

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA

Máster Universitario en Acuicultura 2013/2014

---



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

**“DESARROLLO DE UN SENSOR DE  
SALINIDAD DE BAJO COSTE PARA  
PISCIFACTORÍAS”**

***TRABAJO FINAL DE  
MASTER***

Autor/a:

**PARRA BORONAT, LORENA**

Tutor/a:

**LLORET MAURI, Jaime  
RODILLA ALAMÁ, Miguel**

***VALENCIA, 2014***

### **Agradecimientos**

*Querría agradecer en primer lugar a mis tutores, Jaime Lloret y Miguel Rodilla por todo lo mucho que me ha enseñado y apoyado en este proyecto. Y en concreto a Jaime Lloret por la oportunidad que me ha dado de trabajar con él y su grupo de investigación.*

*En segundo lugar le quiero dar las gracias a Sandra Sendra, por haberme guiado y ayudado en algunos puntos de este trabajo incluso desde la distancia. Por explicarme y ayudarme en cierto tipo de conocimientos que tal vez se alejan un poco de mi ámbito de trabajo.*

*Por último a mi familia, mis padres, Francisco y Francisca, mi hermana Mar y mi pareja Borja y a mis amigos quienes me habéis dado ánimos para proseguir y que nunca habéis dudado de que alcanzaría todo lo que me propusiera.*

*Muchas gracias a todos, esto no hubiese sido posible sin vosotros.*

**Resumen:**

El control de los parámetros fisicoquímicos del agua es una necesidad en las piscifactorías. Este control puede suponer diversas mejoras tanto desde el punto de vista económico como operacional. Las redes de sensores son una opción viable que permite hacerlo. Pero los sensores deben cumplir con ciertas características como tener un bajo mantenimiento y ser de bajo coste. En esta tesina de master nos centramos en el desarrollo de un sensor de salinidad. Los cambios en la salinidad afectan a la forma en que los peces se alimentan y a la supervivencia de las larvas. Para obtener un sensor de salinidad óptimo para las piscifactorías realizamos una búsqueda exhaustiva del estado del arte. Finalmente decidimos desarrollar un sensor inductivo, el cual se basa en la inducción de una bobina a partir de un campo magnético.

Primero desarrollamos 13 prototipos con diferentes características como número de espiras, diámetro de la bobina y diámetro del hilo de cobre. Los datos obtenidos pueden explicar cómo los cambios en las características físicas de la bobina afectan a la forma en que mide el sensor. Una vez está hecho, elegimos un prototipo basándonos en su precio, dimensiones, máximo voltaje obtenido y frecuencia de pico.

Con el prototipo elegido hemos desarrollado varios test para asegurar que el sensor alcanza los objetivos. El primero era para saber la extensión del campo magnético. Su extensión afectará al volumen de agua necesario para el calibrado. Más tarde el calibrado se realiza con más de 30 puntos de control. Finalmente realizamos dos pruebas para asegurar la idoneidad del sensor para las piscifactorías. El primero de ellos se desarrolla con una muestra de agua de salinidad estable, durante una hora se toman medidas cada 5 minutos. El propósito de esta prueba es asegurarnos que no hay una deriva en la medida debido a la polarización de los iones presentes en el agua por el campo magnético. Este efecto había sido descrito en uno de los artículos consultados. Finalmente pusimos el sensor dentro de una pecera con un pez. El objetivo era asegurarnos que el campo magnético no afecta al pez. Al mismo tiempo que asegurarnos que el pez no causa ninguna interferencia. En esta memoria describimos todos los test realizados así como los resultados obtenidos.

Palabras clave: conductividad eléctrica; bobina de inducción; campo magnético; sensor de salinidad, granja marina, acuicultura

**Abstract:**

The control of physicochemical parameters is needed in the fish farms. This control can suppose several improvements in their production from an economical and operational point of view. Wireless sensor networks are a feasible option to do it. But the sensors should have some desirable characteristics as low cost and low maintenance. In this master thesis we focus on the development of a salinity sensor. The changes in salinity affects to the fishes in their feeding process and larval survival. To obtain an optimum salinity sensor for fish farms we searched exhaustively the state of the art. Finally, we decided to develop an inductive sensor, which is based in the induction of a coil from a magnetic field.

First we developed 13 prototypes with different characteristics such as number of spires, diameter of coil, and diameter of copper wire. The obtained data can explain how changes on their physical characteristics of the coil affect. Once it is done, we choose a prototype basing on its price, dimensions, maximum obtained voltage and peak frequency.

With the chosen prototype we developed several tests to ensure that sensor raises the objectives. First test was developed to know the extension of the magnetic field. The extension of the magnetic field will affect to the volume of water required for calibration. Later the calibration is performed with more than 30 checkpoints. Finally we performed two tests to determine the suitability of the sensor for fish farms facilities. The first test is developed with a water sample with stable salinity, during one hour we take measures each 5 minutes. The aim of test is to ensure that there is no drift due to the polarization of the ions present in the water caused by the magnetic field. This effect was described in one of the consulted articles. Finally we put the sensor inside an aquarium with a fish. The aim of this test is to ensure that the magnetic field does not affect that fish. At the same time, we ensure that the fish do not cause any interference. In the memory we describe all the performed tests and the obtained results.

Keywords: electrical conductivity; inductive coil; magnetic field; salinity sensor, aquaculture, fish farms

## Índice

Índice de Tablas .....	7
Índice de Figuras .....	8
1. Introducción .....	10
<b>1.1. Introducción</b> .....	10
<b>1.1.1. Efectos en los cambios de salinidad</b> .....	12
<b>1.1.2. ¿Dónde mediríamos la salinidad en acuicultura?</b> .....	13
<b>1.2. Precedentes en la UPV</b> .....	14
<b>1.3. Objectives</b> .....	15
<b>1.4. Nuestra propuesta</b> .....	16
<b>1.5. Estructura</b> .....	17
2. Antecedentes .....	18
<b>2.1. Revisión bibliográfica</b> .....	18
<b>2.2. Trabajos previos</b> .....	19
3. Caracterización física del sensor .....	22
<b>3.1. Introducción</b> .....	22
<b>3.2. Material y métodos</b> .....	22
<b>3.3. Primer test: Mantener la relación de espiras</b> .....	23
<b>3.4. Segundo test: Variaciones en la relación de espiras (I) Variación de espiras en la bobina alimentada</b> .....	26
<b>3.5. Tercer test: Variaciones en la relación de espiras (II) Variación de espiras en la bobina inducida</b> .....	30
<b>3.6. Cuarto test: variar diámetro del cable</b> .....	34
<b>3.7. Quinto test: variar diámetro de la tubería</b> .....	36
<b>3.8. Conclusiones</b> .....	39
4. Calibrado del sensor .....	40
<b>4.1. Introducción</b> .....	40
<b>4.2. Material y métodos</b> .....	40
<b>4.3. Elección de una prototipo</b> .....	40
<b>4.4. Volumen mínimo</b> .....	41
<b>4.5. Calibración del sensor elegido</b> .....	42
<b>4.6. Conclusiones</b> .....	43
5. Pruebas en entorno real.....	44
<b>5.1. Introducción</b> .....	44

<b>5.2. Material y métodos</b> .....	44
<b>5.3. Pruebas realizadas</b> .....	44
<b>5.4. Conclusiones</b> .....	45
<b>6. Conclusiones</b> .....	46
<b>6.1. Cumplimiento del objetivo</b> .....	46
<b>6.2. Conclusiones del proyecto</b> .....	46
<b>6.3. Problemas encontrados y cómo se han solucionado</b> .....	47
<b>6.4. Aportaciones personales</b> .....	47
<b>6.5. Futuras líneas de investigación</b> .....	47

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1. Resumen de los efectos de la salinidad en parámetros alimentación en <i>S.aurata</i> obtenidos por A. Calderer	12
Tabla 2. Resumen de los efectos de la salinidad en la alimentación en <i>S.aurata</i> obtenidos por R. Laiz-Carrión	13
Tabla 3. Comparativa de precios entre sensores comerciales y los propuestos (modelo 1 y modelo 2)	20
Tabla 4. Conductividad y salinidad de los patrones	22
Tabla 5. Características de los prototipos (I)	23
Tabla 6. Características de los prototipos (II)	27
Tabla 7. Valores de diferencia de voltaje (V) entre los patrones 4 y 5	34
Tabla 8. Características de los prototipos (III)	34
Tabla 9. Características de los prototipos (IV)	36
Tabla 10. Comparativa entre prototipos 4, 9 y 13 desde un punto de vista económico	40
Tabla 11. Precio del sensor propuesto	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Resultados previos con el sensor Hall con distintas salinidades	20
Figura 2. Resultados previos con dos bobinas con distintos medios y frecuencias	20
Figura 3. Prototipos previos del 1 al 4 de izquierda a derecha	20
Figura 4. Resultados del prototipo previo 1	21
Figura 5. Resultados del prototipo previo 2	21
Figura 6. Resultados del prototipo previo 3	21
Figura 7. Resultados del prototipo previo 4	21
Figura 8. Calibrado del prototipo previa 4	21
Figura 9. Efecto del volumen de agua	21
Figura 10. Ejemplo de un prototipo terminado	22
Figura 11. Esquema del circuito eléctrico formado por las bobinas	23
Figura 12. Sistema de medida ensamblado	23
Figura 13. Imagen de los prototipos 1 al 4.	24
Figura 14. Comportamiento del prototipo 1 a diferentes frecuencias	24
Figura 15. Comportamiento del prototipo 2 a diferentes frecuencias	25
Figura 16. Comportamiento del prototipo 3 a diferentes frecuencias	25
Figura 17. Comportamiento del prototipo 4 a diferentes frecuencias	25
Figura 18. Punto de medida propuesto para el prototipo 1	25
Figura 19. Punto de medida propuesto para el prototipo 2	25
Figura 20. Punto de medida propuesto para el prototipo 3	26
Figura 21. Punto de medida propuesto para el prototipo 4	26
Figura 22. Representación de la caída de voltaje en el patrón 2 en los prototipos 1 - 4	26
Figura 23. Imagen de los prototipos 5 al 9.	27
Figura 24. Comportamiento del prototipo 5 a diferentes frecuencias (I)	28
Figura 25. Comportamiento del prototipo 6 a diferentes frecuencias (I)	28
Figura 26. Comportamiento del prototipo 7 a diferentes frecuencias (I)	28
Figura 27. Comportamiento del prototipo 8 a diferentes frecuencias (I)	28
Figura 28. Comportamiento del prototipo 9 a diferentes frecuencias (I)	28
Figura 29. Punto de medida propuesto para el prototipo 5 (I)	30
Figura 30. Punto de medida propuesto para el prototipo 6 (I)	30
Figura 31. Punto de medida propuesto para el prototipo 8 (I)	30
Figura 32. Punto de medida propuesto para el prototipo 9(I)	30
Figura 33. Comportamiento del prototipo 5 a diferentes frecuencias	31
Figura 34. Comportamiento del prototipo 7 a diferentes frecuencias	31
Figura 35. Comportamiento del prototipo 8 a diferentes frecuencias	31
Figura 36. Comportamiento del prototipo 9 a diferentes frecuencias	31
Figura 37. Correlación entre el número de espiras en la bobina inducida y la frecuencia a la cual presenta el primer pico de inducción.	32
Figura 38. Punto de medida propuesto para el prototipo 5	33
Figura 39. Punto de medida propuesto para el prototipo 7	33

Figura 40. Punto de medida propuesto para el prototipo 8 a 900kHz	33
Figura 41. Punto de medida propuesto para el prototipo 8 a 1700kHz	33
Figura 42. Punto de medida propuesto para el prototipo 9 a 250kHz	33
Figura 43. Punto de medida propuesto para el prototipo 9 a 2500kHz	33
Figura 44. Imagen de los prototipos 10 y 11 más el prototipo 3.	34
Figura 45. Comportamiento del prototipo 10 a diferentes frecuencias	35
Figura 46. Comportamiento del prototipo 11 a diferentes frecuencias	35
Figura 47. Punto de medida propuesto para el prototipo 10	36
Figura 48. Punto de medida propuesto para el prototipo 11	36
Figura 49. Imagen de los prototipos 12 y 13 más el prototipo 3.	36
Figura 50. Comportamiento del prototipo 12 a diferentes frecuencias	37
Figura 51. Comportamiento del prototipo 13 a diferentes frecuencias	37
Figura 52. Relación Voltaje-Diámetro prototipo	38
Figura 53. Relación Frecuencia pico-Diámetro prototipo	38
Figura 54. Relación frecuencia del pico (C) con Diámetro prototipo (A) y número de espiras en la bobina inducida (B)	38
Figura 55. Punto de medida propuesto para el prototipo 12	39
Figura 56. Punto de medida propuesto para el prototipo 13	39
Figura 57. Modelo matemático para la altura mínima	42
Figura 58. Modelo matemático para el diámetro mínimo	42
Figura 59. Calibración completa	43
Figura 60. Rango lineal en la calibración	43
Figura 62. Voltaje inducido con muestra de salinidad estable durante el tiempo	44
Figura 62. Fotografía durante la primera exposición	45
Figura 63. Fotografía del pez comiendo, segunda exposición	45
Figura 64. Sensor de salinidad propuesto con su esquema final	48

# 1. Introducción

---

## 1.1. INTRODUCCIÓN

---

Los peces estando sumergidos en el agua están en continuo contacto con gran cantidad de sustancias disueltas en el medio acuoso, estas sustancias dan al agua unas características fisicoquímicas que junto a su temperatura son factores importantes en el desarrollo de los peces. Los cambios en esos parámetros fisicoquímicos pueden afectarles en las tasas de alimentación [1], implicar un mayor coste metabólico [2] o incluso llevarles a una situación de estrés [3] haciendo peligrar su supervivencia. Es por ello que gran cantidad de parámetros fisicoquímicos suelen ser controlados de forma rutinaria en las instalaciones de cría de peces. A continuación se listan algunos de los parámetros que comúnmente se suelen controlar:

- Temperatura
- Oxígeno disuelto
- NH<sub>3</sub>
- NO<sub>2</sub>
- NO<sub>3</sub>

Sin embargo otros parámetros que pueden ser importantes para el desarrollo de los peces no se les suele dar tanta importancia por lo que no son objeto de medición rutinario. En este grupo podríamos englobar otros parámetros fisicoquímicos del agua como la conductividad, la salinidad, el pH o la turbidez. Muchos de estos parámetros tienen cierta dependencia unos con otros, un claro ejemplo sería el NH<sub>3</sub>/NH<sub>4</sub>, la constante de disociación entre ellos depende de la temperatura, el pH y la salinidad.

El principal inconveniente para las empresas a la hora de medir los parámetros es en muchos casos que el personal que está trabajando en las jaulas puede no tener los conocimientos necesarios para tomar la decisión de en que punto o puntos hay que realizar el control de cada parámetro. Por ejemplo algunos parámetros deben medirse a lo largo de la columna de agua (como la temperatura o la salinidad) y es independiente de en qué zona de la jaula se tome. Sin embargo otros parámetros como el oxígeno disuelto que también debería tomarse a lo largo de la columna de agua es importante saber en qué zona se ha medido, según la corriente que exista saber si se ha tomado antes de que el agua entre en la jaula o después es vital para poder interpretar la información. Por otro lado la distribución espacial de los datos es relevante, es decir, los parámetros muestreados pueden tener fluctuaciones a lo largo del día que si se toma solo una medida al día no quedan representadas y podrían ser vitales para entender o predecir posibles problemas en el crecimiento de los peces. Además el tiempo que se puede llegar a perder durante la toma de diversas medidas para cada parámetro a lo largo de la columna de agua debe tenerse en cuenta a la hora de planificar las labores diarias de los empleados.

Por tanto, el conocimiento de ciertos parámetros fisicoquímicos del agua pese a ser importante para planificar la producción, pero la obtención de dicha información de la forma como se está haciendo actualmente (por parte de los empleados) ni consigue información suficiente ni resulta óptima para la empresa. Sin embargo las nuevas tecnologías y en concreto las redes de sensores ofrecen una alternativa que puede solucionar ambos problemas. Por un

lado la distribución de los sensores a lo largo de la columna de agua y su toma de datos continua puede resolver las necesidades de información con suficiente distribución espacial y temporal. Por otro lado, la autonomía de dichas redes no requiere de excesivo mantenimiento de forma que los operarios no necesitan invertir parte de su tiempo en la toma de datos.

Las redes de sensores, son redes basadas en pequeños nodos que actúan como procesadores a los cuales van unidos uno o más sensores, que son los encargados de tomar los datos de las variables estudiadas. Estos nodos se comunican entre ellos mediante diferentes tecnologías tanto cableadas como inalámbricas utilizando para ellos diferentes protocolos y algoritmos. Suelen caracterizarse por su escalabilidad y automatización, en los últimos años una de las principales líneas de investigación se basa en la reducción del consumo de energía por estas redes. [4,5] Las redes de sensores tienen gran cantidad de aplicaciones en áreas muy diversas como industria alimentaria [6], control de infraestructuras [7], Investigación en ambientes hostiles como volcanes [8] o glaciares [9], agricultura de precisión [10] incluso detección de fuegos [11]. Además existen varios ejemplos de sus aplicaciones en la acuicultura, donde puede ser usado en un futuro para mejorar la forma de alimentación [12] o para tener un control constante de los parámetros fisicoquímicos del agua [13].

Las principales ventajas del uso de sensores son que hacen más fácil la toma de datos en ambientes difícilmente accesibles, pueden tomar datos en tiempo real y ser accesibles a través de diversas aplicaciones desde internet. Es decir la red de sensores se instala en la jaula flotante y desde tierra se pueden recibir los datos tomados en el mismo momento. Como los sensores están conectados a un nodo sensor el cual se puede programar se puede obtener la resolución temporal deseada. Usando sensores pequeños distribuidos a través de la columna de agua podemos obtener una elevada resolución espacial de los datos. Eliminan la necesidad del muestreo ya que el sensor se encuentra en la zona a muestrear de forma que no se requiere la toma de muestras y el envío de estas al laboratorio. Por otro lado el nodo sensor es capaz de transmitir dicha información directamente al usuario final en tiempo real o almacenarla en una base de datos para ser consultada a posteriori.

Los principales inconvenientes de las redes de sensores en muchos casos es la necesidad de calibración periódica y los requerimientos energéticos que hacen necesario reemplazar las fuentes energéticas. Sin embargo en los últimos años los protocolos para reducir el consumo energético han hecho el tiempo útil de las baterías sea mayor y por lo tanto la necesidad de cambio de baterías sea cada vez un problema menor. Finalmente la necesidad de calibración periódica depende del tipo de sensor empleado y en la forma en la que este interactúa con el entorno para sensar el parámetro fisicoquímico. De forma que buscando la forma óptima puede llegar a reducirse o incluso eliminarse la necesidad de calibración periódica, sino que el sensor junto al nodo sensor ya estaría calibrados una vez instalados. Sin embargo existe todavía otro inconveniente de las redes de sensores que impide que se extienda su uso en las piscifactorías, su elevado coste. En general los sensores adaptados para entornos subacuáticos tienen a presentar unos precios elevados, lo que ralentiza su expansión, ya que los beneficios a corto tiempo de la instalación de sensores pueden no verse por parte de las empresas.

A continuación y dando que el presente trabajo se basa en el desarrollo de un sensor de salinidad se muestran diversos casos donde los cambios en la salinidad ha causado cambios en los peces.

### 1.1.1. EFECTOS EN LOS CAMBIOS DE SALINIDAD

En este apartado vamos a mostrar un breve resumen de los efectos de los cambios en la salinidad en la nutrición de los peces, prestando especial atención al cultivo de dorada.

A. Calderer desarrollo en su tesis doctoral [14] una serie de experimentos donde mantuvo tanto a alevines como a juveniles de dorada (*Sparus aurata* L.) en distintas condiciones de temperatura (18°C y 28°C) y salinidad (12psu, 22psu y 36psu). Observo como los hábitos alimenticios cambiaban en función de las condiciones del medio en el que estaban. Los resultados para los alevines mostraron mejores Índices de Conversión y un mayor peso final para las doradas mantenidas en una salinidad de 22psu con la temperatura de 28°C. Pese a que no existieron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos de 22psu y 36psu los valores si eran mejores en el grupo de 22psu. En cuanto a los juveniles el peso final fue mayor para las doradas mantenidas a una salinidad de 22psu sin embargo el índice de conversión fue un poco más alto en 22psu. Podemos ver todos estos datos en la Tabla 1 para la temperatura de 28°C. En cuanto a los datos de 12psu tanto en juveniles como en alevines presentaron resultados mucho peores.

**Tabla 1.** Resumen de los efectos de la salinidad en parámetros alimentación en *S.aurata* obtenidos por A. Calderer

	Salinidad (psu)	Índice de Conversión	Peso final
Alevines	22	1,46	33,52
	36	1,52	30,47
Juveniles	22	2,83	264,90
	36	2,78	249,84

A. J. Conides et al. realizaron diversos experimentos [15] con ejemplares de lubina (*Dicentrarchus labrax* L.) y dorada capturados del medio. En estos experimentos se les daban distintas cantidades de comida, un grupo fue alimentado hasta que se saciarán, mientras que los otros grupos recibían 2/3 del alimento, 1/3 del alimento y otro grupo permaneció en ayunas. Se dieron estas cantidades de pienso a ejemplares en distintas condiciones de salinidad, a 8psu a 18psu a 28psu y otro grupo se mantuvo en condiciones naturales de salinidad. Los resultados mostraron que el óptimo de salinidad para las lubinas se encontraba por encima de 30psu mientras que para las doradas debía estar entre 18psu y 20psu.

R. Laiz-Carrión et al, en su trabajo [16] muestran los experimentos realizados con grupos de doradas las cuales estuvieron durante un período de 100 días a salinidades de 38psu, 12psu y 6psu. Entre otros parámetros nutricionales destacamos los resultado obtenidos en cuanto al peso final donde fue muy superior el peso alcanzado a 12psu que además presentaba diferencias estadísticamente significativas con los pesos finales obtenidos en las otras condiciones de salinidad. Por otro lado la Tasa de Crecimiento Especifico fue de nuevo superior y presentó diferencias estadísticamente significativas en condiciones de 12psu, ver Tabla 2.

**Tabla 2.** Resumen de los efectos de la salinidad en la alimentación en *S.aurata* obtenidos por R. Laiz-Carrión

	Caso I	Caso II	Caso III
Salinidad (psu)	6	12	38
Peso final (g)	134,2	144,1	120,5
Tasa de crecimiento específico (g/d)	1,911	1,990	1,791

C. C. Mylonas et al. Realizaron una serie de ensayos [17] con ejemplares *Umbrina cirrosa* que fueron mantenidos durante 84 días en distintas condiciones de salinidad de 4psu, 10psu y 40psu. Los mejores resultados en cuanto a máximos crecimiento en las condiciones de 10psu, que eran las condiciones de salinidad más próximas a la salinidad del medio interno del pez.

A. Tandler et al, estudiaron el efecto de los cambios de salinidad en larvas de dorada [18], utilizaron huevos de dorada obtenidos del medio natural. Tras la eclosión separaron en tres grupos para tres salinidades diferentes a 25psu, 32,5psu y a 40psu durante 32 días. Se evaluaron tanto la supervivencia como el porcentaje de peces eran capaces de desarrollar correctamente la vejiga natatoria y llenarla de aire. Los resultados mostraron que la supervivencia era máxima para salinidades de 25psu, con casi un 20% de supervivencia, en cuanto a los otros grupos mostraron supervivencias inferiores al 12%. Los resultados muestran diferencias aun mayores en cuanto a los porcentajes de peces que llenaron la vejiga natatoria, 92,5% para salinidades de 25psu y menos del 70% para las otras salinidades.

Existe gran cantidad de trabajos como los que se acaban de resumir para otras especies donde analizan tanto parámetros nutricionales, supervivencia larvaria e incluso la relación de la salinidad con el desarrollo de algunos parásitos.

### **1.1.2. ¿DÓNDE MEDIRIAMOS LA SALINIDAD EN ACUICULTURA?**

Con los datos mostrados anteriormente queda más que claro que la salinidad es un parámetro muy importante que debe tenerse en cuenta a la hora criar a los peces. Por tanto debería ser uno de los parámetros que deberían medirse en una instalación acuícola. Sin embargo según el tipo de instalación donde se encuentren los peces podremos llegar a tener un control sobre la salinidad o no.

En instalaciones en mar abierto no podemos controlar la salinidad a la que están los peces, pero si podremos tenerla en cuenta a la hora de alimentarlos. Otros autores [14] demostraron que la cantidad de pienso ingerida variaba en función de la salinidad del medio, por tanto no solo la temperatura y el peso medio son factores a tener en cuenta cuando se calculan las cantidades de pienso diarias. De esa forma se podrá gestionar mejor el pienso, ajustándolo a la necesidad de los peces. Si bien es cierto que en la mayoría de instalaciones los cambios de salinidad no son demasiado grandes, algunas instalaciones cercanas al área de influencia de las desembocaduras de ríos pueden tener cambios importantes. Otras zonas donde hay cambios importantes es en la costa mediterránea de Andalucía y Murcia donde la entrada de agua más dulce del Atlántico forma una serie de turbulencias y según las condiciones climatológicas del momento una misma zona puede tener agua del Atlántico, del Mediterráneo o una mezcla.

Existen también instalaciones acuícolas situadas en zonas estuarinas o de manglares, sobre todo la cría de camarones. A los camarones también les afectan los cambios de salinidad,

descendiendo su supervivencia en aguas con baja salinidad [19]. Los estuarios son zonas donde existe una gran variación de salinidad que depende muchas veces de los caudales de los ríos. Debido a diversos fenómenos (cambio climático y cambio de usos de suelo entre otros) los caudales de los ríos están sufriendo grandes cambios. Ante este medio tan cambiante puede ser una buena idea tomar medidas de la salinidad Algunos procesos como el consumo de oxígeno se ha demostrado que depende entre otras cosas de la salinidad [20] por tanto la medida de dicho parámetro puede ir ligada a un sistema de aireación para momentos críticos.

En otros casos si es posible tener un control sobre la salinidad del medio en el cual se encuentran los peces. Esto se da en las instalaciones en tierra con circuito abierto o cerrado que toman su caudal de pozos, del mar o de ríos. En las instalaciones de circuito abierto se puede tener una medida de salinidad a la entrada de la instalación con un sistema que compense la salinidad de entrada aunque es posible que el coste que supongo tener otra fuente de agua no compense para hacerlo de forma continua. Sin embargo en momentos puntuales donde exista una fuerte subida o bajada de salinidad si resulte interesante. Aunque no exista un sistema compensatorio si es importante como mínimo conocer la salinidad del agua que está entrando a la instalación para adecuar la cantidad de pienso o si hay que prestar especial atención a la aparición de patógenos. Por otro lado, donde mayores posibilidades de control existes es en aquellas instalaciones de circuito cerrado, donde por un lado se debe medir la salinidad de la entrada de agua en el momento de ponerla en funcionamiento y por otro controlar la salinidad del agua del circuito a lo largo del tiempo. En las grandes instalaciones de circuito cerrado es común que la salinidad tienda a ir subiendo debido a la evaporación de agua desde lo tanques a la atmosfera. Por tanto existen dos opciones, o tener en cuenta dicha subida e ir controlándola o bien compensarla con pequeñas aportaciones de agua dulce.

Con los ejemplos anteriores el uso de sensores de salinidad en una instalación acuícola queda justificado. Siempre y cuando cumpla unas características de precio, necesidad de mantenimiento y facilidad en su uso para que resulte interesante para las empresas. Si evaluáramos los beneficios que puede suponer para las instalaciones el control de la salinidad, bien sea solo midiéndola y adaptando los procesos a la salinidad de cada momento o bien en casos en los que puede existir un ajuste de esta, veríamos que puede traer grandes beneficios. La cantidad de pienso ahorrado al ajustar la cantidad diaria teniendo en cuenta la salinidad, las bajas que se pueden evitar añadiendo aireación en momentos de subidas de salinidad e incluso ajustarla en los circuitos de larvas a la salinidad óptima para aumentar su supervivencia y en los circuitos de larvas y pre-engorde para obtener los máximos índices de conversión.

## **1.2. PRECEDENTES EN LA UPV**

---

Se ha realizado una búsqueda para encontrar trabajos similares al que se presenta en la UPV. Y se han encontrado los siguientes:

Por un lado se han presentado 3 trabajos en los que realizaban sensores subacuáticos o que usaran campos magnéticos para medir parámetros físico-químicos.

En Diciembre del 2009 Juan Manuel González Legidos, presento un nodo sensor capaz de medir parámetro físico-químicos en ambientes subacuáticos en su proyecto fin de carrera

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN NODO SENSOR PARA LA MEDIDA DE PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS EN PISCINAS CLIMATIZADAS”. Este proyecto se presentó para la titulación de Ingeniero Técnico de Telecomunicación, esp. Sistemas Electrónicos

Más tarde, en Junio de 2010, Carlos Bonache Bañuls presentó en su proyecto fin de carrera un sensor que a través de la medida del campo magnético era capaz de detectar distintos valores de humedad en el suelo. Su trabajo se presentó en la titulación de Ingeniero Técnico de Telecomunicación, esp. Sistemas Electrónicos bajo el nombre “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SENSOR DE HUMEDAD DE SUELO BASADO EN SENSORES DE CAMPOS MAGNÉTICOS GMR”.

En Setiembre de 2013, Lorena Parra Boronat, presentó en su tesina fin de máster un sensor de conductividad para entornos subacuáticos. La tesina se presentó en el Máster en Evaluación y Seguimiento Ambiental de Ecosistemas Marinos y Costeros con el nombre “DESIGN AND DEVELOPMENT OF A LOW-COST UNDERWATER CONDUCTIVITY SENSOR”.

Por otro lado se han presentado dos trabajos en los que se relacionaban las redes de sensores u otras nuevas tecnologías a procesos que se dan en una instalación de acuicultura:

En Setiembre del 2012 Rocio Ester Letelier Núñez presentó en su tesina un sistema de medida de la cantidad de sal presente en un producto elaborado a partir de merluza. La tesina se que llevaba por nombre “APLICACIÓN DE LA ESPECTROSCOPIA DE IMPEDANCIA EN LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO EN SAL EN PRODUCTOS DE LA PESCA”, se presentó en el Máster Universitario en Acuicultura.

En Setiembre del 2013 Sandra Sendra Comte en su tesis doctoral mostró diversas aplicaciones de redes de sensores en instalaciones acuícolas en mar abierto. Las aplicaciones estaban centradas en el control de parámetros físico-químicos y del comportamiento de los peces para mejorar la forma de alimentarlos. Estas aplicaciones se presentaron en la tesis doctoral en el Departamento de Ingeniería Electrónica, “DEPLOYMENT OF EFFICIENT WIRELESS SENSOR NODES FOR MONITORING IN RURAL, INDOOR AND UNDERWATER ENVIRONMENTS”.

Podemos ver por tanto que el desarrollo de sensores que permitan medir parámetros físico-químicos del agua ha sido tema para diversos trabajos presentados en la UPV. Además también se han presentado trabajos en los que la aplicación de nuevas tecnologías se utilizan para facilitar o automatizar diferentes procesos llevados a cargo en distintos procesos de la acuicultura. Por tanto el presente trabajo cuenta con varios precedentes tanto en la UPV.

### **1.3. OBJETIVOS**

---

El principal objetivo del presente trabajo es desarrollar un sensor de salinidad que tenga las siguientes características.

- Coste barato (ya que en una instalación haría falta gran cantidad de sensores y pretendemos desarrollar sistemas de bajo coste)
- Minimizar el contacto entre el sensor y el medio de medida (para evitar que la los organismos dañen el sistema de medición, tanto por acumulación de algas como por mordeduras de peces o incluso golpes)

- Reducir las necesidades de mantenimiento y calibrado ya que no estará muy accesible (para que no suponga una gran pérdida de tiempo para los operarios que supervisan la piscifactoría)
- Que su rango de medida sea entre 20psu y 45psu de forma que pueda detectar tanto una subida como una bajada considerable desde el valor medio del agua de mar (36psu aprox.). En cuanto a la precisión del sensor, no es necesaria una gran precisión, teniendo una precisión de 0,1psu será suficiente., ya que queremos detectar variaciones que afecten a los peces.

Como hemos visto anteriormente los conductímetros con base inductiva no necesitan estar en contacto con el fluido que van a medir, solo entra en contacto su campo magnético. Basándonos en eso, un sensor con base inductiva sería ideal ya que minimizaría el contacto entre el sensor y el medio de medida, además con las oportunas correcciones por temperatura y un microcontrolador que asegurase una entrada de energía estable no debería necesitar calibrarse. En cuanto al coste de estos sensores, el cual ya se ha calculado y veremos más adelante, es mucho más bajo que los sensores comerciales que se pueden adquirir. Para alcanzar los objetivos anteriores y desarrollar un sensor de conductividad específico para acuicultura se realizarán las siguientes pruebas:

- Inicialmente se realizaran diferentes pruebas para asociar las diferentes características físicas de la bobina a diferentes rangos de medida o sensibilidades. Para ello realizaremos los siguientes test en todos ellos se realizaran medidas de 5 muestras de salinidad diferentes además de medir en diferentes condiciones de alimentación (diferentes frecuencias):
  - Cambio en el número de espiras
  - Cambio en la relación de espiras
  - Cambio en el diámetro del hilo de cobre
  - Cambio en el diámetro del solenoide
- Una vez hayamos relacionado que características son las idóneas para el rango de medida que buscamos crearemos una bobina con las características que buscamos y la calibraremos. Para ello realizaremos los siguientes tests:
  - Calibrado del sensor con numerosos puntos de control (numerosas muestras)
  - Hallar el volumen mínimo de agua para cubrir todo el campo magnético generado
- Una vez el sensor este calibrado y listo para usarlo realizaremos las siguientes comprobaciones:
  - Media de varias muestras preparadas en laboratorio
  - Medida d varias muestras de origen natural
  - Medida en continuo de una muestra de salinidad descendente
  - Medida de una muestra de salinidad constante con peces

#### **1.4. NUESTRA PROPUESTA**

---

Como ya hemos desarrollado en apartados anteriores pretendemos desarrollar un sensor de salinidad óptimo para el uso en instalaciones acuícolas. De los diferentes puntos propuestos donde es necesario el control de la salinidad nos vamos a centrar en el control de cambios de

salinidad en jaulas flotantes o en instalaciones en tierra con recirculación de agua salada. En ambos casos estaremos trabajando con salinidades típicas del agua de mar y posibles desviaciones tanto por arriba como por abajo. Nos proponemos que nuestro sensor tenga en su rango de medida valores comprendidos entre 20 y 45 psu y una sensibilidad de 0,1psu.

Además pretendemos crear un sensor de bajo coste con necesidades mínimas en cuanto a mantenimiento y calibración como hemos visto anteriormente, por tanto será un sensor que pueda aislarse del medio, es decir que la parte física del sensor que realiza las medidas no esté en contacto con el agua. Por lo tanto nos decantamos por la opción de medir la conductividad a través de campos magnéticos.

Por último pretendemos que nuestro sensor este instalado en un futuro en instalaciones acuícolas por lo que es necesario que no se vea afectado por la presencia de peces y que a su vez no sea una fuente de estrés para los mismos.

### **1.5. ESTRUCTURA**

---

La estructura del resto de esta memoria se detalla a continuación. En el capítulo 2 vamos a realizar una revisión de diversos artículos donde los autores desarrollan conductímetros prestando especial atención a aquellos casos donde se han desarrollado conductímetros basados en la metodología inductiva. Además resumimos los resultados obtenidos en anteriores trabajos.

Posteriormente en el Capítulo 3 presentamos las pruebas realizadas para caracterizar físicamente el sensor, es decir que características deben tener las bobinas en cuanto a número de espiras, relación de espiras, diámetro, etc. También presentamos en el Capítulo 3 los resultados obtenidos en dichas pruebas y la elección del sensor de salinidad.

Caracterizamos dicho sensor en el Capítulo 4, donde se presenta el exhaustivo calibrado con más de 20 puntos de calibrado dentro del rango de medición. Además se muestran las pruebas realizadas para determinar el volumen mínimo de agua que cubre todo el campo magnético generado, puesto que las pruebas en el laboratorio se realizan con recipientes de vidrio de tamaño reducido pero el volumen que abarca el campo magnético es mucho mayor. Con esas medidas se podrá obtener una relación que permitirá corregir el calibrado para que este sea válido para volúmenes de agua mucho mayores.

En el Capítulo 5 se presentan las pruebas realizadas para determinar la idoneidad del sensor producido para entornos de una piscifactoría. Primero se realizarán mediciones con muestras de agua preparadas en el laboratorio de las cuales se desconoce su salinidad, que posteriormente a la medida con el sensor se medirá su conductividad con un equipo de laboratorio. También se presentan los resultados obtenidos con muestras de origen natural, recolectadas en el mar y en zonas estearinas. Así mismo se mostrarán los resultados obtenidos al realizar una medición de salinidad de una muestra de agua de salinidad descendiente. Por último se presentan los resultados de las pruebas realizadas en presencia de peces.

Para finalizar en el Capítulo 6 presentamos las conclusiones obtenidas tras analizar todos los datos y mostramos cuales son las posibles líneas de investigación a desarrollar en un futuro.

## 2. Antecedentes

---

### 2.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

---

Como se ha visto anteriormente la salinidad es un parámetro muy importante y que debe ser controlado en el día a día de una instalación acuícola. Realizamos a continuación una revisión de las diferentes metodologías empleadas para medir la salinidad o conductividad del agua.

Existen principalmente dos vías para medir la conductividad del agua, la primera de ellas, ha sido empleada durante mucho tiempo y sigue estando presente en la mayoría de equipos de laboratorio, es la metodología resistiva [21] y [22]. Esta metodología consiste en utilizar placas de cobre que actúan como ánodo y cátodo. El voltaje registrado en el cátodo depende directamente de la cantidad de electrolitos que haya en el agua ya que a mayor cantidad de iones presentes en el agua menor será la resistencia que ofrezca a la corriente eléctrica. El principal problema de esta forma de medir la conductividad del agua es que los electrodos deben estar permanentemente en contacto con agua, esto supone dos problemas, el primero de ellos, que durante el tiempo que no esté midiendo tiene que estar sumergido en una disolución en la mayoría de los casos. El segundo problema es el ambiente en el cual va a tomarse la medida, se trata de una masa de agua con gran cantidad de materia orgánica disuelta, con microorganismos, peces que pueden morder el equipo de medida...En general se trata de un medio bastante hostil para sondas que tienen unos altos requerimientos de mantenimiento y limpieza. Además estas sondas generalmente requieren un calibrado bastante periódico.

La segunda metodología empleada para medir conductividad o salinidad en el agua es la metodología inductiva [23] y [24]. En este caso no se genera un campo eléctrico que se pone en contacto con el agua. Esta vez se cuenta con un circuito eléctrico cerrado que no está en contacto con el agua, pero el cual contiene una bobina que genera un campo magnético, dicho campo magnético es registrado por diferentes vías, pero es directamente proporcional a la cantidad de electrolitos presentes en el agua. La principal diferencia con el método anterior es que en este caso no hay ninguna parte de circuito que necesite estar en contacto directo con el agua, es decir se puede aislar del agua. La bobina que genera el campo magnético puede estar en un recipiente hermético pero su campo magnético se expande fuera de dicho recipiente entrando en contacto con el agua. De esta forma se eliminan los problemas derivados de ensuciamiento de componentes electrónicos, de roturas por golpes o mordeduras de peces. Es decir se trata de un sistema mucho más robusto.

Y. Wei et al. en [21] propusieron un sensor de conductividad usando electrodos. Para evitar los problemas causados por la polarización alrededor de los electrodos usaron un pulso bipolar. Dicho pulso se genera usando un microcontrolador MSP430F149, que también se usaba para realizar la compensación por temperatura. Usaron diferentes ecuaciones para compensar para tres rangos de temperatura, de 1°C a 10°C, de 10°C a 20°C y de 20°C a 30°C.

M. Medrano et al. [22] desarrollaron un conductímetro para líquidos con baja conductividad, basándose en la metodología resistiva. Testearon diferentes distancias entre electrodos, desde 0,5mm a 2,5mm. El mínimo valor de conductividad que fueron capaces de medir fue 0,0002mS/m, con un error del 10%. El voltaje con el que alimentaron el electrodo lo fueron variando desde -10V a +10V.

H. Ramos et al. [23] desarrollaron un sensor de conductividad de bajo coste cuya principal aplicación era el seguimiento en ambientes estuarinos. El sensor está compuesto por dos electrodos en forma de anillo más dos puntas metálicas empleadas para medir el voltaje de salida. Midieron a frecuencias de 0 a 30 kHz. El rango de medida de dicho sensor va desde 50mS/m a 650mS/m. Los autores calibraron el sensor para temperaturas desde 14°C a 30°C.

A. Ribeiro et al. [24] presentaron un sensor de conductividad basado en la metodología inductiva. El sensor estaba compuesto por dos bobinas con forma de toroide (ambos con 20 espiras) y con una sola capa de espiras. Los toroides tenían un diámetro externo de 44mm y un diámetro interno de 26mm, cada uno tenía una altura de 20mm. El contenedor de agua que emplearon tenía un diámetro de 84mm y una altura de 136mm. Midieron el voltaje inducido a frecuencias que iban desde 0,3kHz hasta 30kHz. El voltaje máximo registrado fue de 1V en las muestras de agua con menor conductividad e iba decreciendo el voltaje tal como aumentaba la conductividad del agua. La conductividad medida ha sido de 0,1S/m a 5S/m y el rango de temperaturas donde se realizó la compensación fue de 20°C a 30°C.

## **2.2. TRABAJOS PREVIOS**

---

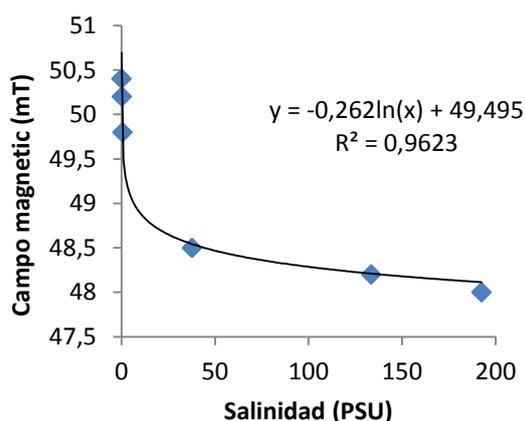
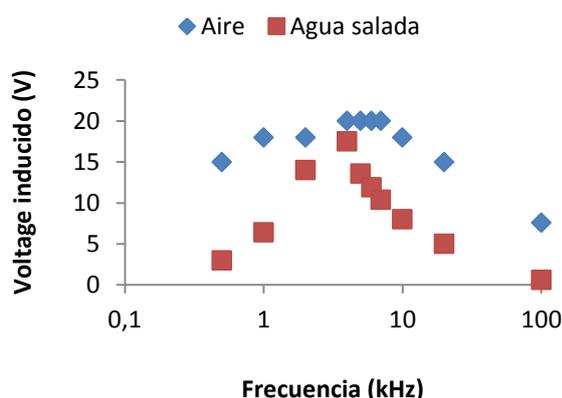
A continuación realizaremos un breve resumen del trabajo realizado con anterioridad por parte del grupo de investigación relacionado con el sensor de conductividad. De forma previa al presente trabajo se realizaron ya diversos estudios sobre como utilizando los cambios en el campo magnético generado por una bobina éramos capaces de detectar la conductividad o salinidad de un líquido.

Los primeros se realizaron para averiguar si con elementos básicos éramos capaces de detectar los cambios en el campo magnético producidos por cambios de salinidad [25]. Para ellos desarrollamos varios experimentos en los cuales testeábamos dos metodologías para medir el campo magnético. La primera de ellas consistía en el uso de un sensor de efecto Hall, un sensor de mide el campo magnético. La segunda opción se basaba en utilizar una bobina que inducía una corriente eléctrica proporcional al campo magnético. En ambos casos el campo magnético se generó con una bobina alimentada a distintos voltajes y frecuencias.

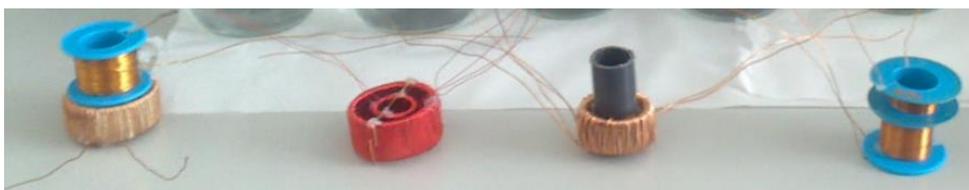
Pese a que os resultados mostraron que el sensor de efecto Hall aportaba datos mucho más precisos, como podemos observar en la Figura 1, presentó varios problemas. En la Figura 2 observamos parte de los resultados obtenidos con el uso de una bobina inductiva donde realizamos medidas sobre aire o agua salada y entrevimos que existía variaciones en el campo magnético al cambiar el medio y que estas variaciones eran dependientes de la frecuencia. Por lo tanto se decidió centrar los estudios siguientes en encontrar una combinación de bobinas (alimentada e inducida) que aportada datos precisos. También se realizó una comparativa de precios con otro tipo de sensores existentes en el mercado, que podemos ver en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Comparativa de precios entre sensores comerciales y los propuestos (modelo 1 y modelo 2)

Nombre	Fabricante	Método de medida	Price (€)
HI 720122-1	Hanna Instruments Deutschland GmbH	Inductivo	516
HI 98309	Hanna Instruments Deutschland GmbH	Conductivo	123
PCE-CM 41	PCE Holding GmbH	Conductivo	85
WQ-COND	Global Water	Conductivo	622
YSI 5560	YSI	Conductivo	295
Modelo 1	-	Inductivo (2 bobinas)	48
Modelo 2	-	Inductivo (sensor Hall)	43

**Figura 1.** Resultados previos con el sensor Hall con distintas salinidades**Figura 2.** Resultados previos con dos bobinas con distintos medios y frecuencias

El siguiente trabajo que realizamos [26] se centró en encontrar que combinación de bobinas era mejor para poder detectar cambios en la salinidad. Para ello ensamblamos 4 prototipos con distintas combinaciones de solenoides y toroides, los cuales podemos verlos en la Figura 3. Empleamos 5 patrones de salinidad en un intervalo de 0,21 a 72 psu.

**Figura 3.** Prototipos previos del 1 al 4 de izquierda a derecha

Realizamos medidas a distintas frecuencias desde 10kHz hasta 750kHz, llegando en algún caso hasta los 2000kHz. Vimos que las distintas configuraciones tenían todas ellas puntos donde era posible diferenciar las muestras de salinidad. El prototipo previo 1, cuyos resultados vemos en la Figura 4, podía diferenciar los patrones a una frecuencia de 500kHz. El prototipo previo 2, en la Figura 5, era capaz de diferenciar los patrones a la frecuencia de 500kHz. En la Figura 6 vemos los resultados del prototipo previo 3 que a las frecuencias de 1750 y 2000kHz diferenciaba claramente los patrones. Por último el prototipo previo 4 cuyos resultados vemos en la Figura 7 diferenciaba los patrones a una frecuencia de 150kHz.

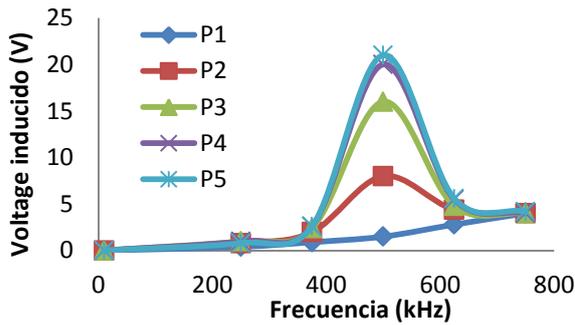


Figura 4. Resultados del prototipo previo 1

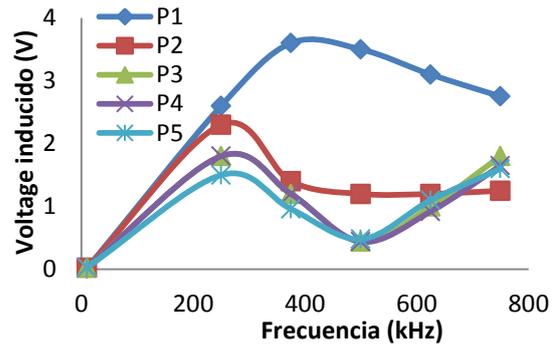


Figura 5. Resultados del prototipo previo 2

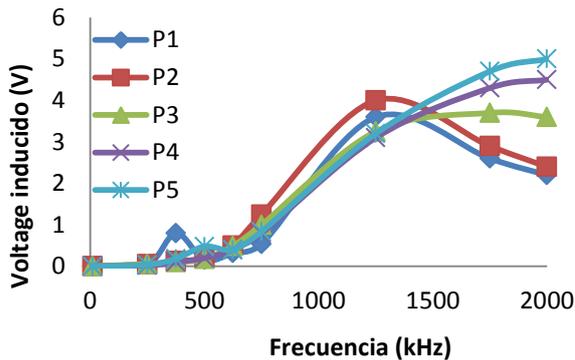


Figura 6. Resultados del prototipo previo 3

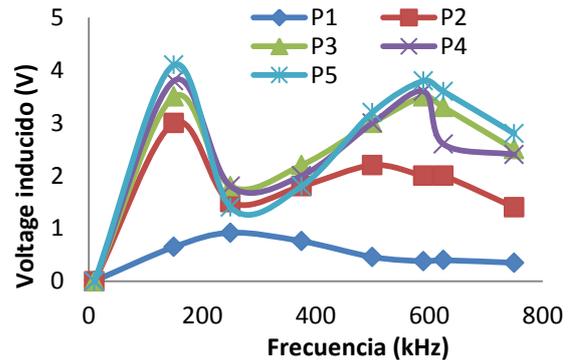


Figura 7. Resultados del prototipo previo 4

Por último en [27] elegimos para continuar las pruebas uno de los prototipo previos (prototipo previo 4) al cual se le realizaron una serie de pruebas al detalle. En primer lugar se realizó un calibrado con numerosos puntos de control, que podemos ver en la Figura 8. Además se midieron varias muestras problema de las cuales se desconocía su salinidad y que posteriormente se midieron con equipos de laboratorio. Por último se realizaron varios test para averiguar cuál era el volumen de agua mínimo para envolver todo el campo magnético generado y es que el voltaje resultante para una misma muestra de igual salinidad depende del volumen de muestra, por tanto era necesario conocer cuál era el volumen mínimo que cubriese todo el campo magnético. Además vimos que existía una relación entre el volumen de agua y el voltaje inducido la cual se puede ver en la Figura 9.

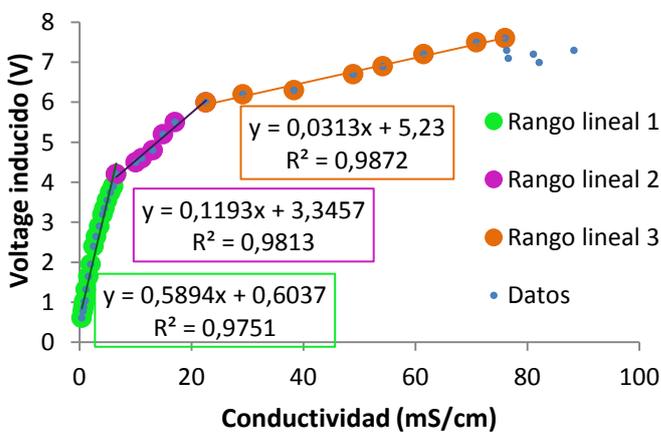


Figura 8. Calibrado del prototipo previa 4

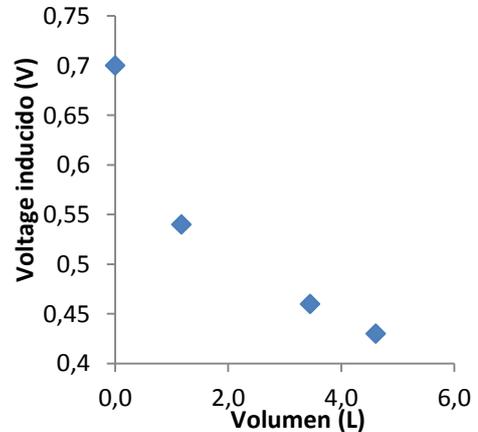


Figura 9. Efecto del volumen de agua

## 3. Caracterización física del sensor

### 3.1. INTRODUCCIÓN

Con el fin de optimizar el funcionamiento del sensor de salinidad y basándonos en los resultados de pruebas anteriores [25],[26],[27] se ha diseñado una batería de pruebas. En ellas se tratará de ampliar el conocimiento sobre como los cambios de salinidad pueden ser medidos empleando la generación de campos magnéticos. Para ello se relacionará como los cambios en las bobinas hacen que estas sean más o menos aptas como sensores de salinidad. Los parámetros que se estudiarán serán la relación de espiras entre la bobina alimentada y la inducida, el número de espiras, el diámetro del hilo de cobre, el diámetro del solenoide. Esta serie de pruebas así como sus resultados se muestran en el presente capítulo.

### 3.2. MATERIAL Y MÉTODOS

Para poder desarrollar los test, ha sido necesario el siguiente material de laboratorio:

- Conductímetro CM35+
- Generador de funciones HP 33120A
- Osciloscopio
- Hilo de cobre
- Tubería de PVC
- Agua destilada
- Sal
- Condensador (10nF)
- Resistencia (100ohm)
- 5 recipientes de vidrio
- Pistola de silicona

Los prototipos utilizados para medir consisten en dos solenoides bobinados sobre un mismo cilindro (tubería de PVC). Para fijar las espiras se empleó silicona térmica. Las características de cada uno de los prototipos se detallan en cada caso.

Inicialmente se prepararon 5 disoluciones de agua destilada con sal a distintas concentraciones que servirán como patrones para calibrar el sensor. Dichas concentraciones fueron medidas empleando el Conductímetro CM35+ en mS/cm se transformaron las unidades a psu que se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Conductividad y salinidad de los patrones

Patrón	1	2	3	4	5
Conductividad (mS/cm)	11,4	32,7	49,0	58,2	77,1
Salinidad (psu)	7,5	23	36	44	60



**Figura 10.** Ejemplo de un prototipo terminado

Dichas disoluciones se emplean para el análisis de todas las bobinas y se mantienen en nevera durante los 30 días desde que se iniciaron los ensayos hasta su finalización. Antes de realizar

ninguna medida los patrones se dejaban fuera de la nevera hasta que alcanzaban la temperatura ambiente. Las disoluciones se realizaron de 5 botes de vidrio de 15cm de altura y 3,6cm de radio todos continúan la misma cantidad de agua (476cm<sup>3</sup>), puesto que en anteriores trabajos se relacionó la altura del agua con la seña recibida [27].

Utilizando el generador de corriente alterna HP33120A se generan ondas senoidales de una amplitud pico a pico de 8V, cuya frecuencia depende de la bobina y se detallan en cada caso. Esta corriente pasa por una resistencia de 100Ohm para limitar la corriente de forma que no pueda dañar el sistema y llega al solenoide. En el solenoide se genera un campo magnético que induce una corriente en la segunda bobina o circuito secundario, la corriente inducida tras pasar por un condensador de 10nF se mide empleando un osciloscopio, el condensador se encarga de estabilizar la señal para que los picos de la onda senoidal no afecten al osciloscopio. Este sistema se puede observar en la Figura 11 mientras que en la Figura 12 podemos observar una fotografía del sistema de medida ensamblado.

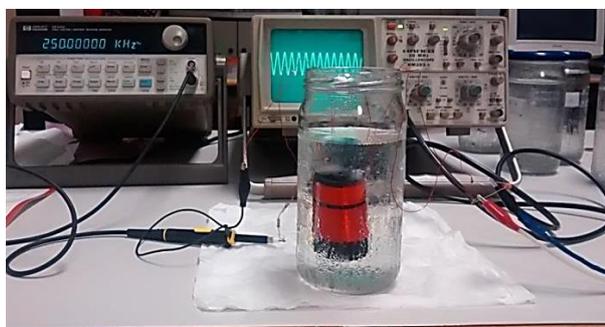
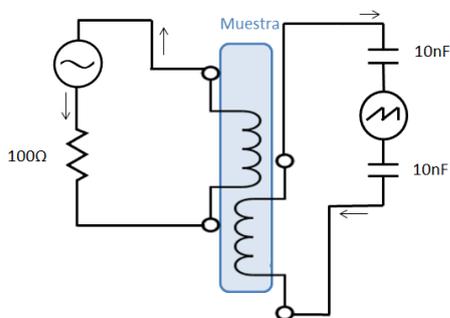


Figura 11. Esquema del circuito eléctrico formado por las bobinas

Figura 12. Sistema de medida ensamblado

### 3.3. PRIMER TEST: MANTENER LA RELACIÓN DE ESPIRAS

El primer cambio realizado en las características de la bobina se basará en aumentar el número de espiras de ambas bobinas, pero manteniendo todos los demás parámetros fijos (relación de espiras, diámetro de hilo, separación entre bobinas...). Por un lado estas pruebas servirán para tratar de hallar una combinación de bobinas que pueda ser válida como sensor de conductividad y a la vez aportar nuevos datos sobre el funcionamiento de como detector de salinidad en relación a sus características físicas. Los prototipos utilizados tienen las características que se muestran en la Tabla 5 y pueden observarse en la Figura 12.

Tabla 5. Características de los prototipos (I)

	Prototipo			
	1	2	3	4
Diámetro hilo de cobre (mm)	0,4	0,4	0,4	0,4
Diámetro bobinas (mm)	25	25	25	25
Nº de espiras bobina alimentada	5	10	20	40
Nº de espiras bobina inducida	10	20	40	80
Relación de espiras	1:2	1:2	1:2	1:2

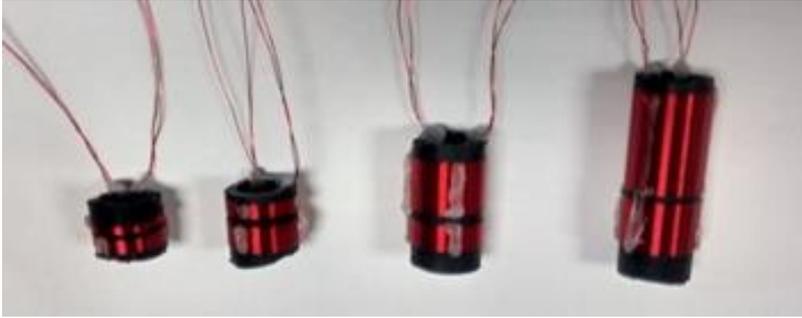


Figura 13. Imagen de los prototipos 1 al 4.

Los resultados obtenidos con estos prototipos se muestran a continuación. Se han realizado medidas del voltaje inducido sobre el circuito secundario en todas las muestras de agua a diferentes frecuencias. Las frecuencias medidas en cada caso dependen de cada bobina. Sin embargo se ha tratado de mantener algunos valores fijos en todos los casos: 100MHz (punto inicial), 500MHz, 1000MHz, 1500MHz y 2000MHz. Las siguientes figuras muestran por un lado los voltajes obtenidos (eje y) para cada disolución (leyenda en psu) a las diferentes frecuencias medidas (eje x). La figura 14 muestra los resultados del prototipo 1, podemos ver que presenta un pico a la frecuencia de 3753kHz. La figura 15, para el prototipo 2, donde vemos el pico a 1840kHz. En la figura 16 (prototipo 3) podemos ver el pico alcanzado a 800kHz, llegando a los 8V. Por último la figura 17 muestra el comportamiento del prototipo 4, que presenta dos picos.

Podemos ver como existe una dependencia entre la frecuencia donde cada prototipo alcanza su pico de inducción (valor máximo de voltaje inducido) con el aumento del número de espiras. A mayor número de espiras menos es la frecuencia donde presentan el pico. En este caso coincide que el punto donde mejor se pueden diferenciar entre salinidades es en la frecuencia en la que se produce el pico. Sin embargo no se puede correlacionar si este cambio se debe al aumento de espiras en la bobina inducida o en la bobina alimentada. En los prototipos 1 al 3 solo se detecta un pico de inducción sin embargo en el prototipo 4 llega a detectarse un segundo pico más pequeño. Es posible que los otros prototipos también tengan otros picos pequeños pero que estén a frecuencias que no se han estudiado.

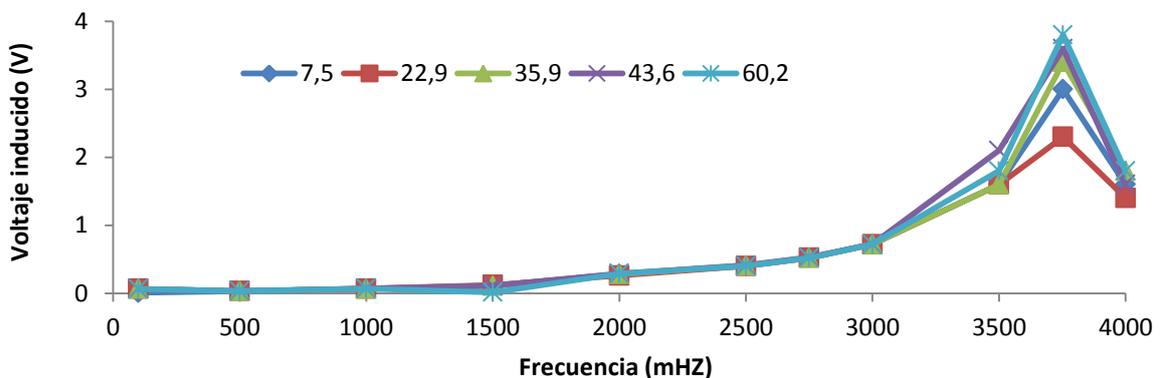


Figura 14. Comportamiento del prototipo 1 a diferentes frecuencias

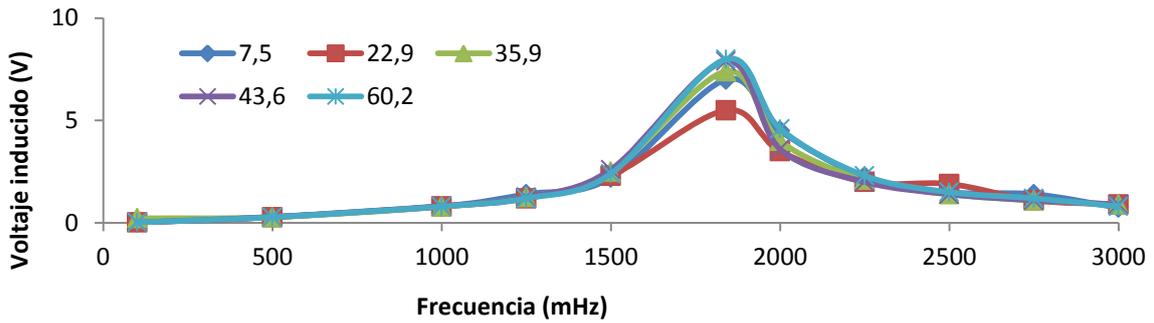


Figura 15. Comportamiento del prototipo 2 a diferentes frecuencias

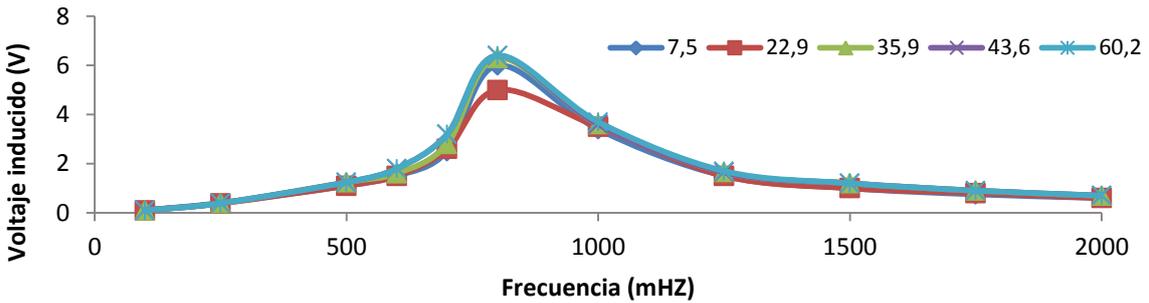


Figura 16. Comportamiento del prototipo 3 a diferentes frecuencias

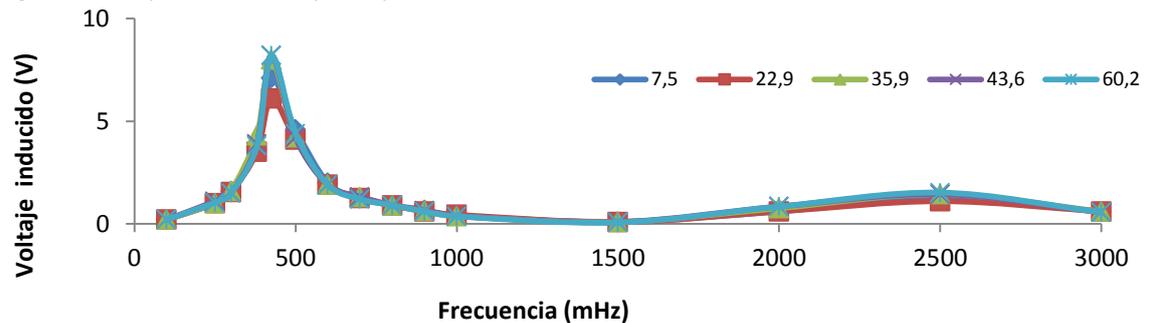


Figura 17. Comportamiento del prototipo 4 a diferentes frecuencias

Además se ha extraído para cada prototipo el mejor punto de medida, es decir aquella frecuencia donde se puede asociar diferentes voltajes (eje y) a las diferentes salinidades de los patrones (eje x), se representan solo los patrones 2 al 5 además se ha mantenido la escala del eje Y igual para una mejor comparación. Podemos en la Figura 18 para el prototipo 1 que es capaz de diferenciar lo 4 patrones de salinidad representados. En la Figura 19 del prototipo 2 también es capaz de diferenciar entre patrones y presenta un voltaje de salida mucho mayor que el prototipo 1. La Figura 20 vemos que el prototipo 3 no es capaz de diferenciar entre los dos últimos patrones al igual que en la y Figura 21 para el prototipo 4.

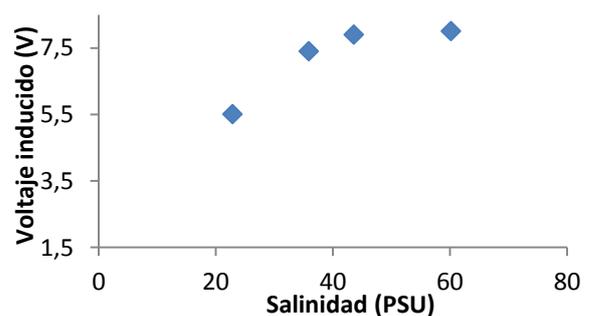
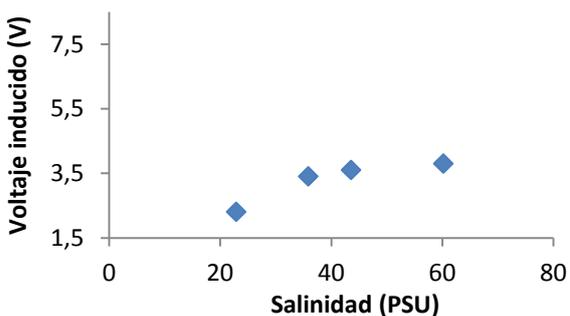


Figura 18. Punto de medida propuesto para el prototipo 1

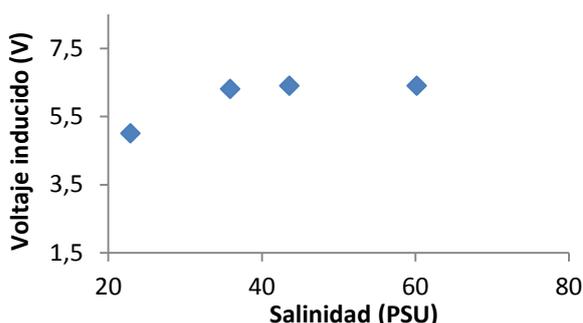


Figura 19. Punto de medida propuesto para el prototipo 2

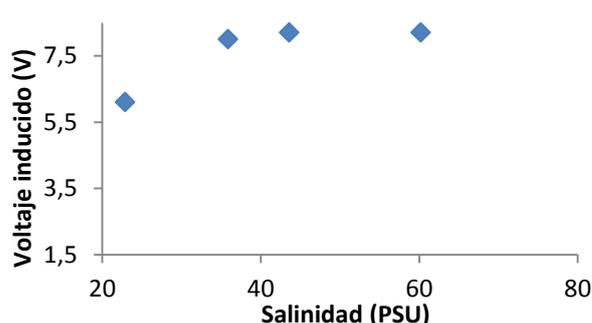


Figura 20. Punto de medida propuesto para el prototipo 3

Figura 21. Punto de medida propuesto para el prototipo 4

Otro factor que se ha podido correlacionar entre forma de medir y características físicas de la bobina es el que no pueden diferenciar correctamente entre los patrones 1, 2 y 3. Dicho efecto lo vamos a explicar empleando la Figura 22, donde están representados los voltajes de salida para cada patrón en la frecuencia pico. Vemos que en todos los casos hay una caída de voltaje para el patrón 2 que hace que sea imposible obtener un rango de medida por encima y por debajo de dicho patrón. Nuestro sensor de salinidad no es capaz de medir en un rango desde el Patrón 1 al 5, solo podrá hacerlo del 2 al 5, esto ocurre para todos los prototipos. Además los prototipos 3 y 4 no son capaces de diferenciar entre los patrones 4 y 5, sin embargo los patrones 1 y 2 ofrecen distintos voltajes inducidos para los distintos patrones. Detectamos una variación de 0,1V entre los patrones 4 y 5 en el prototipo 2 y de 0,2V en el prototipo 1. Existe una relación entre el rango superior de medida y el número de espiras. Al igual que antes no podemos afirmar si este fenómeno está relacionado con el aumento de espiras en la bobina inducida o la bobina alimentada, por tanto se desarrolla el segundo set de pruebas.

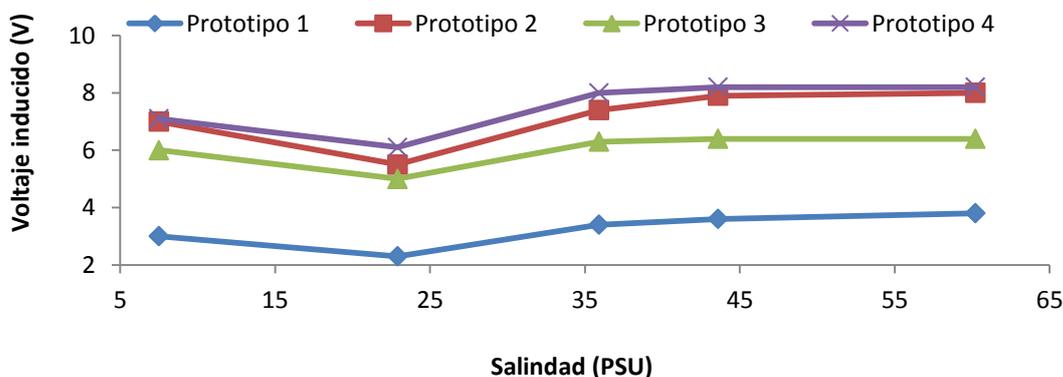


Figura 22. Representación de la caída de voltaje en el patrón 2 en los prototipos 1 - 4

### 3.4. SEGUNDO TEST: VARIACIONES EN LA RELACIÓN DE ESPIRAS (I) VARIACIÓN DE ESPIRAS EN LA BOBINA ALIMENTADA

Anteriormente hemos detectado cambios en la frecuencia de pico y en la capacidad para diferenciar valores elevados de salinidad que están correlacionados con los cambios en el número de espiras. No se ha podido detallar si los cambios están relacionados con la bobina que genera el campo magnético o a la bobina que se induce. Para poder dar respuesta a esto y con el fin de obtener un prototipo que sea capaz de funcionar a bajas frecuencias y distinguir entre salinidades elevadas se desarrollan las dos siguientes pruebas en las que analizaremos

como la variación de la relación de espiras influye en el comportamiento de las bobinas y en su capacidad como sensor de salinidad. En la primera prueba, mantendremos fijo el número de espiras de la bobina inducida (30 espiras) e iremos cambiando el número de espiras de la bobina alimentada. Estos prototipos están descritos en la Tabla 6 y los vemos en la Figura 23. La segunda pruebas se desarrollará en siguiente apartado, mantendremos constante el número de espiras de la bobina inducida y cambiaremos las de la bobina alimentada.

**Tabla 6.** Características de los prototipos (II)

	Prototipo				
	5	6	7	8	9
Diámetro hilo de cobre(mm)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Diámetro bobinas (mm)	25	25	25	25	25
Nº de espiras bobina alimentada en el primer test	15	30	60	90	120
Nº de espiras bobina inducida en el primer test	30	30	30	30	30
Relación de espiras	1:2	1:1	1:0.5	1:0.3	1:0.25



**Figura 23.** Imagen de los prototipos 5 al 9.

Se han realizado las medidas con los prototipos 5, 6, 7, 8 y 9 en estas medidas se han alimentado las bobinas de 15, 30, 60, 90 y 120 espiras midiendo la inducción en las bobinas de 30 espiras. Los resultados obtenidos con estos prototipos se muestran a continuación. Las siguientes figuras muestran por un lado los voltajes obtenidos (eje y) para cada disolución (leyenda en psu) a las diferentes frecuencias medidas (eje x). La Figura 24 muestra para el prototipo 5 los resultados obtenidos, podemos ver que presenta un primer pico 900kHz y otro de menor voltaje inducido a 2000kHz. En la Figura 25, prototipo 6, vemos como presenta un valor máximo de cerca de 6V y el pico está alrededor de 1300kHz. La Figura 26 muestra los resultados del para el prototipo 7, que presenta un pico a 900kHz. La Figura 27 vemos que el prototipo 8 presenta claramente dos picos a 800 y a 1700kHz. Por último la figura 28, presenta los resultados para el prototipo 9, que presenta el primer pico a 600kHz.

En primer lugar podemos observar como el comportamiento de las bobinas a diferentes frecuencias sigue siendo parecido al obtenido en las pruebas anteriores. En todos los casos nos encontramos ante una respuesta que varía con la frecuencia y forma uno o más picos. A diferencia de los casos anteriores donde los picos estaban muy marcados en estas graficas observamos picos poco marcados como en la Figura 25 y 26, donde la bajada de tensión no es tan brusca como en otros casos. En 4 de los 5 prototipos empleados en este test su comportamiento ha mostrado dos picos (excepto el prototipo 6, Figura 25). No se observa

relación alguna entre la altura de los picos (Voltaje máximo) y los cambios en la relación e espiras. Tampoco se ha detectado una relación entre el número de espiras de la bobina inducida y la frecuencia a la cual se observa el primer pico de inducción.

En algunos casos (prototipos 5, 6 y 8) que la frecuencia a la cual se observa el pico varía de una muestra de agua a la siguiente. En el caso del prototipo 5 presenta el máximo de inducción para el patrón 1 a 1000kHz y para los otros patrones a 900kHz. Esto puede deberse a pequeñas variaciones en el nivel del agua, ya que durante la preparación del material para el segundo test el patrón 1 se detectó que el volumen de agua había cambiado en algún momento anterior, con lo que el volumen de agua cambió. El hecho de que solo algunos prototipos puedan detectarlo se debe a la forma en que cada uno expande su campo magnético. Es decir, al igual que algunos prototipos son más idóneos para detectar las variaciones en la salinidad existen otros más idóneos para detectar cambios en el volumen

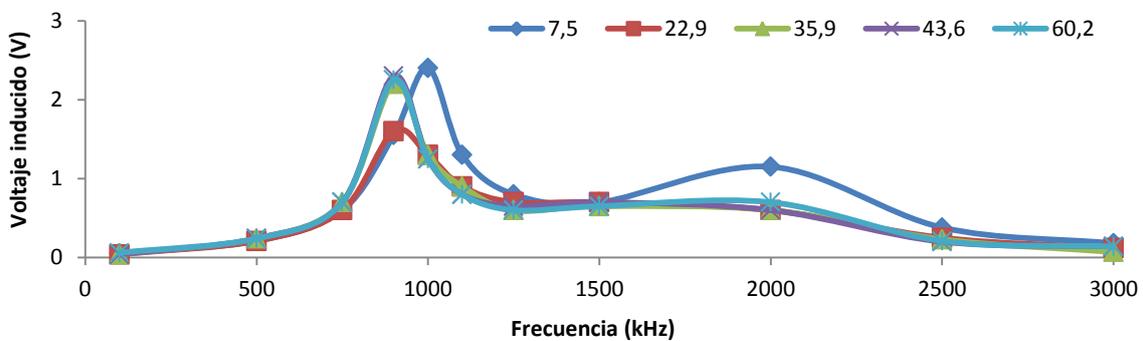


Figura 24. Comportamiento del prototipo 5 a diferentes frecuencias (l)

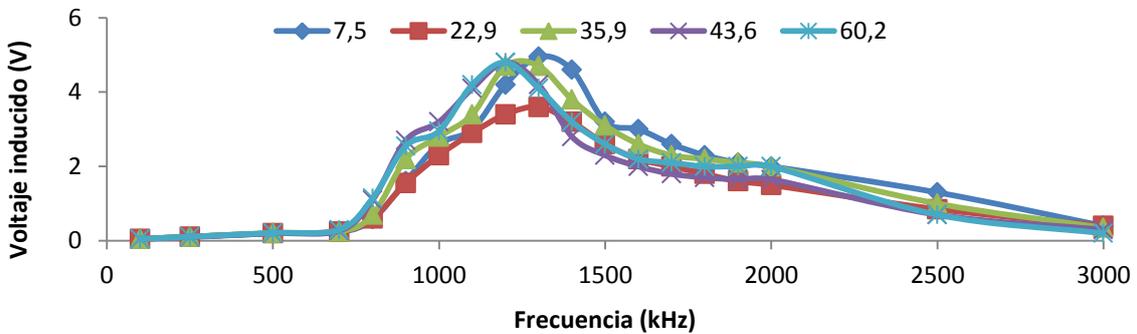


Figura 25. Comportamiento del prototipo 6 a diferentes frecuencias (l)

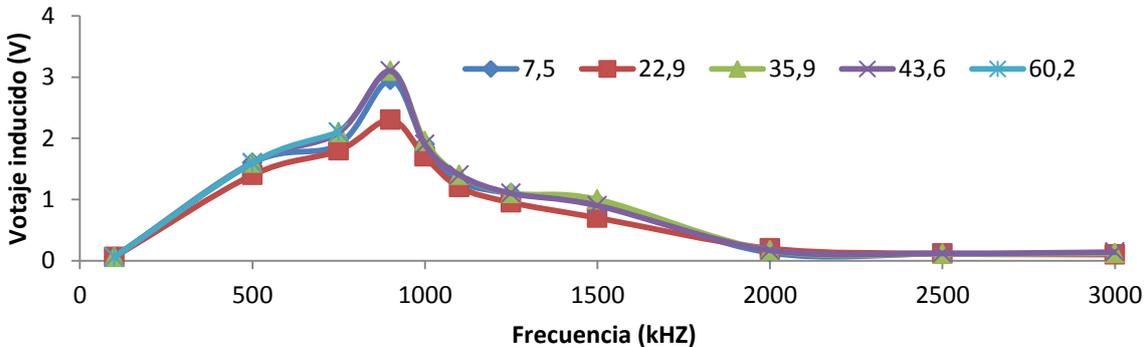


Figura 26. Comportamiento del prototipo 7 a diferentes frecuencias (l)

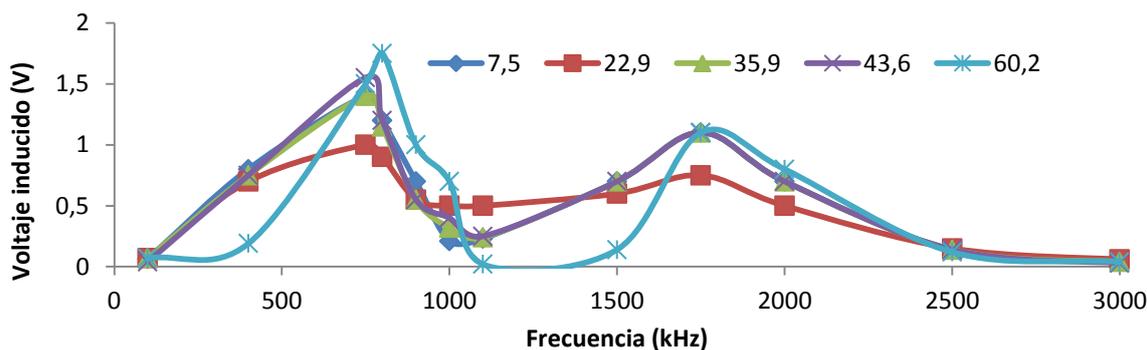


Figura 27. Comportamiento del prototipo 8 a diferentes frecuencias (l)

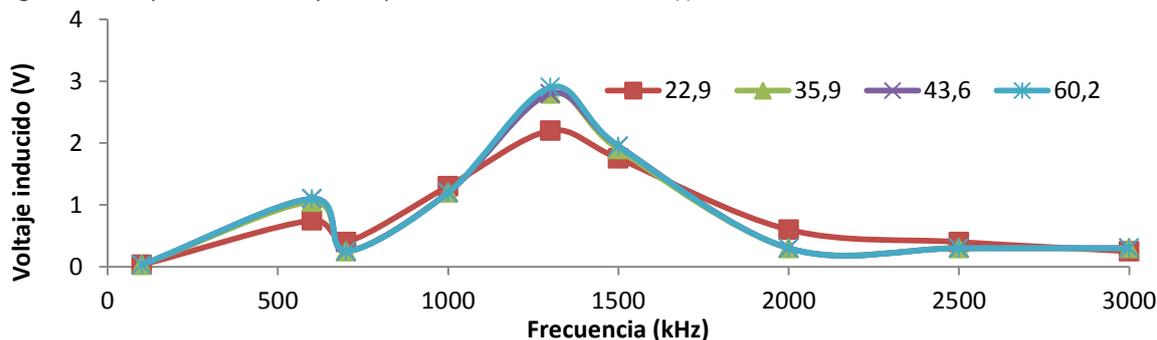


Figura 28. Comportamiento del prototipo 9 a diferentes frecuencias (l)

A continuación se presentan una serie de figuras las cuales muestran los posibles puntos de medida para los diferentes prototipos, como se ha hecho en la sección anterior. Sin embargo en este caso uno de los prototipos, el prototipo 7 no presenta ningún posible punto de medida en ninguna frecuencia que distinga entre los tres patrones centrales (valores necesarios a distinguir en nuestro sensor). La Figura 29 representa la respuesta del prototipo 5 al inducir la bobina de 30 espiras a una frecuencia de 2500kHz, es el primer caso en el que vemos que el voltaje disminuye al aumentar la salinidad, este comportamiento fue visto en [26]. En el punto de medida propuesto el prototipo es capaz de diferenciar entre los patrones 1 y 2 cosa que no ocurría en la prueba anterior. El prototipo 5 también presenta un punto de medida a 900kHz. La Figura 30 muestra el punto de medida propuesto para el prototipo 6 a 800kHz, podemos ver que en este caso y al contrario de lo que ocurría en la anterior prueba, en el punto de medida el prototipo es capaz de diferenciar entre todos los patrones. En la Figura 31 observamos la respuesta del prototipo 8 a 1100kHz, este punto de medición destaca por la amplia diferencia que existe entre los patrones 4 y 5, sin embargo la diferencia entre los patrones 3 y 4 tan baja hace que sea un mal candidato para el diseño final del sensor. Finalmente en la Figura 32 podemos ver los voltajes inducidos a distintas salinidades para el prototipo 9 a 600kHz.

En el apartado anterior se ha propuesto que existe una relación entre las espiras de las bobinas y la capacidad para diferenciar entre los patrones 4 y 5. Sin embargo en este caso no se ha podido observar dicha dependencia, por lo que descartamos que el número de espiras de la bobina inducida afecte a dicha capacidad.

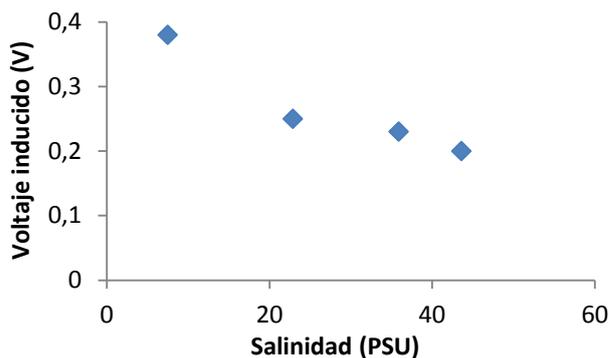


Figura 29. Punto de medida propuesto para el prototipo 5 (I)

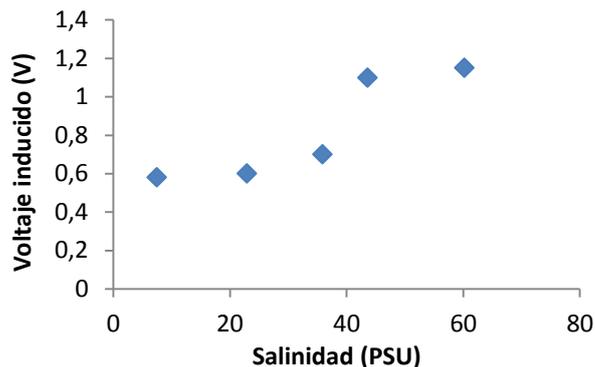


Figura 30. Punto de medida propuesto para el prototipo 6 (I)

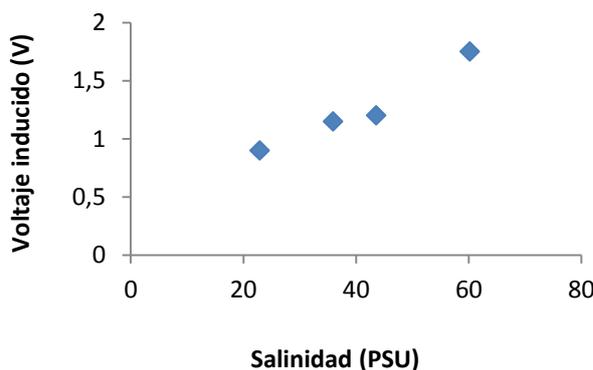


Figura 31. Punto de medida propuesto para el prototipo 8 (I)

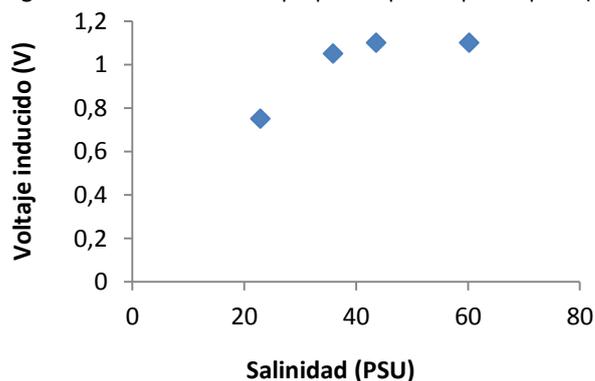


Figura 32. Punto de medida propuesto para el prototipo 9 (I)

### 3.5. TERCER TEST: VARIACIONES EN LA RELACIÓN DE ESPIRAS (II) VARIACIÓN DE ESPIRAS EN LA BOBINA INDUCIDA

En este apartado desarrollaremos la segunda prueba en cuanto a la variación de la relación de espiras entre las bobinas. Para esta segunda prueba, mantendremos fijo el número de espiras de la bobina alimentada (30 espiras) e iremos cambiando el número de espiras de la bobina inducida (15 a 120 espiras). Para ello emplearemos las bobinas de la prueba anterior, alimentaremos las bobinas que antes eran inducidas y realizaremos las mediciones sobre las bobinas que antes alimentábamos. Por tanto las bobinas están descritas en al Taba 5 y se pueden ver en la Figura 23. Por tanto pasamos directamente a mostrar los resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos con estos prototipos se muestran a continuación, en este caso no se muestran los resultados para el prototipo 6 ya que al tener una relación de espiras 1:1 al invertir las bobinas alimentada/inducida obtendríamos los mismos resultados y los podemos ver en la Figura 25. La Figura 33 muestra los resultados para el prototipo 5, donde vemos como presenta dos pico, el primero a 100kHz y el segundo que presenta un subido mucho más suave en 2700kHz. La Figura 34 muestra para el prototipo 7 el comportamiento observado, con los dos picos a 500 y 850kHz. En la Figura 35 para el prototipo 8 que presenta gran cantidad de picos entre 330 y 1600kHz. Y por último la Figura 36 que muestra los dos picos a 280 y 1200kHz que presenta el prototipo 9.

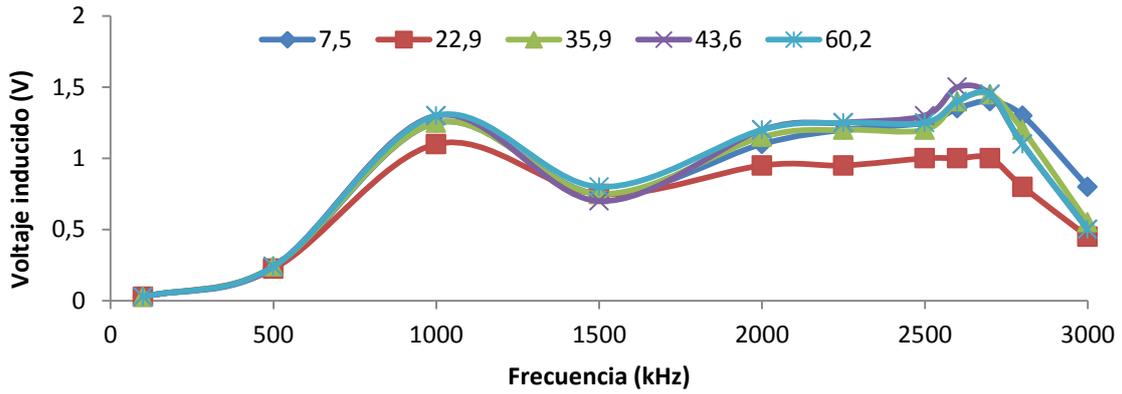


Figura 33. Comportamiento del prototipo 5 a diferentes frecuencias

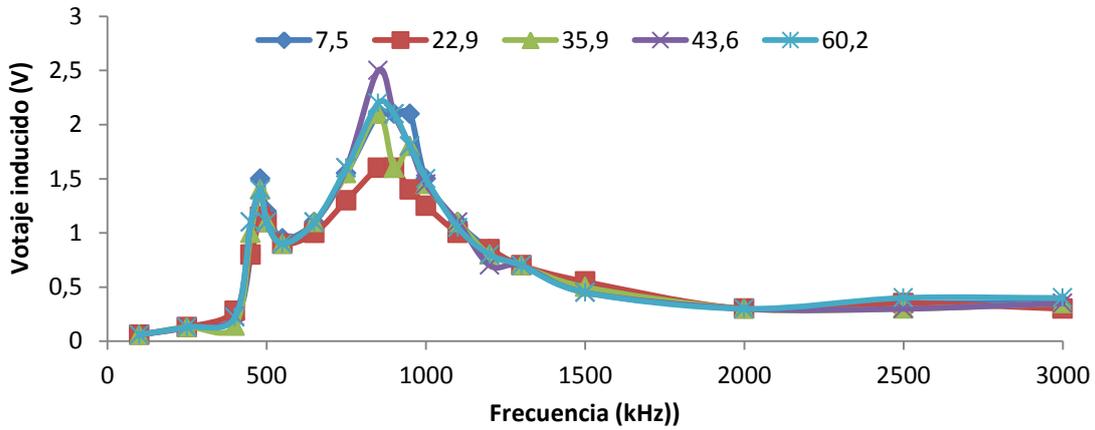


Figura 34. Comportamiento del prototipo 7 a diferentes frecuencias

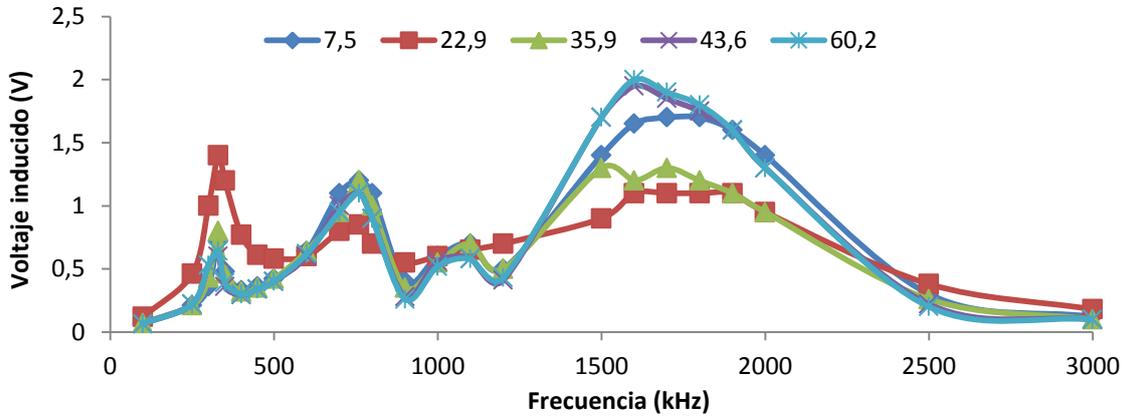


Figura 35. Comportamiento del prototipo 8 a diferentes frecuencias

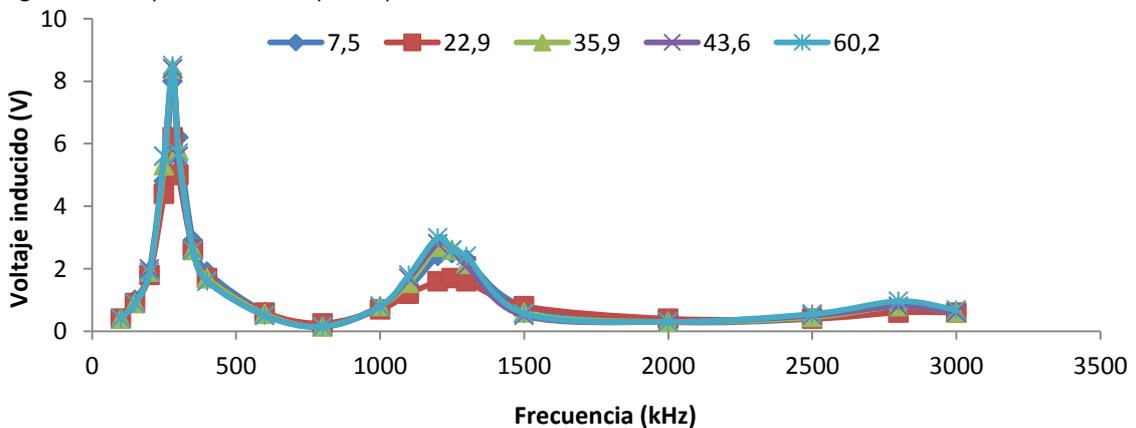
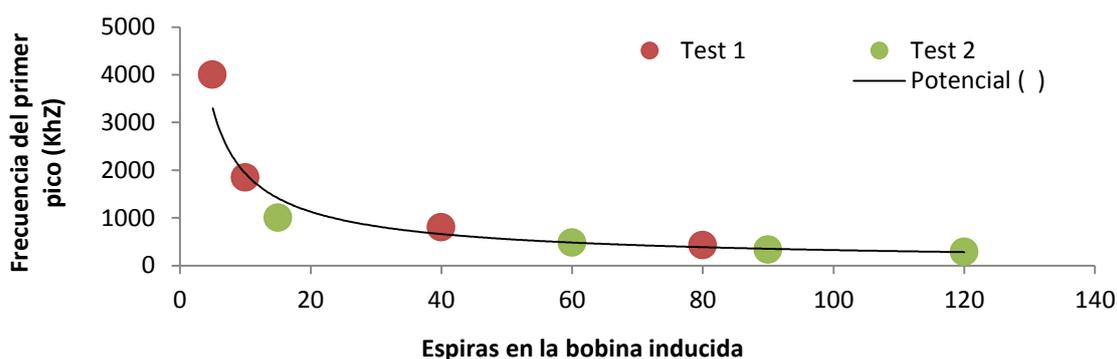


Figura 36. Comportamiento del prototipo 9 a diferentes frecuencias

En esta ocasión en todos los prototipos se han detectado varios picos como muestran las Figuras 24 a 28. Se ha podido comprobar que con excepción del prototipo 6, todos los demás prototipos siguen el comportamiento descrito en el apartado anterior. A más espiras en la bobina inducida menor es la frecuencia en la que alcanzan su pico de inducción. Sin embargo este efecto puede deberse a que el primer pico en el prototipo 6 no se ha podido detectar con precisión. Es posible que el primer pico del prototipo se encuentre a la frecuencia de 900kHz pues si observamos con atención la Figura 25 podemos ver como existe un pequeño punto de inflexión en la forma en la que aumenta el voltaje con la frecuencia, haciendo posible que entre 900kHz y 100Hz exista una pequeña bajada de voltaje que no hemos detectado. Representamos a continuación en la Figura 29 como varía la frecuencia de pico en relación al número de espiras de la bobina inducida, no incluye el prototipo 6. En la Figura 39 dividimos en diferentes colores según los datos proceden del test 1 con los prototipos 1 al 4 o del test 2 con los prototipos del 5 al 9. Podemos ver como existe una relación entre el número de espiras y la frecuencia de pico que viene dado por la Ecuación 1 que presenta un coeficiente de correlación de 0,9645.

$$\text{Frecuencia (kHz)} = 11447 \times N^{\circ} \text{ de espiras bobina inducida}^{0.773} \quad (1)$$



**Figura 37.** Correlación entre el número de espiras en la bobina inducida y la frecuencia a la cual presenta el primer pico de inducción.

Otro hecho que se ha podido comprobar con los datos obtenidos es que la frecuencia de pico puede variar un poco entre una muestra y otra. Esto ya se comprobó en estudios anteriores con otro tipo de configuración de bobinas [26] y como se ha mencionado anteriormente es posible que se deba a pequeños cambios de nivel en los patrones o que sea simplemente el comportamiento particular de algunas bobinas. En este caso se ha visto como el prototipo 5 todas las muestras presenta el pico de inducción a 2600kHz excepto el patrón 4 que lo presenta a 2700kHz. Algo similar ocurre en el prototipo 8, donde todos los patrones excepto el 4 presentan el pico de inducción en la frecuencia de 1700kHz pero el patrón 4 lo presenta a 1600kHz.

A continuación presentamos para cada uno de los prototipos el voltaje de salida para cada muestra en aquellas frecuencias óptimas. Vemos en la Figura 38 con una frecuencia de 1000kHz las respuestas en voltaje inducido del prototipo 5. En la Figura 39 podemos ver la respuesta del prototipo 7 a las diferentes salinidades a una frecuencia de 750kHz. Del prototipo 8 se muestran la Figura 40 donde se muestran las respuestas obtenidas a 900kHz donde por primera vez el voltaje disminuye cuando aumenta la salinidad, este

comportamiento se vio en algunos casos en [26] y la Figura 41 donde vemos el voltaje inducido a 1700kHz, destacamos la gran diferencia de voltaje entre los patrones 2, 3 y 4. Por último del prototipo 9 que al igual que el prototipo 8 presenta varias frecuencias aptas en las cuales se puede diferencias entre salinidades mostramos en la Figura 42 la posibilidad de realizar las medidas a una frecuencia de 250kHz, la más baja hasta este momento. Además existe otro punto de medida interesante a una frecuencia de 2500kHz que pese a ser elevada presenta la ventaja de que no existe diferencia entre los patrones 1 y 2 (generalmente la diferencia que existe hace que no se puede realizar un calibrado adecuado entre los puntos 1, 2 y 3, como hemos mencionado en el anterior apartado). En 2500 kHz además el resto de patrones 2 al 5 presentan una correlación entre el voltaje inducido y la salinidad de los patrones, esto lo podemos ver en la Figura 43.

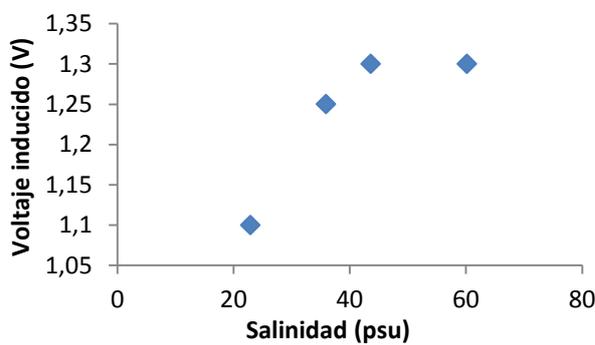


Figura 38. Punto de medida propuesto para el prototipo 5

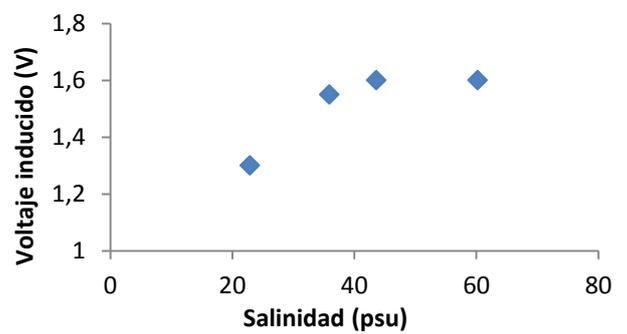


Figura 39. Punto de medida propuesto para el prototipo 7

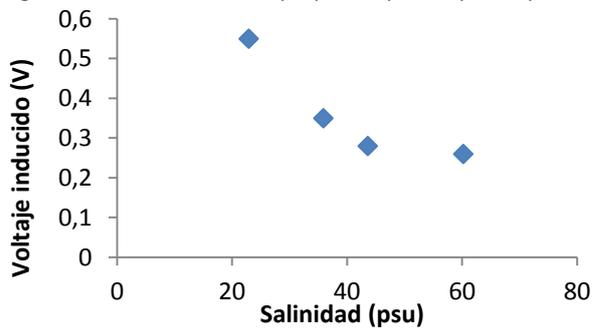


Figura 40. Punto de medida propuesto para el prototipo 8 a 900kHz

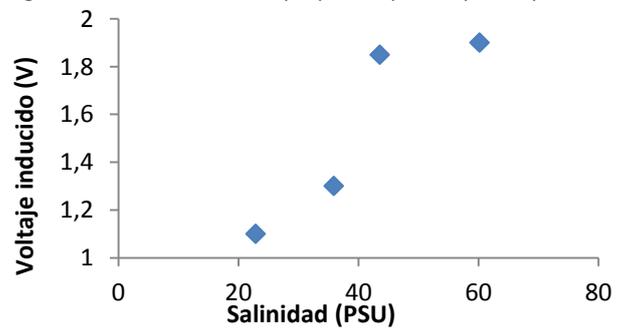


Figura 41. Punto de medida propuesto para el prototipo 8 a 1700kHz

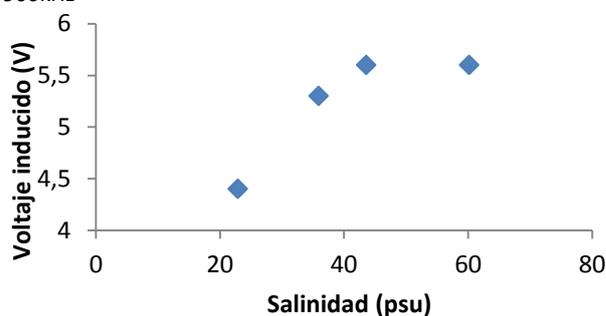


Figura 42. Punto de medida propuesto para el prototipo 9 a 250kHz

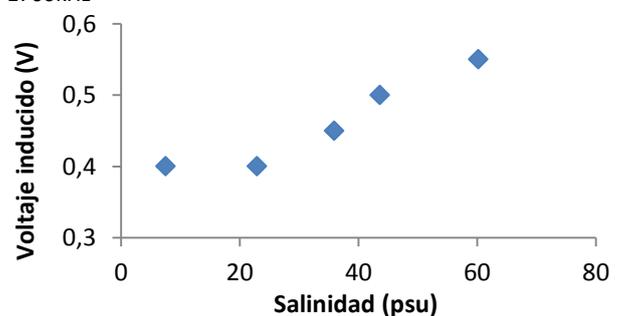


Figura 43. Punto de medida propuesto para el prototipo 9 a 2500kHz

Si tratamos de analizar la relación entre el número de espiras de la bobina inducida y la capacidad para diferenciar entre los patrones 4 y 5 vemos que los resultados son los que vemos en la Tabla 7 (resultados del test 1 y test 3).

**Tabla 7.** Valores de diferencia de voltaje (V) entre los patrones 4 y 5

Test 1		Test 2	
Espiras bobina inducida	Dif. patrones (V)	Espiras bobina inducida	Dif. patrones (V)
5	0.2	15	0
10	0.1	30	0.05
40	0	60	0
80	0	90	0.02
		120	0.2

A la vista de los datos de la Tabla 7 podemos decir que no existe la relación que se podría extraer con los datos del test 1 (a menos número de espiras mayor capacidad para diferenciar entre los patrones 4 y 5), puesto que en el test 3 los resultados son contrarios. Por tanto no podemos afirmar que exista ninguna relación lineal. Sin embargo los datos muestran que solo los prototipos con el menos número de espiras y con el mayor número de espiras son capaces de diferenciar entre los patrones, es posible que exista otro tipo de relación de tipo potencial, pero los datos disponibles no son suficientes como para afirmarlo.

### 3.6. CUARTO TEST: VARIAR DIÁMETRO DEL CABLE

En este apartado desarrollaremos una serie de pruebas encaminadas a determinar cuál es el efecto que produce un cambio en el diámetro del cable en la capacidad de la bobina como sensor de salinidad. Para evaluar cómo afecta el cambio en el diámetro del cable hemos preparado 3 nuevos prototipos que junto al prototipo 3 nos permitirán realizar la comparativa. Los prototipos nuevos tienen las mismas características (diámetro de tubería, numero de espiras y relación de espiras) que el prototipo 3 tan solo cambia el diámetro del cable. Podemos ver los 2 nuevos prototipos junto al prototipo 3 en la Figura 34 y están todos descritos en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Características de los prototipos (III)

	Prototipo		
	3	11	12
Diámetro hilo de cobre bobina alimentada (mm)	0,4	0,6	0,8
Diámetro hilo de cobre bobina inducida (mm)	0,4	0,6	0,8
Diámetro bobinas (mm)	25	25	25
Nº de espiras bobina alimentada	20	20	20
Nº de espiras bobina inducida	40	40	40
Relación de espiras	1:2	1:2	1:2



**Figura 44.** Imagen de los prototipos 10 y 11 más el prototipo 3.

Los resultados que se muestran a continuación pertenecen a las pruebas realizadas para establecer si existe una relación entre el diámetro del cable y el comportamiento de los patrones. Los resultados se muestran como las veces anteriores, primero veremos las gráficas pertenecientes a los voltajes obtenidos a diferentes frecuencias y con los patrones de salinidad del 2 al 5. En esta ocasión no usamos el 1 en esta ocasión pues el volumen de agua remanente no era suficiente como para cubrir completamente el prototipo 11. La Figura 45 muestra los voltajes registrados para el prototipo 10, que presenta un solo pico a 800kHz con un voltage inducido de 4,4 V y en la Figura 46 los voltajes del prototipo 11, algo superiores al anterior y el pico en 700kHz.

Los resultados del prototipo 3 en la Figura 16 muestran también un solo pico al igual que los prototipos 10 y 11. También se caracterizan por mostrar una elevada diferencia de voltaje entre los patrones 2 y 3, dicha diferencia incrementa con el diámetro del hilo. Entre los prototipos 10, 11 y 3 no existe una relación entre el cambio en el diámetro del hilo de cobre y la frecuencia de pico. Podemos ver como los prototipos 3 y 10 tienen la misma frecuencia de pico en todos los patrones de salinidad, sin embargo el prototipo 11 presenta un pico para los patrones 3, 4 y 5 a una frecuencia de 700kHz y el patrón 2 presenta el pico a 800kHz.

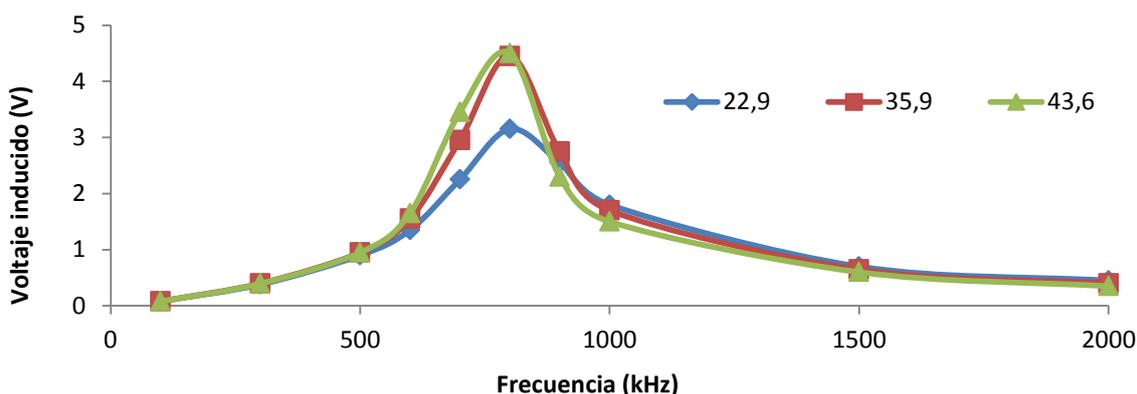


Figura 45. Comportamiento del prototipo 10 a diferentes frecuencias

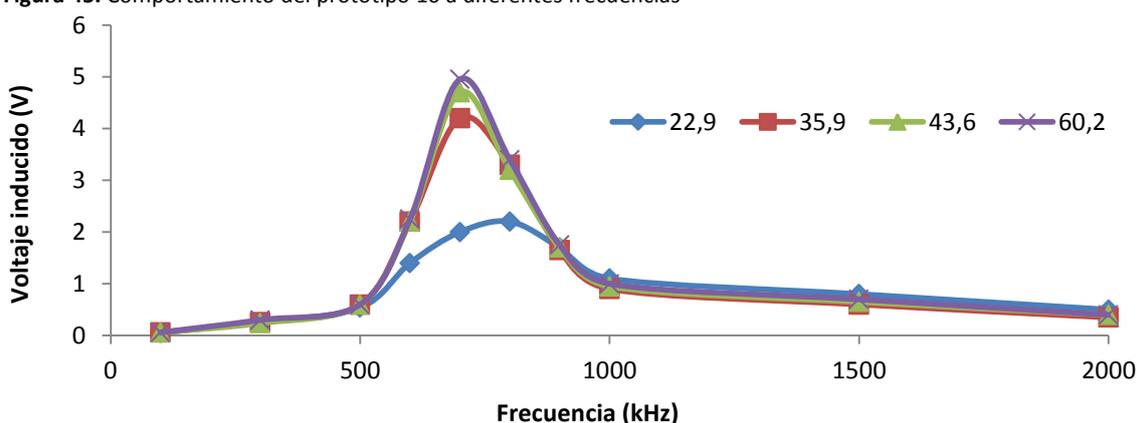


Figura 46. Comportamiento del prototipo 11 a diferentes frecuencias

A continuación mostramos en las siguientes figuras cuales serían las posibles frecuencias de medida con sus voltajes de salida para cada uno de los patrones. En la Figura 47 podemos ver la respuesta del prototipo 10 a la frecuencia de 800kHz y como este es incapaz de diferenciar los patrones 3, 4 y 5 haciendo claramente una mala elección como señor. La respuesta del

prototipo 11 a la frecuencia de 900kHz se presenta en la Figura 48 y podemos ver como si es capaz de diferenciar entre patrones de salinidad.

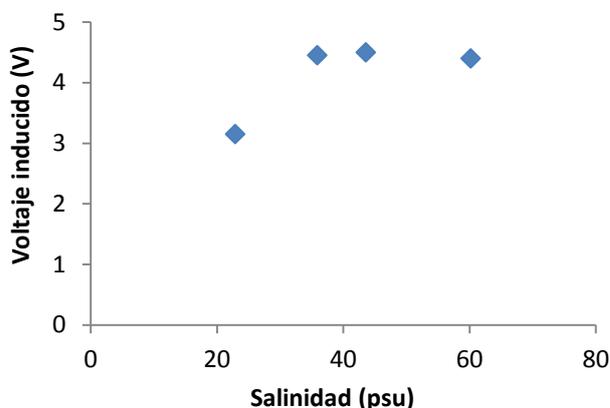


Figura 47. Punto de medida propuesto para el prototipo 10

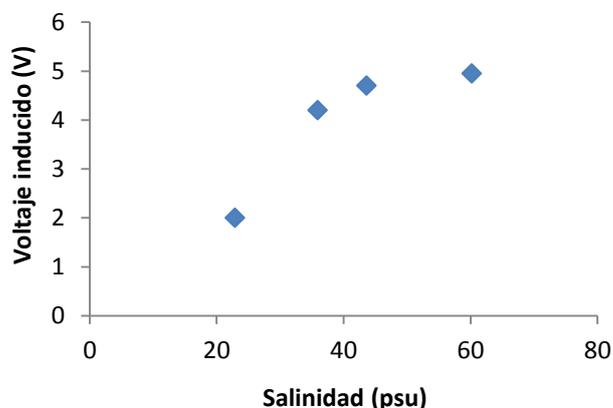


Figura 48. Punto de medida propuesto para el prototipo 11

### 3.7. QUINTO TEST: VARIAR DIÁMETRO DE LA TUBERÍA

En este último apartado del capítulo de caracterización física del sensor se presentan las pruebas realizadas cuyo fin era hayas las posibles relaciones existentes entre el diámetro de la bobina y la forma de detectar los cambios de salinidad. Para ellos preparamos en nuestro banco de pruebas dos prototipos de distinto diámetro, los prototipos 12 y 13, los cuales tienen el mismo número de espiras en las bobinas alimentadas e inducidas que el prototipo 3. De esta forma podremos comparar los resultados de los 3 prototipos en busca de relaciones que nos permitan desarrollar un sensor de salinidad que cumpla con las necesidades descritas anteriormente. En la Tabla 9 podemos ver las características los prototipos 12, 13 y recordaremos las del prototipo 3. Así mismo en la Figura 49 vemos una imagen de los 3 prototipos utilizados en este test.

Tabla 9. Características de los prototipos (IV)

	Prototipo		
	12	13	3
Diámetro hilo de cobre bobina alimentada (mm)	0,4	0,4	0,4
Diámetro hilo de cobre bobina inducida (mm)	0,4	0,4	0,4
Diámetro exterior de las bobinas (mm)	15	35	25
Nº de espiras bobina alimentada en el primer test	40	40	40
Nº de espiras bobina inducida en el primer test	20	20	20
Relación de espiras	1:2	1:2	1:2



Figura 49. Imagen de los prototipos 12 y 13 más el prototipo 3.

El tamaño de los prototipos 12 y 13 si permitieron realizar medidas con el patrón 1, así que en este caso se presentan los resultados de las mediciones usando todos los patrones de salinidad. Dichos resultados se pueden observar en las Figura 50 para el prototipo 12, que presenta un solo pico a 1720kHz y en la Figura 51 para el prototipo 13 con un pico mucho más marcado y con un voltaje superior a 600kHz.

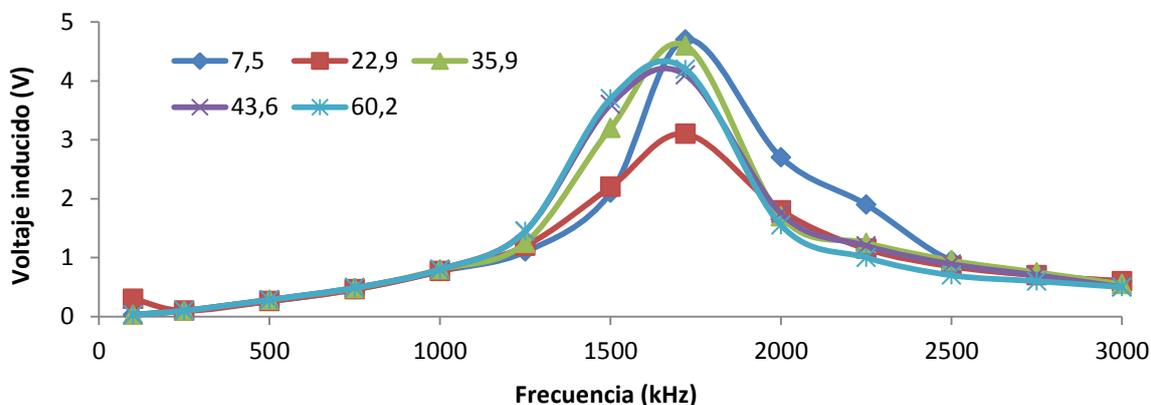


Figura 50. Comportamiento del prototipo 12 a diferentes frecuencias

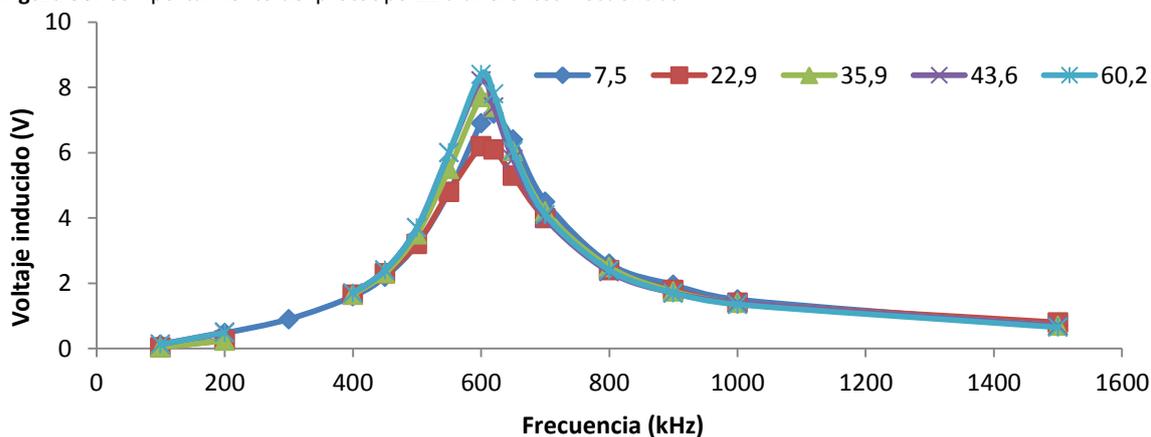


Figura 51. Comportamiento del prototipo 13 a diferentes frecuencias

Observando las figuras anteriores junto la Figura 16 del prototipo 3 se puede apreciar como existe una dependencia entre el diámetro de la bobina y el voltaje máximo alcanzado, representamos dicha correlación en la Figura 52, cuanto mayor es el diámetro de la bobina mayor es el voltaje alcanzado poniendo como ejemplo el voltaje inducido al estar el prototipo sumergido en el patrón 3 en la frecuencia de pico. Pese a tener solo 3 puntos de referencia, podemos llegar a obtener la relación matemática que relaciona el voltaje máximo con el diámetro de la tubería, podemos verla en la Ecuación 2, con un coeficiente de correlación de 0,998. Los datos muestran que existe una correlación entre la frecuencia de pico y el diámetro de la tubería. En primer lugar mostramos en la Figura 53 la relación observada, con su ajuste entre la frecuencia y el diámetro externo de la tubería. Y en la Ecuación 3 presentamos el modelo matemático que ajustaría los datos, con un coeficiente de correlación de un 0,996. Si tenemos en cuenta que también encontramos una relación anteriormente entre la frecuencia de pico y el número de espiras de la bobina inducida se ha obtenido un modelo matemático, Ecuación 4, que integra las tres variables, dicha ecuación presenta un coeficiente de correlación de 0,994. Para poder observar como el modelo matemático obtenido se ajusta a

los datos originales se representa en la Figura 54 una gráfica con los datos reales frente a los datos teóricos según el modelo matemático.

$$\text{Voltage } P3 \text{ máx (V)} = 0,155 \times \text{Dext (mm)} + 2,325 \quad (2)$$

$$F_{\text{pico}} \text{ (kHz)} = \frac{17770 \times \text{Dext (mm)}}{(\text{Dext(mm)}^2 - 70)} \quad (3)$$

$$F_{\text{pico}} \text{ (kHz)} = \frac{52303,13}{\text{Dext(mm)}} + \frac{75039,80}{N^{\circ} \text{espiras}^2} - 7,80 * N^{\circ} \text{espiras} + 44,82 \times \text{Dext (mm)} - 2175,19 \quad (4)$$

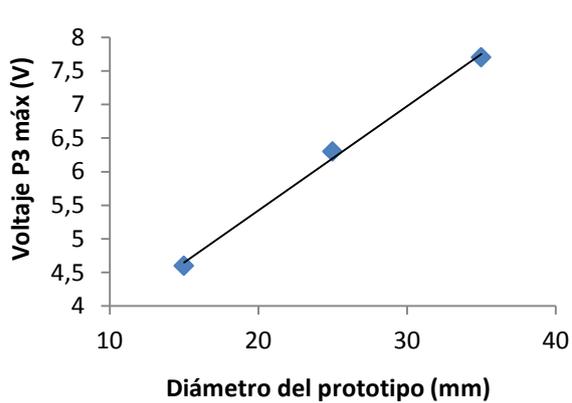


Figura 52. Relación Voltaje-Diámetro prototipo

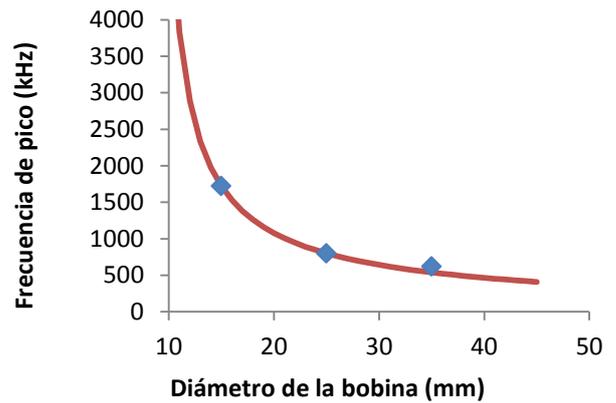


Figura 53. Relación Frecuencia pico-Diámetro prototipo

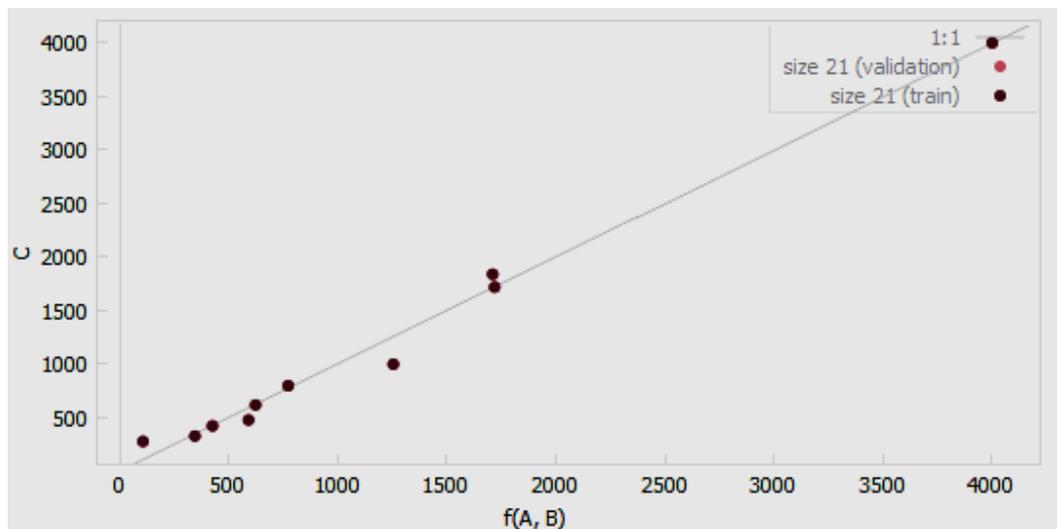


Figura 54. Relación frecuencia del pico (C) con Diámetro prototipo (A) y número de espiras en la bobina inducida (B)

A continuación vemos en las Figura 55 la representación del mejor punto de medida propuesto para el prototipo 12 en una frecuencia de 1500 y podemos ver que claramente es capaz de diferenciar entre todos los patrones de salinidad. Mientras que en la Figura 56 el propuesto para el prototipo 13, al igual que el otro prototipo es capaz de diferenciar entre patrones.

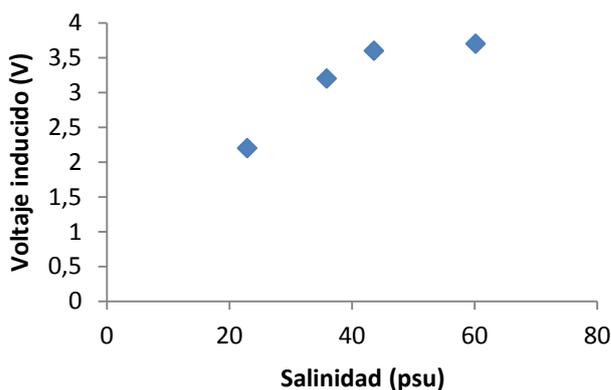


Figura 55. Punto de medida propuesto para el prototipo 12

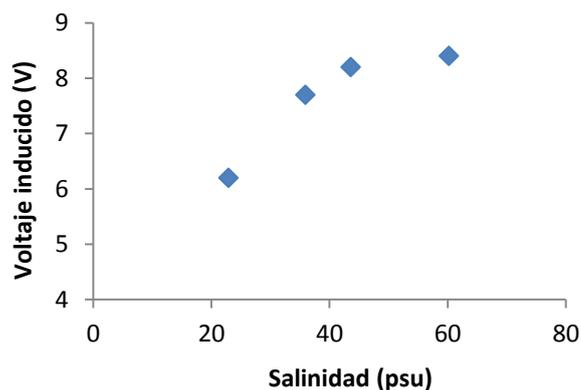


Figura 56. Punto de medida propuesto para el prototipo 13

Podemos observar en las figuras anteriores que ambos prototipos tienen un comportamiento muy similar, presentan una amplia diferencia de voltaje entre los patrones 2 y 3 y una diferencia mínima, pero suficiente para ser detectada entre los patrones 4 y 5. De nuevo no representamos los resultados del patrón 1 pese ya que muestra un efecto similar al descrito en la Figura 22, haciendo que no sea posible diferenciar entre los patrones 1 y 3 adecuadamente.

### 3.8. CONCLUSIONES

Hemos construido y testeado un total de 13 prototipos diferentes, la mayoría de ellos ofrecen resultados favorables para nuestro rango de medida deseado 25 a 45 psu, más o menos los valores de los patrones de salinidad 2 al 4. La mayor parte de los prototipos testeados presentan problemas para diferenciar entre salinidades bajas, ofreciendo resultados que pueden confundirse con salinidades de alrededor de 30 psu, este efecto se ha demostrado en la Figura 22. Sin embargo durante los test realizados en el segundo set de pruebas se detectó que el volumen de agua del recipiente del patrón de salinidad 1 había descendido debido a un error en la manipulación de los recipientes. Se sospecha por tanto que los resultados del patrón 1 no sean correctos y que estén influenciados por la reducción en el volumen de agua.

Por otro lado hemos detectado ciertas correlaciones que nos muestran como variaciones en las características físicas de las bobinas que conforman los prototipos hacen que las señales (voltaje de salida) sufra modificaciones. El efecto más reportado y explicado ha sido la correlación entre la frecuencia de pico, donde se alcanza la máxima inducción y el número de espiras de la bobina inducida y el diámetro de la tubería sobre la cual se ha realizado el bobinado. También hemos encontrado una relación entre el voltaje y el diámetro del prototipo. Sin embargo ambas relaciones deben estudiarse con más detalle, tomando una mayor cantidad de datos para confirmar las ecuaciones propuestas como válidas o realizar un ajuste más preciso.

## 4. Calibrado del sensor

---

### 4.1. INTRODUCCIÓN

---

Una vez hemos testeado los diferentes prototipos es la hora de elegir uno de ellos para calibrarlo para que esté listo para ser usado como sensor. Para realizar el calibrado se han utilizado diferentes concentraciones de salinidad creciente. Además vistos los resultados obtenidos con el patrón 1 y sospechando que pueden deberse a un cambio en el volumen de agua, vamos a realizar un exhaustivo análisis de dicho efecto, previo al calibrado. En [27] vimos que el volumen necesario para cubrir todo el campo magnético con agua era de más de 7L de agua. Si el volumen mínimo es elevado, realizaremos el calibrado en un recipiente con un volumen de agua inferior que nos servirá para demostrar la capacidad para diferenciar entre muestras de diferente salinidad. Así como detectar el máximo y mínimo valor de salinidad que puede medir de forma correcta.

### 4.2. MATERIAL Y MÉTODOS

---

El material empleado es casi el mismo usado en el apartado anterior y se ve a continuación

- Conductímetro CM35+
- Generador HP 33120A
- Osciloscopio
- Prototipos
- Agua destilada
- Sal
- Condensador (10nF)
- Resistencia (100ohm)
- Diferentes recipientes de vidrio de diferente diámetro y altura

### 4.3. ELECCIÓN DE UNA PROTOTIPO

---

A la hora de elegir el prototipo sobre el que trabajaremos vamos a tener en cuenta factores como la frecuencia a la que trabaja, es interesante que trabaje a una frecuencia baja ya que los componentes electrónicos del circuito final son más baratos para frecuencias bajas. Por otro lado y muy importante que las diferencias entre los patrones 2 y 4 sean elevadas, ya que así obtendremos mayor sensibilidad en nuestras medidas. También tendremos en cuenta el tamaño de la bobina, a mayor tamaño del prototipo mayor será el campo magnético que genera y mayor será el volumen de agua necesario para cubrirlo, será por tanto preferible una bobina de dimensiones pequeñas. Además una bobina pequeña implica un menor gasto en cobre y no podemos olvidar que el bajo coste del sensor es uno de los objetivos principales.

Por otro lado es relevante que el voltaje alcanzado en la frecuencia de pico sea elevado, ya que generalmente a voltajes elevados las diferencias entre patrones es alta. Con esta premisa se han seleccionado los prototipos 2, 4, 9, 10, 11 y 13 por su capacidad para diferenciar entre patrones. De entre ellos el 2, 10 y el 11 se han eliminado debido a sus altas frecuencias de pico. De entre los prototipos 4, 9 y 13 los tres son buenos candidatos como sensor de salinidad para elegir uno de entre ellos se ha tomado la decisión desde un punto de vista económico ya que el coste del sensor es muy importante. Realizamos una comparativa del cobre empleado para cada una de las bobinas la cual se representa en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Comparativa entre prototipos 4, 9 y 13 desde un punto de vista económico

	Prototipo nº		
	4	9	13
Diámetro tubería (mm)	25	25	35
Diámetro cobre (mm)	0,4	0,4	0,8
Área del hilo de cobre (mm <sup>2</sup> )	0,1	0,1	0,5
Espiras totales	120	150	60
Longitud cobre (mm)	9425	11781	6597
Volumen cobre usado (mm <sup>3</sup> )	1184	1480	3316
Peso cobre usado (g)	10,61	13,26	29,71
Precio cobre del prototipo	0,42	0,53	1,19

A la vista de los resultados obtenidos en cuanto al coste económico del cobre para diseñar cada uno de los prototipos. El prototipo 13 es el que tiene un coste más elevado, costando 0,77€ más caro que el prototipo 4 que presenta el menor coste de todos. Pese a que la diferencia entre los prototipos 4 y 9 es de solo 0,11€ si consideremos que las redes de sensores cuentan con un elevado número de sensores, el sobrecoste de utilizar el prototipo 9 frente al prototipo 4 puede llegar a ser considerable. Por tanto y tras el análisis realizado teniendo en cuenta numerosos factores se elige el prototipo 4 para seguir las pruebas.

#### 4.4. VOLUMEN MÍNIMO

En [27] ya se observó que de forma previa al calibrado y teniendo en cuenta la variación de voltaje al cambiar el volumen de agua es necesario conocer lo que denominamos como “mínimum cell volume” y se definió como la cantidad de agua necesario que cubra todo el campo magnético que se ha generado. El trabajar con bobinas carentes de núcleo el campo magnético generado se expande en todas las direcciones. Si se realiza un calibrado sin tener en cuenta que todo el campo magnético este rodeado por agua las lecturas obtenidas no servirán para usar el sensor en mar abierto. De ahí la gran importancia de conocer el volumen mínimo. Para hallar dicho valor, realizaremos una serie de pruebas similares a las desarrolladas en [27] utilizando agua de salinidad baja y utilizando un recipiente de vidrio se ira aumentando progresivamente la altura de agua sobre el prototipo hasta llegar a un valor a partir del cual aunque aumente el nivel de agua, la señal ofrecida por el sensor sea la misma, esa será la altura de agua mínima. Posteriormente, con la altura de agua mínima (u otra fijada si la anterior fuese demasiado elevada) se realizaran medidas en recipientes de vidrio de distinto diámetro. De nuevo buscaremos el diámetro mínimo necesario. Sin embargo teniendo en cuenta los resultados que se obtuvieron en [27] es posible que no lleguemos a realizar medidas hasta el diámetro mínimo y altura mínima, pero con los datos obtenidos se podrá realizar una regresión hasta hallar dichos valores y poder conocer el volumen mínimo. En la Figura 57 se muestran los voltajes obtenidos frente a las diferentes alturas (altura de agua sobre la bobina), junto a los valores de la Ecuación (5) que se ajusta a los datos. Posteriormente presentamos en la Figura 58 los valores obtenidos en las pruebas realizadas para hallar el diámetro mínimo, representamos en la gráfica el diámetro del recipiente empleado frente al voltaje inducido, así como el modelo matemático obtenido que se ajusta a los datos, Ecuación (6). Las Ecuaciones (5) y (6) presentan ambas coeficientes de correlación superiores a 0,997.

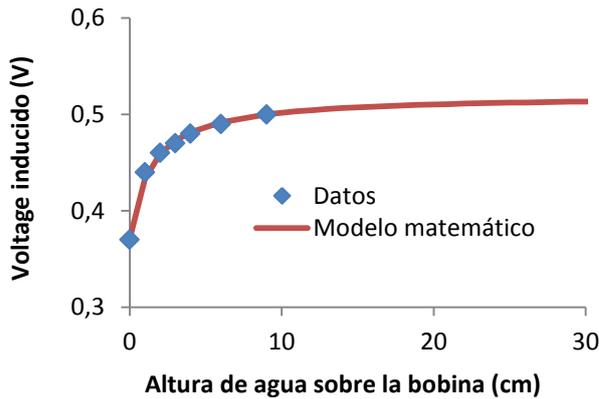


Figura 57. Modelo matemático para la altura mínima

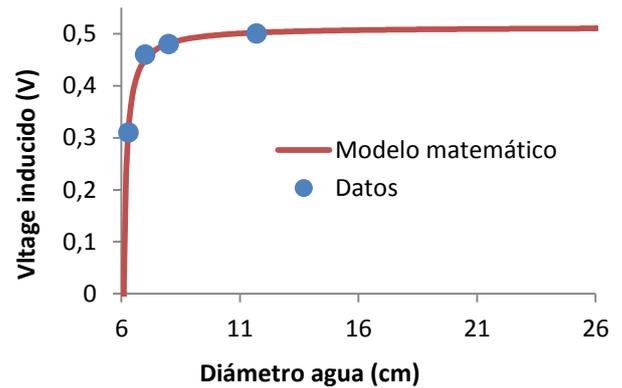


Figura 58. Modelo matemático para el diámetro mínimo

$$Voltage (V) = \frac{0,52 + 0,52 \times Altura\ agua\ (cm)}{1,40 + Altura\ de\ agua\ (cm)} \quad (5)$$

$$Voltage (V) = \frac{78,85 - 12,94 \times Diametro\ agua\ (cm)}{150,38 - 25,20 \times Diametro\ de\ agua\ (cm)} \quad (6)$$

A la vista de las Figuras 57 y 58 con las Ecuaciones (5) y (6) podemos extraer que la altura mínima es aproximadamente 20cm ya que es el punto a partir del cual pese a que aumentemos la altura el voltaje inducido se mantiene fijo. Pese a que según el modelo matemático el voltaje sigue subiendo el nivel al que sube es prácticamente inapreciable. Por otro lado, extraemos que el diámetro mínimo es de 25cm. Con estos datos ya somos capaces de calcular el volumen mínimo. Teniendo en cuenta que la altura de la bobinas es de 8cm, la altura de agua por arriba y por debajo de la bobina será de 20cm y el diámetro a su alrededor de 25cm, podemos afirmar que el volumen mínimo es de 23,5L.

#### 4.5. CALIBRACIÓN DEL SENSOR ELEGIDO

Llegados a este punto es el momento de realizar la calibración del sensor, sin embargo los resultados obtenidos en el apartado anterior muestran que el volumen donde deberíamos calibrar nuestro sensor debe ser de 23,5L, tener una altura de 48cm y 25cm de diámetro. En los momentos en los que se realizó el calibrado no se disponía de ningún recipiente de dichas características, por lo que se procedió a realizar un calibrado en un recipiente más pequeño. Un recipiente más pequeño es más manejable a la vez que necesita una menor cantidad de sal para aumentar la salinidad del agua que contiene. En próximos trabajos trataremos de adaptar las medidas obtenidas a un recipiente de las características descritas.

Los datos obtenidos durante el calibrado se muestran en la Figura 59, corresponden al voltaje inducido a diferentes salinidades, en concreto a salinidades desde 0.26psu hasta 74,83psu. Se tomar un total de 32 puntos control durante el calibrado del sensor, de ellos 8 se encuentran entre el rango de funcionamiento propuesto para el sensor, de 20 a 45psu. También mostramos en la Figura 60 una región del calibrado que presenta un comportamiento lineal, donde estaría nuestro rango de funcionamiento objetivo y otros puntos control. Consideramos que a partir de 47psu nuestro sensor no es capaz de seguir midiendo subidas de salinidad, no hemos detectado ningún valor mínimo a partir del cual no es capaz de detectar bajas de

salinidad, de existir está muy por debajo de nuestro objetivo de medida, de forma que el sensor desarrollado es capaz de distinguir cambios de salinidad en el rango objetivo. Las ecuaciones matemáticas que modelan el calibrado se muestran a continuación y son la Ecuación (7) para el calibrado completo y la Ecuación (8) para el rango lineal, ambas presentan un coeficiente de correlación superior a 0,987. En el rango lineal somos capaces de calcular la sensibilidad del sensor para diferenciar entre muestras, es decir la variación mínima de salinidad de es capaz de detectar, lo hacemos con la ecuación 8 y teniendo en cuenta que cuando esté operando junto a un nodo sensor la mínima variación de voltaje que puede registrar es de 0,001V. Para calcularlo se sustituye en la ecuación (8) dos voltajes cuya diferencia sea ña mínima que podemos detectar, por ejemplo 2 y 2,001, el resultado muestra que el sensor es capaz de diferenciar muestras cuya salinidad difiera en 0,04psu dentro del rango lineal.

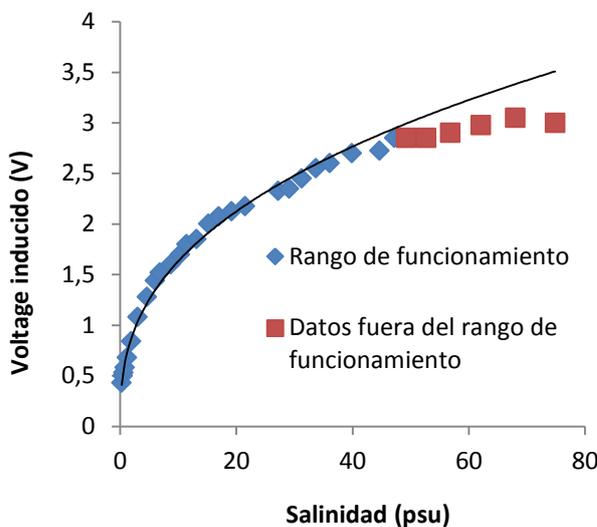


Figura 59. Calibración completa

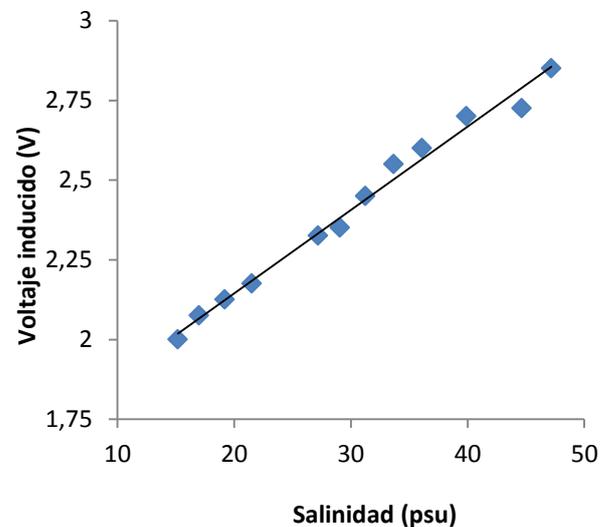


Figura 60. Rango lineal en la calibración

$$\text{Voltage (V)} = 0,6815 \times \text{Salinidad (psu)}^{0,3798} \quad (7)$$

$$\text{Voltage (V)} = 0,0262 \times \text{Salinidad (psu)} + 1,622 \quad (8)$$

#### 4.6. CONCLUSIONES

Tras las pruebas realizadas podemos concluir que el prototipo elegido es capaz de diferenciar entre muestras cuya salinidad varía en 0,04V dentro del rango de 13 a 47psu. Por debajo de 13psu presenta una sensibilidad mayor. Se ha detectado el máximo valor de salinidad que puede diferenciar y se sitúa en 47psu, sin embargo el valor mínimo no se ha detectado, pero está muy por debajo del rango en el que operará el sensor. Sí que quiere que opere en muestras de salinidad inferior a 13 deberían realizarse más pruebas para tratar de buscar el valor mínimo. Por otro lado las pruebas encaminadas a conocer el volumen mínimo de agua han mostrado que dicho valor es de 23,5L (48cm de largo con un diámetro de 25cm).

Si comparamos los resultados obtenidos con los que se obtuvieron con los prototipos previos, vemos que este prototipo requiere un volumen mínimo 3 veces superior y la sensibilidad en el rango de medida no puede ser comparada ya que se tratan de diferentes unidades de medida.

## 5. Pruebas en entorno real

### 5.1. INTRODUCCIÓN

Una vez calibrado el sensor es hora de comprobar que las lecturas que ofrece son estables y que los peces no suponen una interferencia en la lectura ni que el campo magnético generado es peligroso para los peces. En el presente capítulo se muestran las pruebas realizadas que aseguran el funcionamiento adecuado del sensor y que puede operar en piscifactorías. Para poder afirmarlo, realizamos una primera prueba en la que el sensor es introducido en una muestra de agua a temperatura estable y se deja midiendo durante 1 hora. Por otro lado para asegurar la inocuidad del sensor y el campo magnético que se genera se han realizado dos exposiciones controladas de un pez de acuario al campo magnético generado. También es relevante conocer si el campo magnético generado por el propio pez es capaz de afectar a la lectura del sensor.

### 5.2. MATERIAL Y MÉTODOS

El material empleado se asemeja al usado en las anteriores pruebas además del uso de un pez

- Generador HP 33120A
- Osciloscopio
- Prototipo 4
- Agua de acuario
- Condensador (10nF)
- Resistencia (100ohm)
- Recipiente de vidrio
- Pez de acuario

### 5.3. PRUEBAS REALIZADAS

La primera de las pruebas realizadas consistió en sumergir el sensor en una muestra de agua tomar la lectura instantánea e ir tomando medidas cada 5 minutos durante 1 hora. De esa forma nos aseguramos de que el sensor no tiene ninguna deriva causada por posibles interferencias entre el campo magnético y los iones a largo plazo. En algunos trabajos [21] los autores si detectaban fenómenos parecidos con conductímetros basados en la resistencia del agua, para ello utilizaban un pulso bipolar para evitar la polarización del agua circundante al sensor. Los resultados mostraron que la lectura era completamente estable como muestra la Figura 61 y no mostraba ningún efecto de polarización.

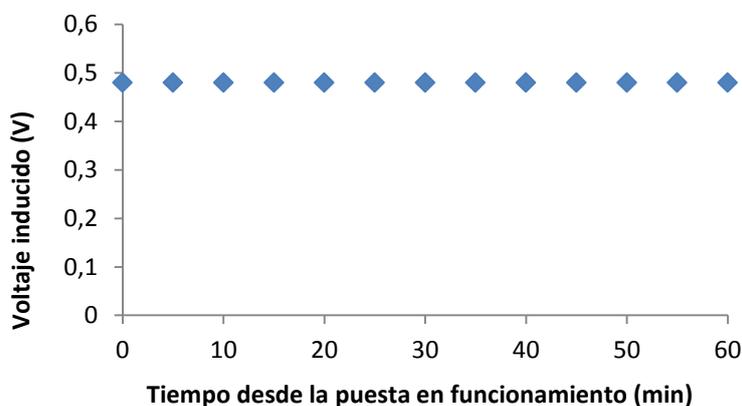


Figura 61. Voltaje inducido con muestra de salinidad estable durante el tiempo

El segundo set de pruebas que realizamos estaban destinadas a asegurar la inocuidad del sensor para formas de vida presentes en las piscifactorías. Las pruebas consistieron en dos exposiciones de un pez al campo magnético que emite el sensor. En las pruebas el pez estaba mucho más cerca del sensor de lo que estarían los peces en las instalaciones acuícola y durante más tiempo puesto que en la realidad el sensor solo se encenderá cuando se vaya a tomar una medida según sea necesario tomará medidas cada minuto, cada hora o cada día. Además para tomar la medida necesitará menos de un segundo por lo que la exposición continuada no se va a dar nunca

El pez estaba en buen estado de salud y siendo alimentado dos veces al día antes de la prueba. La primera exposición a la que se sometió el pez duró 2 minutos y se pudo comprobar como no existía ninguna alteración inmediata del comportamiento, la Figura 62 muestra una imagen tomada durante la prueba. También se comprobó que no hubiese ninguna alteración de la señal ofrecida por el sensor cuando el pez estaba cerca de él. Tras realizar dicha prueba el pez fue devuelto a su acuario donde se dejó hasta la siguiente prueba 24 horas después.

La segunda exposición dura 1 hora, durante esa prueba se observó tanto el comportamiento del pez, como la lectura ofrecida por el sensor. Así mismo se tuvo en cuenta que la hora se correspondiera con la hora de alimentación del pez por lo que se procedió a alimentar al pez, para observar si se alimentaba de forma normal o no. Esto se realizó para tener información sobre más comportamientos del pez, no solo en lo referente a su natación sino también en su alimentación para asegurar que el campo magnético no interfiere ni en la detección del alimento como en la captura del mismo. Se realizaron una serie de grabaciones de video durante el proceso de puesta en marcha del sensor, la alimentación del pez (a los 15 minutos de iniciar la prueba) y en el apagado del sensor. La Figura 62 muestra al pez en la primera exposición y la Figura 63 durante la segunda exposición.



Figura 62. Fotografía durante la primera exposición



Figura 63. Fotografía del pez comiendo, segunda exposición

#### 5.4. CONCLUSIONES

Se ha demostrado que el pez no parece afectado por el campo magnético como se observa en las fotografías anteriores incluso ha comido. Al mismo tiempo el pez no supone una alteración en la medida del sensor y el sensor no parece tener una deriva ni producir una polarización de los iones del agua como ocurría en [21]. Es por tanto un sensor adecuado para piscifactorías.

## 6. Conclusiones

---

### 6.1. CUMPLIMIENTO DEL OBJETIVO

---

Si recordamos los principales objetivos, estos eran obtener un sensor de bajo coste, que fuera capaz de operar en una instalación acuícola presentando un bajo mantenimiento y bajo contacto entre el sensor y el agua, que además fuese capaz de diferenciar salinidades desde 20 a 45psu. Hemos conseguido un sensor que es capaz de realizar medidas de salinidad en un rango de 13 a 47psu, con una precisión de 0,04psu con un coste bajo y que debido a su forma de operar teóricamente puede ser aislado del entorno recubriendo la parte de cobre con un material permeable al campo magnético. Para obtener este sensor se han realizado pruebas con gran cantidad de prototipos hasta elegir uno de ellos por sus características de frecuencia de pico, voltaje inducido, dimensiones, etc.

### 6.2. CONCLUSIONES DEL PROYECTO

---

Las conclusiones ya han sido vistas al final de cada apartado, por lo que aquí hacemos un breve resumen de ellas.

En primer lugar tras un exhaustivo análisis de 13 prototipos con características diferentes hemos encontrado diversas relaciones entre la forma de medir la salinidad por el sensor y las características físicas de los mismos. Esto nos permitirá en un futuro diseñar el sensor óptimo según la frecuencia y voltaje en el que queremos trabajar. Más tarde se ha realizado una elección del prototipo a utilizar y se ha calibrado, los resultados del calibrado muestran que el sensor puede trabajar dentro del rango de medidas objetivo. Por último y para asegurarnos que el sensor puede trabajar sin problemas en el entorno de una piscifactoría se han realizado una serie de pruebas poniendo en contacto a un pez con el sensor y hemos observado que su comportamiento no se ha alertado al estar expuesto al campo magnético.

En cuanto a las repercusiones del presenta trabajo radican principalmente en haber obtenido un sensor de salinidad apto para su uso en piscifactorías con un coste muy bajo en comparación con sensores comerciales. El sensor desarrollado se integrará en una red de sensores que está prevista que sea usada en breve para la monitorización en piscifactorías de jaulas flotantes. Dicha red de sensores que se presentó en [12] por parte del equipo de investigación y se desarrollará en breve aportará los siguientes beneficios para las piscifactorías debido al descenso del pienso no consumido.

Podrá ajustarse el pienso suministrado al pienso consumido por los peces, existiendo un ahorro para las instalaciones acuícolas, existiendo una mayor eficiencia del pienso. Al aprovechar mejor el pienso, se comprará menor cantidad de pienso en general. Esto supondrá un aumento en los beneficios de la empresa. El pienso no consumido que tendía a sedimentar y depositarse en el fondo de la instalación y sus alrededores, por tanto al descender la cantidad de pienso no consumido el fondo los fondos submarinos tendrán una menor carga de materia orgánica. Poco a poco los fondos marinos podrán llegar a recuperarse y los hábitats naturales volver a establecerse.

### **6.3. PROBLEMAS ENCONTRADOS Y CÓMO SE HAN SOLUCIONADO**

---

Uno de los principales problemas con los que nos hemos encontrado ha sido la variación que existe en la salinidad con la temperatura. Esta variación hacía que los datos no se pudiesen comparar ya que estaban afectados por la variación de temperatura. Para tratar de dar solución a dicho efecto se trabajó en los primeros análisis (Capítulo 3) con las muestras de agua a 5°C. Para ello las muestras se mantenían en una nevera y se trataba de tener las muestras siempre dentro y sacarlas durante las medidas, para evitar que se calienten. Para el calibrado se utilizó agua a temperatura ambiente ya que era un proceso largo y el agua se iría calentando.

De forma paralela a la investigación que se ha presentado hemos seguido trabajando con los prototipos previos uno de los trabajos realizados ha sido el aislamiento del sensor, para ello empleamos una pintura plástica aislante al agua. Sin embargo los resultados obtenidos no han sido concluyentes. Por lo que será necesario repetir las pruebas con los prototipos de este trabajo para tratar de solucionar el problema del aislamiento. Otra opción será recubrir el sensor con otra tubería de PVC. Por otro lado también tenemos que valorar la opción de no recubrir el sensor, ya que el propio esmalte del hilo de cobre ya lo está aislando del medio.

### **6.4. APORTACIONES PERSONALES**

---

Este no es el primer trabajo realizado dentro del grupo interdisciplinar al que pertenezco en relación a la creación del sensor de salinidad inductivo. En la anterior ocasión pude contar en todo momento con el apoyo de la persona encargada de la parte electrónica y tuve la ocasión de ampliar mis conocimientos en áreas que eran desconocidas para mí. En esta ocasión dicha persona estuvo fuera durante gran parte del periodo en el que realicé las pruebas por lo que recayó sobre la mi responsabilidad de preparar el circuito electrónico que acompaña a las bobinas y manejar el instrumental. Gracias a los conocimientos que había adquirido fue fácil poder realizar aquellas simples labores que un año antes no hubiese podido hacer.

Me siento orgullosa de poder pertenecer a un grupo interdisciplinar donde cada uno de nosotros aportamos nuestros conocimientos con el fin de llegar a un objetivo común. Aprendemos unos de otros de forma que nos continuamos formando tanto como profesionales como personas. Ahora como persona al cargo de la rama de medioambiente del grupo de investigación colaboro tanto con miembros de otras áreas tan dispares como Ingeniería electrónica, Telecomunicaciones o Informática así como ayudo a nuevos miembros del área de medioambiente a integrarse en el grupo. Los conocimientos obtenidos durante la realización del Master en Acuicultura me ayudarán a mí y mis compañeros en el grupo de investigación a mejorar las propuestas de redes de sensores para entornos subacuáticos y en concreto para piscifactorías.

### **6.5. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

---

Las futuras líneas de investigación son principalmente realizar nuevas pruebas ajustando otros parámetros con nuevos prototipos. Usaremos prototipos que tengan las espiras en 2 o más capas, así como prototipos que tengan las dos bobinas una sobre otra o con diámetros de cable distintos. Para seguir ampliando el conocimiento sobre la forma en que las bobinas inducidas son capaces de detectar los cambios de salinidad.

Por otro lado realizaremos calibrados a diferentes temperaturas para tener un sensor que sea capaz de realizar un ajuste según la temperatura. Estas ecuaciones que se obtendrán junto con toda la información y programación que sea necesaria para el correcto funcionamiento del sensor serán introducidas en un nodo sensor.

De forma paralela a los datos ofrecidos se ha trabajado con los prototipos previos y uno de ellos ha sido propuesto como un sensor de salinidad para estuarios integrando las ecuaciones del calibrado dentro de un nodo PIC24FJ256. Además se ha diseñado el circuito electrónico necesario que puede servir para el nuevo prototipo y que permitirá realizar medidas sin necesidad del generador o el osciloscopio. Dicho esquema se muestra a continuación en la Figura 64. Dichos resultados han formen parte del artículo enviado al congreso de IEEE Sensors que se presentarán en Valencia en el congreso que tendrá lugar del 2 al 5 de Noviembre [28].

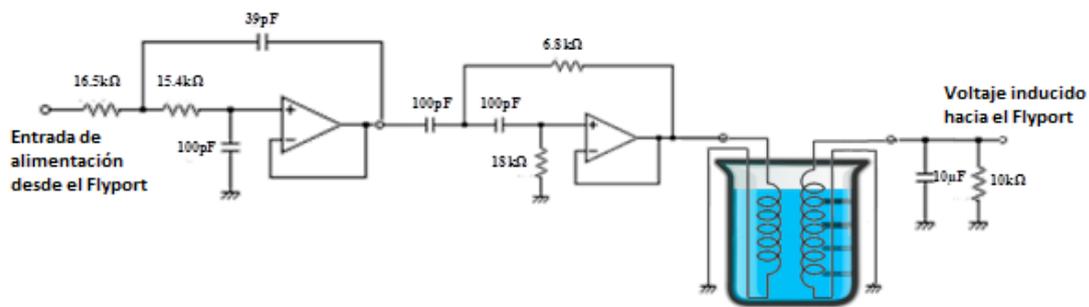


Figura 64. Sensor de salinidad propuesto con su esquema final

A continuación mostramos cual sería el precio final de cada sensor teniendo en cuenta todo el equipamiento electrónico visto en la Figura 64, dicho precio se desglosa en los diferentes componentes y lo podemos ver en la Tabla 11.

Tabla 11. Precio del sensor propuesto

Componentes	Precio (€)
Regulador de voltaje -5V (1A corriente de salida)	14,5
Regulador de voltaje -5V (1A corriente de salida)	2,73
PIC 16f8775.39	5,39
Convertor Analógico - Digital	8,57
Resistencias y condensadores	3
Bobinas de cobre	0,42
Total	34,61

Así mismo también se van a realizar más pruebas con peces, primero con el mismo individuos se le expondrá durante un mayor periodo de tiempo, así como se realizarán exposiciones periódicas cortas, buscando un posible efecto a una exposición crónica. Más tarde se realizarán las mismas pruebas en tanques experimentales con mayor cantidad de peces con las especies que podemos encontrar en instalaciones acuícolas.

**Referencias:**

- [1] Handeland, S. O., Imsland, A. K., & Stefansson, S. O. (2008). The effect of temperature and fish size on growth, feed intake, food conversion efficiency and stomach evacuation rate of Atlantic salmon post-smolts. *Aquaculture*, 283(1), 36-42.
- [2] Sangiao-Alvarellos, S., Laiz-Carrión, R., Guzmán, J. M., del Río, M. P. M., Miguez, J. M., Mancera, J. M., & Soengas, J. L. (2003). Acclimation of *S. aurata* to various salinities alters energy metabolism of osmoregulatory and nonosmoregulatory organs. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 285(4), R897-R907.
- [3] Valenzuela, A., Alveal, K., & Tarifeño, E. (2002). Respuestas hematológicas de truchas (*oncorhynchus mykiss walbaum 1792*) a estrés hipoxico agudo: serie roja. *Gayana (Concepción)*, 66(2), 255-261.
- [4] Yick, J., Mukherjee, B., & Ghosal, D. (2008). Wireless sensor network survey. *Computer networks*, 52(12), 2292-2330.
- [5] Sendra, S., Lloret, J., García, M., & Toledo, J. F. (2011). Power Saving and Energy Optimization Techniques for Wireless Sensor Networks. *Journal of communications*, 6(6), 439-459.
- [6] Wang, N., Zhang, N., & Wang, M. (2006). Wireless sensors in agriculture and food industry—Recent development and future perspective. *Computers and electronics in agriculture*, 50(1), 1-14.
- [7] Sendra, S., Lloret, A. T., Lloret, J., & Rodrigues, J. J. P. C. (2014). A wireless sensor network deployment to detect the degeneration of cement used in construction. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, 15(1), 147-160.
- [8] Werner-Allen, G., Johnson, J., Ruiz, M., Lees, J., & Welsh, M. (2005, January). Monitoring volcanic eruptions with a wireless sensor network. In *Wireless Sensor Networks, 2005. Proceedings of the Second European Workshop on* (pp. 108-120). IEEE.
- [9] Beutel, J., Gruber, S., Hasler, A., Lim, R., Meier, A., Plessl, C., ... & Yucel, M. (2009, April). PermaDAQ: A scientific instrument for precision sensing and data recovery in environmental extremes. In *Proceedings of the 2009 International Conference on Information Processing in Sensor Networks* (pp. 265-276). IEEE Computer Society.
- [10] Lloret, J., Bosch, I., Sendra, S., & Serrano, A. (2011). A wireless sensor network for vineyard monitoring that uses image processing. *Sensors*, 11(6), 6165-6196.
- [11] Lloret, J., Garcia, M., Bri, D., & Sendra, S. (2009). A wireless sensor network deployment for rural and forest fire detection and verification. *Sensors*, 9(11), 8722-8747
- [12] Garcia, M., Sendra, S., Lloret, G., & Lloret, J. (2011). Monitoring and control sensor system for fish feeding in marine fish farms. *IET communications*, 5(12), 1682-1690.
- [13] Ma, D., Ding, Q., Li, D., & Zhao, L. (2010). Wireless sensor network for continuous monitoring water quality in aquaculture farm. *Sensor Letters*, 8(1), 109-113.
- [14] Calderer Reig, A. (2001). *Influencia de la temperatura y la salinidad sobre el crecimiento y consumo de oxígeno de la dorada ("Sparus aurata" L.)*. Universitat de Barcelona.
- [15] Conides, A. J., & Glamuzina, B. (2006). Laboratory simulation of the effects of environmental salinity on acclimation, feeding and growth of wild-caught juveniles of European sea bass <i>Dicentrarchus labrax</i> and gilthead sea bream, <i>Sparus aurata</i>. *Aquaculture*, 256(1), 235-245.

- [16] Laiz-Carrión, R., Sangiao-Alvarellos, S., Guzmán, J. M., Martín del Río, M. P., Soengas, J. L., & Mancera, J. M. (2005). Growth performance of gilthead sea bream *Sparus aurata* in different osmotic conditions: Implications for osmoregulation and energy metabolism. *Aquaculture*, 250(3), 849-861.
- [17] Mylonas, C. C., Pavlidis, M., Papandroulakis, N., Zaiss, M. M., Tsafarakis, D., Papadakis, I. E., & Varsamos, S. (2009). Growth performance and osmoregulation in the shi drum (*Umbrina cirrosa*) adapted to different environmental salinities. *Aquaculture*, 287(1), 203-210.
- [18] Tandler, A., Anav, F. A., & Choshniak, I. (1995). The effect of salinity on growth rate, survival and swimbladder inflation in gilthead seabream, *Sparus aurata*, larvae. *Aquaculture*, 135(4), 343-353.
- [19] Maicá, P. F., Borba, M. R. D., Martins, T. G., & Wasielesky Junior, W. (2014). Effect of salinity on performance and body composition of Pacific white shrimp juveniles reared in a super-intensive system. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 43(7), 343-350.
- [20] Spanopoulos-Hernández, M., Martínez-Palacios, C. A., Vanegas-Pérez, R. C., Rosas, C., & Ross, L. G. (2005). The combined effects of salinity and temperature on the oxygen consumption of juvenile shrimps *Litopenaeus stylirostris* (Stimpson, 1874). *Aquaculture*, 244(1), 341-348.
- [21] Wei, Y., Wang, J., Li, D., & Ding, Q. (2010). Design of Intelligent Conductivity Meter Based on MSP430F149. In *Computer and Computing Technologies in Agriculture III* (pp. 240-247). Springer Berlin Heidelberg.
- [22] Medrano, M., Pérez, A. T., & Soria-Hoyo, C. (2007). Design of a conductivity meter for highly insulating liquids. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40(5), 1477.
- [23] Ramos, H., Gurriana, L., Postolache, O., Pereira, M., & Girão, P. (2005, March). Development and characterization of a conductivity cell for water quality monitoring. In *Third IEEE International Conference on Systems, Signals & Devices (SSD'2005), Sousse, Tunisia*.
- [24] Ribeiro, A. L., Ramos, H. M. G., Ramos, P. M., & Pereira, J. D. (2006, September). Inductive conductivity cell for water salinity monitoring. In *Proceedings of XVIII Imeko World Congress, Metrology for a Sustainable Development* (pp. 17-22).
- [25] Parra, L., Ortuño, V., Sendra, S., & Lloret, J. (2013, August). Two New Sensors Based on the Changes of the Electromagnetic Field to Measure the Water Conductivity. In *SENSORCOMM 2013, The Seventh International Conference on Sensor Technologies and Applications* (pp. 266-272).
- [26] PARRA, L., SENDRA, S., ORTUÑO, V., & LLORET, J. Water Conductivity Measurements based on Electromagnetic fields.
- [27] PARRA, L., SENDRA, S., ORTUÑO, V., & LLORET, J. Low-cost Conductivity Sensor Based on Two Coils.
- [28] ] PARRA, L., SENDRA, LLORET, J, & Rodrigues, J.J.P.C (2014), Low Cost Wireless Sensor Network for Salinity Monitoring in Mangrove Forests, IEEE SENSORS 2014; The 13th IEEE Conference on Sensors