N) para cada módulo de balsa-jaula modelado a distintas velocidades de corriente (m/s).  $A_c$ : Anillo cortacorriente.

Peso de $A_c$ para cada módulo de balsa-jaula	0,25 m/s	0,5 m/s	0,75 m/s
Sin $A_c$	54.227	186.263	372.600
30 kg/m	81.851	251.743	426.800
40 kg/m	82.330	261.213	440.700
50 kg/m	82.566	267.801	454.000

Es posible identificar el efecto que tiene la fuerza de arrastre sobre el tren de balsa-jaula desde una vista isométrica, superior y frontal-superior para las velocidades de corriente 0,25 m/s, 0,5 m/s y 0,75 m/s respectivamente, donde las líneas de fondeo  $L_1$  y  $L_3$  se muestran en color anaranjado, mientras que la línea  $L_2$  en rojo. Las otras 15 líneas de fondeo se muestran en colores azules y grises ya que se encuentran sometidos a una tensión muy baja en comparación a las tres ya mencionadas (Fig. 13, 14 y 15). En el anexo 1, se detallan las tensiones para cada línea de fondeo.

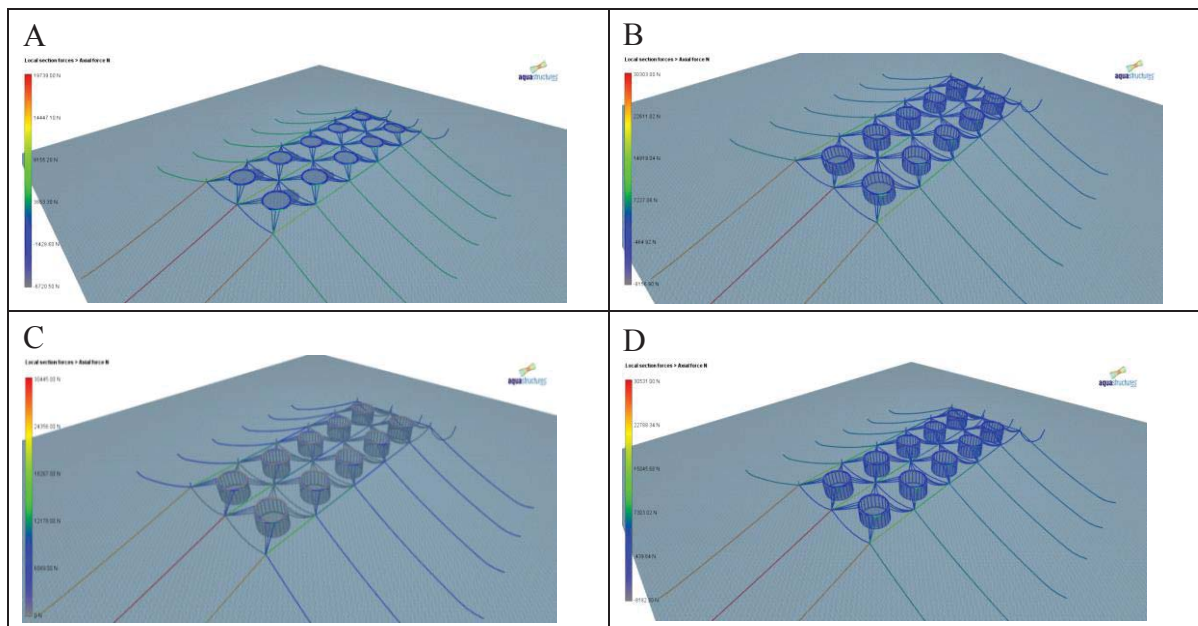


Figura 13. Comparación visual de la fuerza de arrastre para los cuatro  $A_c$  utilizados a una  $v_c$  de 0,25 m/s. A: Modelo con  $A_c$ : 0 kg/m; B: Modelo con  $A_c$ : 30 kg/m. C: Modelo con  $A_c$ : 40 kg/m; D: Modelo con  $A_c$ : 50 kg/m.

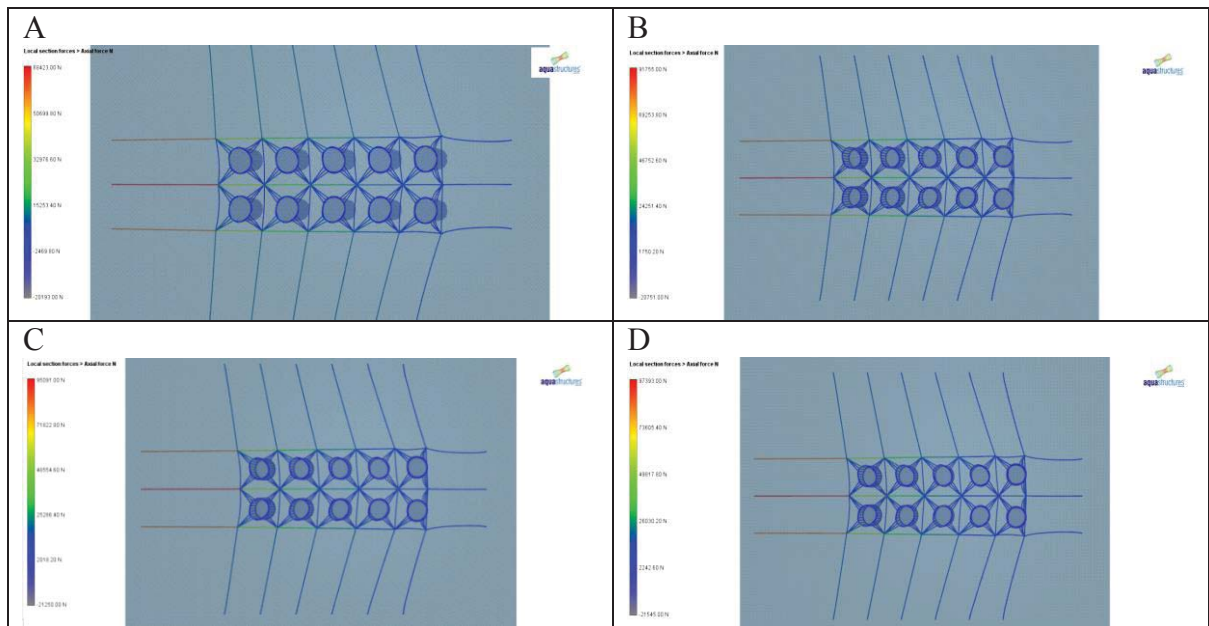


Figura 14. Comparación visual de la fuerza de arrastre para los cuatro  $A_c$  utilizados a una  $v_c$  de 0,5 m/s. A: Modelo con  $A_c$ : 0 kg/m; B: Modelo con  $A_c$ : 30 kg/m. C: Modelo con  $A_c$ : 40 kg/m; D: Modelo con  $A_c$ : 50 kg/m.

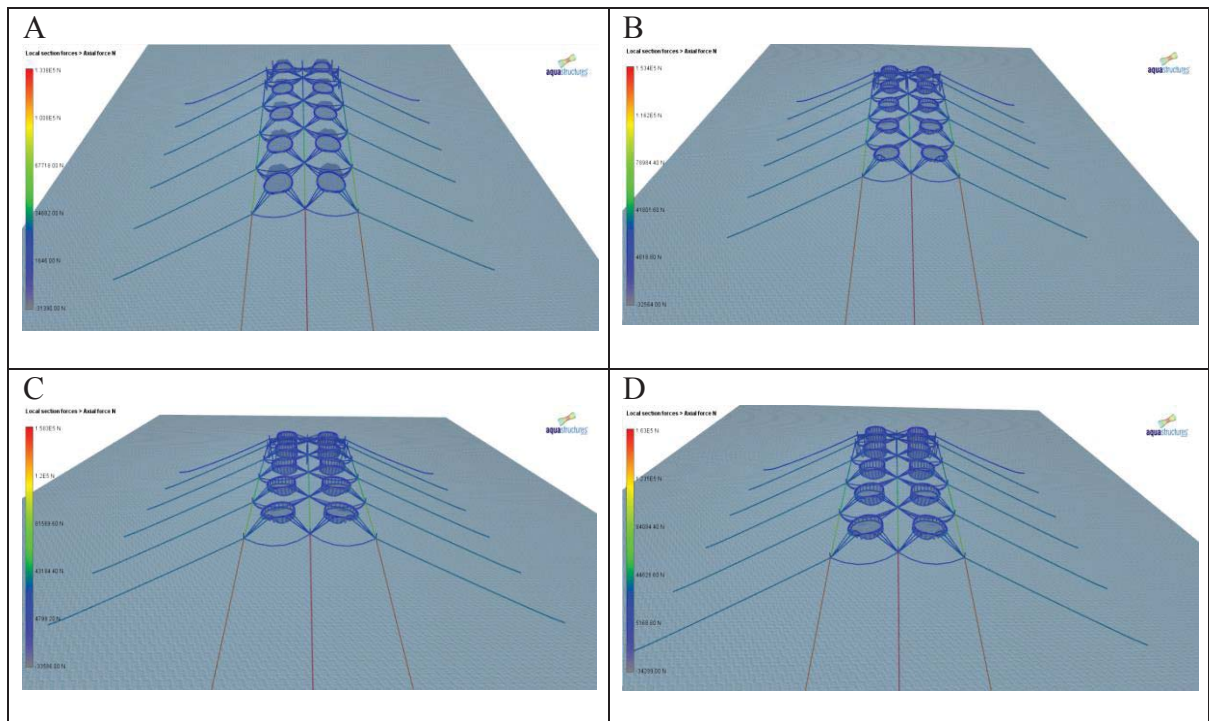


Figura 15. Comparación visual de la fuerza de arrastre para los cuatro  $A_c$  utilizados a una  $v_c$  de 0,75 m/s. A: Modelo con  $A_c$ : 0 kg/m; B: Modelo con  $A_c$ : 30 kg/m. C: Modelo con  $A_c$ : 40 kg/m; D: Modelo con  $A_c$ : 50 kg/m.

### 5.3 Comparación de los resultados

En los resultados obtenidos tanto por medio del método estático (ME) como el dinámico, se obtuvo que para las tres velocidades de corriente a medida que aumenta la  $v_c$ , aumenta también la fuerza de arrastre. En cuanto a los valores obtenidos por medio de la metodología estática, se observa para el caso de 0,75 m/s una disminución de 102.594 N (22,6%) respecto al obtenido en la simulación con un peso de 50 kg/m en el anillo cortacorriente, siendo ésta diferencia la máxima observada. En el caso de la exposición del sistema de cultivo a una corriente de 0,5 m/s, también se observa un resultado inferior en el arrastre total obtenido a través del ME, respecto a los tres modelos dinámicos que en su estructura incorporan el anillo cortacorrientes. La diferencia máxima se observa con el modelo que contiene 50 kg/m en su  $A_c$ , siendo ésta 111.908 N o bien un 41,79% inferior. Respecto a los resultados obtenidos con una intensidad de corriente 0,25 m/s se observa que el modelo estático es menor que los obtenidos en las simulaciones con anillo cortacorriente, donde la mayor diferencia ocurre con la simulación que utilizo el anillo cortacorriente de 50 kg/m, siendo ésta de 43.514 N, lo que representa una disminución del 52,7%. En el caso de la simulación sin  $A_c$ , el resultado obtenido en el modelo estático siempre resultó inferior que el modelo dinámico, observándose una diferencia de 15.175 N, 30.370 N y 21.194 N para una velocidad de corriente de 0,25 m/s, 0,5 m/s y 0,75 m/s equivalente a una disminución en el modelo estático de 27,98%, 16,3% y 5,69% respectivamente (Fig. 16 y Tabla 4).

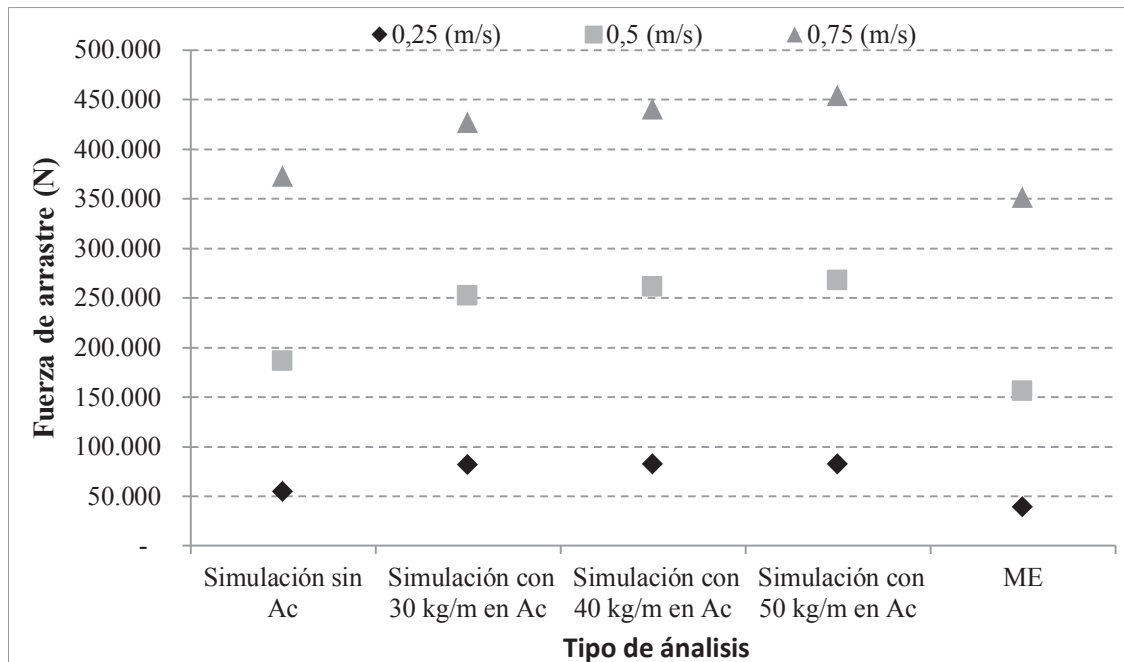


Figura 16. Comparación de fuerzas resistivas resultantes para distintas velocidades de corriente (m/s) y diferentes tipos de construcción de balsa-jaula.  $A_c$ : Anillo cortacorrientes. ME: Modelo estático

Tabla 4. Fuerza de arrastre según magnitud de corriente (m/s) y tipo de análisis. Todas las unidades se encuentran en Newton (N). ME: Método estático. A<sub>c</sub>: Anillo cortacorriente.

<b>Tipo de análisis</b>	<b>0,25 m/s</b>	<b>0,5 m/s</b>	<b>0,75 m/s</b>
<b>ME</b>	39.052	155.893	351.406
<b>Sin A<sub>c</sub></b>	54.227	186.263	372.600
<b>A<sub>c</sub>: 30 kg/m</b>	81.851	251.743	426.800
<b>A<sub>c</sub>: 40 kg/m</b>	82.330	261.213	440.700
<b>A<sub>c</sub>: 50 kg/m</b>	82.566	267.801	454.000

#### 5.4 Cambios en los volúmenes de cultivo

Para cada velocidad de corriente considerada en las simulaciones del sistema balsa-jaula-fondeo, se determinó que la deformación de la jaula disminuye a medida que el peso lineal del anillo cortacorriente aumenta (Fig. 17). Al someter al sistema a una  $v_c$  de 0,25 m/s, el ángulo de deformación del paño fue máximo ( $12,7^\circ$ ) cuando el peso lineal del anillo cortacorriente usado correspondió a 30 kg/m, disminuyendo a  $7,7^\circ$  de deformación cuando este peso lineal aumentó a 50 kg/m. Al aumentar la  $v_c$  a 0,5 m/s se observó un incremento considerable de la deformación del paño, fluctuando entre  $38,0^\circ$  y  $27,7^\circ$  para pesos lineales de 30 y 50 kg/m, respectivamente. Menos favorable aún fue el desempeño del sistema al ser sometido a una  $v_c$  de 0,75 m/s, ya que la deformación en este caso fluctuó entre  $60,7^\circ$  y  $52,0^\circ$  para pesos lineales de 30 y 50 kg/m, respectivamente (Fig. 18).

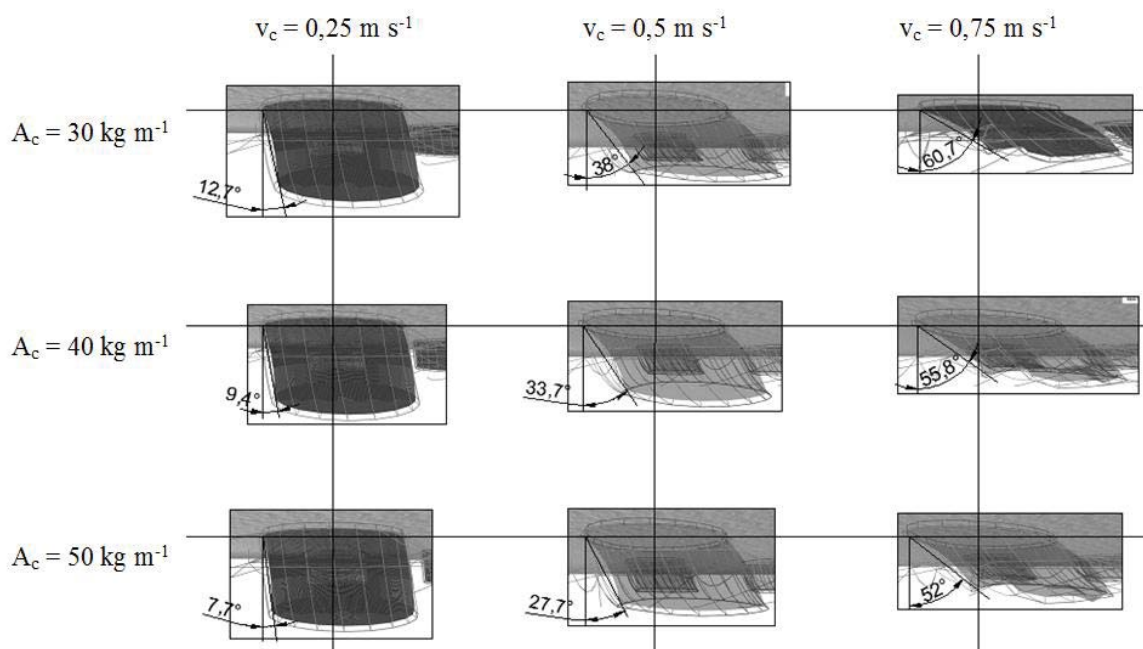


Figura 17. Deformación de la jaula con distintos pesos en su anillo cortacorriente ( $A_c$ ) y velocidades de corriente ( $v_c$ ).

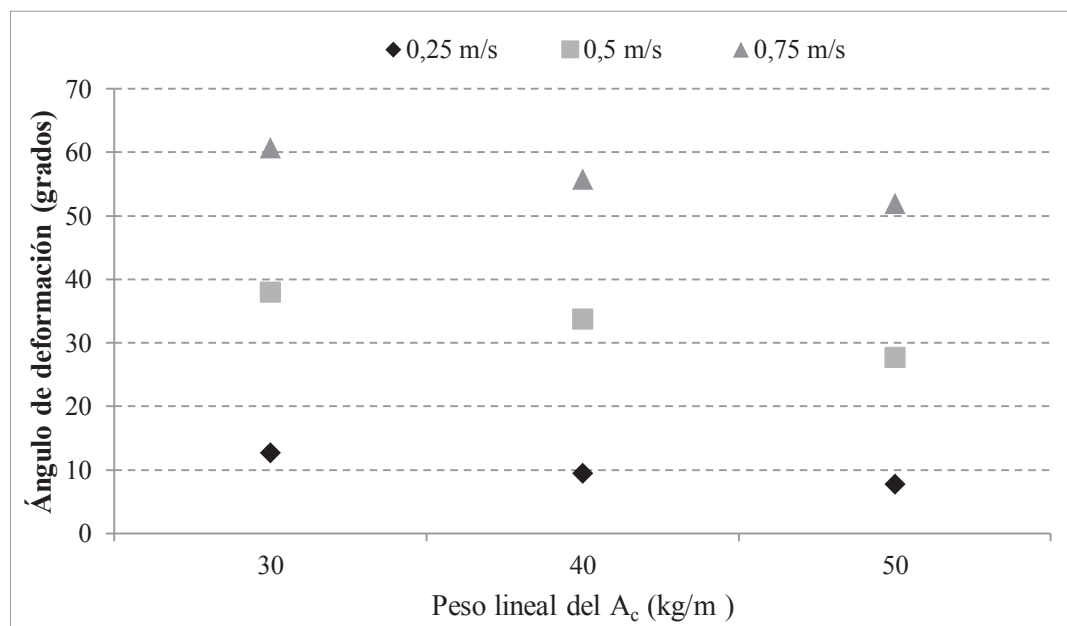


Figura 18. Ángulos de deformación para distintas combinaciones de peso lineal en el anillo cortacorriente y velocidades de corriente.



Debido a la deformación de la jaula por efecto de la velocidad de la corriente, se determinó la existencia de una relación directa entre esta variable y la pérdida de volumen de la jaula, no obstante el aumento de peso lineal del  $A_c$  contribuyó a reducir parcialmente dicha pérdida. En particular, a 0,25 m/s se determinó una pérdida de volumen del 5,4% usando un peso lineal del anillo cortacorriente de 30 kg/m, mientras que con mayor peso lineal (40 y 50 kg/m) la pérdida de volumen es prácticamente despreciable (<2%) (Anexo 2). Por su parte, a 0,5 m/s la pérdida de volumen aumentó de manera significativa, fluctuando entre 30,3% y 19% para pesos lineales de 30 y 50 kg/m, respectivamente. La mayor reducción de volumen interno de una jaula ocurrió con una  $v_c$  de 0,75 m/s y un peso lineal del anillo cortacorriente de 30 kg/m, llegando en este caso a una pérdida de volumen del 49,4% (Tabla 5).

Tabla5.: Pérdida (%) del volumen interno de una jaula en función al peso lineal del anillo cortacorriente y la velocidad de la corriente.

Peso lineal (kg/m)	Velocidad de corriente (m/s)		
	0,25	0,5	0,75
30	5,4	30,3	49,9
40	1,9	25,0	44,8
50	1,3	19,0	34,6

A partir de los resultados descritos anteriormente, se obtuvo un ajuste significativo ( $R^2=0,98$ ) que representa la pérdida relativa de volumen interno de una jaula (expresado en términos porcentuales), válida para el rango de variación de los factores considerados. Dicha ecuación se expresa como:

$$PRV = 80,47 * v_c - 0,51 * P_L + 3,81 \quad (18)$$

donde:

PRV: Pérdida de volumen (%).

$v_c$ : Velocidad de corriente (m/s).

$P_L$ : Peso lineal del anillo cortacorriente (kg/m).

## 6. DISCUSIÓN

El análisis estático cuenta con una serie de supuestos los cuales generan una distorsión del resultado. Un claro ejemplo de esta distorsión, es el hecho que sólo se considere el efecto de las redes en el arrastre total del sistema, generando un resultado inferior al real por no considerar las áreas expuestas de otros componentes como los tubos de flotación, cabos, anillo cortacorriente, entre otros. Además del supuesto de que no se consideren deformaciones en los paños producto del ataque de la corriente, lo que mantiene constante el área expuesta y con ello una distorsión en el resultado final.

La exactitud de la fuerza de arrastre está en función de la precisión de la estimación del coeficiente resistivo ( $C_d$ ) para un panel (Loland, 1991). Es por esta razón que la metodología para obtener el  $C_d$  toma una gran importancia y hace necesario comparar la utilizada en este trabajo con las propuestas por otros autores, los cuales han determinado valores que van en el rango de 1-1,6 dependiendo principalmente de la solidez de los paños y de las características propias del flujo como la turbulencia (Tabla 6). Mientras que este trabajo se utilizó un valor de 1,37 lo cual se encuentra en el rango ya mencionado.

Tabla 6. Coeficientes resistivos utilizados por algunos autores.

<b>Autor(es)</b>	<b>Año</b>	<b><math>C_d</math></b>
<b>Milne</b>	(1970)	1,28
<b>Choo &amp; Casarella</b>	(1971)	1,59-1,24
<b>Bessonneau &amp; Marichal</b>	(1998)	1,2
<b>Turner</b>	(2000b)	1

Respecto a la simulación, la estimación del arrastre se realizó considerando las tensiones en las tres líneas del cabezal que enfrenta la corriente, despreciando las fuerzas observadas en las demás líneas ya que estas fuerzas no representan más del 10% de lo observado en las tres líneas analizadas.

Al comparar los resultados entre las simulaciones y el análisis estático, se demostró que el anillo cortacorriente influye en la fuerza de arrastre total del sistema al disminuir la deformación del paño, ya que a mayor área expuesta, mayor es la fuerza de arrastre resultante, tal como lo demostrara Tsukrov *et al.* (2003) quienes observaron cómo disminuía la fuerza de arrastre al aumentar el ángulo de deformación del paño. Según lo observado en este trabajo, para una simulación con anillo cortacorrientes y una sin éste a una misma intensidad de corriente, siempre el arrastre total fue mayor en el caso donde se utilizó este elemento. Así mismo, el modelo estático mostró valores cercanos con los obtenidos en la simulación sin anillo cortacorriente, observándose una tendencia a disminuir esta diferencia a medida que aumentaba la velocidad de la corriente. Estas

diferencias podrían ocurrir debido a que el ME no considera la dependencia entre la deformación y las fuerzas externas, a diferencia del modelo dinámico, dificultad que Lader (2005) enfrentara en su estudio al reconocer que al parecer esta dependencia sólo podría originarse a través de un modelo numérico.

El uso de variación de volumen en términos de porcentaje responde a que los valores obtenidos a través de AutoCAD® son valores aproximados producto de la metodología empleada, en donde por ejemplo para una jaula con 3 velocidades de corriente, se obtuvieron 3 volúmenes distintos para la jaula afectada solo por la fuerza de gravedad (sin el actuar de la corriente), esto debido a la dificultad de obtener una fotografía de la jaula desde un mismo punto en tres modelos distintos. Sin embargo, para un solo modelo esta fotografía es tomada siempre desde la misma posición, tanto para la jaula afectada solo por la fuerza de gravedad como para la jaula que además fue sometida a la fuerza de la corriente. Esto permitió determinar el porcentaje de variación de volumen para cada caso.

En cuanto a los resultados de las variaciones de volumen de cultivo, se logró cuantificar la pérdida de volumen interno de una jaula al aumentar la velocidad de corriente. Así también, se determinó el aporte que produce el uso de anillos cortacorriente para mantener el volumen interno de una unidad de cultivo, en cuyo caso tiende a preservar la geometría de la jaula y de este modo evitar cambios drásticos en la densidad de cultivo. Para jaulas de cultivo de similar solidez en los paños, Lader & Enerhaug (2005) determinaron tendencias comparables en términos de pérdidas de volumen en función a la velocidad de la corriente, reduciendo el efecto de deformación con un aumento en el peso lineal del anillo cortacorriente, lo cual contribuye a validar los resultados obtenidos en el presente trabajo.

En cuanto a los resultados de las variaciones de volumen de cultivo en función del peso en el anillo cortacorrientes, se observaron importantes variaciones de volumen, las cuales son mayores a medida que aumenta la velocidad de la corriente. Es por esto que el peso a utilizar en el anillo cortacorrientes dependerá de las condiciones del sitio donde se emplace el centro de cultivo. Esto toma gran importancia, ya que las reducciones en los volúmenes de la jaula genera un aumento en la densidad de cultivo y con ello un aumento del estrés en los peces afectando su bienestar (Trumbull *et. al.*, 2005) y por ende una disminución en los beneficios.

La literatura científica es escasa respecto a la pérdida de volumen en unidades de cultivo de peces, y más aún, generalmente las características de los sistemas no son directamente comparables, ya sea por diferencias en las dimensiones de los sistemas o bien debido a la solidez de los paños que conforman las jaulas. Considerando lo anterior, es posible mencionar que algunos autores han estimado pérdidas del volumen interno en jaulas de cultivo que fluctúan entre 20% y 70% para velocidades de corriente que oscilan entre 0,13 y 1,0 m/s (Tabla 7).

Tabla 7. Estimación de pérdida de volumen en jaulas de cultivo obtenida por diversos autores.

<b>Pérdida de volumen (%)</b>	<b>Velocidad de corriente (m/s)</b>	<b>Autores</b>
<b>70</b>	0,5	Moe <i>et al.</i> (2010)
<b>60</b>	0,52	Lee <i>et al.</i> (2008)
<b>50</b>	1,0	Reyes (1993)
<b>40</b>	0,35	Lader <i>et al.</i> (2008)
<b>20</b>	0,13	Lader <i>et al.</i> (2008)

Lo anterior demuestra que el volumen interno de una jaula no es constante, determinando entonces que la densidad de cultivo en la etapa de engorda de los peces en el mar sea variable a un mismo nivel de biomasa. Esto tiene implicancias en el cultivo dadas las restricciones que han sido impuestas en la producción para favorecer el manejo sanitario. Por ejemplo, la densidad máxima de cultivo de salmón del Atlántico (*Salmo salar*) en Noruega no debe ser superior a 25 kg/m<sup>3</sup> (Norwegian Ministry of Fisheries and Coastal Affairs, 2008) mientras que en Chile esta densidad no debe ser superior a 17 kg/m<sup>3</sup> para la misma especie (Res. N° 1449/2009 del Servicio Nacional de Pesca). Si en ambos casos la deformación de la jaula llegase a provocar una pérdida de volumen interno del 50%, la densidad de cultivo en el momento de máxima capacidad aumentaría a 50 y 34 kg/m<sup>3</sup> en Noruega y Chile, respectivamente.

Las deformaciones de la jaula deben ser reconocidas en relación al bienestar de los peces, ya que un aumento significativo de la densidad tendría incidencia en el oxígeno disponible, en las tasas de crecimiento y en los niveles de estrés asociados al hacinamiento (Turnbull *et al.*, 2005) y por ende una disminución en los beneficios. En el caso particular del salmón del Atlántico, se ha descrito su preferencia por los sectores más profundos de las jaulas bajo ciertas condiciones de luz y temperatura (Juell & Fosseidengen, 2004). Sin embargo, la deformación de las jaulas no sólo afecta al volumen interno sino que también altera las preferencias de los peces en cautiverio, ya que el efecto de la velocidad de la corriente tiende a elevar el piso de la jaula y obligar a los peces a situarse en la parte superior de la columna de agua.

Sin duda la tendencia en cuanto a los sistemas de cultivo se dirigen a aumentar las dimensiones de las balsas-jaula y ubicarlas en zonas más expuestas (Sunde *et al.*, 2003; Marra, 2005), donde las magnitudes de las corrientes y oleajes afectarían drásticamente el volumen de cultivo si no se toman medidas de compensación al respecto. Una medida alternativa corresponde al uso de jaulas de cobre que ofrecen menor resistencia al arrastre que las redes de poliamida y, en general, otorgan una mayor integridad de la estructura y

estabilidad del volumen de la jaula ante condiciones climáticas extremas (Tsukrov *et al.*, 2011). No obstante lo anterior, para los sistemas tradicionales compuestos por redes de poliamida, este trabajo demostró que el uso de anillos cortacorriente contribuye de manera significativa a reducir la deformación de la jaula y con ello reducir las pérdidas de volumen interno de las unidades de cultivo, siendo recomendable que el dimensionamiento del anillo sea evaluado mediante simulación dinámica de manera previa a su construcción e instalación.

## 7. CONCLUSIONES

Las fuerzas resistivas estimadas a través del análisis estático para el módulo de balsa-jaula fueron de 39.052 N, 155.893 N y 351.406 N para una velocidad de corriente de 0,25, 0,5 y 0,75 m/s respectivamente. Mientras que obtenido por medio del método de simulación dinámica fue en un rango de 51.851 y 454.000 N para los modelos que incluyeron anillo cortacorriente de 30, 40 y 50 kg/m y para el modelo sin éste componente, la fuerza fue de 54.227 N a 372.000 N para las velocidades de corriente ya mencionadas.

De lo anterior, se concluye que las diferencias se deben principalmente a las consideraciones propias del modelo estático, el cual considera solo algunas de las variables involucradas en el análisis del problema, a diferencia del modelo dinámico que considera una mayor cantidad de variables. Estas diferencias son máximas cuando se contrasta el modelo estático con el dinámico que incluyó el  $A_c$  de 50 kg/m las que fluctuaron de 52,7 a 24,04 % para el rango de  $v_c$  estudiado.

El aumento de la velocidad de corriente afecta significativamente la deformación de la jaula de cultivo pudiendo llegar a una pérdida de volumen interno de la unidad de cultivo del 50% en el rango evaluado. Sin embargo, la deformación de la jaula puede ser reducida de manera significativa diseñando un anillo cortacorrientes con un peso lineal adecuado a las condiciones ambientales del sitio.

Finalmente se logró presentar una ecuación lineal que permite estimar la pérdida de volumen de una jaula de cultivo dada las consideraciones señaladas es este estudio.

## 8. REFERENCIAS

- Aarsnes, J., G. Løland & H. Rudi. 1990. Current forces on cage, net deflection. In: Engineering for Offshore Aquaculture, Thomas Telford, Glasgow, pp. 137–152.
- Bessonneau, J. & D. Marichal. 1998. Study of the dynamics of submerged supple nets (Applications to trawls). Laboratoire d' Hydrodynamique Navale, École Centrale de Nantes, Nantes, France. Ocean Eng., Vol.25. N° 7, pp. 563-583.
- Berstad A., H. Tronstad & A. Ytterland. 2004. Design rules for marine fish farms in Norway. calculation of the structural response of such flexible structures to verify structural integrity. Proceedings of OMAE2004 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vancouver, Canada. OMAE2004-51577.
- Castelló F. 1993. Acuicultura Marina: Fundamentos biológicos y tecnología de la producción. Universidad de Barcelona, Barcelona, 739 pp.
- Carnicero A. 2001. Introducción al Método de los Elementos Finitos. Escuela Técnica Superior de Ingeniería ICAI (Universidad Pontificia Comillas, Madrid). España.
- Choo Y. & M. Casarrella. 1971. Hydrodynamic resistance of towed cables. J. Hydronautics, pp. 126-131.
- Goudey C., T. Boaz & C. Bridger. 2003. The design, installation, and performance of a single-point mooring for an offshore cage. In: C. J. Bridger & B. A. Costa-Pierce 66 (eds.). Open Ocean Aquaculture: From Research to Commercial Reality. The World Aquaculture Society, Louisiana, United States, pp. 191-195.
- Huang C., H. Tang & J. Liu. 2007. Modeling volume deformation in gravity-type cages with distributed bottom weights or a rigid tube-sinker. Aquacult Eng. 37: 144–157.
- Izaguirre P., B. Serán, J. Núñez, J. Lara & A. Souto. 2006. Calculo de esfuerzos en jaulas de cultivo y leneas de fondeo. Escuela Superior de Ingenieros Navales (ETSIN), Universidad Politécnica de Madrid (UPM). pp. 96-104.
- Juell, J.-E. & J.E. Fosseidengen. 2004. Use of artificial light to control swimming depth and fish density of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in production cages. Aquaculture, 233: 269-282.
- Kawakami T. 1964. The theory of designing and testing fishing nets in model. In: Modern Fishing Gear World, vol. 2. Fishing News, London, pp. 471-482.
- Kimura H. & Y. Munekage. 1982. Tension of mooring lines for offshore fish culture cage in waves. Coast. Eng. Jap. 25, 293 pp.

- Lader P., B. Enerhaug, A. Fredheim & J. Krokstad. 2003. Modelling of 3D net structures exposed to waves and current. In: Eatock Taylor, R. (ed.), 3rd International Conference on Hydroelasticity in Marine Technology. Department of Engineering Science, The University of Oxford, 15–17 September 2003. Oxford, UK.
- Lader P. & B. Enerhaug. 2005. Experimental investigation of forces and geometry of a net cage in uniform flow. IEEE J. Ocean Eng. 30: 79–84.
- Lader P., T. Dempster, A. Fredheim & Ø. Jensen. 2008. Current induced net deformations in full-scale sea-cage for Atlantic salmon (*Salmo salar*). Aquacult Eng. Volumen 38: 52-65.
- Lee C., H. Kim, G. Lee & K. Koo. 2005. Dynamic simulation for a fish cage system. In: 24th International conference on offshore mechanics and arctic engineering (OMAE), 12–17 June 2005. Halkidiki, Greece.
- Lekang O. 2007. Aquaculture Engineering. Blackwell Publishing, Oxford. 340 pp.
- Lisac D. 1996. Recent developments in open sea cages: Practical experience with the tension leg cage. Open ocean aquaculture proceedings of an international conference. pp. 513-522.
- Loland G. 1991. Current forces on and flow through fish farms. Division of Marine Hydrodynamics. The Norwegian Institute of Technology, 149 pp.
- Luco R. 2003. La Acuicultura en Chile. [<http://www.bibliotecnica.upc.es/bib280/cursmari/parte3.pdf>].
- Masatsune, N. 1985. Discussion on net and rope material, basic gear behavior in fishing operation, model net experiment system on fishing instrument. Fishing Techniques. pp 45-68.
- Melo, T., C. Hurtado & D. Queirolo. 2002. Aplicación de teoría de paños en redes de pesca. Manual del Curso dictado vía e-learning a través del Campus Virtual UCV. 65 pp.
- Mott L. Robert. 1996. Mecánica de fluidos aplicada. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. Ciudad de México. 579 pp.
- Morison J., M. O'Brien, J. Johnson, & S. Schaaf. 1950 The Force Exerted by Surface Waves on Piles. Transactions of AIME. 189 pp.
- Nedelec C., M. Portier, J. Prado. 1979. Techniques de peche. Institut Scientifique et technique des peche maritimes, 146 pp.



Norwegian Ministry of Fisheries and Coastal Affairs. 2008. Aquaculture operations regulations with remarks, [<http://www.lovddata.no/cgi-wift/ldles?doc=/sf/sf/sf-20080617-0822.html>].

Olivares P. 2004. Análisis preliminar resistivo de un tren de balsas jaulas, utilizando metodología teórica en contraste con mediciones *in situ*. Tesis Esc. Cs Del Mar, PUCV, Valparaíso. 46 pp.

Reyes R. 1993. Aplicación de la teoría de paños e hidrodinámica al estudio del comportamiento de jaulas para salmones. Tesis Esc. Cs Del Mar, PUCV, Valparaíso. 137 pp.

Silva N. & S. Palma 2006. Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos. Comité Oceanográfico Nacional - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. pp. 59-62.

Sunde, L.M., M.A. Heide, N. Hagen, A. Fredheim, E. Forås & Ø. Prestvik. 2003. Review on technology in the Norwegian aquaculture industry. SINTEF Fisheries and Aquaculture Report STF 80 A034002. 32 pp.

Thoms A. 1989. Pointers to safer mooring. *Fish Farmer*. 12: 27-28.

Troncoso C. 2006. Análisis de jaula circular de HDPE mediante el método de elementos finitos. Universidad Austral de Chile. 58 pp.

Tronstad H. 2000. Nonlinear hydroelastic analysis and design of cable net structures like fishing gear based on the finite element method. Ph.D. thesis. Institute of marine technology NTNU, Trondheim.

Trumbull J., B. Alisdair, A. Colin, B. James & H. Felicity. 2005. Stocking density and welfare of cage farmed Atlantic salmon: application of a multivariate analysis. *Aquaculture*, 243: 121-132.

Tsukrov, I., A. Drach, J. Decew, M. Robinson-Swift & B. Celikkol. 2011. Characterization of geometry and normal drag coefficients of copper nets. *Ocean Eng.*, 38: 1979-1988.

Tsukrov I., O. Eroshkin, D. Fredriksson, M.R. Swift & B. Celikkol. 2003. Finite element modeling of net panels using a consistent net element. *Ocean Eng.*, 30: 251–270.

Turner R. 2000a. Offshore mariculture: Site evaluation. In: J. F. Muir & B. Basurco (eds.). *Mediterranean Offshore Mariculture*. CIHEAM, Zaragoza, pp. 141–157.

Turner R. 2000b. Offshore mariculture: Mooring system design. *Seawork*, Dunstaffnage Yacht Haven, by Dunbeg, Oban, Argyll PA37 1PX, Scotland, UK.

Sanhueza. 2006. Interacción operacional entre wellboats y balsas jaulas. Tesis para optar al título de ingeniero naval. Facultad de ciencias de la ingeniera. Universidad Austral de Chile. 85 pp.

Zhao Y., Y. Li, G. Dong, F. Gui & B. Teng 2007. A numerical study on dynamic properties of the gravity cage in combined wave-current flow. *Ocean Eng.*, 34: 2350–2363.

## 9. ANEXOS

Anexo 1: Tensiones (N) obtenidas bajo simulación dinámica en las líneas de fondeo  $L_n$  (n: 1, 2, 3) para cada tipo de jaula según su peso (kg/m) en el anillo cortacorriente ( $A_c$ ) y velocidad de corriente (m/s).

Tensión (N) en la línea ( $L_n$ )	Velocidad de corriente (m/s)		
	0,25	0,5	0,75
<b>Sin <math>A_c</math></b>			
$L_1$	17.240	58.919	119.400
$L_2$	19.739	68.423	133.800
$L_3$	17.248	58.921	119.400
Total	54.227	186.263	372.600
<b><math>A_c</math>: 30 (kg/m)</b>			
$L_1$	25.775	79.996	136.700
$L_2$	30.303	91.755	153.400
$L_3$	25.773	79.992	136.700
Total	81.851	251.743	426.800
<b><math>A_c</math>: 40 (kg/m)</b>			
$L_1$	25.943	83.063	141.200
$L_2$	30.445	95.091	158.300
$L_3$	25.942	83.059	141.200
Total	82.330	261.213	440.700
<b><math>A_c</math>: 50 (kg/m)</b>			
$L_1$	26.018	85.206	145.500
$L_2$	30.531	97.393	163.000
$L_3$	26.017	85.202	145.500
Total	82.566	267.801	454.000

Anexo 2: Volúmenes de cultivo para la jaula estática, deformada y porcentaje de disminución del volumen para cada peso (kg/m) del anillo cortacorriente ( $A_c$ ) y velocidad de corriente (m/s).

Volumen (m <sup>3</sup> )	Velocidad de corriente (m/s)		
	0,25	0,5	0,75
<b><math>A_c</math>: 30 (kg/m)</b>			
Total jaula estática	14.005,6	13.165,3	12.477,2
Total jaula deformada	13.253,4	9.179,1	6.249,9
Diferencia	752,2	3.986,2	6.227,2
% de disminución	5,4	30,3	49,9
<b><math>A_c</math>: 40 (kg/m)</b>			
Total jaula estática	13.032,4	14.328,5	13.382,4
Total jaula deformada	12.789,9	10.739,0	7.390,1
Diferencia	242,4	3.589,5	5.992,3
% de disminución	1,9	25,1	44,8
<b><math>A_c</math>: 50 (kg/m)</b>			
Total jaula estática	13.170,6	13.379,6	12.723,7
Total jaula deformada	13.005,4	10.841,6	8.320,0
Diferencia	165,3	2.538,1	4.403,7
% de disminución	1,3	19,0	34,6