



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

## FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE  
PROTOTIPOS PARA LA MEDICIÓN DEL  
CONTENIDO DE AIRE EN AGUA

T E S I S

Que para obtener el Título de  
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO

Presenta

**ALEJANDRO DOMÍNGUEZ CASTANEDO**



ASESOR: Ing. Rodolfo Peters Lammel

Ciudad Universitaria, marzo 2009.

**Dedico este trabajo  
a mi Familia y  
a mis Amigos.**

Quiero Agradecer a las siguientes personas por haber hecho este trabajo posible:

En primer lugar, al Ingeniero Rodolfo Peters Lammel, mi director de Tesis y amigo, por su infinita paciencia, comprensión e invaluable enseñanzas, que me ayudaron a crecer como ingeniero y ser humano. Si todo el mundo tuviera su trato y respeto para con los demás, este mundo sería diferente.

A mis asesores de Tesis, por su tiempo y dedicación. Sin sus valiosas correcciones y aportaciones, este trabajo sería una sombra de lo que es.

Al personal del Laboratorio de Hidráulica de Cuernavaca de la CFE por todas las facilidades y el apoyo que nos brindaron.

A mi Papá, por ser un incomparable ejemplo a seguir. Gracias por todas las veces que me presionaste para que consiguiera esta importante meta. Espero llegar a ser la mitad de lo que tú y mi mamá son.

A mi Mamá, por su apoyo, sabiduría y amor incondicional. Gracias por jamás dudar de mí. Eres la persona con el corazón más grande del mundo.

A mis hermanos, por siempre estar ahí cuando los he necesitado. Con ustedes a mi lado, siento que no hay obstáculo que nos detenga. Omar, ojalá tuviera tu aplomo para hacer las cosas. Nayeli, si fuera la mitad de inteligente que tú, tendría mi título desde hace años.

A mi abuelo Jesús, por ser un ejemplo de integridad y fuerza sin igual. Te extraño... por ti cada partido lo juego al máximo.

A mi abuelo Berna, por todas las enseñanzas que me ha dado, sobre todo por demostrar que siempre hay una forma de hacer las cosas. Por ti decidí ser ingeniero.

A mis abuelas Lolita y Conchita, por su cariño inconmensurable. Siempre me hacen sentir que soy el mejor hombre del mundo.

Al Ingeniero José Alberto Ortiz, mi compañero de Tesis y amigo, por su valiosa ayuda en el desarrollo de este trabajo de tesis. Gracias por todo carnal, sin ti este proyecto no hubiera sido posible.

A mis amigos, por todos los momentos que hemos compartido, los berrinches que han aguantado, las lágrimas que han consolado, las alegrías que me han brindado y sobre todo, por ayudarme a siempre salir adelante convirtiéndome en el hombre que soy. Niñas, las adoro... Carnales, se les quiere.

A las familias de mis amigos, por sus sabios consejos, aguantar gorroneías, desveladas y preocupaciones sin igual. Las puertas de mi corazón y mi casa siempre estarán abiertas para ustedes.

A todos en el Edificio 12 del Instituto de Ingeniería de la UNAM, y en mi actual trabajo, por su amistad, comprensión y apoyo para permitirme terminar con este trabajo.

Al final pero no menos importante,

A Dios, "el creador", "el destino", "la fuerza" o como quieran llamarle, por tenerme aquí con todos ustedes.

# Índice General:

---

|   |        |
|---|--------|
| Portada:.....   | - 1 -  |
| Dedicatoria: .....  | - 2 -  |
| Agradecimientos:.....   | - 3 -  |
| Índice general:.....  | - 4 -  |
| Índice de figuras: .....  | - 6 -  |
| Índice de tablas: .....   | - 8 -  |
| <b>1.Introducción</b> .....   | - 9 -  |
| <b>2.Antecedentes</b> .....   | - 11 - |
| 2.1.Descripción del canal de demasías en una presa hidroeléctrica. ....                               | - 11 - |
| 2.2.Cavitación, definición y su presencia en los canales de demasías.....                             | - 12 - |
| 2.3.Métodos para evitar la cavitación en los canales de demasías. ....                                | - 15 - |
| 2.4.Necesidad de un medidor de contenido de aire en agua.....   | - 16 - |
| <b>3.Objetivos</b> .....  | - 18 - |
| 3.1.Objetivo general.....   | - 18 - |
| 3.2.Objetivos particulares. ....  | - 18 - |
| <b>4.Desarrollo de los sistemas empleados</b> .....   | - 19 - |
| 4.1.Descripción general de los sistemas.....  | - 19 - |
| 4.1.1.Diagrama de bloques de los circuitos electrónicos. ....   | - 21 - |
| 4.1.2.Diferencias entre los sistemas de dos y de cuatro electrodos ..                                 | - 22 - |
| 4.2.Oscilador senoidal. ....  | - 24 - |
| 4.3.Etapa de amplificación de corriente “push-pull” .....   | - 27 - |
| 4.4.Etapa de amplificación de tensión para ambos prototipos.....                                      | - 30 - |
| 4.5.Etapa de rectificación y generación del nivel de corriente .....                                  | - 32 - |
| 4.6.Etapa de filtrado y corrección del nivel de “offset” . ....                                       | - 35 - |
| 4.7.Fuente de corriente.....  | - 38 - |
| <b>5.Electrodos</b> .....   | - 39 - |
| 5.1.Sistema anular (dos electrodos anulares concéntricos).....  | - 39 - |
| 5.1.1.Justificación del empleo del sistema anular.....  | - 41 - |
| 5.1.2.Principio de funcionamiento y conexión.....   | - 41 - |
| 5.2.Sistema lineal (cuatro electrodos circulares). ....   | - 43 - |
| 5.2.1.Justificación del empleo del sistema de cuatro electrodos .....                                 | - 44 - |
| 5.2.2.Principio de funcionamiento y conexión.....   | - 44 - |
| <b>6.Pruebas y mediciones realizadas</b> .....  | - 47 - |
| 6.1.Descripción de las pruebas realizadas para el sistema de dos electrodos .....                     | - 47 - |
| 6.2.Mediciones y curva de funcionamiento del sistema de dos electrodos .....                          | - 52 - |
| 6.3.Análisis de los resultados obtenidos para el sistema de dos electrodos .....                      | - 55 - |
| 6.4.Descripción de las pruebas realizadas para la elección del tamaño de los electrodos lineales..... | - 58 - |
| 6.5.Mediciones y curva de funcionamiento del sistema de cuatro electrodos lineales .....              | - 61 - |
| 6.6.Análisis de los resultados obtenidos para el sistema de cuatro electrodos lineales .....          | - 63 - |

|   |        |
|---|--------|
| <b>7.Fuente de alimentación</b> .....       | - 68 - |
| 7.1.Elección del tipo de fuente.....        | - 68 - |
| 7.2.Diseño y construcción.....              | - 69 - |
| 7.2.1.Etapa de transformación:.....         | - 70 - |
| 7.2.2.Etapa de rectificación:.....          | - 70 - |
| 7.2.3.Etapa de filtrado y regulación: ..... | - 71 - |
| <b>8.Conclusiones</b> .....                 | - 73 - |
| <b>I. Anexos</b> .....                      | - 75 - |
| Anexo 1:.....                               | - 75 - |
| Anexo 2:.....                               | - 77 - |
| Anexo 3:.....                               | - 78 - |
| Anexo 4:.....                               | - 80 - |
| <b>II.Bibliografía</b> .....                | - 85 - |

# **1 ● Introducción**

---

Dentro de este capítulo se plantearán los puntos fundamentales que justifican la realización de este proyecto de tesis. Se realizará también una breve descripción del sistema empleado, con la finalidad de establecer claramente los puntos que se tratarán a lo largo de este trabajo.

Para comenzar, es importante destacar que el prototipo desarrollado para esta tesis se realizó en el Instituto de Ingeniería de la UNAM bajo petición del Laboratorio de Hidráulica de la Comisión Federal de Electricidad, con la dirección y ayuda del Ingeniero Rodolfo Peters Lammel, Coordinador del Área de Instrumentación del Instituto de Ingeniería de la UNAM. También se desea aclarar que la construcción física de los medidores, investigación, compra de materiales, así como las pruebas necesarias para corroborar su buen funcionamiento y calibración, las realicé de forma conjunta con el Ingeniero José Alberto Ortiz Gutiérrez.

La Comisión Federal de Electricidad se acercó al Instituto de Ingeniería para pedirle el desarrollo de medidores de concentración de aire en agua para, por medio de ellos, poder monitorizar el correcto funcionamiento de sus dispositivos de aireación que evitan los problemas causados por la cavitación en los canales de demasías o vertedores de las presas hidroeléctricas del país.

En un comienzo, la CFE le facilitó al Instituto un sistema de medición desarrollado por su gente para que se empleara como base para un nuevo desarrollo, empleando tecnología actual. Esto se convirtió en una tarea muy difícil ya que el medidor no funcionaba correctamente y era sumamente complejo; por ello se pidió autorización para desarrollar un nuevo medidor, más simple, pero que funcionara de acuerdo con sus necesidades.

Se nos permitió realizar el proyecto cumpliendo con ciertas restricciones; utilizar las celdas de medición que la CFE ya tenía desarrolladas fue una de ellas, y otras fueron las fechas de entrega para cumplir con el convenio firmado. Sin embargo, a lo largo del desarrollo logramos, tanto cumplir con sus restricciones al desarrollar un sistema que emplea las celdas de medición de la CFE, como conseguir diseñar un nuevo y mejorado sistema de medición que emplea una sonda diseñada por nosotros, y gracias a esto, la Comisión nos dio facilidades de tiempo para desarrollar ambos sistemas con la calidad deseada.

La razón por la cual se decidió iniciar el desarrollo de un sistema que utilizara un tipo de sonda distinto, fue porque el Laboratorio de Hidráulica de Cuernavaca pidió una sonda adicional que pudiera montarse en sus modelos hidráulicos. Dichos modelos están contruidos en acrílico, y aunque era posible

montar las sondas que nos facilitó la CFE, se prefirió plantear el diseño de una sonda mucho más liviana, hecha también en acrílico, y también más pequeña para permitir un montaje rápido y sencillo.

Una vez diseñados y armados los medidores, fue necesario calibrarlos y probar su buen funcionamiento, sin embargo, en el laboratorio sólo fue posible realizar mediciones estáticas. Posteriormente ambos sistemas se calibraron para dar la mejor respuesta posible.

Gracias a la ayuda brindada por el Laboratorio de Hidráulica de Cuernavaca, se pudo también probar dinámicamente los medidores acercándose mucho más a las condiciones reales de operación, ya que se instalaron las sondas de medición en un modelo hidráulico y se fue modificando la cantidad de agua que se hacía pasar sobre ellas, variando con eso la altura de la columna de agua sobre la sonda, y como el modelo tiene instalado un sistema de aireación que simula a los aireadores, fue posible simular condiciones parecidas a las de la presa hidroeléctrica en donde serán instalados.

La parte final de este proyecto fue realizar manuales de operación para el personal de CFE y documentar por medio de esta tesis todo el proceso desarrollado.

# 2. Antecedentes

En este capítulo se explicará de forma breve la manera de evitar la presencia del fenómeno de la cavitación mediante el uso de aireadores en los canales de demasías de las presas hidroeléctricas, así como la necesidad de cuantificar la cantidad de aire introducida al agua mediante éstos.

## 2.1. Descripción del canal de demasías en una presa hidroeléctrica.

Es importante hacer mención de los canales de demasías ya que en ellos es donde se instalarán los medidores desarrollados en esta tesis.

En las presas hidroeléctricas, existen unas estructuras llamadas canales de excedencias o de demasías, también conocidas como vertedores. Se encuentran clasificados dentro del grupo denominado como obras de excedencias para presas hidroeléctricas.

“Dichas obras de excedencias son estructuras que forman parte intrínseca de una presa, sea de almacenamiento o derivación y cuya función es la de permitir la salida de los volúmenes de agua excedentes a los aprovechables” (Torres Herrera, 1987).

Una de las clasificaciones empleadas para diferenciar las obras de excedencias entre sí es la mostrada en la Figura 1.

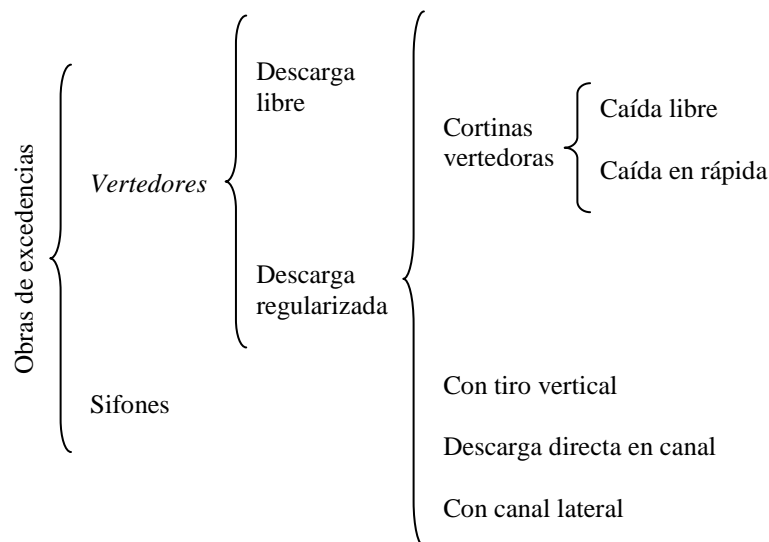


Figura 1. Clasificación según Torres Herrera, de las obras de excedencias.



La seguridad de la presa depende del buen diseño, control y funcionamiento de dichos canales, ya que de lo contrario se puede presentar una avenida mayor que la supuesta y el nivel del agua lograría sobrepasar la elevación de la corona de la cortina generando graves daños, no sólo en la estructura, sino también en los asentamientos urbanos localizados aguas abajo dentro de la zona de riesgo, fuera de toda reglamentación.

Es necesario destacar que a pesar del buen diseño de un canal de demasías, el desalojo del agua excedente producirá daños en su estructura debidos al fenómeno de cavitación a menos de que se tomen medidas preventivas al respecto. En puntos siguientes se profundizará al respecto.

Hay diversos tipos de vertedores dependiendo de si presentan estructuras de control en ellos, como compuertas, o del tipo de descarga de los mismos, Figura 1. El prototipo de medición para el contenido de aire en agua desarrollado se diseñó para instalarse en un vertedor de canal abierto, sin embargo puede ser utilizado en cualquier tipo de obra de excedencias, siempre y cuando se realicen las modificaciones necesarias para su montaje.

En la Figura 2 se muestra una foto del vertedor de la presa hidroeléctrica del Cajón. Lugar en donde serán colocados los medidores desarrollados en este trabajo.



*Figura 2. Foto de los vertedores de la presa hidroeléctrica del Cajón.*

## **2.2. Cavitación, definición y su presencia en los canales de demasías.**

La cavitación ha sido un importante motivo de estudio para la ingeniería por poco más de 100 años. Es un fenómeno intrínseco de los fluidos en movimiento contenidos en un área determinada.

Aunque la cavitación es considerada como un efecto o fenómeno indeseable, algunas veces es utilizada para propósitos útiles. Aplicaciones que incluyen el limpiado ultrasónico de superficies o para

mejorar varios procesos químicos tales como la coagulación, formación de suspensiones y adelgazamiento de líquidos. La cavitación también puede ser usada para aumentar el calor y transferencia de masa en líquidos, para promover la cristalización y degradación de polímeros. También se emplea para aplicaciones biomédicas como el remover piedras de riñón y entregar de forma automática medicamento a los pacientes (Arndt R., 2002). Por otro lado, se han encontrado nuevas e importantes aplicaciones de la cavitación para el control de áreas contaminadas (Kalumuck y Chahine 2000, Gong y Hart 1998).

Para entender mejor este fenómeno y su importancia en este estudio, es necesario definirlo.

Se le define como: “La reducción dinámica de la presión que tiene lugar cuando un líquido fluye en ductos curvos, o rodea o pasa sobre un cuerpo inmerso” (Daily J. y Harleman D., 1975), dicho de otro modo: “La cavitación es un cambio rápido, casi <<explosivo>> de fase de líquido a vapor, el cual ocurre siempre que la presión absoluta de un líquido que está fluyendo, cae por medios hidrodinámicos hasta o más debajo de su valor crítico. Bajo circunstancias usuales, la presión crítica es la presión de vaporización, o una ligeramente menor.” (Daily J. y Harleman D., 1975).

Para entender con mayor claridad el fenómeno, se explicará el flujo de un líquido a través de un ducto con un estrechamiento.

Como sabemos, la presión de un fluido contenido dentro de una tubería o sección disminuye mientras menor sea la sección de éste, y a consecuencia, la velocidad del fluido aumentará; se puede afirmar que la presión del líquido será la más baja en el lugar de área mínima.

Si se pudiera aumentar paulatinamente la velocidad del fluido, se notaría que no se presenta la cavitación hasta sobrepasar cierta velocidad. Esto se debe a que a esa velocidad determinada, el fluido alcanzó una presión en el estrechamiento igual o menor a la presión de vaporización. De tal modo que justo después de la zona más estrecha comienza la formación de cavidades adheridas a las paredes. Estas cavidades contienen una masa de pequeñas gotas y de vapor en agitación, y aunque pareciera ser una gran burbuja estable, en realidad está formándose y destruyéndose varias veces por segundo. Esta “explosión” continua es la que genera los daños en las estructuras pues al repetirse durante mucho tiempo el fenómeno, el material comienza a sufrir esfuerzos hasta rebasar el límite elástico del mismo, produciendo la fatiga y destrucción de la superficie (Vennard J., 1979), Figura 3.

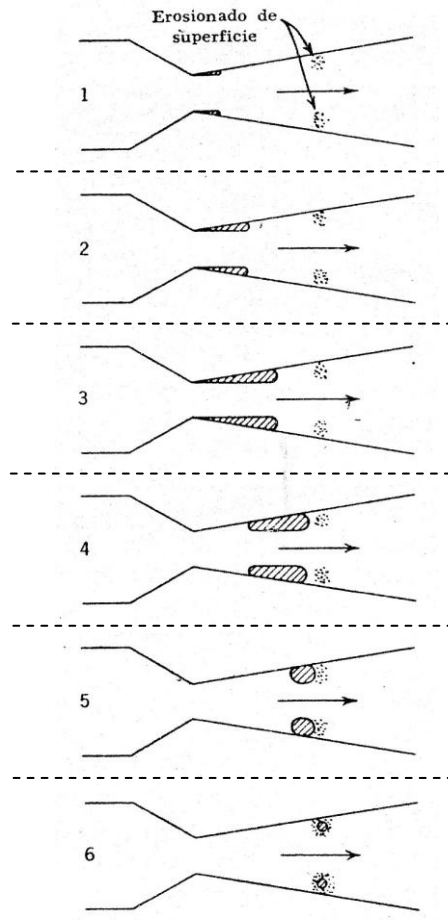


Figura 3. Formación de cavidades y sus consecuencias en un ducto estrecho. Tomada de Elementos de Mecánica de Fluidos, Venard, John K.

Sin embargo, para que se presente este fenómeno se requiere de ciertas condiciones: “cuando la velocidad del agua en los conductos abiertos sobrepasa los valores de 20 [m/s] a 25 [m/s] se crean zonas de baja presión que favorecen el desarrollo de la cavitación y erosión de las superficies de concreto” (Torres Herrera, 1979). La cavitación desarrollará daños importantes en las estructuras debido a que la implosión de las burbujas formadas mediante este fenómeno generan golpes de hasta 10,204 [kg/cm<sup>2</sup>] actuando en áreas y lapsos de tiempo muy pequeños (Saidarriaga J., Navarrete M., Galeano L., 1992)

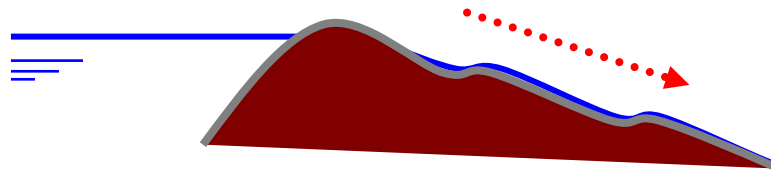
Evidentemente, en los vertedores se alcanzan velocidades mayores a 20 [m/s], por ello se puede concluir que el fenómeno de la cavitación se presenta en los canales de demasías y es necesario evitarlo de algún modo para que no se generen daños en la plantilla de concreto.

### **2.3. Métodos para evitar la cavitación en los canales de demasías.**

Desde los inicios de la construcción de obras hidráulicas se ha tenido el problema de la cavitación y se le ha dado solución de acuerdo con las tecnologías disponibles.

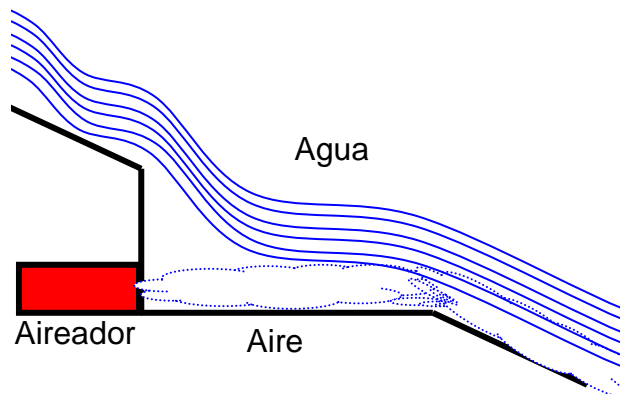
En un principio no se contaba con algún método eficiente para evitar la presencia de la cavitación; los constructores de las presas se resignaban a utilizar materiales de alta resistencia y a dar mantenimiento a las obras periódicamente cambiando por completo la plantilla de la presa.

Posteriormente se generaron medios mecánicos para disminuir la energía cinética del fluido a lo largo de la caída, se diseñaron perfiles de caída escalonados con una determinada pendiente, Figura 4.



*Figura 4. Disminución de la energía cinética del fluido mediante caída escalonada*

Recientemente se ha pensado en utilizar alguna clase de material que aumente el coeficiente de fricción entre el agua fluyendo y la plantilla de concreto, sin embargo, en un comienzo parecía una solución inviable en cuanto a su costo y desarrollo. Para convertir esta opción en algo viable, se planteó generar un colchón de aire a lo largo del flujo para utilizarlo como amortiguador, empleando así un elemento dinámico que no tiene que ser reemplazado después de algún tiempo. Los aireadores surgen como solución a este problema generando grandes cantidades controladas de aire que se inyecta paralelo a la plantilla, y para lograr un colchón apropiado es necesario diseñar escalones pequeños a lo largo de la caída para que el agua brinque y caiga sobre el colchón de aire lanzado, Figura 5.



*Figura 5. Aireador.*

Sin embargo, como todos sabemos, el aire es menos denso que el agua y por ello las burbujas de aire tenderán a subir. Esto implica que el aire inyectado junto a la plantilla por los aireadores después de algunos metros habrá subido y será inservible en lo que a evitar la cavitación respecta.

Como se puede ver, es muy complejo realizar un análisis matemático de todos los factores mencionados para poder conocer un modelo teórico que nos aproxime a un valor real del contenido de aire en el agua del vertedor, por ello se necesita de algún método físico que nos ayude a determinar esta variable como se explicará en el punto siguiente.

#### **2.4. Necesidad de un medidor de contenido de aire en agua.**

Como consecuencia de lo explicado en los puntos anteriores, podemos justificar la realización de esta tesis debido a la necesidad de construir un medidor de contenido de aire en agua ya que, para el personal de la Comisión Federal de Electricidad, es de sumo interés el conocer la cantidad de aire que se encuentra próximo a la plantilla de los canales de demasías en las presas hidroeléctricas, en particular para este proyecto la del Cajón, pues al conocer dicho valor es posible determinar con certeza si los aireadores están funcionando correctamente y si la cantidad de aire que están suministrando es la adecuada para evitar los daños causados por la cavitación.

Para determinar si los aireadores funcionan correctamente, se necesitaba conocer el porcentaje de concentración de aire, necesario en el fondo de la plantilla para eliminar el fenómeno de la cavitación. Según la experiencia del personal del Laboratorio de Hidráulica de Cuernavaca, al tener por lo menos 3% de concentración de aire al fondo del canal de demasías, se puede asegurar la no aparición de daños por cavitación. Para respaldar este valor, se encontró en el artículo "Aireación de flujos de alta velocidad, una metodología alterna para el diseño de aireadores" escrito por Saidarriaga J., Navarrete M. y Galeano L., una referencia al valor necesario para evitar la cavitación. Según los autores de este artículo, Peterka A. realizó los primeros experimentos que lograron determinar que al contar con un 7.4% de concentración de aire en agua en la parte inferior del flujo, se evita totalmente la erosión del concreto causada por cavitación, y con un 1% a 2 % de concentración de aire al fondo del flujo, se reducen de forma considerable los daños causado por la misma.

Por lo tanto, al saber si tenemos un colchón de aire que corresponda por lo menos al 3% del tirante de agua, se garantizará que no se presenten problemas causados por cavitación, y por otro lado, si se detecta un porcentaje de aire muy por encima del 3%, será posible afirmar que el aireador está trabajando a una capacidad por encima de la necesaria y se podrán tomar medidas al respecto que reducirán el gasto de energía de forma innecesaria.

Cabe resaltar que en la Comisión Federal de Electricidad ya se contaba con medidores de contenido de aire en agua; sin embargo, el mal funcionamiento y la complejidad de los mismos, abre la puerta a la realización de nuevos medidores que presenten un correcto funcionamiento acorde con las especificaciones de esta institución gubernamental.

# 3. Objetivos

---

## 3.1. Objetivo general.

Diseño y construcción de prototipos para la medición del contenido de aire en agua.

## 3.2. Objetivos Particulares.

1. Diseñar y construir un circuito electrónico para la medición del contenido de aire en agua partiendo del uso de las sondas de medición anulares.
2. Probar de forma estática el circuito realizado con las sondas anulares.
3. Calibrar el circuito desarrollado.
4. Diseñar y construir nuevos electrodos para ser montados en los modelos hidráulicos del laboratorio de la CFE en Cuernavaca.
5. Mejorar el circuito del medidor que emplea los sensores anulares concéntricos, diseñando y construyendo un circuito electrónico para utilizar los nuevos electrodos diseñados.
6. Probar de forma estática el circuito con los nuevos electrodos circulares.
7. Calibración del sistema de electrodos circulares alineados.
8. Pruebas dinámicas del sistema de electrodos circulares alineados.

# 4. Desarrollo de los sistemas empleados

---

Como se señaló en partes previas de este trabajo, se desarrollaron dos sistemas que emplean el mismo principio de funcionamiento pero que tienen pequeñas diferencias en cuanto a los bloques que los conforman; a uno lo llamamos “Sistema de 2 electrodos anulares” y al otro “Sistema de 4 electrodos lineales”, poco a poco se explicará en qué consiste cada uno de ellos. Ambos fueron desarrollados por petición de la Comisión Federal de Electricidad para medir, de forma cualitativa, el contenido de aire en agua mediante el principio de conductividad gracias a un arreglo resistivo.

El proceso de desarrollo del sistema anular fue un tanto intuitivo. Tomamos como base las especificaciones señaladas por el personal de CFE para establecer las limitantes del diseño. Dichas restricciones fueron:

- El tamaño de los registros de instrumentación en la presa hidroeléctrica como medidas máximas del medidor.
- Utilizar las sondas anulares.
- La necesidad de tener 5 sondas conectadas al mismo gabinete.
- Tener una variación significativa en la respuesta del sistema para la detección del aire en por lo menos los 3 centímetros más próximos a la plantilla.
- Fácil instalación y manejo.
- Cumplir con los tiempos de entrega.
- Cumplir con los costos establecidos.

A lo largo de este capítulo se hará una descripción detallada del funcionamiento y partes que componen a los equipos desarrollados haciendo hincapié en las diferencias entre ambos medidores.

## **4.1. Descripción general de los sistemas.**

Hablando en particular de cada uno de los medidores, el de dos anillos concéntricos consta de varios elementos: un gabinete central en donde se encuentran las fuentes de polarización bipolares, una caja de interconexión con los dos circuitos electrónicos que realizan la medición del contenido de aire en agua mediante cada anillo, y una sonda de medición con dos anillos concéntricos metálicos que sirven como electrodos.



En cuanto al medidor de cuatro anillos circulares, los elementos que lo constituyen son los mismos que en el medidor mencionado anteriormente con la excepción de que en la caja de interconexión se cuenta únicamente con un circuito electrónico, y que la sonda de medición es una base acrílica con cuatro electrodos circulares montados en ella.

En secciones posteriores se hablará con más detalle sobre cada una de las partes mencionadas.

Debido al tamaño de los registros de medición en los cuales se colocará el sistema de dos anillos concéntricos, fue necesario realizar circuitos electrónicos sencillos y de pocos elementos con el afán de reducir al máximo el espacio que necesitan para ser instalados. De igual forma se diseñaron los circuitos electrónicos del medidor de cuatro electrodos circulares, ahorrando al máximo el espacio ocupado por los circuitos para que fueran de fácil transporte y ubicación.

Particularizando sobre los circuitos electrónicos que se describen en esta tesis, son de un diseño muy simple dividido en bloques conformados por elementos electrónicos activos y pasivos.

#### 4.1.1. Diagrama de bloques de los circuitos electrónicos.

Los bloques que conforman los circuitos electrónicos de ambos sistemas son los mismos, Figura 6. Sin embargo, hay algunas diferencias muy importantes entre ambos sistemas que serán descritas posteriormente.

En el diagrama se presentan los bloques del circuito electrónico en el centro y, a los lados, se agregaron las fuentes y las sondas de cada sistema para que quedaran plasmadas las diferencias en cuanto a la conexión entre elementos, sondas y fuentes.

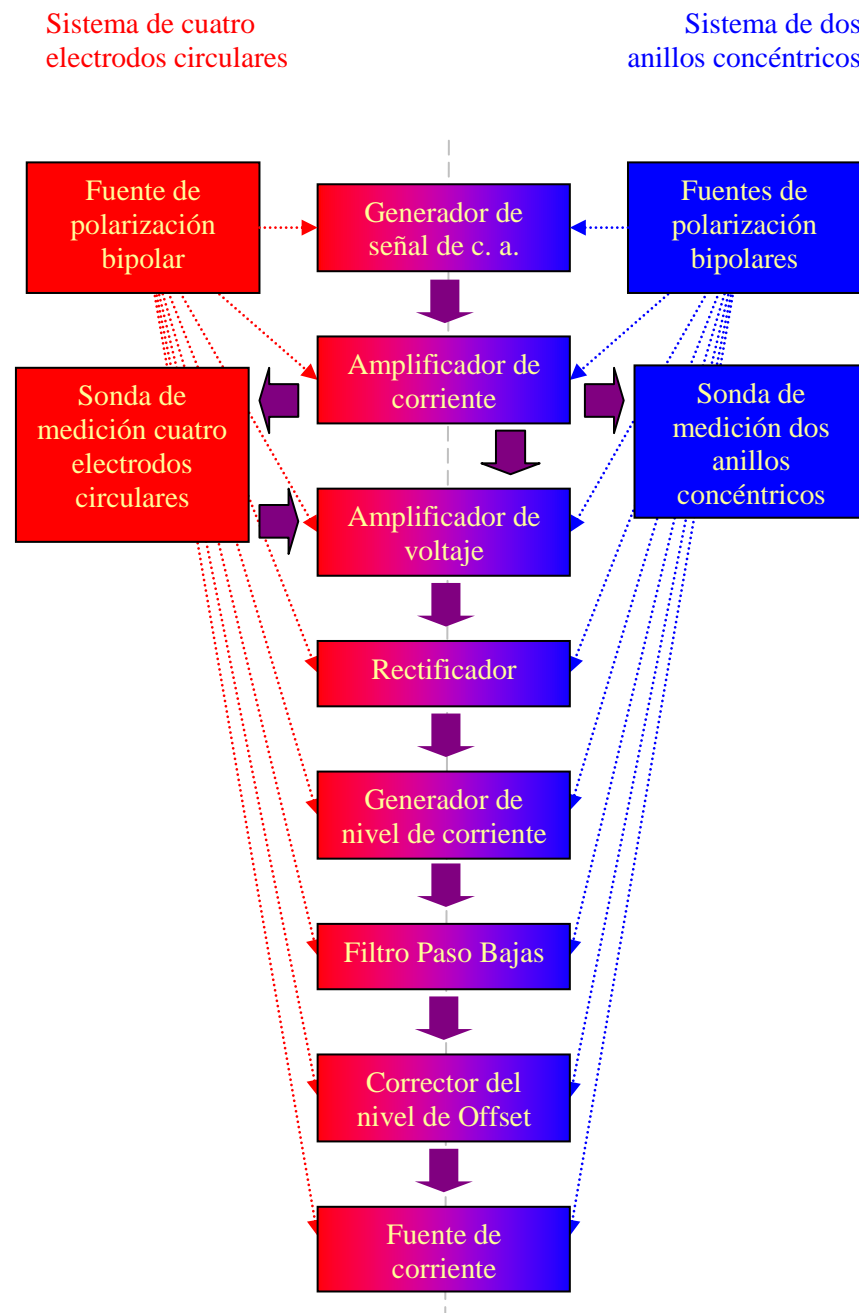


Figura 6. Bloques que forman el circuito electrónico

#### **4.1.2. Diferencias entre los sistemas de dos y de cuatro electrodos.**

Se ha mencionado con anterioridad la existencia de dos sistemas diferentes para el desarrollo de esta tesis, un sistema denominado anular, Figura 7, y otro llamado de cuatro electrodos circulares, Figura 8.

Las diferencias entre ambos se deben a que el primero fue diseñado para instalarse directamente en los registros de instrumentación de la planta hidroeléctrica del Cajón, mientras que el segundo se desarrolló para instalarse en los modelos hidráulicos del laboratorio de hidráulica de la CFE en Cuernavaca, Morelos.

La primera diferencia a destacar es que el sistema anular se realizó pensando en interconectar cinco medidores independientes al mismo gabinete central por petición de CFE, mientras que el sistema de cuatro electrodos consta de un solo medidor.

Otra diferencia es que el sistema anular necesita de dos fuentes bipolares independientes para evitar interferencia entre los dos anillos, y por su parte, el sistema de cuatro electrodos sólo requiere de una fuente bipolar.

A su vez, las cajas de interconexión del sistema de dos anillos tienen dos circuitos electrónicos impresos ubicados dentro de ellas (uno para cada anillo) mientras que el sistema de cuatro electrodos circulares sólo necesitó de un circuito impreso.

Por otra parte las sondas de medición del sistema de dos anillos tienen, como su nombre lo indica, una sonda formada por dos electrodos anulares concéntricos y un círculo metálico central de referencia montados en una brida metálica que sirve como tapa de los registros de medición, y el sistema de cuatro electrodos circulares tiene una sonda de medición compuesta por los cuatro electrodos montados en una base acrílica pequeña; el capítulo de electrodos explica más sobre el tema.

Los circuitos electrónicos de ambos sistemas también se diferencian entre sí debido a que la etapa de amplificación de voltaje del sistema anular se realizó mediante un amplificador operacional configurado como seguidor y el sistema de cuatro electrodos tiene un amplificador operacional configurado como diferencial.

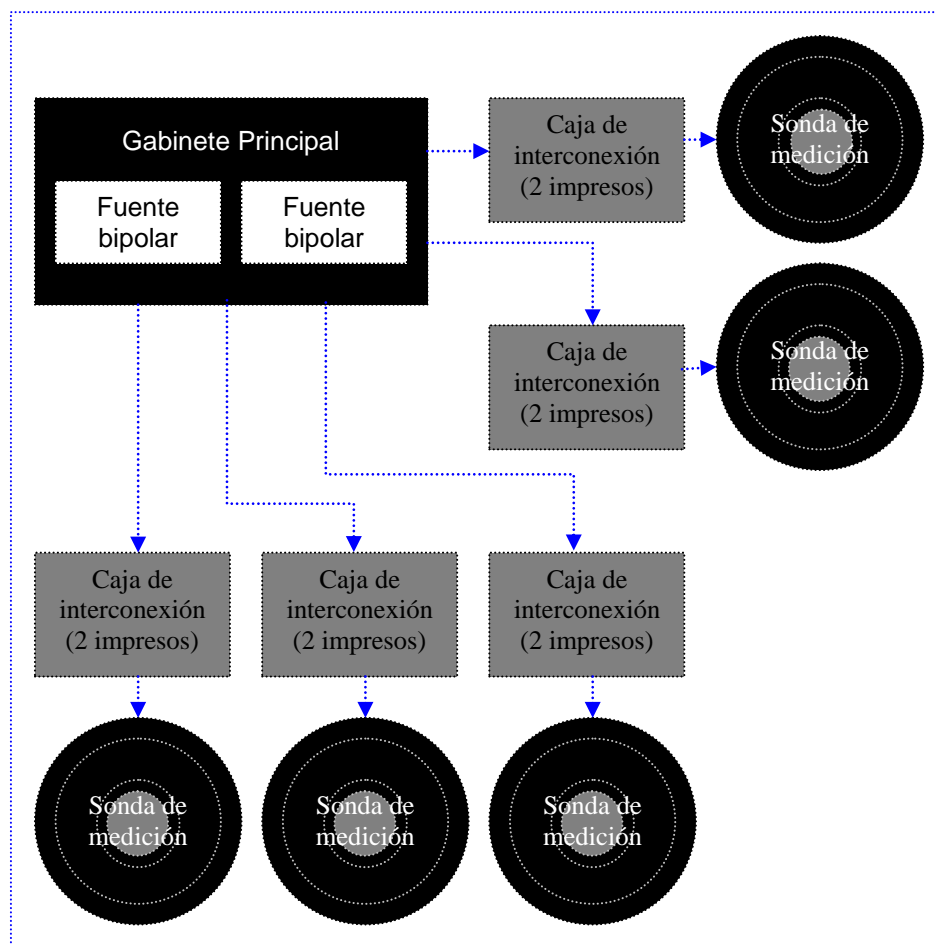


Figura 7. Partes que forman al sistema de dos anillos concéntricos

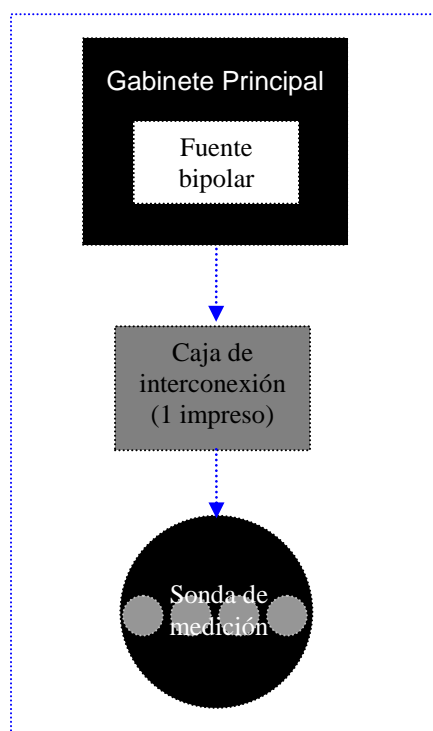


Figura 8. Partes que forman al sistema de 4 electrodos circulares

#### **4.2. Oscilador senoidal.**

Para justificar el uso de una señal senoidal en lugar de cualquier otro tipo de señal es necesario explicar la forma en que se genera la electrólisis del agua. Este fenómeno se presenta si se hace pasar una corriente directa por el agua, la molécula básica que la conforma ( $H_2O$ ) se va a disociar en iones con carga positiva y negativa. Esta separación provoca que los electrodos por los cuales se está inyectando la señal de directa se oxiden rápidamente, y que se generen burbujas que alterarán la medición obtenida.

La electrólisis puede ser evitada utilizando una señal de corriente alterna en lugar de directa para realizar la medición, ya que al estar cambiando el sentido de la corriente varias veces por segundo, no se alcanza a establecer una diferencia de potencial lo suficientemente grande como para romper la molécula del agua.

Por todo lo anterior, el primer bloque del circuito electrónico que conforma a nuestro medidor es un oscilador. Este bloque se encarga de generar una señal de corriente alterna que viajará a través de la mezcla aire-agua de un electrodo de medición a otro, sufriendo una atenuación proporcional a la cantidad de aire contenido en el agua que se encuentra circulando entre ambos electrodos.

Sin embargo era necesario determinar el tipo de forma de onda de la señal de corriente alterna, así como su amplitud y frecuencia. Para ello se analizaron varios medidores de conductividad que existen en el mercado y la mayoría utilizaba señales senoidales o cuadradas de más de 1 kilo Hert de frecuencia. Al analizar las ventajas y desventajas de una señal senoidal contra una cuadrada, se decidió utilizar una señal senoidal para tener menos ruido causado por las armónicas y con ello generar un menor desgaste y calentamiento de los elementos del circuito.

Hay varios tipos de osciladores senoidales que servían para nuestros fines, pero optamos por utilizar un “Puente de Wien”, Figura 9, debido a su fácil implementación al sólo necesitar de un amplificador operacional, resistencias y capacitores; además es un oscilador que puede ser ajustado en amplitud y frecuencia muy fácilmente. Por otro lado, el “Puente de Wien” es considerado como un auto-oscilador, esto significa que produce una señal senoidal sin necesidad de entrada alguna (Ruiz Robredo, 2001).

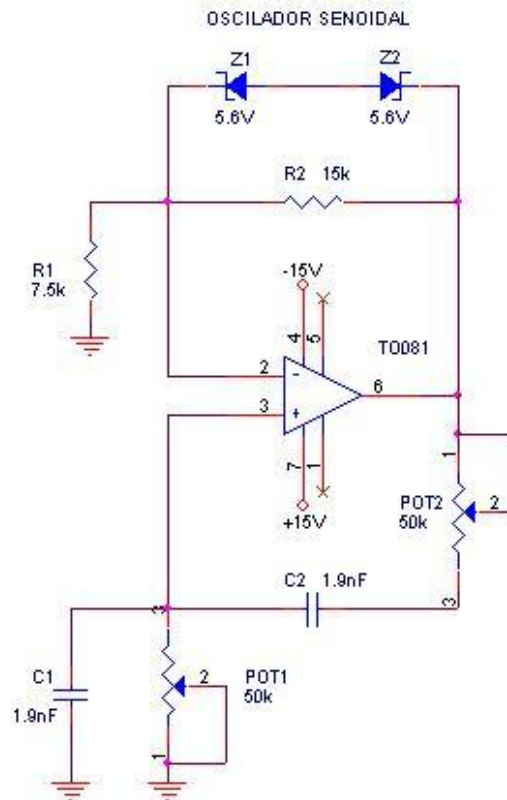


Figura 9. Oscilador Senoidal

Para el diseño del oscilador, cumplimos con el criterio de Barkhausen logrando así que el Amplificador Operacional oscilara. Dicho criterio se compone por dos enunciados. El primero dice que para lograr que el amplificador operacional oscile es necesario que la resistencia llamada  $R_2$  sea por lo menos del doble del valor de la resistencia  $R_1$ , con ello, se logra generar una ganancia por lo menos de 2 en la rama de realimentación negativa del operacional; el segundo enunciado establece que la frecuencia de oscilación del amplificador operacional será igual al inverso del producto de dos veces la constante “pi” por la resistencia ( $Pot_1$  y  $Pot_2$ ) y por la capacitancia ( $C_1$  y  $C_2$ ) de la rama de retroalimentación positiva, ver ecuaciones 1 y 2.

$$\text{Ganancia: } A = \frac{R_2}{R_1} \geq 2 \dots \text{ecuación 1}$$

$$\text{Frecuencia de oscilación: } f_o = \frac{1}{2 \pi Pot_x C_y} \dots \text{ecuación 2}$$

Donde:  $Pot_x = Pot_1 = Pot_2$  ;  $C_y = C_1 = C_2$ .

Se planteó tener una frecuencia de oscilación de 5 kHz para asegurarnos de no generar electrólisis del agua y para tener una frecuencia media, fácil de alcanzar con un Puente de Wien y que no interfiriera con algún otro dispositivo o la línea de alimentación.

Fijando el valor de la frecuencia, se tienen 2 incógnitas en la ecuación 2, resistencia por un lado y capacitancia por el otro, por esta razón, se decidió fijar la capacitancia con base en los elementos considerados como adecuados y elegidos entre los que se encontraban en el laboratorio, y posteriormente se ajustó la resistencia para obtener el valor de frecuencia de oscilación deseado. El procedimiento descrito es el siguiente:

Frecuencia de oscilación: 5 [kHz]

Capacitancia elegida: 1.9 [nF]

Al despejar la resistencia de la ecuación 2 y sustituir valores, obtenemos un valor de resistencia igual a 16.753 [k $\Omega$ ]

Como no se contaba con un valor comercial cercano a la resistencia necesaria, se decidió colocar potenciómetros de 50 [k $\Omega$ ] para ajustarlos al valor deseado.

Para cumplir con la ecuación 1, decidimos fijar las resistencias con los valores siguientes:

$R_1 = 7.5$  [k $\Omega$ ]

$R_2 = 15$  [k $\Omega$ ]

Sin embargo, a pesar de calcular con precisión los valores del oscilador, notamos que al conectar las siguientes etapas la amplitud de la señal variaba debido a que los amplificadores operacionales tienen una saturación muy brusca; para evitar ese problema, agregamos un par de diodos zener de 5.6 [V] en la realimentación para generar un control automático de ganancia. El comportamiento de dichos diodos cambia con respecto a la polarización que sufren; durante el semiciclo positivo de la onda senoidal, uno de los diodos se polariza en directa y el otro en inversa, el que está polarizado en directa trabajará como un diodo normal, mientras que el diodo contrapuesto lo haré como un diodo zener normal, variando su corriente de salida de acuerdo con la demandada por las etapas posteriores. Durante el semiciclo negativo, el comportamiento de los diodos se invertirá, Figura 10.

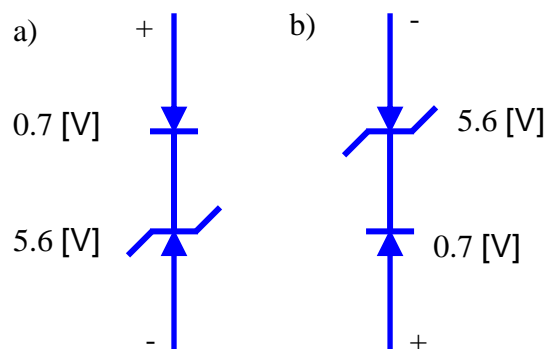
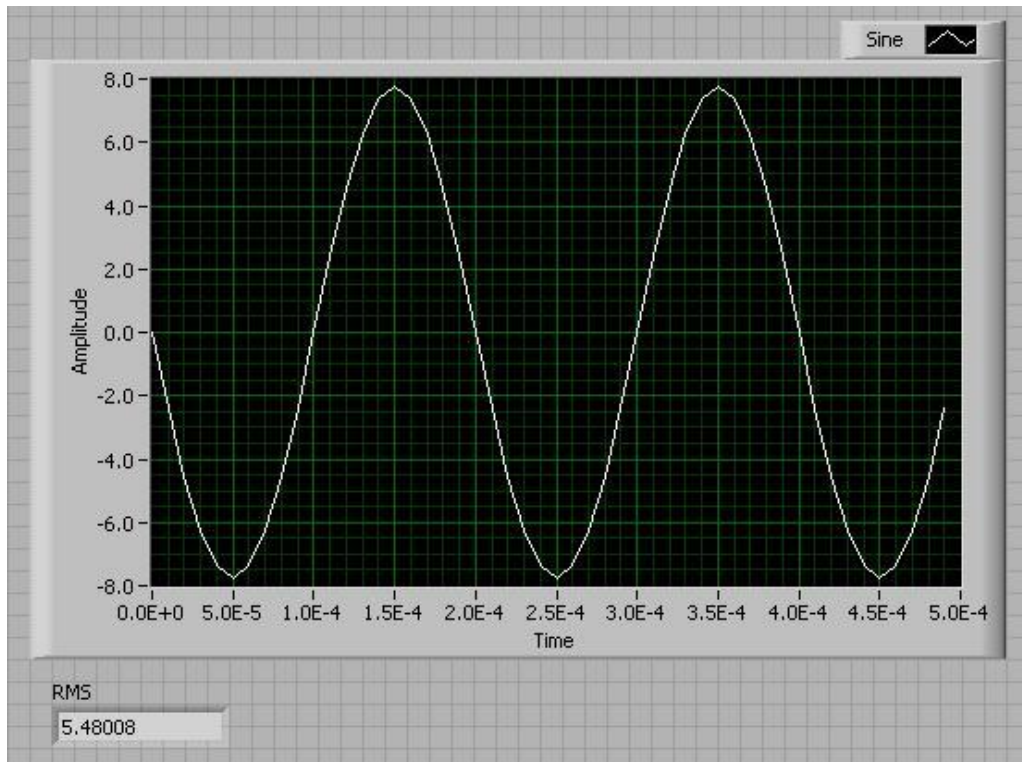


Figura 10. Comportamiento de la rama de control automático de ganancia:  
 a) Durante el semiciclo positivo de la onda senoidal generada.  
 b) Durante el semiciclo negativo de la onda senoidal generada.

Se hizo lo anterior para aprovechar la no linealidad de los diodos, los cuales suavizan el comportamiento del circuito al tener un encendido progresivo manteniendo la ganancia del circuito constante sin importar las etapas posteriores (Miyara F., 2004).

La señal obtenida, Figura 11, ya no variaba en amplitud sin importar la carga que se conectara a la salida del oscilador, después de realizar la cantidad necesaria de pruebas, se fijó la amplitud de la señal en 14.5 [V] pico a pico por ser el valor que garantizaba la escala que se necesitaba a la salida del medidor.



*Figura 11. Señal senoidal generada. 14.5 Vpp 5kHz de frecuencia.*

### **4.3. Etapa de amplificación de corriente “Push-Pull”.**

Una vez construido y ajustado el oscilador para tener la señal senoidal deseada, fue necesario agregar una etapa de amplificación de corriente para asegurar que al inyectar la señal en uno de los electrodos, se consiguiera hacerla llegar al otro electrodo sin sufrir una atenuación demasiado grande en cuanto a su amplitud, causada por el viaje de la onda a través de la mezcla agua-aire.

Se deseaba agregar una etapa que no amplificara en voltaje pero sí lo hiciera en corriente, para ello se pensó utilizar transistores configurados como emisor común, los cuales se caracterizan por tener ganancia en corriente y una ganancia muy cercana a uno en voltaje, además de invertir la fase a la señal de salida con respecto a la señal de entrada, factor que no influye en cuanto a obtener la señal de salida deseada.



Existen cuatro tipos de etapas de salida formadas por transistores configurados como emisor común, se les denomina A, B, AB y C. La etapa tipo A se caracteriza por utilizar un solo transistor; esta etapa conduce durante los 360°, esto implica un consumo de energía estático altísimo ya que aunque no se tenga señal de entrada, se tiene al transistor polarizado entregando salida. Para no tener este problema, se decidió implementar una etapa conocida como “Push-Pull”, la cual entra en la clase B.

Se tomó esta determinación ya que la etapa “Push-Pull” presenta varias ventajas sobre las etapas de amplificación de corriente constituidas por un solo transistor (tipo A), como son un consumo estático de potencia prácticamente cero y una mejor eficiencia que puede alcanzar un valor máximo próximo al 78%, muy superior al 25% de la etapa de salida clase A (Ruiz Robledo, 2001).

Al implementar la etapa de amplificación en corriente, Figura 12, se utilizaron dos transistores complementarios, un BC548B (NPN), y un BC558B (PNP). Se eligieron estos transistores porque manejan voltajes de acuerdo con la fuente empleada y porque se contaba de antemano con ellos.

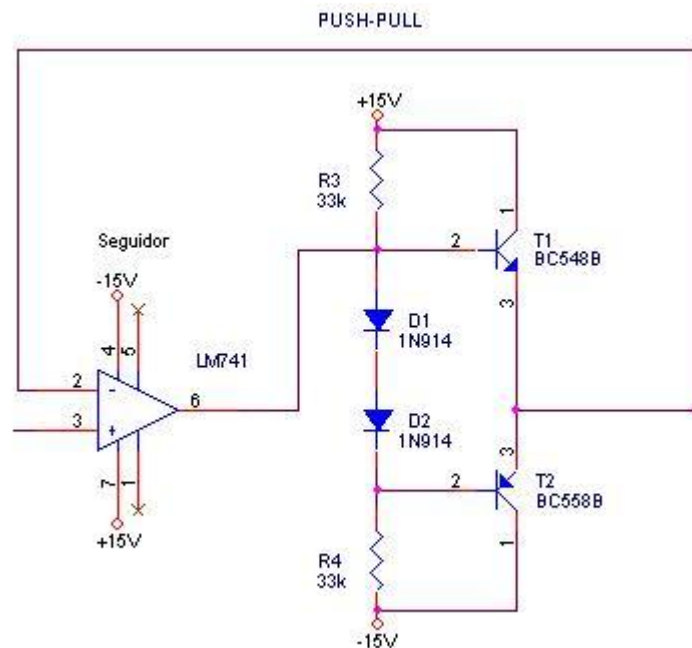
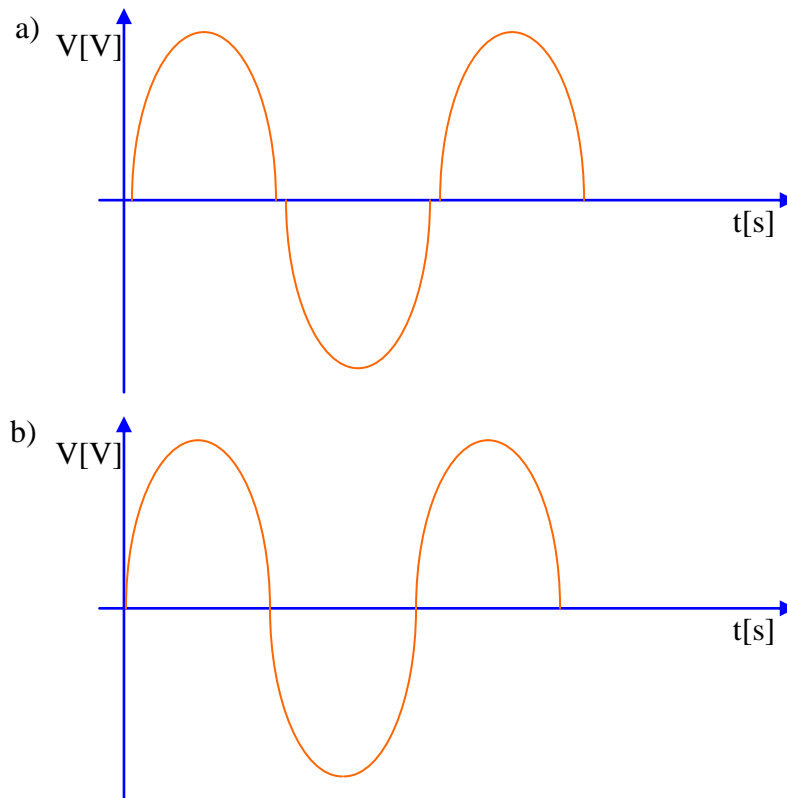


Figura 12. Etapa de Amplificación de Corriente

Se agregaron las resistencias R3 y R4 de 33 [kΩ] como protección para mantener baja la corriente de base y evitar que los transistores se calienten demasiado o se dañen.

Sin embargo, al probar el sistema notamos que se generaba distorsión de cruce por cero debido a los 0.7 [V] de encendido de los transistores, Figura 13 inciso a.



*Figura 13. a) Señal con distorsión de cruce por cero. b) Señal senoidal sin distorsión de cruce por cero.*

Para minimizar la distorsión, agregamos los diodos 1N914 entre las bases de los transistores para con ellos suministrar los 0.7 [V] que necesitan los transistores recorriendo su voltaje de encendido a cero, Figura 13 inciso b. Se eligió ese tipo de diodo por su rápida velocidad de conmutación y porque se tenían varios en el laboratorio, a demás de que tienen el mismo voltaje de encendido que los transistores empleados.

Al agregar los diodos, automáticamente se genera una etapa de salida tipo AB, la cual se caracteriza por hacer que los transistores conduzcan a un ángulo poco mayor a  $180^\circ$  pero mucho menor de  $360^\circ$ , eliminando con ello la distorsión del cruce por cero que presenta la etapa clase B.

“La polarización con diodos presenta una importante ventaja al proporcionar estabilización de la polarización con la temperatura. Al aumentar la temperatura, el voltaje base emisor de los transistores disminuye pero a su vez la caída de tensión de los diodos también, lo que permite mantener constante la corriente de polarización de los transistores de salida”, (Ruiz Robledo, 2001).

Se realizaron pruebas posteriores para comprobar que se tenía la suficiente amplificación de corriente como para lograr que la señal senoidal viajara entre electrodos a través de la mezcla agua-aire y se comprobó que el circuito empleado, funcionaba correctamente y sin generar distorsión en la señal de salida.

#### **4.4. Etapa de amplificación de tensión para ambos prototipos.**

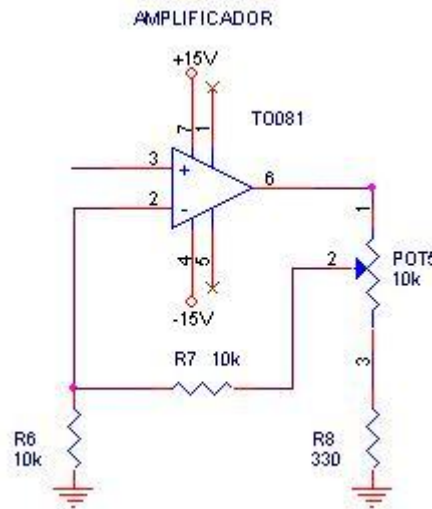
En ambos sistemas, a la salida de la etapa de amplificación de corriente se tiene una señal senoidal de 13.5 Volts pico a pico y con una corriente lo suficientemente grande como para poder mandar ésta señal, a través del agua, de un electrodo al otro.

Sin embargo, como la señal de corriente alterna se atenúa por la resistencia de la mezcla aire-agua entre los electrodos, es necesario agregar una etapa de amplificación de tensión.

Se va a comenzar describiendo la etapa de amplificación para el sistema anular.

Como se explicará en el capítulo de electrodos dentro de la parte referente al sistema anular, la señal senoidal entra en el círculo central, pasa a través del agua atenuándose y se cierra el circuito conectando a tierra cada uno de los anillos.

Posteriormente se forma un divisor de tensión entre la resistencia del agua y una resistencia de 10 [kΩ] que se conecta a la entrada no inversora de un amplificador operacional configurado como amplificador no inversor, Figura 14, que tiene una ganancia determinada por la división de R<sub>7</sub> más el valor del potenciómetro POT<sub>5</sub>, entre R<sub>6</sub>, de entre 1 y 2.



*Figura 14. Etapa de amplificación del circuito de sondas anulares.*

Mediante esta etapa se consigue tener una señal de alterna que depende en amplitud de la cantidad de aire que se tenga entre los electrodos, dentro del área sensible por el medidor y además, logramos amplificarla hasta dos veces para conseguir variaciones significativas en cuanto a la amplitud de la señal.

Cabe mencionar que la etapa de amplificación es exactamente igual para cada uno de los anillos; es decir, se repitió el mismo amplificador no inversor con igual ganancia para ambos.

En lo que respecta a la etapa de amplificación del sistema de cuatro electrodos circulares, es necesario realizar algunos cambios en la misma, debido a que se cuenta con un tipo diferente de sonda de medición.

Como se comentará en el capítulo de electrodos, dentro de la parte referente a los electrodos lineales, en el primer electrodo entra la señal de alterna, en los siguientes dos se realizan mediciones y en el último se realiza la conexión a tierra como referencia, Figura 29.

Las señales que se reciben en los electrodos  $E_2$  y  $E_3$  son señales de alterna atenuadas en cuanto a su amplitud en diferente medida.

La señal del electrodo  $E_2$ , sufrirá una atenuación proporcional al aire contenido en el agua entre el electrodo  $E_1$  y  $E_2$ , mientras que la señal recibida en el electrodo  $E_3$ , sufrirá una atenuación proporcional al aire contenido entre los electrodos  $E_1$  y  $E_3$ ; debido a esto, la señal en el electrodo  $E_3$  será menor en amplitud a la señal en el electrodo  $E_2$  puesto que la señal de alterna tuvo que viajar el doble de la distancia para alcanzar al tercer electrodo que al segundo.

En cuanto a la zona comprendida entre los electrodos  $E_3$  y  $E_4$ , si se tiene presencia de aire dentro de esta región, las mediciones en los electrodos  $E_2$  y  $E_3$  variará, esto se debe a que la referencia a tierra se está modificando. Gracias a esto, se logró obtener mediciones proporcionales a la cantidad de aire, comprendido dentro de toda la zona entre los cuatro electrodos, teniendo una atenuación un poco mayor en el electrodo  $E_3$ .

Posteriormente se introdujo la señal del electrodo  $E_2$  en la entrada no inversora de un amplificador operacional configurado como restador, y la señal del electrodo  $E_3$  en la entrada inversora del mismo amplificador.

Dicha configuración se muestra en la Figura 15, y la ganancia del circuito está definida por la división de la resistencia de realimentación entre las resistencias de las entradas del operacional.

Como se puede observar, se colocaron resistencias de 10 [kΩ] fijas y potenciómetros de 50 [kΩ]; mediante estos últimos, se pudo variar la ganancia en valores de 1 a 6.

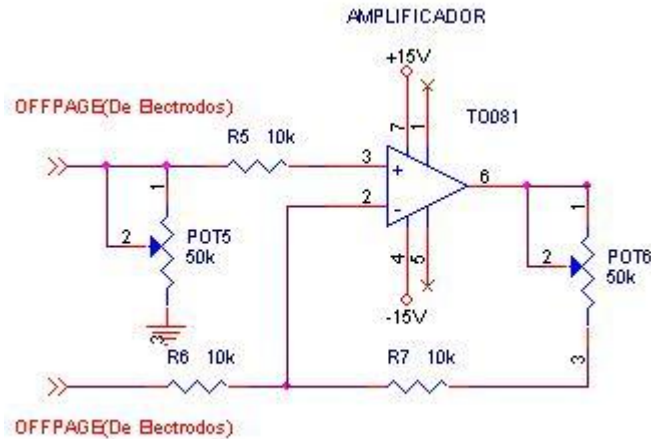


Figura 15. Etapa de amplificación para el sistema de electrodos circulares lineales.

Gracias a esta etapa se consigue generar una señal de alterna que es proporcional a la diferencia entre las señales que se tienen en los electrodos  $E_2$  y  $E_3$ , quienes a su vez dependen directamente de la cantidad de aire que se contenga en el agua entre los electrodos  $E_1$  y  $E_4$ .

Al tener estas dos señales de alterna, se logran atenuar las variaciones en la salida del operacional causadas por cambios en las características fisicoquímicas del agua, ya que al modificarse alguna de las entradas del restador debidas al aumento o disminución en la salinidad del agua o de la materia orgánica en suspensión, por dar un ejemplo, la otra entrada también variará en la misma proporción, y al realizar la medición diferencial dichas variaciones serán compensadas entre sí y la salida no cambiará.

#### 4.5. Etapa de rectificación y generación del nivel de corriente directa.

Ya se cuenta con una señal de corriente alterna que varía en amplitud con respecto a la cantidad de aire contenido en el agua. Sin embargo, lo que se necesita es tener un voltaje directamente proporcional a la cantidad de aire contenido en el agua; para ello es necesario rectificar la señal de alterna y generar un nivel de corriente directa.

La manera más común y sencilla de conseguir un nivel de directa a partir de una señal de corriente alterna es empleando diodos.

Se utilizó un puente rectificador de onda completa compuesto por 4 diodos 1N914 porque se consideraron adecuados para el diseño por su rápida velocidad de conmutación, su voltaje de encendido y porque además, se contaba con varios en el laboratorio.

Después de realizar varias pruebas con dicho circuito, notamos que la señal generada a la salida estaba sumamente distorsionada debido a que los diodos encienden cuando se tiene una diferencia de potencial superior a 0.7 [V] entre sus terminales, además la señal sufría de una notable atenuación en su amplitud; el Ing. Rodolfo Peters sugirió que se modificara la etapa de rectificación agregando un amplificador operacional, para aprovechar las bondades del mismo como acoplador de etapas al contar con una baja impedancia de entrada y una muy alta impedancia de salida; también gracias a la adición del amplificador operacional fue posible polarizar con los 0.7 [V] a todos los diodos permitiéndoles con esto conducir o dejar de hacerlo desde los cero volts y no desde 0.7 [V], eliminando la distorsión que se tenía. Otra ventaja adicional fue que le dimos una ganancia de 2.4 al amplificador operacional para amplificar con ello la señal y compensar la atenuación sufrida. El circuito empleado se muestra en la Figura 16.

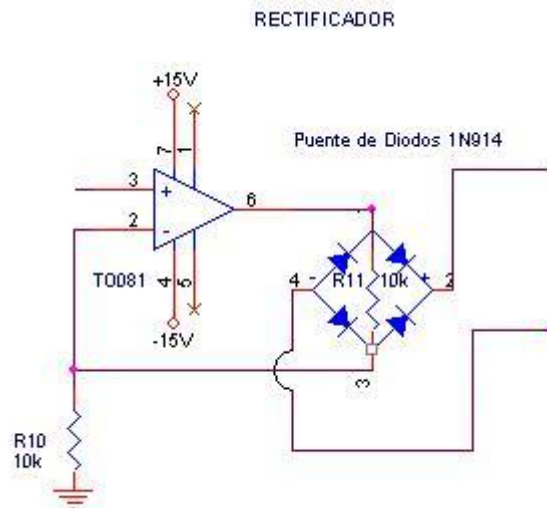


Figura 16. Etapa de rectificación.

Sin embargo, la señal obtenida distaba mucho de un nivel de corriente directa, Figura 17.

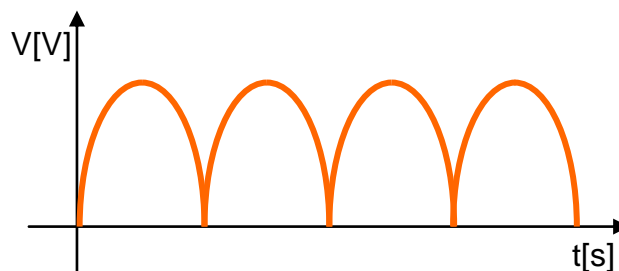


Figura 17. Señal a la salida del puente rectificador de onda completa.

Para conseguir acercarnos a dicho nivel de corriente directa, fue necesario agregar una etapa de filtrado capaz de disminuir las variaciones entre el valor máximo y mínimo de la señal a la salida del operacional rectificador. Se empleó un capacitor para corregir este problema. Se realizaron varias pruebas con diversos capacitores hasta

encontrar el que nos acercara en mayor medida al nivel de corriente directa proporcional a la cantidad de aire contenido en el agua que se deseaba. El capacitor elegido fue un electrolítico de  $0.1 \mu\text{F}$  ya que su frecuencia de carga y descarga es mucho menor a la frecuencia de la señal a la salida del rectificador, con ello se consiguió que el capacitor (previamente cargado en su valor máximo) no se descargara por completo sino que comenzara nuevamente a cargarse manteniendo un nivel de voltaje más o menos constante, Figura 18 inciso a.

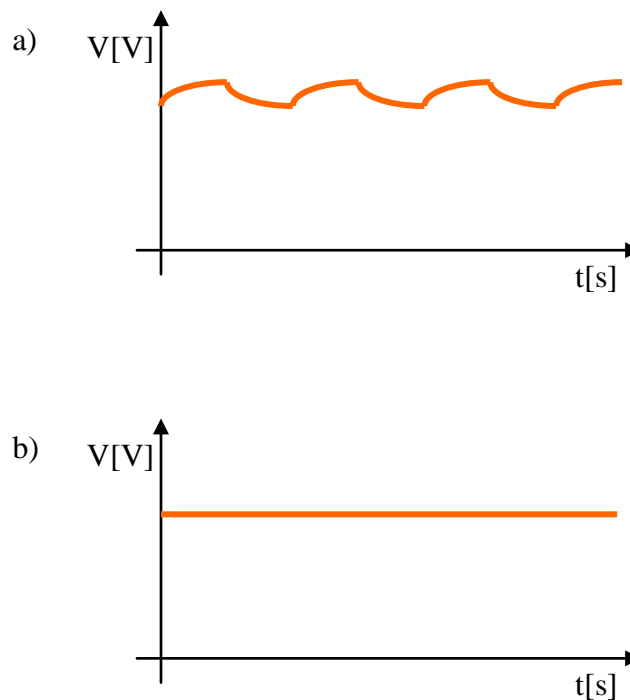


Figura 18. a) Señal con rizo a la salida de la etapa de filtrado, b) Nivel de corriente directa obtenido a la salida del restador.

Como puede observarse en la Figura 18, inciso a, la señal obtenida presenta pequeñas variaciones periódicas conocidas como rizo. Para eliminarlas es necesario añadir un circuito que atenúe los picos de la señal. Se eligió un amplificador operacional configurado como restador para este fin, Figura 19. Analizando el circuito podemos observar que no se tiene una ganancia unitaria, fue necesario cambiar la resistencia  $R_{13}$  de  $100 \text{ k}\Omega$  por una de  $33 \text{ k}\Omega$  para evitar el calentamiento excesivo del amplificador. A la salida del amplificador operacional denominado como “Nivel de DC” al fin se obtiene la señal con las características deseadas, Figura 18 inciso b, un nivel de corriente directa proporcional a la cantidad de aire contenido en el agua censada por los electrodos de medición. En la sección correspondiente a las pruebas y mediciones realizadas se describirán los valores máximos y mínimos obtenidos para las respectivas concentraciones de aire en agua.

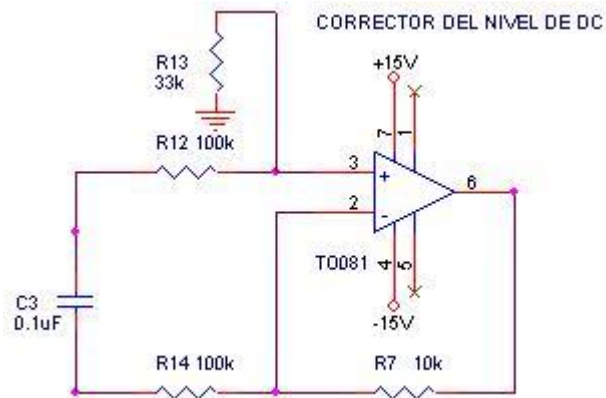


Figura 19. Corrector de nivel de DC para eliminar el rizo de la señal.

#### 4.6. Etapa de filtrado y corrección del nivel de “offset”.

Ya se cuenta con el tipo de señal deseado a la salida del medidor, por ello es importante agregar una etapa de filtrado que evite la adición de ruido a nuestro sistema.

Se realizó un filtro activo paso bajas de primer orden y ganancia unitaria, Figura 20.

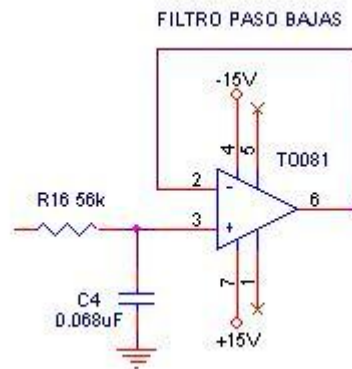


Figura 20. Filtro Paso Bajas.

La elección de este tipo de filtro se debió al deseo de aprovechar las bondades proporcionadas por el amplificador operacional como un excelente acoplador de etapas y por su sencillo diseño; sin embargo, se decidió darle una ganancia unitaria al filtro pues posteriormente se colocó otro operacional para eliminar el offset, y mediante el cual, se amplificó la señal.

No se utilizó un filtro de mayor orden pues no era necesario conseguir una pendiente muy elevada en la frecuencia de corte debido a que se está trabajando con una señal de corriente directa, con ello, al tener una frecuencia de corte de unos 40 [Hz], permitimos perfectamente el paso de la señal de interés y evitamos la presencia de ruido causado por la línea de alimentación de 60 [Hz] o cualquier otra señal de frecuencia superior.



Se utilizó la ecuación 3 para el cálculo de los elementos constitutivos del filtro.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad \dots \text{Ecuación 3}$$

Para emplear dicha ecuación es necesario fijar ya sea el valor de la capacitancia o de la resistencia y el valor deseado de frecuencia; decidimos fijar la frecuencia en 40 [Hz] y por facilidad para conseguir los elementos, fijamos la capacitancia en un valor de 68 [nF], adecuada para el diseño.

Después de sustituir valores y de despejar el valor de la resistencia, se obtuvieron 58.512 [ $\Omega$ ] como resultado. Sin embargo el valor comercial mas próximo fue de 56 [k $\Omega$ ] y al calcular nuevamente la frecuencia con este valor, se obtiene una frecuencia de corte real de 41.79 [Hz], lo cual es adecuado para nuestro diseño pues se encuentra por debajo de los 60 [Hz] de la línea.

Una vez filtrada la señal de corriente directa generada, que es proporcional a la cantidad de aire contenido en el agua, se necesita escalar dicha señal para ajustarla a un rango de valores útil; es decir, que el valor mínimo y el máximo sean lo suficientemente diferentes entre sí como para lograr una diferencia sustancial en el valor de la condición mínima de presencia de aire y la máxima, pero que no sean tan diferentes entre sí como para tener por ello problemas de gran significado debidos a la escala del sistema empleado para adquirir los datos de salida entregados por el medidor.

Para este fin se agregó un eliminador de offset con ganancia, en otras palabras, un amplificador operacional configurado como diferencial, al cual se le introdujo la señal de corriente directa proporcional a la cantidad de aire contenido en el agua, en su entrada no inversora, y un nivel de voltaje ajustable en la entrada inversora, Figura 21.

Con esto se consigue mandar a cero el nivel mínimo de la señal de salida y amplificar la señal para tener un rango de datos útil.

Como se puede ver en la Figura 21, se diseñó un divisor de tensión en la entrada no inversora capaz de entregar un voltaje de salida entre 2.27 y cero Volts. Se eligió este valor debido a que la salida de la etapa anterior (rectificación y generación del nivel de DC) proporciona una señal con un nivel de directa de 2 [V] en su nivel mínimo.

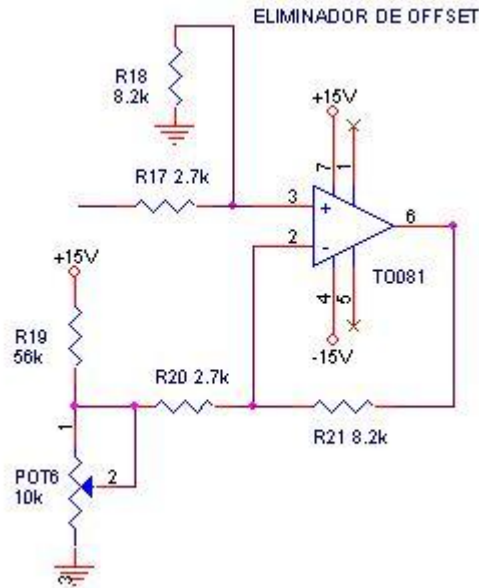


Figura 21. Circuito Eliminator del Offset.

En la Figura 22 se muestra el funcionamiento del eliminador de offset al referenciar a cero el valor de voltaje mínimo de la señal y a un valor máximo de 6 [V] para la medición mayor de tensión, correspondiente al mayor contenido de aire en agua.

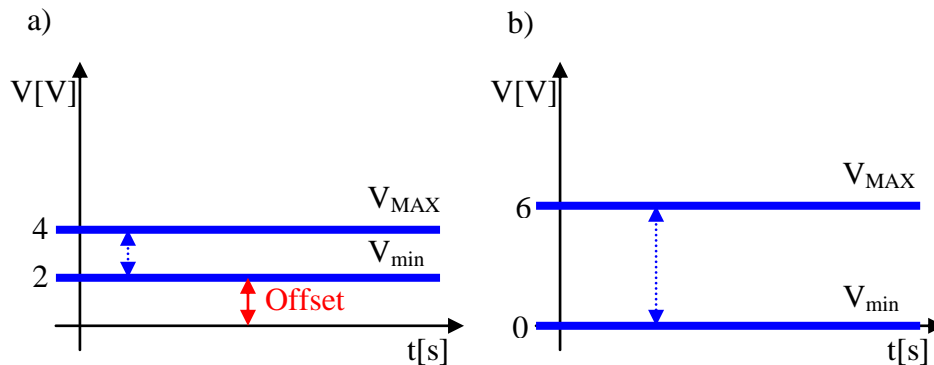


Figura 22: a) Señal antes del eliminador de offset. b) Señal después del eliminador del offset.

Se ajustó el potenciómetro de 10 [kΩ] para lograr lo anterior y se le dio una ganancia de tres a esta etapa para tener la escala final de cero a 6 volts que permite la utilización de un sistema de adquisición diseñado para voltajes positivos y menores a 10 [V].

La ganancia se obtuvo de la misma manera que en la etapa de amplificación del circuito para los electrodos lineales, entregando un valor de 3.03.

#### 4.7. Fuente de corriente.

La última etapa del circuito eléctrico diseñado fue una fuente de corriente.

Se agregó esta etapa pensando en ubicar las sondas del medidor de contenido de aire en agua a cientos de metros del lugar en donde se encontraría el circuito del medidor como tal. Por esta dificultad, era necesario “inyectar” una gran cantidad de corriente a la señal para lograr que viajara todos estos metros necesarios, sin sufrir una atenuación sustantiva en su amplitud.

La solución que se encontró fue realizar una conversión de voltaje a corriente, en la cual la corriente que se entregara a la salida fuera proporcional al voltaje de la medición, para posteriormente reconvertir nuestra señal en voltaje en el lugar mismo de medición.

El circuito implementado se muestra en la Figura 23, y se diseñó pensando en tener a la salida un voltaje entre uno y 5 volts con una corriente de entre 4 [mA] y 20 [mA].

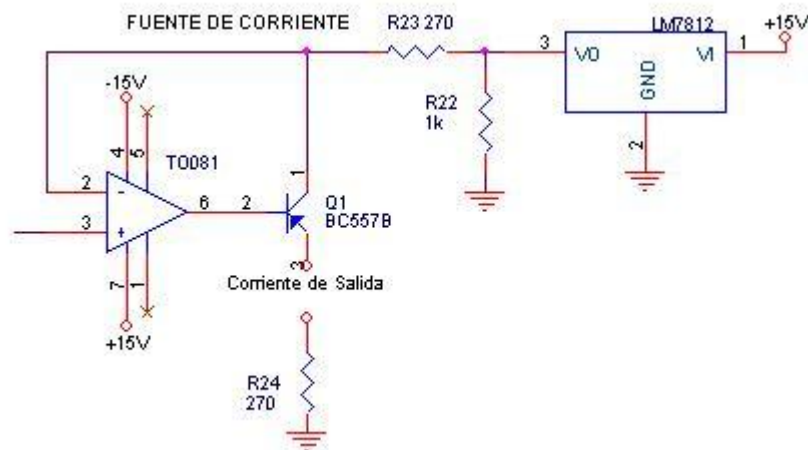


Figura 23. Fuente de Corriente.

El amplificador operacional suministra la corriente necesaria para polarizar el transistor y dicho transistor en conjunto con el regulador de tensión, generan la corriente necesaria para evitar que la señal sea atenuada en los metros que tiene que viajar.

# 5. Electrodo

---

---

Los electrodos de medición son una parte fundamental de los equipos desarrollados, gracias a ellos se logra introducir la señal de corriente alterna al agua y posteriormente tomarla nuevamente para realizar las mediciones deseadas.

A lo largo de este capítulo se explicará de forma detallada el por qué de la elección de los electrodos empleados, así como su funcionamiento y conexión.

## **5.1. Sistema anular (dos electrodos anulares concéntricos).**

Como su nombre lo indica, el sistema anular tiene como electrodos un par de anillos concéntricos de 3 [mm] de grosor, uno más pequeño con 5.2 [cm] de diámetro mientras que el más grande tiene 7.1 [cm] de diámetro, y un círculo central de 4.7 [cm] de diámetro, Figura 24 y Figura 25. Todas las piezas están hechas de acero inoxidable al igual que la brida sobre la que se encuentran montados.

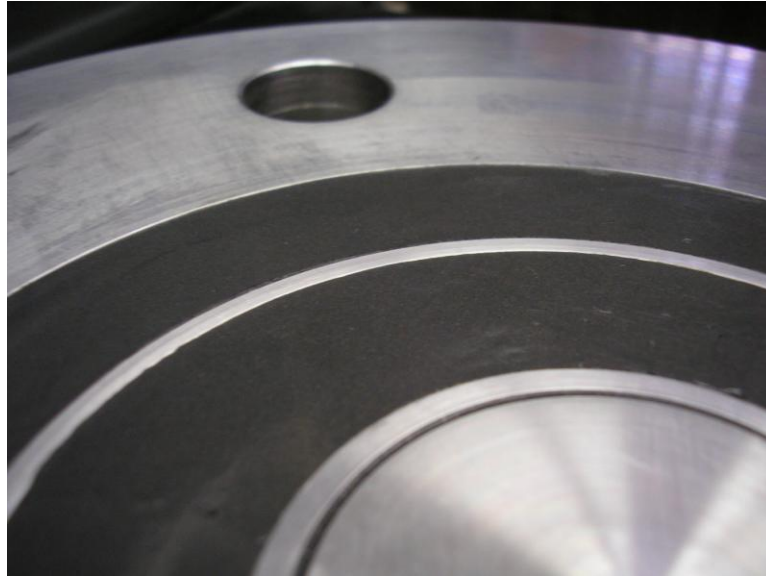
La brida, los anillos y el círculo central se unieron por medio de una resina epóxica conocida como plastiacer, debido a las características líquidas del material antes de ser puesto en contacto con el catalizador, así como su rápido secado al mezclarse con éste fijando herméticamente todas las piezas que se encuentren inmersas en la resina; otra cualidad de este material es su gran resistencia contra golpes así como a las condiciones de inmersión en agua y presión bajo las que va a trabajar la sonda.

Explicando con detalle el ensamblado de la sonda, lo que se hizo fue colocar los elementos perfectamente centrados sobre hojas de papel, posteriormente se utilizaron sujetadores de plástico para mantener a los anillos, el círculo central y la brida unidos entre sí y centrados; luego, utilizando una jeringa comercial de plastiacer con su catalizador, se fueron rellenando poco a poco los espacios entre los elementos cuidando de no dejar burbujas de aire atrapadas entre ellos.

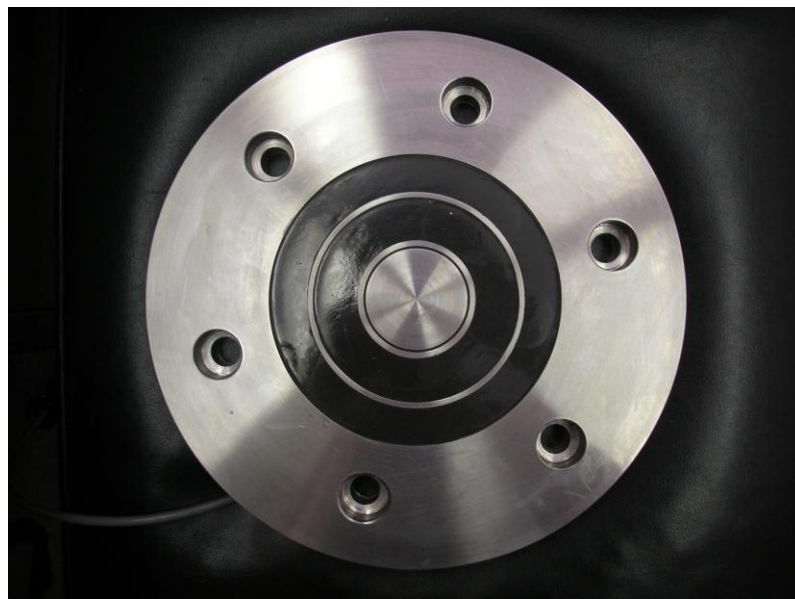
Luego lo que se hizo fue soldar pernos metálicos de 2 centímetros de largo a cada uno de los anillos y el círculo central (se les había dejado una perforación un poco mayor al diámetro de los pernos a cada una de estas piezas en su parte posterior para este fin). La finalidad de estos pernos era servir como una base rígida sobre la cual se pudieran soldar posteriormente los cables de conexión de la sonda.

A continuación se despegaron los sujetadores plásticos y se terminó el rellenado de la brida con plastiaceró pero ahora empleando botes de 1 kilogramo y un abatelenguas como herramienta para distribuirlo y aplanarlo lo más posible en la cara posterior.

Por último se realizó el soldado de los cables de conexión a los pernos metálicos y se fijó el respectivo conector a su otro extremo.



*Figura 24. Acercamiento de los dos anillos, el círculo central y la brida de sujeción de la sonda de medición.*



*Figura 25. Vista frontal de la sonda de medición anular.*

### **5.1.1. Justificación del empleo del sistema anular.**

Como se mencionó en la introducción de este trabajo, la Comisión Federal de Electricidad le había pedido previamente al Instituto de Ingeniería de la UNAM un medidor de concentración de aire en agua.

Para ese medidor se desarrolló un tipo de sonda no invasiva con dos anillos concéntricos y un círculo central. Dichas sondas se emplearon en la presa de Aguamilpa cumpliendo con sus expectativas.

Por esta razón se nos pidió que utilizáramos el mismo tipo de sonda para este nuevo medidor, ya que los registros de medición del Cajón tienen exactamente las mismas dimensiones que los de Aguamilpa.

### **5.1.2. Principio de funcionamiento y conexión.**

El principio de funcionamiento de la sonda es muy simple, se tienen dos anillos de diferente diámetro montados concéntricamente a un círculo central.

Este último funciona como uno de los electrodos inmersos en el fluido, el otro electrodo viene siendo cada uno de los anillos, los cuales son independientes entre sí; es decir, se forma un par de electrodos entre el círculo central y el anillo interior y otro par de electrodos con el círculo central nuevamente pero ahora con el anillo exterior.

Ahora bien, entre cada par de electrodos se tiene una resistencia generada por la mezcla agua-aire contenida entre ellos, por consiguiente, el divisor de tensión formado por la resistencia del agua entre los electrodos y la resistencia que se tiene en medio de la etapa de amplificación en corriente y la de amplificación de voltaje, se va a ver modificado dependiendo de la cantidad de aire contenido en el agua.

Esta variación en los valores resistivos del divisor de voltaje va a generar una atenuación en la señal de alterna que pasa a través del mismo; con ello se consigue lo que tanto se deseaba, una señal proporcional a la cantidad de aire contenida en el agua, Figura 26.

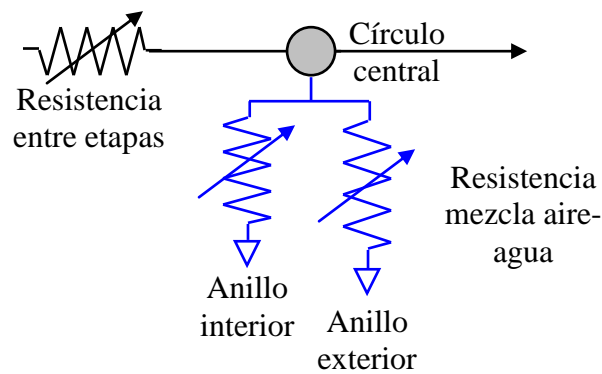


Figura 26. Esquematización del funcionamiento de la sonda anular. Divisor de tensión.

En cuanto a la conexión de la sonda, a cada anillo se conecta la tierra o referencia del sistema, que proviene de la fuente de alimentación que le corresponde (hay una fuente bipolar independiente para alimentar los circuitos electrónicos correspondientes a cada anillo como se explicará en el capítulo de pruebas y mediciones realizadas) al círculo central se conecta la salida de la etapa de amplificación en corriente en donde se tiene la señal de alterna generada por el oscilador, de este modo, la señal de alterna sale del círculo central y viaja a través de la mezcla aire-agua hasta cerrar el circuito en cada uno de los anillos, Figura 27.

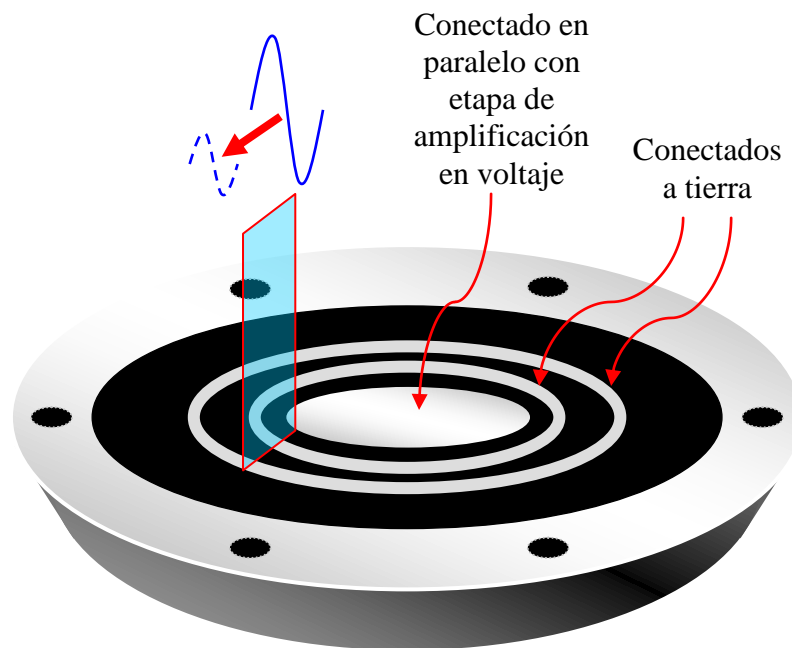


Figura 27. Conexión de la sonda anular.

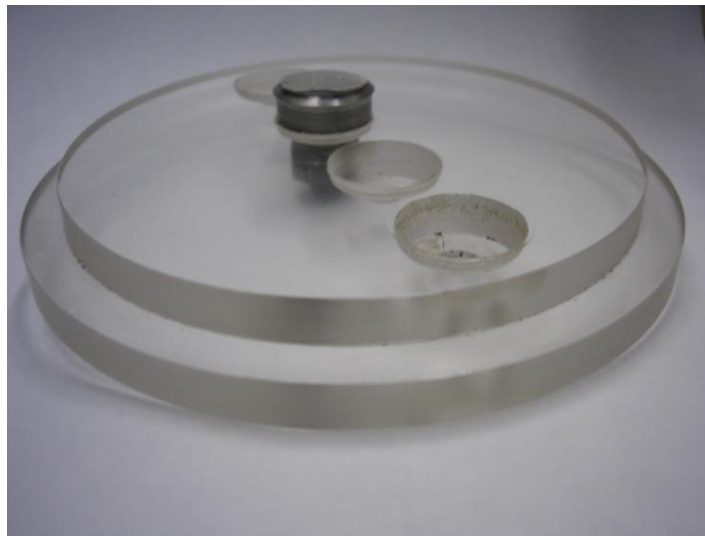
## **5.2. Sistema lineal (cuatro electrodos circulares).**

Este sistema está formado por una sonda de cuatro electrodos circulares alineados, montados en una base acrílica.

Los electrodos, Figura 28, están hechos de acero inoxidable, tienen una cara circular, de 2 centímetros de diámetro, como superficie en contacto con el agua y están alineados con una separación entre electrodos de 1.83 centímetros.

La base acrílica de la sonda tiene un diámetro de 13.5 centímetros; se eligió este tamaño ya que corresponde al diámetro interno de la brida de sujeción del sistema anular, así si en un futuro se desea utilizar la nueva sonda en una presa hidroeléctrica se podrá sujetar empleando la misma brida que en los proyectos hidroeléctricos anteriores.

Sobre el montaje de la sonda, después de manufacturar mediante un torno los electrodos, se le hicieron perforaciones a la base de acrílico para introducir en ellos a los cuatro electrodos y poder fijarlos mediante una tuerca a la base acrílica ya que los electrodos cuentan con una cuerda en la parte inferior para este fin.



*Figura 28. Electrodo montado en la base acrílica antes de ser careado para darle el acabado deseado.*



### **5.2.1. Justificación del empleo del sistema de cuatro electrodos lineales.**

El sistema desarrollado para el laboratorio de Hidráulica en Cuernavaca no tenía restricción alguna en cuanto a su diseño por parte de CFE, por ello se decidió emplear un sistema de electrodos diferente al utilizado para la hidroeléctrica del Cajón, ya que no era necesario tener una brida de soporte tan robusta; además, como el modelo hidráulico donde se va a montar el sistema es un “canal” de acrílico, el tamaño y materiales de la sonda de medición debían ser compatibles con dicho canal en cuanto a sus características físicas y la facilidad de montaje.

En lo que respecta al tipo de electrodos, se notaron ciertos problemas en el sistema anular que se querían corregir para este nuevo diseño.

El primero de estos problemas a corregir fue que la lectura obtenida por el sistema anular dependía directamente del tamaño del tirante de agua que se tuviera sobre el medidor, dicho de otro modo, si por alguna causa el nivel del agua disminuía por debajo del volumen de control, las lecturas obtenidas se disparaban inmediatamente marcando un contenido de aire muy por encima del real.

El otro problema que se tuvo con el sistema anular y se deseaba evitar era que la lectura obtenida variaba de acuerdo con las características fisicoquímicas del agua, es decir, si se tomaban mediciones del mismo contenido de aire pero con agua a diferente temperatura o con una concentración de sales distinta, las lecturas obtenidas eran muy diferentes entre sí, lo cual hace indispensable la calibración del equipo para el tipo específico de agua del lugar en donde se va a instalar si se quiere que el equipo trabaje a escala completa sin saturarse.

Para evitar estos dos problemas se desarrollaron los nuevos electrodos que tienen un principio de funcionamiento similar al sistema anular como se comentará en el punto siguiente.

### **5.2.2. Principio de funcionamiento y conexión.**

Como se comentó en el punto anterior, con la sonda anular se tenían dos problemas, la medición dependía del tirante de agua y de las características fisicoquímicas de la misma.

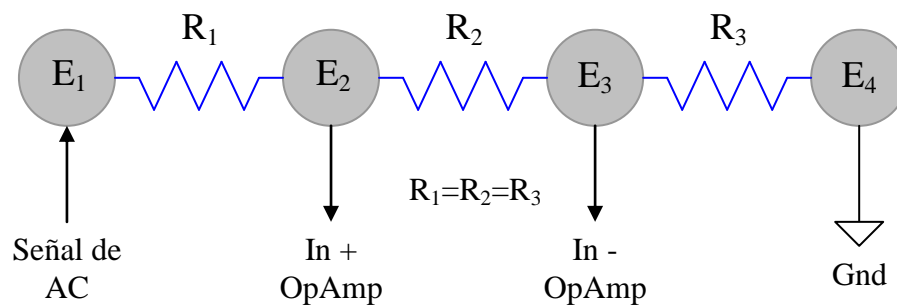
Ambos problemas se solucionan con este tipo de electrodos circulares alineados debido al amplificador diferencial que se

emplea. Para aclarar este punto, se explicará a continuación la forma en que opera la sonda.

Al contar con cuatro electrodos inmersos en el agua, lo que se consigue es generar un divisor de tensión formado por la resistencia del agua contenida entre cada par de electrodos, Figura 29.

Para explicar la conexión de la sonda, se denotará a los electrodos por un número, siendo el 1 el de la extrema izquierda y el 4 el de la extrema derecha.

En el electrodo uno se introduce la señal de alterna proveniente de la etapa de amplificación de corriente, el electrodo dos está conectado a la entrada no inversora del amplificador operacional de la etapa de amplificación en voltaje, el electrodo tres está conectado a la entrada inversora del amplificador antes mencionado y el electrodo cuatro se conecta a tierra para servir como referencia para las mediciones realizadas.



*Figura 29. Conexión de los cuatro electrodos circulares.*

La resistencia en las tres zonas entre electrodos es la misma considerando la existencia únicamente de agua debido a que se encuentran a la misma distancia entre sí. Esto sirve para tener una atenuación constante de la señal de alterna, que se introduce por el electrodo uno, de un electrodo al siguiente.

Como ya se comentó en la parte referente al amplificador de voltaje, se tienen dos señales de alterna en fase entre sí en ambas entradas del restador, la única diferencia entre ellas es que la entrada negativa tiene una amplitud un poco menor que la señal de la entrada positiva, pues la señal de alterna tiene que

“viajar” el doble de distancia para llegar del electrodo uno al tres que del uno al dos.

El par de señales mencionado sirve para realizar una medición diferencial mediante la comparación que realiza el amplificador operacional de sus dos entradas; gracias a esto se lograron solucionar los dos problemas que presentaba la sonda anular, ya que al comparar directamente ambas señales, dejan de ser relevantes los posibles cambios en la medición debidos a variaciones en las características fisicoquímicas del agua y de su tirante, puesto que ambas señales sufrirán los mismos cambios haciéndolos imperceptibles para nuestros fines. Se tiene que aclarar que estas variaciones no se solucionaron del todo pero fueron grandemente atenuadas permitiendo un mejor funcionamiento del equipo de cuatro electrodos sobre el anular.

La conexión de la sonda con el circuito es muy simple, Figura 30, para esto se empleó un cable de cuatro hilos calibre 18 con malla al cual se le adaptaron zapatas en un extremo, el cual se fija por medio de una rosca que se le hizo en la parte posterior a los electrodos y una tuerca, y en el otro extremo tiene el conector necesario para conectarse a las cajas de interconexión.



*Figura 30. Conector con el cable adaptado mediante zapatas para fijarse con una tuerca a los electrodos.*

# **6. Pruebas y mediciones realizadas**

---

Una vez descritas las partes constitutivas de los medidores, es necesario explicar de forma detallada la manera en que se realizaron las pruebas para lograr el óptimo funcionamiento de los sistemas, así como las mediciones obtenidas a partir de ellas, que permitieron realizar ajustes a los circuitos para conseguir las mejores lecturas del contenido de aire en agua a la salida de los medidores.

En este capítulo se abordará la explicación de dichas pruebas y mediciones, así como el análisis de estas últimas y dejando para otro capítulo las conclusiones que se obtienen de dicho análisis.

## **6.1. Descripción de las pruebas realizadas para el sistema de dos electrodos anulares.**

Todas las pruebas se llevaron a cabo en uno de los laboratorios del área de Instrumentación en el edificio 12 del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

La Comisión Federal de Electricidad proporcionó una sonda anular y un medidor de contenido de aire en agua que habían desarrollado con anterioridad pero que no funcionaba correctamente.

Lo primero que se hizo fue analizar el circuito electrónico del medidor, sin embargo el diseño era muy complejo y de difícil análisis, más aún con el equipo sin funcionar, por esta razón se decidió emplear el mismo principio de funcionamiento pero simplificando el circuito de acuerdo con los conocimientos con que se contaba.

Una vez desarrollado el nuevo circuito, se le armó en una tableta de pruebas y le colocamos unos cables para conectar los electrodos de medición, en este caso la sonda anular proporcionada por CFE. Sin embargo, fue necesario colocar la sonda en un recipiente lo suficientemente grande para contenerla y con una altura de por lo menos 5 centímetros. Se utilizó una tina de plástico, Figura 31, a la cual se le hizo una perforación en su parte inferior para pasar a través de

ella los cables de conexión, por lo mismo, se tuvo que sellar con silicón todo el borde de la sonda que se encontraba en contacto con la tina.



Figura 31. Instalación donde se realizaron las pruebas de la sonda anular.

La primera prueba realizada fue para determinar el volumen de control del sistema. Para conocer dicho volumen se hicieron pruebas de forma independiente con cada anillo, conectando a ellos la salida de la etapa de amplificación en corriente (señal de corriente alterna) y al círculo central a la tierra.

El siguiente paso realizado fue ir aumentando el nivel del agua en la tina hasta llegar a una altura para la cual la salida del sistema se mantuviera constante, Figura 32.

Se empleó un osciloscopio para ver el cambio en la señal de directa a la salida del medidor.

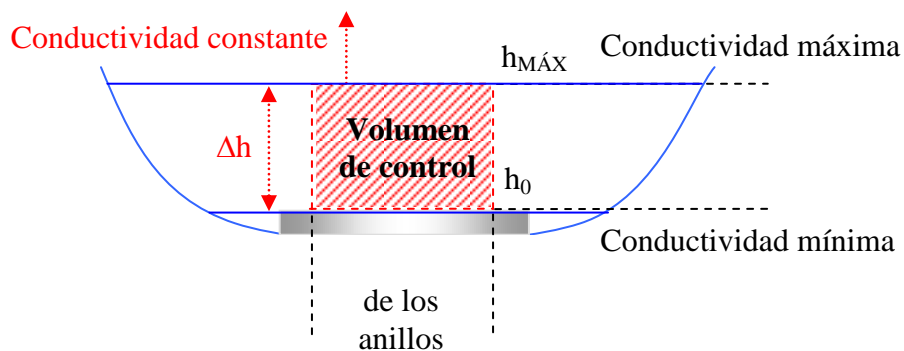


Figura 32. Volumen de control de la sonda anular.

Se realizó esta prueba para ambos anillos y se encontró que la altura del volumen de control era distinta para cada uno, siendo mucho mayor la del electrodo exterior.

Una vez encontrado el volumen de control, fue necesario hacer otro tipo de pruebas para determinar la mejor conexión de los elementos de la sonda.

Para esta prueba lo que se hizo fue introducir al agua dos señales de corriente alterna provenientes del mismo oscilador, una por cada anillo, y en el círculo central se conectó la referencia a tierra. Luego, se iba disminuyendo el nivel del agua desde el máximo del volumen de control hasta cero, y por medio del osciloscopio se realizaron mediciones para cada centímetro de cambio en la altura.

Se fueron tomando lecturas en ambos anillos de forma simultánea por medio de los dos canales del osciloscopio, gracias a esto pudo descubrirse que se obtenía una especie de suma de las dos señales en ambos canales. Por esta causa se decidió introducir sólo una señal de alterna al agua.

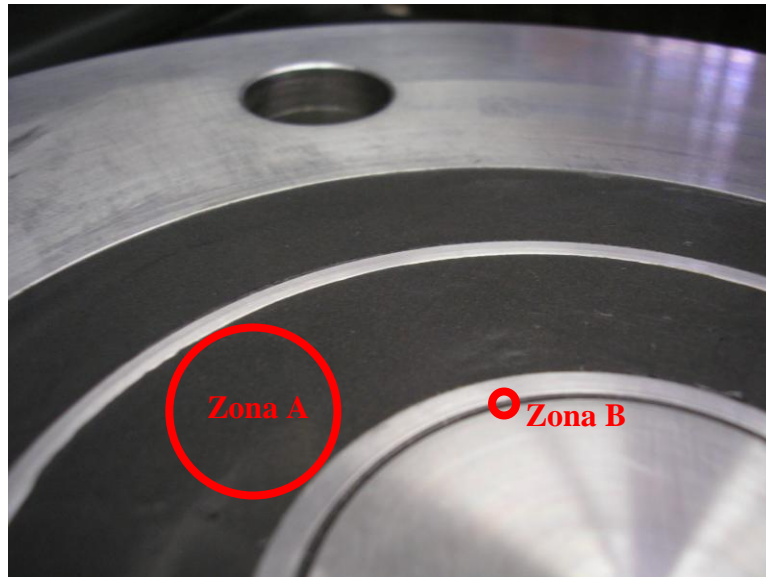
Fue necesario cambiar la conexión de los elementos, ahora se conectaba la salida de la etapa de amplificación de corriente al círculo central, y los dos anillos a tierra.

Se repitió el experimento, nuevamente se disminuyó el tirante del agua centímetro a centímetro y se iban capturando las mediciones de ambos electrodos. Con lo anterior, la señal de ambos anillos ya no era la misma pero aún existía la duda sobre la completa independencia de los anillos, para corroborar este punto se realizó un segundo tipo de pruebas.

Ahora, el experimento consistía en determinar de algún modo que la señal obtenida por uno de los anillos no dependía de la señal que se tuviera en el otro, para realizar esta prueba se utilizó una bomba de aire (del tipo empleado para los acuarios) y una piedra difuminadora de aire mejor conocida como burbujeador. Mediante estos aditamentos fue posible inyectar una cierta cantidad de burbujas en una zona específica de la sonda.

El experimento se llevó a cabo de la siguiente manera: se conectaron los elementos de la sonda de igual forma que en la prueba anterior (anillo central con la señal de alterna y los anillos a tierra) y se conectaron las salidas de los circuitos del medidor de cada anillo a los dos canales del osciloscopio.

Se introdujeron burbujas, mediante la bomba y el burbujeador antes descritos, en las zonas de la sonda comprendidas entre el anillo interior y el círculo central (Zona B) y el anillo exterior y el interior (Zona A) Figura 33.



*Figura 33. Zonas de la sonda en donde se introducían burbujas de aire para la prueba de independencia entre electrodos.*

Cuando se tenían burbujas de aire entre el círculo central y el anillo interior, Zona B, se registraba la misma medición en ambos canales del osciloscopio sólo que en el correspondiente al anillo exterior se tenía una pequeña atenuación debida al diferente volumen de control. Este funcionamiento era el esperado ya que esa zona debe ser censada por ambos anillos.

Sin embargo, al introducir burbujas entre el anillo exterior y el interior, Zona A, se obtuvieron las mismas lecturas en ambos canales, sólo con una atenuación para el anillo interior; esto presentó un nuevo problema puesto que en la zona entre anillos, el medidor correspondiente al electrodo interior no debía registrar las variaciones en la conductividad del agua debidas a la introducción del aire en ella.

Después de analizar el problema, se pensó que alimentando los circuitos de cada anillo con fuentes independientes se lograría la no dependencia entre electrodos.

Realizando los cambios pertinentes en los circuitos y conectando uno de los anillos a la tierra de una de las fuentes y el otro anillo a la tierra de la otra fuente, se repitió el experimento introduciendo burbujas en la zona A y ahora sí, la salida del electrodo interno no registraba el aire mientras que el externo sí lo hacía. Con ello se logró el correcto funcionamiento del equipo teniendo una total independencia entre ambos anillos.

A continuación, se repitió la prueba de ir disminuyendo el nivel del agua en múltiples ocasiones, hasta que se ajustó el funcionamiento del medidor. Por ejemplo, se agregó la etapa de amplificación de voltaje y la etapa de corrección del offset, para ajustar el nivel mínimo de la señal

de corriente directa a cero y que el medidor diera la máxima escala, así como lograr que la respuesta del equipo fuera lo más lineal posible.

Otro cambio que se realizó gracias a la repetición de las pruebas fue cambiar el amplificador operacional TL081 de la etapa de amplificación en corriente por un LM741 para evitar su sobrecalentamiento. También se ajustó la frecuencia y amplitud de la señal generada por el oscilador para aumentar la diferencia entre el valor máximo de contenido de aire y el mínimo.

Posteriormente, se armaron los circuitos impresos y se probaron, fue necesario cambiar los valores de las resistencias de la fuente de corriente para que no se calentaran tanto.

Por último, se dejó trabajando el equipo por horas hasta comprobar su buen funcionamiento.



## 6.2. Mediciones y curva de funcionamiento del sistema de dos electrodos anulares.

Como se explicó anteriormente, mediante las pruebas realizadas se logró ajustar el comportamiento de ambos anillos para conseguir que nos entregaran las mejores lecturas posibles.

Las mediciones que se obtuvieron, en cuanto a la prueba de altura del volumen de control, fueron de entre tres y tres punto cinco centímetros de altura de la columna de agua para el anillo exterior; es decir, si se modificaba la altura del tirante del agua a cuatro centímetros, la lectura entregada por el medidor era exactamente la misma que para tres centímetros y medio.

En cuanto al anillo interior, la altura del volumen de control fue de entre uno y uno punto cinco centímetros de altura para la columna de agua, Tabla 1.

*Tabla 1. Profundidad de penetración de cada anillo.*

| Anillo   | Profundidad de penetración (Área de medición) |
|----------|---|
| Interior | 0 [cm] a 3 - 3.5 [cm]                         |
| Exterior | 0 [cm] a 1 - 1.5 [cm]                         |

Estos valores se deben a que la altura del volumen de control es función de la separación entre electrodos, como se comentó en los antecedentes.

Gracias a esto se puede decir con certeza que con el circuito del anillo interior es posible detectar con mayor seguridad las burbujas de aire que se encuentren a no más de un centímetro de la plantilla, mientras que con el anillo exterior es posible detectar burbujas de aire que se encuentren hasta a tres centímetros de separación de la misma.

Como se menciona anteriormente, la prueba de ir tomando lecturas con la disminución del tirante de agua sobre la sonda para cada centímetro, se repitió en múltiples ocasiones puesto que no se tenía la escala ni variación deseada. Se consideró innecesario presentar todas esas mediciones con excepción de la prueba con los circuitos en sus condiciones finales, las cuales reflejan el funcionamiento de cada anillo, Tabla 2 y Tabla 3.

Tabla 2. Mediciones a la salida del circuito correspondiente al anillo exterior.

| <b>Anillo Exterior</b>                       |   |   |   |   |   |
|--|---|---|---|---|---|
| <b><math>h_{\text{agua}}</math><br/>[cm]</b> | <b><math>V_{\text{salida}_1}</math><br/>[V]</b> | <b><math>V_{\text{salida}_2}</math><br/>[V]</b> | <b><math>V_{\text{salida}_3}</math><br/>[V]</b> | <b><math>V_{\text{salida}_4}</math><br/>[V]</b> | <b><math>V_{\text{salida}_5}</math><br/>[V]</b> |
| 4.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| 3.5  | 0.0   | 0.1   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| 3.0  | 0.1   | 0.1   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| 2.5  | 0.1   | 0.2   | 0.1   | 0.1   | 0.1   |
| 2.0  | 0.3   | 0.3   | 0.2   | 0.2   | 0.3   |
| 1.5  | 0.6   | 0.6   | 0.5   | 0.5   | 0.6   |
| 1.0  | 1.5   | 1.5   | 1.2   | 1.3   | 1.6   |
| 0.5  | 5.3   | 5.2   | 5.0   | 4.9   | 5.4   |
| 0.0  | 8.5   | 8.4   | 8.5   | 8.5   | 8.5   |

Tabla 3. Mediciones a la salida del circuito correspondiente al anillo interior.

| <b>Anillo Interior</b>                       |   |   |   |   |   |   |
|--|---|---|---|---|---|---|
| <b><math>h_{\text{agua}}</math><br/>[cm]</b> | <b><math>V_{\text{salida}_1}</math><br/>[V]</b> | <b><math>V_{\text{salida}_2}</math><br/>[V]</b> | <b><math>V_{\text{salida}_3}</math><br/>[V]</b> | <b><math>V_{\text{salida}_4}</math><br/>[V]</b> | <b><math>V_{\text{salida}_5}</math><br/>[V]</b> | <b><math>V_{\text{salida}_6}</math><br/>[V]</b> |
| 2.0  | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| 1.5  | 0.0   | 0.0   | 0.1   | 0.0   | 0.0   | 0.0   |
| 1.0  | 0.1   | 0.0   | 0.1   | 0.1   | 0.1   | 0.08  |
| 0.5  | 0.3   | 0.3   | 0.4   | 0.3   | 0.3   | 0.24  |
| 0.0  | 2.2   | 2.2   | 2.2   | 2.2   | 2.2   | 2.2   |

Es necesario destacar que para obtener los datos mostrados se tuvo que ajustar el potenciómetro correspondiente a la etapa de eliminación del offset, también se cambió el valor del potenciómetro que se encuentra entre la etapa de amplificación de corriente y de voltaje, así como el potenciómetro de la realimentación de la etapa de amplificación de voltaje.

Si se dibujan las gráficas de los datos anteriormente presentados, se obtendrán las gráficas de funcionamiento preliminares del equipo, Figura 34 y Figura 35.

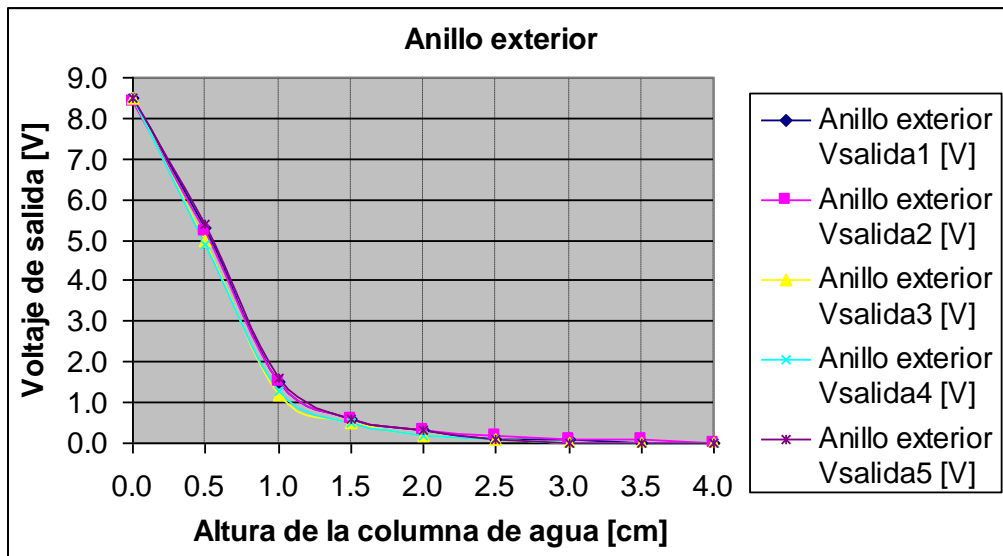


Figura 34. Gráfica preliminar del funcionamiento del medidor correspondiente al anillo exterior.

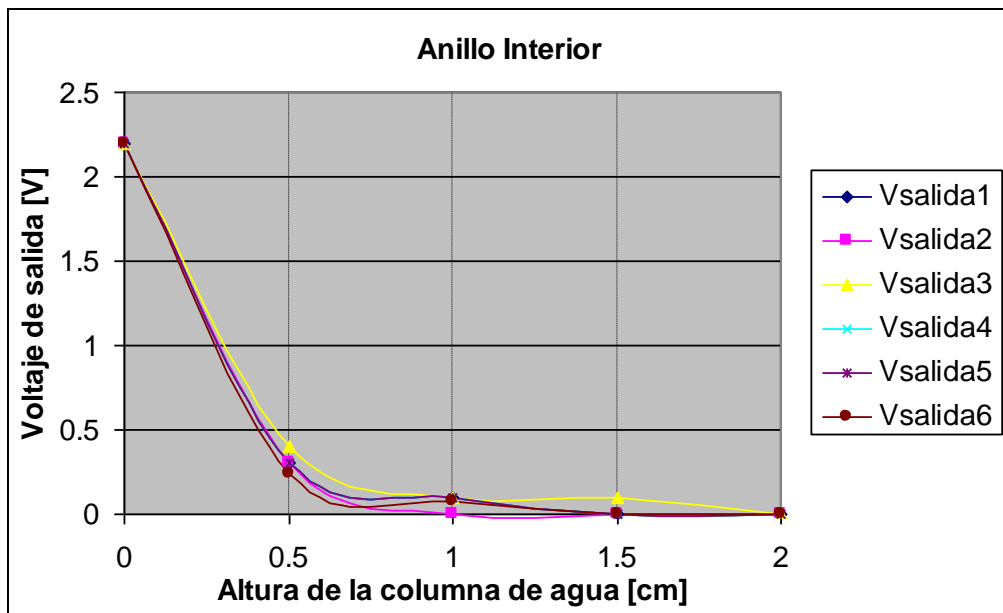


Figura 35. Gráfica preliminar del funcionamiento del medidor correspondiente al anillo interior.

En el punto siguiente se analizarán los valores y gráficas obtenidas para encontrar la curva de funcionamiento final del medidor de concentración de aire en agua.

### **6.3. Análisis de los resultados obtenidos para el sistema de dos electrodos anulares.**

En cuanto a la profundidad de campo obtenida por ambos anillos del medidor, se puede decir que es muy buena, ya que la medición realizada con el equipo que tenía anteriormente la CFE daba una altura máxima de medición de tres centímetros con el anillo exterior y de un centímetro con el anillo interior, con el nuevo medidor se consiguió una altura de medición de entre 3.5 y 4 centímetros para el anillo exterior y de entre 1.5 y 2 centímetros para el interior, logrando con esto una pequeña mejora en los intervalos sensibles del medidor.

Además, con los tres y medio centímetros conseguidos mediante el medidor del anillo exterior, se tiene una altura más que suficiente para conocer el estado del colchón de aire en la vecindad de la plantilla, puesto que no es de interés si se tiene aire por encima de esta altura, ya que aunque exista, no va a favorecer en nada contra los problemas causados por la cavitación.

Y al tener una profundidad de penetración de un centímetro y medio con el anillo interior, se podrá corroborar la medición obtenida por el anillo exterior en cuanto a la parte más próxima a la plantilla y así saber, de forma más exacta, si hay o no aire justo junto a la plantilla.

Sin embargo, para que pueda ser analizado el comportamiento del medidor con respecto a cualquier altura intermedia entre el mínimo y el máximo valor del intervalo de medición para ambos anillos, es necesario calcular el valor promedio de los voltajes obtenidos mediante la prueba final del sistema de los anillos concéntricos para cada una de las alturas deseadas, Tabla 4 y Tabla 5.

*Tabla 4. Voltajes promedio para cada altura correspondientes al circuito del anillo exterior.*

| <b>Anillo Exterior</b>            |                                  |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| Altura de la columna de agua [cm] | Voltaje promedio a la salida [V] |
| 4.0                               | 0.0                              |
| 3.5                               | 0.02                             |
| 3.0                               | 0.04                             |
| 2.5                               | 0.12                             |
| 2.0                               | 0.26                             |
| 1.5                               | 0.56                             |
| 1.0                               | 1.42                             |
| 0.5                               | 5.16                             |
| 0.0                               | 8.48                             |

Tabla 5. Voltajes promedio para cada altura correspondientes al circuito del anillo interior.

| Anillo Interior                   |                                  |
|-----------------------------------|----------------------------------|
| Altura de la columna de agua [cm] | Voltaje promedio a la salida [V] |
| 2.0                               | 0.000                            |
| 1.5                               | 0.017                            |
| 1.0                               | 0.080                            |
| 0.5                               | 0.307                            |
| 0.0                               | 2.200                            |

Ahora, para conseguir las curvas de funcionamiento finales de los medidores, Figura 36 y Figura 37, basta con trazar las gráficas de los valores promedio anteriormente calculados, y mediante ellas, se podrá conocer con exactitud la manera en que operan los sistemas armados.

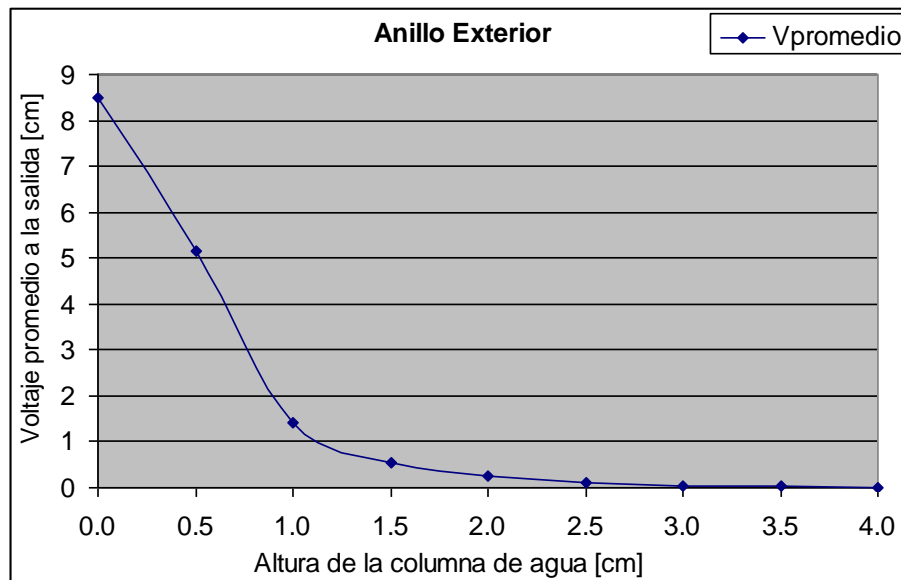


Figura 36. Curva de funcionamiento del medidor correspondiente al anillo exterior.

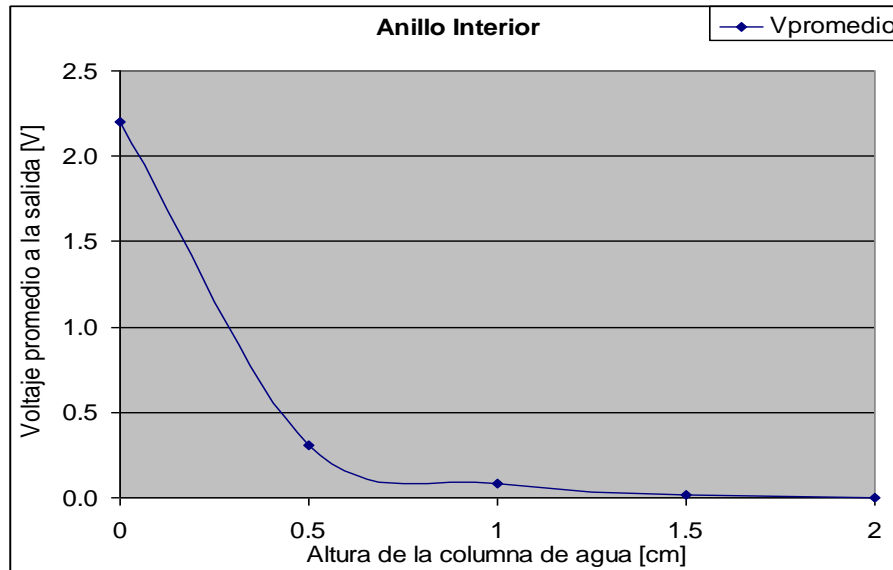


Figura 37. Curva de funcionamiento del medidor correspondiente al anillo interior.

Si se analizan las curvas de funcionamiento obtenidas, se podrá ver que los medidores presentan un comportamiento idóneo, ya que en ambas gráficas se tiene una zona cuasilineal en la parte más cercana a la plantilla, que representa la zona de máximo interés.

También se puede destacar el hecho de que en el anillo exterior tenemos una variación de prácticamente 8 [V] para la zona comprendida entre la plantilla y el primer centímetro de agua. Esto es sumamente satisfactorio pues será mucho más sensible el medidor para cuando se detecte la presencia de aire en esa zona.

En cuanto al medidor del anillo interior, se nota claramente en la Figura 37 que la mayor variación de voltaje se encuentra en el medio centímetro más cercano a la plantilla, a pesar de contar con una variación en voltaje pequeña (poco menos de 2 [V]) podemos ver fácilmente el cambio en la salida, provocado por la existencia o no existencia de aire en esa región crítica, pues es precisamente este aire el que evitará en mayor medida la presencia del fenómeno de la cavitación.

Es importante destacar que las curvas de funcionamiento del equipo dependerán directamente de las condiciones fisicoquímicas del agua en la cual se realizó la prueba, por lo cual es probable que se obtenga una curva de funcionamiento con el mismo comportamiento pero con pequeñas variaciones al ubicar la sonda en la hidroeléctrica.

Las posibles variaciones que se pudieran presentar por cambios en las condiciones fisicoquímicas del agua lo único que van a hacer es desplazar la curva de funcionamiento hacia arriba o hacia abajo en voltaje, pero se tendrá el mismo comportamiento asintótico con respecto al eje de las abscisas, esto implica que las gráficas mostradas son una guía más no un patrón que siempre se cumplirá.

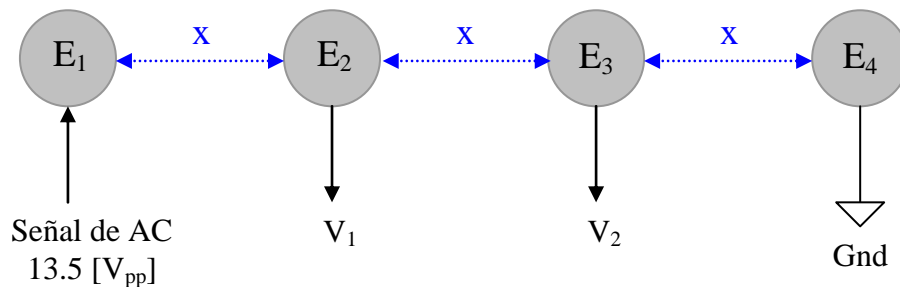
Sin embargo esto no presenta un problema pues al analizar los datos que se adquirieran será sencillo interpretarlos para obtener una lectura cualitativa del contenido de aire en agua en el lugar de interés.

#### **6.4. Descripción de las pruebas realizadas para la elección del tamaño de los cuatro electrodos lineales.**

Una vez armados los circuitos electrónicos con las modificaciones específicas que requería el sistema de cuatro electrodos, quedaba por establecer las dimensiones y configuración de los electrodos de medición.

Se decidió que se iban a tener 13.5 centímetros como dimensión máxima de la sonda para, en caso de que el personal de la Comisión Federal de Electricidad así lo quisiera, se pudiera montar esta nueva sonda en los registros de instrumentación de las presas hidroeléctricas del país mediante la misma brida estándar de sujeción empleada por ellos.

Partiendo de esto, se planteó la distribución de los cuatro electrodos dentro del círculo de los 13.5 centímetros de diámetro. Como se quería tener una atenuación constante de la señal inyectada a través de uno de los electrodos al viajar por el agua hasta alcanzar a los demás electrodos, se ubicaron en una línea recta con la misma separación entre ellos, Figura 38, pero para determinar la distancia óptima entre electrodos y el mejor tamaño de los mismos se realizó un experimento en el que se hicieron pruebas con distintos electrodos y distancias entre ellos.



*Figura 38. Distancia entre electrodos..*

Se eligieron tres diferentes medidas de electrodos de acuerdo con los tamaños comerciales de roldanas que tuvieran diámetros aproximados a uno, dos y tres centímetros; los valores que se encontraron fueron de 1, 1.9 y 3.15 centímetros de diámetro.

Se decidió fijar cada juego de cuatro electrodos sobre bases plásticas colocándolos a dos diferentes distancias de separación entre ellos, una

muy pequeña y otra grande, con la finalidad de comparar el funcionamiento de los electrodos y determinar la mejor configuración.

La distancia menor fue de 0.3 centímetros para los tres tipos de roldanas. Se eligió esta distancia basándose en la separación entre el círculo central y el anillo interno de la sonda anular.

La distancia mayor se determinó distribuyendo de forma equidistante los cuatro electrodos dentro del área de 13.5 centímetros que se tenía. Para ello se empleó la fórmula siguiente:

$$x = \frac{13.5 \text{ [cm]} - (4 * \text{diámetro del electrodo [cm]})}{3} \quad \dots \text{ Ecuación 4}$$

Si se utiliza la ecuación anterior para calcular la distancia máxima entre los electrodos de un centímetro de diámetro, se obtiene una distancia de 3.16 centímetros y si se calcula la distancia máxima de separación para los electrodos de 1.9 centímetros de diámetro mediante la misma fórmula, se obtiene una separación de 1.97 centímetros, Tabla 6. En el caso de los electrodos de 3.15 centímetros de diámetro, sólo se realizaron pruebas con la distancia mínima debido a que no era físicamente posible dar una distancia de separación mayor a 0.3 centímetros pues se sobrepasaría la distancia máxima establecida para el diámetro de la sonda (13.5 [cm]).

*Tabla 6. Separaciones experimentales de cada electrodo.*

| <b>Diámetro electrodos</b> | <b>Separación menor</b> | <b>Separación mayor</b> |
|----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>1 [cm]</b>              | <b>0.3 [cm]</b>         | <b>3.16 [cm]</b>        |
| <b>1.9 [cm]</b>            | <b>0.3 [cm]</b>         | <b>1.97 [cm]</b>        |
| <b>3.15 [cm]</b>           | <b>0.3 [cm]</b>         | <b>-----</b>            |

Se armaron los cinco juegos de cuatro electrodos y se les soldaron cables para poder conectar la salida del divisor de tensión en el electrodo de la izquierda (introducción de la señal de alterna al agua), medir los voltajes en los siguientes dos electrodos y conectar a tierra el electrodo de la extrema derecha.

Luego, se colocaron dentro de un recipiente de vidrio con agua a cada juego de electrodos por separado y fuimos disminuyendo el tirante de agua partiendo de 6 centímetros de altura hasta llegar a un centímetro, y se iban anotando los valores de voltaje presentes en los electrodos uno, dos y tres, los cuales adquirimos mediante un osciloscopio, Figura 39.



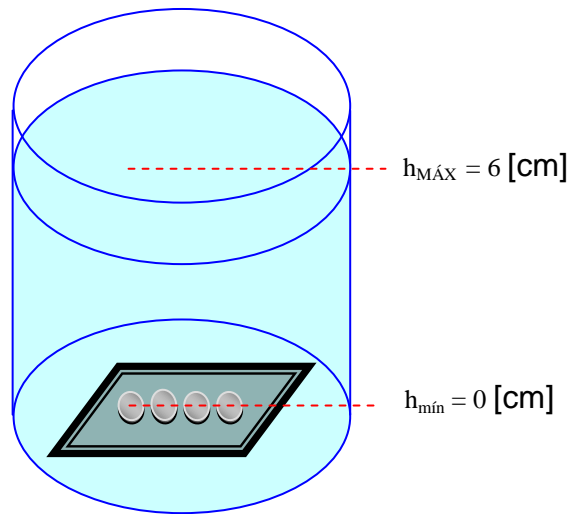


Figura 39. Prueba para la elección de los electrodos finales.

En el punto siguiente se comentarán las mediciones obtenidas y se analizarán los datos para su mejor entendimiento.

Una vez elegidos tanto la distancia entre electrodos como el diámetro de los mismos, se manufacturaron los electrodos finales de acero inoxidable, Figura 40, también desarrollamos los circuitos electrónicos en una tableta de pruebas para comprobar su buen funcionamiento y realizar los ajustes pertinentes; sin embargo, como el circuito es prácticamente el mismo que para la sonda anular, dicho circuito estaba más que probado y por lo mismo no fue necesario realizarle corrección alguna.



Figura 40. Uno de los electrodos finales, montado sobre la base acrílica de montaje.

Posteriormente, se realizaron pruebas conectando los electrodos finales al circuito electrónico terminado del medidor (en circuito impreso) con la finalidad de comprobar el buen funcionamiento de todo el sistema. Para ello, se repitió el mismo tipo de experimento realizado con la sonda anular; es decir, colocar la base con los cuatro electrodos dentro de un recipiente transparente de vidrio e ir variando el nivel del agua desde una altura máxima de 10 centímetros, hasta reducirla a cero. Se tomaron mediciones cada medio centímetro y se anotaron para posteriormente sacar el promedio del voltaje en cada altura y obtener la gráfica de funcionamiento del equipo, en el punto siguiente se presenta esta información.

### **6.5. Mediciones y curva de funcionamiento del sistema de cuatro electrodos lineales.**

En lo que respecta a la prueba realizada para determinar el mejor diámetro y separación de los electrodos, las lecturas que se tomaron se presentan en seis tablas, Anexo 1, Tabla 9 a Tabla 13. Cada una de ellas corresponde a un juego de electrodos de cierto diámetro y con una determinada distancia entre ellos.

El voltaje del electrodo cuatro siempre es de cero Volts pues es la referencia a tierra, y el voltaje del electrodo uno es menor a los 14.5 [V] pico a pico de la señal senoidal generada por el oscilador, esto se debe a que se está haciendo un divisor de tensión entre el potenciómetro que se encuentra en medio de la etapa amplificadora de corriente y la de amplificación de voltaje y la resistencia del agua contenida entre cada par de electrodos.

En lo correspondiente a las pruebas realizadas para comprobar el buen funcionamiento del equipo con los circuitos y electrodos finales, se tomaron mediciones del voltaje a la salida del sistema para cada medio centímetro de disminución en el tirante del agua, partiendo de 10 centímetros y hasta llegar a cero, Tabla 7.

Estas mediciones se realizaron después de dejar al sistema conectado y funcionando durante una, dos y hasta tres horas de forma continua para corroborar que el equipo se comportaba igual sin importar el tiempo que tuviera en operación.

Tabla 7. Mediciones con los electrodos lineales finales.

| h agua [cm] | Vsalida 1[V] | Vsalida 2[V] | Vsalida 3[V] | Vsalida 4[V] | Vsalida 5[V] | Vsalida 6[V] |
|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 10.0        | 0.7          | 0.7          | 0.7          | 0.5          | 0.4          | 0.3          |
| 9.5         | 0.6          | 0.7          | 0.7          | 0.5          | 0.4          | 0.3          |
| 9.0         | 0.6          | 0.7          | 0.7          | 0.5          | 0.4          | 0.3          |
| 8.5         | 0.6          | 0.7          | 0.7          | 0.5          | 0.4          | 0.4          |
| 8.0         | 0.6          | 0.7          | 0.7          | 0.6          | 0.4          | 0.4          |
| 7.5         | 0.6          | 0.7          | 0.7          | 0.7          | 0.5          | 0.4          |
| 7.0         | 0.6          | 0.7          | 0.7          | 0.7          | 0.5          | 0.4          |
| 6.5         | 0.6          | 0.7          | 0.7          | 0.7          | 0.5          | 0.4          |
| 6.0         | 0.7          | 0.8          | 0.7          | 0.6          | 0.5          | 0.5          |
| 5.5         | 0.7          | 0.9          | 0.7          | 0.7          | 0.6          | 0.6          |
| 5.0         | 0.9          | 0.9          | 0.8          | 0.7          | 0.7          | 0.6          |
| 4.5         | 1.0          | 1.0          | 0.9          | 0.9          | 0.7          | 0.7          |
| 4.0         | 1.1          | 1.2          | 1.0          | 1.0          | 0.9          | 0.9          |
| 3.5         | 1.4          | 1.4          | 1.3          | 1.3          | 1.1          | 1.1          |
| 3.0         | 1.8          | 1.7          | 1.6          | 1.5          | 1.5          | 1.5          |
| 2.5         | 2.2          | 2.2          | 2.2          | 2.1          | 2.0          | 1.9          |
| 2.0         | 2.9          | 2.8          | 2.8          | 2.8          | 2.7          | 2.6          |
| 1.5         | 3.7          | 3.8          | 3.5          | 3.7          | 3.6          | 3.4          |
| 1.0         | 5.0          | 5.3          | 5.1          | 5.2          | 5.0          | 5.1          |
| 0.5         | 6.6          | 6.6          | 6.4          | 6.6          | 6.5          | 6.5          |
| 0.0         | 7.4          | 7.4          | 7.4          | 7.6          | 7.4          | 7.2          |

Se dibujaron las gráficas con los datos anteriores, Figura 41, para ver el comportamiento del sistema; sin embargo, más adelante se presentará el análisis de las mediciones y de esta gráfica para saber si el medidor se comportaba como era esperado o no.

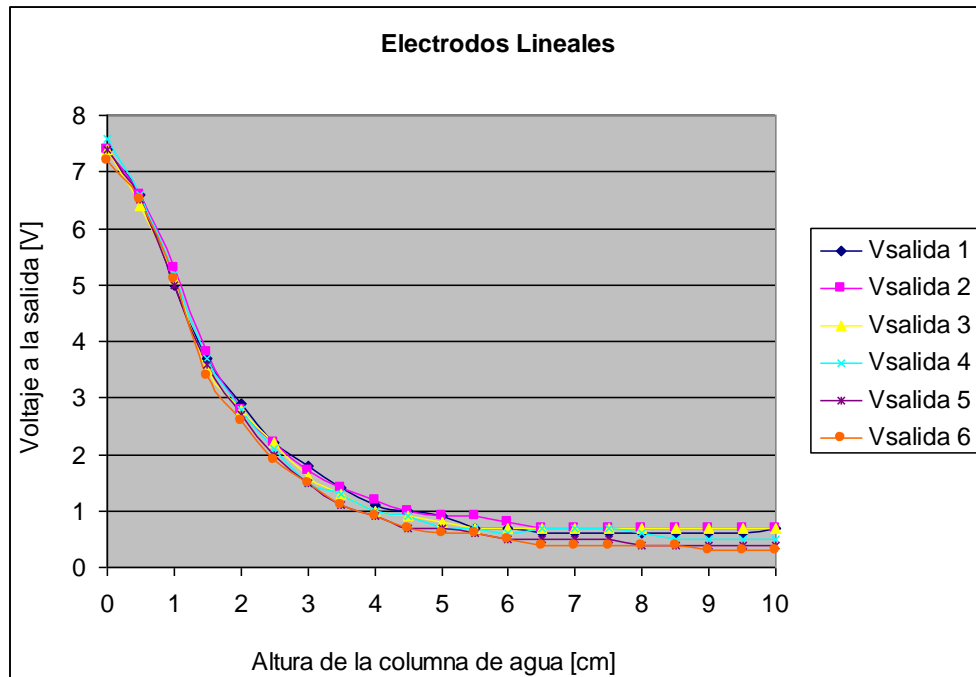


Figura 41. Curva de funcionamiento preliminar para el medidor de cuatro electrodos lineales.

## 6.6. Análisis de los resultados obtenidos para el sistema de cuatro electrodos lineales.

Se comenzará analizando los resultados de la prueba de elección de electrodos.

Primero se va a calcular la diferencia entre el valor menor y el mayor de los voltajes para cada juego de electrodos, Anexo 2, Tabla 14, con esto se determinará cuales electrodos tienen la mayor sensibilidad respecto a las variaciones del tirante de agua.

Si se observan los valores de las diferencias calculadas, se puede notar que el valor mayor para los voltajes correspondientes a los electrodos uno y dos los tiene el juego de electrodos de 1.9 [cm] de diámetro separados 3 [mm] entre sí, con valores de 0.9 [V] y 0.6 [V] respectivamente, mientras que la diferencia mayor para el voltaje del electrodo tres se tiene para el juego de electrodos de un centímetro de diámetro con una separación de 0.3 [cm] entre ellos, con un valor de 0.4 [V].

Para poder realizar el análisis del otro factor involucrado en la elección del mejor juego de electrodos, se va a necesitar calcular el valor promedio de los voltajes de cada electrodo correspondientes a cada juego, Anexo 2, Tabla 15. También se necesitará calcular la diferencia entre el valor promedio del voltaje perteneciente a los electrodos uno y dos de cada juego, para ello se utilizará la ecuación 5, así como la diferencia entre el voltaje promedio del electrodo dos y el electrodo tres de cada configuración mediante la ecuación 6, Anexo 2,

Tabla 16. Por último se requerirá calcular la resta de las diferencias mencionadas anteriormente utilizando la ecuación 7; es decir, se va a restar el valor de la diferencia entre los voltajes de los electrodos dos y tres de cada configuración, con el valor de la diferencia entre los voltajes de los electrodos uno y dos del mismo juego de electrodos, Anexo 2, Tabla 16.

Una vez que se han calculado los valores anteriores, es posible analizar el otro factor a considerar en la elección de la configuración de electrodos más apropiada, dicho factor es la atenuación debida al agua existente entre cada par de electrodos.

Para obtener dicha atenuación, lo que se hizo fue calcular la diferencia entre voltajes de electrodos consecutivos de cada configuración, dicho de otro modo, se restó el voltaje del electrodo dos al voltaje del electrodo uno de cada juego para obtener la primera diferencia, y restamos al voltaje del electrodo dos el voltaje del electrodo tres de cada configuración para obtener con esto la segunda diferencia.

Posteriormente, se restaron entre sí ambas diferencias, valor que corresponde al cambio, en la amplitud de la señal de alterna, sufrido por la atenuación del agua contenida en las zonas entre electrodos; mientras menor sea el valor de la resta, mejor será la configuración de electrodos, esto se debe a que la señal de alterna inyectada al agua por el electrodo uno, sufre una atenuación similar al viajar por el agua del electrodo uno al electrodo dos como de éste al electrodo tres.

Para aclarar el procedimiento descrito, se presenta como ejemplo el cálculo de la atenuación sufrida por el agua para el juego de electrodos de un centímetro de diámetro separados 3 milímetros entre sí:

$$\Delta_1 = \bar{V}_1 - \bar{V}_2 \dots \text{Ecuación 5}$$

$$\Delta_1 = 5.067 \text{ [V]} - 2.9 \text{ [V]} = 2.167 \text{ [V]}$$

$$\Delta_2 = \bar{V}_2 - \bar{V}_3 \dots \text{Ecuación 6}$$

$$\Delta_2 = 2.9 \text{ [V]} - 2.55 \text{ [V]} = 0.35 \text{ [V]}$$

$$\Delta_T = \Delta_1 - \Delta_2 \dots \text{Ecuación 7}$$

$$\Delta_T = 2.167 \text{ [V]} - 0.35 \text{ [V]} = 1.797 \text{ [V]}$$

Al analizar los valores obtenidos, se puede concluir que los electrodos de 3.15 centímetros de diámetro son los que mejor cumplen con esta condición ya que tienen el valor menor de la diferencia total.

Si tomamos en cuenta los resultados del análisis de ambas limitantes de forma conjunta, no podemos elegir la configuración de electrodos correspondiente a los electrodos de un centímetro de diámetro y separación de 3 milímetros pues a pesar de tener la mayor diferencia entre el valor máximo y mínimo del tercer electrodo, como se muestra en la Tabla 14 del Anexo 2, no cumple con tener una atenuación

constante de la señal de alterna debida al agua entre sus electrodos como se muestra en la Tabla 16 del Anexo 2. Tampoco se puede elegir al juego de electrodos de 3.15 [cm] de diámetro con una separación entre ellos de 3 [mm], pues a pesar de ser la configuración que mejor cumple con la segunda limitante es la que peor cumple con la primera.

Por esta razón, se eligió a la configuración de 1.9 [cm] de diámetro para los electrodos con una separación de 3 [mm] entre ellos como los electrodos finales, ya que cumple con la primera condición de muy buena forma, teniendo la mayor diferencia entre los valores de voltaje máximos y mínimos para dos de sus electrodos, significando que tiene la mayor sensibilidad para detectar los cambios de altura del tirante de agua, y es la segunda mejor configuración en cuanto al cumplimiento de la segunda limitante, ya que como se puede ver en la Tabla 16 del Anexo 2, su diferencia total fue de 1.034 [V], sólo superada por la configuración de 3.15 [cm], significando que se logrará tener una atenuación más o menos constante de la señal de alterna al viajar de un electrodo al otro con la configuración seleccionada.

En cuanto a las pruebas que se realizaron con los electrodos finales para ver su funcionamiento, se necesita sacar el valor promedio de los voltajes para cada altura, Tabla 8, con estos valores se podrá obtener la curva final de funcionamiento, Figura 42, y será posible comentar sobre la forma en que opera el medidor.

Tabla 8. Voltajes promedio calculados para cada altura obtenidos mediante el medidor de cuatro electrodos lineales

| h agua [cm] | V promedio [V] |
|-------------|----------------|
| 10.0        | 0.55           |
| 9.5         | 0.53           |
| 9.0         | 0.53           |
| 8.5         | 0.55           |
| 8.0         | 0.57           |
| 7.5         | 0.60           |
| 7.0         | 0.60           |
| 6.5         | 0.60           |
| 6.0         | 0.63           |
| 5.5         | 0.70           |
| 5.0         | 0.77           |
| 4.5         | 0.87           |
| 4.0         | 1.02           |
| 3.5         | 1.27           |
| 3.0         | 1.60           |
| 2.5         | 2.10           |
| 2.0         | 2.77           |
| 1.5         | 3.62           |
| 1.0         | 5.12           |
| 0.5         | 6.53           |
| 0.0         | 7.40           |

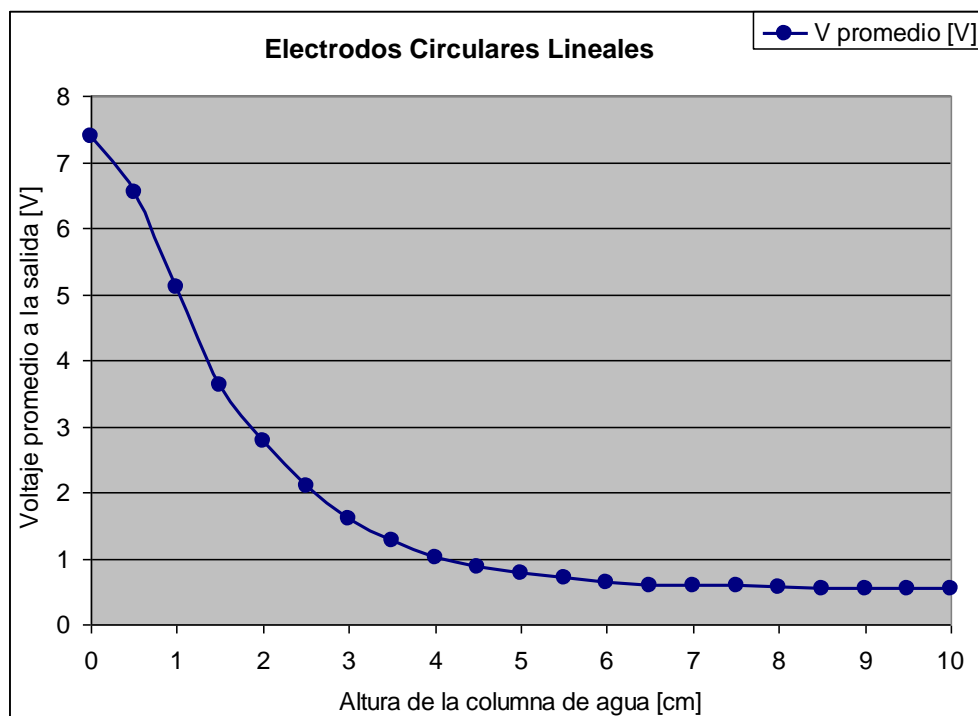


Figura 42. Curva final de funcionamiento para el medidor de cuatro electrodos lineales.

Al observar la gráfica de la Figura 42, se puede notar el buen comportamiento del medidor, ya que hay una zona casi lineal para los dos centímetros más cercanos a la plantilla, lo cual ayuda a conocer de una forma más directa el contenido de aire en esa región.

Por otro lado, se puede notar que hay un cambio de aproximadamente 6 [V] en los 4 centímetros más cercanos a la plantilla, esto es mucho más de lo que se esperaba tener en un principio pues al conseguir una diferencia de voltaje tan grande en una altura relativamente pequeña se logra que el medidor tenga una sensibilidad muy grande, lo cual sirve para detectar cualquier variación en cuanto a la cantidad de aire presente en esa zona.

La curva es asintótica con el eje de las abscisas; es decir, si se aumentara el tirante de agua a más de 10 centímetros, llegará un momento en el cual la lectura será de cero volts, sin embargo para el uso práctico no es de interés el si hay o no aire a 10 centímetros de la plantilla pues con ello no se logran evitar los daños causados por la cavitación, y por esta razón, es posible modificar el nivel de directa de la señal para descartar por completo las mediciones por encima de esa altura; es decir, que se tengan cero volts con 10 centímetros de agua, para ello basta con modificar el valor del potenciómetro colocado en la etapa de eliminación del offset.



# 7 • Fuente de Alimentación

---

---

Se va a dedicar un capítulo entero a la fuente de alimentación, no por su complejidad sino para separar toda la parte electrónica correspondiente al medidor, de la electrónica adicional requerida para su polarización.

A lo largo de este capítulo se explicará el por qué de la elección del tipo de fuente empleado y se puntualizará sobre la elección de los elementos electrónicos utilizados para su construcción.

## **7.1. Elección del tipo de fuente.**

El primer factor a considerar para determinar el tipo de fuente que se requiere es el voltaje que se necesitará para polarizar a todos los circuitos integrados y demás elementos electrónicos que conforman al medidor.

Dicho factor lo delimitan los amplificadores operacionales, ya que son los elementos que requieren el mayor voltaje para ser polarizados.

Tanto los LM741 como los TL081 operan perfectamente con un voltaje bipolar de entre 13 [V] y 18 [V], por ello, se decidió fijar el voltaje de polarización en 15 [V], tanto positivos como negativos, de corriente directa.

Otro factor a considerar es que se necesita una fuente que mantenga los mas/menos 15 Volts de forma constante sin fluctuaciones considerables en su salida. Por ello se decidió emplear una fuente regulada.

La eficiencia de la fuente es un factor importante más no contundente para la elección de la fuente, esto se debe a que es indeseable tener pérdidas que se traduzcan en el calentamiento excesivo de algunos componentes de la misma; sin embargo, no es necesario emplear elementos con un alto costo monetario para reducir al mínimo posible dichas pérdidas.

Únicamente se requerirán elementos comerciales de fácil adquisición que permitan una buena operación sin la necesidad de emplear disipadores térmicos de dimensiones mayores a las comerciales.

Los únicos elementos que se decidió emplear en la fuente y que tienen un relativo costo elevado fueron los capacitores de poliéster en lugar de utilizar cerámicos para la etapa de filtrado; esto se debió a que su valor es más exacto y a que se contaba de antemano con dichos componentes.

En el punto siguiente se profundizará sobre los elementos empleados y la construcción de la fuente.

## **7.2. Diseño y construcción.**

Para el diseño de la fuente de polarización empleada, se pensó en primer lugar, en el voltaje con el cual iba a ser alimentado el circuito, para nuestra aplicación, todo el sistema se va a conectar a una toma de corriente alterna estándar en nuestro país, es decir, a 127 [V] de corriente alterna con una frecuencia de 60 [Hz].

El siguiente punto a considerar es el voltaje necesario a la salida de la fuente para polarizar el circuito del medidor de contenido de aire en agua. Como se mencionó previamente, se necesita generar un voltaje bipolar de  $\pm 15$  [V] de corriente directa.

Para lograr conseguir los  $\pm 15$  [V] deseados, se planteó diseñar una fuente lineal bipolar regulada, ya que si se hubiera elegido construir una fuente conmutada, se tendría que haber dedicado más tiempo para el diseño y mucho más dinero para la compra de elementos de conmutación rápida de alta frecuencia. Otro punto a favor de las fuentes lineales sobre las conmutadas, es que las primeras no generan ruido electrónico que puede ser transmitido a través de la línea de transmisión.

La fuente lineal que se diseñó consta de cuatro etapas: transformación, rectificación, filtrado y regulación.

Es importante señalar que las fuentes que se emplearon para ambos medidores de contenido de aire en agua, tanto las dos que necesita el sistema anular como la fuente del sistema lineal de 4 electrodos, son exactamente iguales.

A continuación se explicará cada una de las cuatro etapas empleadas en el circuito de la fuente. Se explicarán las etapas en el orden que sigue la corriente.

### 7.2.1. Etapa de Transformación:

En esta etapa se redujo el voltaje de la línea de transmisión a un voltaje útil.

Para reducir el voltaje se emplearon transformadores con los que se contaba de antemano en el laboratorio, los cuales tienen una relación de transformación igual a 5, esto quiere decir que se tenían 25.4 [V] rms a la salida del transformador, si a la entrada se conectaba directamente la línea. Dicho transformador contaban con una derivación central gracias a la cual fue posible obtener de forma directa  $\pm 18$  [V] pico a pico, valores adecuados para nuestros fines, Figura 43. Lógicamente, el calibre del cable y la construcción misma del transformador estaban diseñados para soportar 3 [A] de corriente sin problemas.

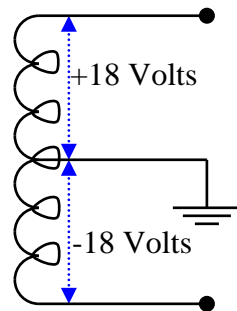


Figura 43. Transformador con derivación central.

### 7.2.2. Etapa de Rectificación:

Por medio de esta etapa se transformó la señal de alterna bipolar en señales alternas unipolares.

Como se contaba ya con dos señales de alterna de 18 [V] pico a pico, gracias a la derivación central del transformador, sólo se necesitaba referenciar cada una de ellas a la misma tierra para obtener dos señales alternas iguales pero de polaridad contraria, una de ellas con valores únicamente positivos, y la otra con valores exclusivamente negativos.

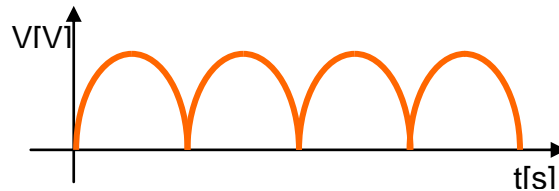
Una vez obtenidas las señales de corriente alterna, opuestas en polaridad, se necesitaba conseguir por algún medio convertir las señales de corriente alterna en señales de corriente continua, y para ello se decidió generar una rectificación mediante un puente de diodos ordinario.

Esta configuración entrega el mismo voltaje pico que un rectificador de media onda, y el voltaje obtenido es más alto que empleando otras configuraciones de rectificación de onda completa, por lo tanto, ésta es una de las formas más eficientes

de rectificar. Además, en la configuración de puente de diodos, los capacitores que se necesitarán posteriormente para el filtrado, serán de menor tamaño que con una rectificación de media onda, permitiendo emplear elementos menos costosos.

Se utilizó un puente rectificador para la sección de voltaje positivo de la fuente y otro para la sección negativa. Por facilidad, se decidió emplear puentes de diodos comerciales, ya que están diseñados para soportar hasta 2 [A] de corriente y voltajes de pico inverso de 200 [V]; además de que físicamente ocupan menos espacio que si se colocan cuatro diodos por separado más las pistas necesarias para unirlos en el circuito impreso.

A la salida de la etapa de rectificación se cuenta con dos señales rectificadas de onda completa. Sin embargo, dichas señales distan mucho de un nivel de corriente continua, Figura 44, y para obtenerlo es necesario agregar una etapa de filtrado.



*Figura 44. Forma de onda a la salida de la Etapa de Rectificación.*

### **7.2.3. Etapa de Filtrado y Regulación:**

Hay diversas formas de eliminar el rizo de una señal; sin embargo, se decidió realizar el filtrado de las señales por medio de capacitores, ya que es la forma más simple y barata de hacerlo.

Gracias a la práctica obtenida durante el estudio de la carrera, elegimos colocar capacitores electrolíticos de 2200 [ $\mu$ F], pues ya se sabía que con este valor de capacitancia era posible reducir el voltaje de rizo existente a la salida de la etapa de rectificación para generar una señal de corriente directa sin variaciones periódicas.

Sin embargo, el voltaje a la salida de la etapa de filtrado presentaba pequeñas variaciones. Para solucionar este inconveniente, se agregó una etapa de regulación, para generar un voltaje de salida constante independientemente de la carga.

En la Figura 45 , es posible visualizar el diseño realizado para la fuente de polarización. Al final del circuito se colocó un regulador de tensión comercial LM7815 para la sección positiva y

un LM7915 para la negativa, un diodo de protección, y tres capacitores que se colocaron siguiendo las recomendaciones establecidas en la hoja de características del regulador de tensión.

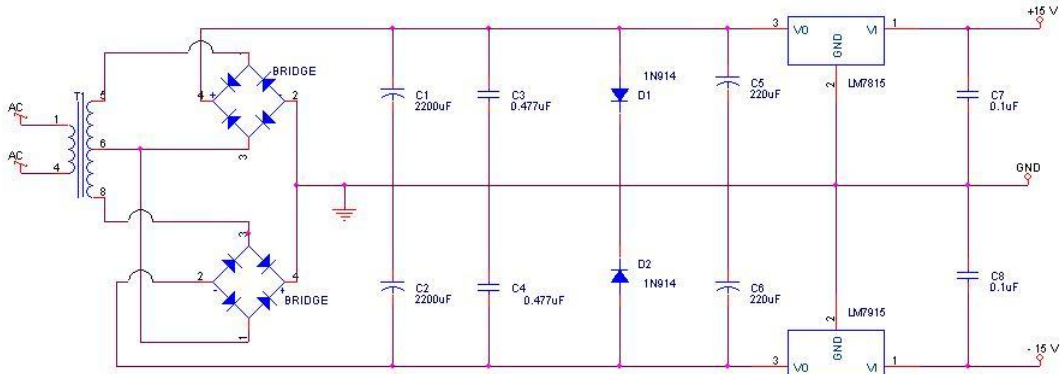


Figura 45. Diagrama de la fuente de polarización diseñada.

Con esto se concluyó el desarrollo e implementación de la fuente de alimentación para poder llevar el circuito de medición de contenido de aire en agua al lugar en donde se deseara instalar.

Con el armado y prueba de la fuente de alimentación en conjunto con el medidor, se terminó la parte experimental de este trabajo de tesis, dejando pendiente el análisis de los resultados y mediciones obtenidas, analizados en el capítulo respectivo, y con ello es posible concluir si se cumplió o no con los objetivos planteados en este trabajo.

# **8. Conclusiones**

---

---

Del desarrollo realizado y retomando los valores generados, se podrá concluir si se cumplió o no con los objetivos planteados al inicio de este trabajo de tesis.

Se diseñó y construyó exitosamente un circuito que entrega una señal de voltaje proporcional a la cantidad de aire que se encuentra en el agua próxima a la plantilla de un canal de demasías, zona de vital interés para Comisión Federal de Electricidad ya que debido a la cantidad de aire con que se cuenta en esa zona, se podrán disminuir de forma eficiente los daños causados por la cavitación, reduciendo al mínimo indispensable la cantidad de aire inyectado por los aireadores para este fin.

Hablando específicamente del medidor con sondas anulares propuestas por la CFE, tomando en cuenta las mediciones estáticas realizadas en el laboratorio del Edificio 12 del Instituto de Ingeniería de la UNAM, se puede concluir que se generó un diseño adecuado para lograr tener una profundidad de penetración de 4 centímetros, la cual nos ayudará a conocer con certeza si se tiene una alta o baja concentración de aire en el agua contenida en los centímetros más cercanos a la sonda, y es casi del doble a la que se tenía con los medidores que tenía previamente CFE.

La calibración del medidor desarrollado se realizó con la mejor precisión posible debido al tiempo limitado que se tenía para la entrega. Sería conveniente que en un futuro se realizara una medición más precisa de la salida obteniendo una gráfica de comportamiento con una mayor cantidad de mediciones e intervalos más reducidos entre ellos. De igual forma, sería conveniente realizar pruebas del medidor inmerso en diversos tipos de agua, con una cantidad diferente de minerales y materia suspendida para obtener una curva de calibración y utilizar la gráfica de interpretación de los voltajes de salida que corresponda al tipo de agua en que se está realizando la medición, evitando con esto tener un corrimiento en las lecturas al multiplicarlas por un factor de corrección.

En cuanto al diseño del circuito electrónico para el prototipo de cuatro electrodos lineales, se consiguió generarlo sin problema basándonos en el principio de funcionamiento del circuito utilizado para la sonda anular, pero realizando algunas modificaciones para obtener una mejor lectura.

Se consiguió de forma adecuada la creación de nuevos electrodos de medición de mejores características que las sondas anteriores. Los nuevos

electrodos diseñados son mucho más pequeños, requieren de una mucho menor cantidad de material para su construcción, disminuyendo el costo de su manufactura y simplificando la sujeción de los mismos en el lugar donde se realizará la medición.

Por todo lo anterior, y por la enorme mejoría encontrada mediante pruebas estáticas en el laboratorio en cuanto a la región de medición (el doble que con las sondas anulares) se puede decir con certeza que el diseño de la nueva sonda de medición con electrodos lineales es más eficiente que el anterior.

Al igual que con las sondas anulares, no se pudo realizar la calibración de forma adecuada. También se recomienda se realicen mediciones estáticas en el laboratorio para ajustar la salida del medidor de la mejor manera posible, generando con ellas una región lineal más definida en la curva de funcionamiento para la zona más cercana a la sonda de medición; sin embargo, gracias al diseño desarrollado, el cual realiza una medición diferencial entre la señal recibida en 2 de sus electrodos, se anulan por completo las variaciones en la medición debidas a las características fisicoquímicas del agua, y con ello, el sensor puede ser colocado en cualquier tipo de agua sin generar la necesidad de multiplicar el resultado leído por un factor de corrección como con el medidor anteriormente diseñado que emplea la sonda de medición con electrodos anulares concéntricos.

Se nos proporcionó la oportunidad de realizar una prueba dinámica de ambos sensores en el Laboratorio de Hidráulica de la CFE en Cuernavaca. En estas pruebas se corroboró que ambos medidores funcionaran adecuadamente en la detección del contenido de aire en agua de acuerdo con las curvas de funcionamiento entregadas. Los medidores superaron las pruebas realizadas; sin embargo, no fue posible obtener una tabla de valores para comparar el funcionamiento de forma estática contra la dinámica por el alto costo de emplear los modelos hidráulicos para las pruebas y porque con el hecho de detectar un nivel de contenido de aire en agua “alto, medio o bajo” era más que suficiente para el personal de la Comisión. Sería conveniente realizar estas pruebas dinámicas nuevamente, tomando los valores de salida del medidor para diferentes flujos y concentraciones de agua; con ello se lograría calibrar el medidor de forma dinámica obteniendo la mejor medición bajo la operación real de los medidores.

# I. Anexos

## Anexo 1:

En este anexo se muestran las tablas correspondientes a las mediciones realizadas para la elección del tamaño y separación de la configuración de cuatro electrodos lineales:

Tabla 9. Voltajes correspondientes a los electrodos de 1 cm. de diámetro separados 0.3 cm. entre sí.

| <b>Electrodos de 1 cm. de diámetro separados entre sí 0.3 cm.</b> |                                      |                        |                        |
|---|--------------------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Tirante del agua [cm]</b>                                      | <b>Voltaje de cada electrodo [V]</b> |                        |                        |
|   | <b>Electrodo 1, V1</b>               | <b>Electrodo 2, V2</b> | <b>Electrodo 3, V3</b> |
| 6   | 4.8                                  | 2.8                    | 2.4                    |
| 5   | 4.9                                  | 2.8                    | 2.4                    |
| 4   | 4.9                                  | 2.8                    | 2.4                    |
| 3   | 5.1                                  | 2.8                    | 2.5                    |
| 2   | 5.2                                  | 3.0                    | 2.8                    |
| 1   | 5.5                                  | 3.2                    | 2.8                    |

Tabla 10 Voltajes correspondientes a los electrodos de 1 cm. de diámetro separados 3.16 cm. entre sí.

| <b>Electrodos de 1 cm. de diámetro separados entre sí 3.16 cm.</b> |                                      |                        |                        |
|--|--------------------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Tirante del agua</b>  | <b>Voltaje de cada electrodo [V]</b> |                        |                        |
|  | <b>Electrodo 1, V1</b>               | <b>Electrodo 2, V2</b> | <b>Electrodo 3, V3</b> |
| 6 cm.  | 4.3                                  | 2.1                    | 2.0                    |
| 5 cm.  | 4.3                                  | 2.1                    | 2.0                    |
| 4 cm.  | 4.4                                  | 2.1                    | 2.0                    |
| 3 cm.  | 4.6                                  | 2.3                    | 2.2                    |
| 2 cm.  | 4.8                                  | 2.4                    | 2.3                    |
| 1 cm.  | 5.0                                  | 2.4                    | 2.3                    |



Tabla 11. Voltajes correspondientes a los electrodos de 1.9 cm. de diámetro separados 0.3 cm. entre sí.

| <b>Electrodos de 1.9 cm. de diámetro separados entre sí 0.3 cm.</b> |                                      |                        |                        |
|---|--------------------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Tirante del agua</b>   | <b>Voltaje de cada electrodo [V]</b> |                        |                        |
|   | <b>Electrodo 1, V1</b>               | <b>Electrodo 2, V2</b> | <b>Electrodo 3, V3</b> |
| <b>6 cm.</b>  | <b>2.9</b>                           | <b>1.6</b>             | <b>1.4</b>             |
| <b>5 cm.</b>  | <b>3.2</b>                           | <b>1.8</b>             | <b>1.5</b>             |
| <b>4 cm.</b>  | <b>2.9</b>                           | <b>1.6</b>             | <b>1.4</b>             |
| <b>3 cm.</b>  | <b>3.0</b>                           | <b>1.8</b>             | <b>1.4</b>             |
| <b>2 cm.</b>  | <b>3.4</b>                           | <b>2.0</b>             | <b>1.6</b>             |
| <b>1 cm.</b>  | <b>3.8</b>                           | <b>2.2</b>             | <b>1.7</b>             |

Tabla 12. Voltajes correspondientes a los electrodos de 1.9 cm. de diámetro separados 1.97 cm. entre sí.

| <b>Electrodos de 1.9 cm. de diámetro separados entre sí 1.97 cm.</b> |                                      |                        |                        |
|--|--------------------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Tirante del agua</b>  | <b>Voltaje de cada electrodo [V]</b> |                        |                        |
|  | <b>Electrodo 1, V1</b>               | <b>Electrodo 2, V2</b> | <b>Electrodo 3, V3</b> |
| <b>6 cm.</b>   | <b>2.6</b>                           | <b>1.4</b>             | <b>1.6</b>             |
| <b>5 cm.</b>   | <b>2.6</b>                           | <b>1.4</b>             | <b>1.6</b>             |
| <b>4 cm.</b>   | <b>2.7</b>                           | <b>1.4</b>             | <b>1.6</b>             |
| <b>3 cm.</b>   | <b>2.8</b>                           | <b>1.5</b>             | <b>1.4</b>             |
| <b>2 cm.</b>   | <b>2.9</b>                           | <b>1.6</b>             | <b>1.4</b>             |
| <b>1 cm.</b>   | <b>3.2</b>                           | <b>1.7</b>             | <b>1.5</b>             |

Tabla 13. Voltajes correspondientes a los electrodos de 3.15 cm. de diámetro separados 0.3 cm. entre sí.

| <b>Electrodos de 3.15 cm. de diámetro separados entre sí 0.3 cm.</b> |                                      |                        |                        |
|--|--------------------------------------|------------------------|------------------------|
| <b>Tirante del agua</b>  | <b>Voltaje de cada electrodo [V]</b> |                        |                        |
|  | <b>Electrodo 1, V1</b>               | <b>Electrodo 2, V2</b> | <b>Electrodo 3, V3</b> |
| <b>6 cm.</b>   | <b>1.6</b>                           | <b>1.0</b>             | <b>0.8</b>             |
| <b>5 cm.</b>   | <b>1.5</b>                           | <b>0.9</b>             | <b>0.7</b>             |
| <b>4 cm.</b>   | <b>1.6</b>                           | <b>1.0</b>             | <b>0.8</b>             |
| <b>3 cm.</b>   | <b>1.7</b>                           | <b>1.0</b>             | <b>0.8</b>             |
| <b>2 cm.</b>   | <b>1.6</b>                           | <b>1.0</b>             | <b>0.8</b>             |
| <b>1 cm.</b>   | <b>1.8</b>                           | <b>1.0</b>             | <b>0.8</b>             |

## Anexo 2:

En el anexo dos, se presentan tablas de cálculos adicionales necesarios para la correcta interpretación de las mediciones mostradas en el anexo anterior.

Tabla 14. Cálculo de las diferencias entre valores máximos y mínimos de los voltajes para cada juego de electrodos.

| Configuración de electrodos                   | $\Delta V_1 = V_{1 \text{ MÁX}} - V_{1 \text{ mín}}$<br>[V] | $\Delta V_2 = V_{2 \text{ MÁX}} - V_{2 \text{ mín}}$<br>[V] | $\Delta V_3 = V_{3 \text{ MÁX}} - V_{3 \text{ mín}}$<br>[V] |
|---|---|---|---|
| 1 cm. de diámetro<br>0.3 cm. de separación    | 5.5 - 4.8 = 0.7   | 3.2 - 2.8 = 0.4   | 2.8 - 2.4 = 0.4   |
| 1 cm. de diámetro<br>3.16 cm. de separación   | 5.0 - 4.3 = 0.7   | 2.4 - 2.1 = 0.3   | 2.3 - 2.0 = 0.3   |
| 1.9 cm. de diámetro<br>0.3 cm. de separación  | 3.8 - 2.9 = 0.9   | 2.2 - 1.6 = 0.6   | 1.7 - 1.4 = 0.3   |
| 1.9 cm. de diámetro<br>1.97 cm. de separación | 3.2 - 2.6 = 0.6   | 1.7 - 1.4 = 0.3   | 1.6 - 1.4 = 0.2   |
| 3.15 cm. de diámetro<br>0.3 cm. de separación | 1.8 - 1.5 = 0.3   | 1.0 - 0.9 = 0.1   | 0.8 - 0.7 = 0.1   |

Tabla 15. Cálculo de los voltajes promedio de los electrodos correspondientes a cada juego de electrodos.

| Configuración de electrodos                   | Promedio de $V_1$ [V] | Promedio de $V_2$ [V] | Promedio de $V_3$ [V] |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 1 cm. de diámetro<br>0.3 cm. de separación    | 5.067                 | 2.900                 | 2.550                 |
| 1 cm. de diámetro<br>3.16 cm. de separación   | 4.567                 | 2.230                 | 2.130                 |
| 1.9 cm. de diámetro<br>0.3 cm. de separación  | 3.200                 | 1.833                 | 1.500                 |
| 1.9 cm. de diámetro<br>1.97 cm. de separación | 2.800                 | 1.500                 | 1.517                 |
| 3.15 cm. de diámetro<br>0.3 cm. de separación | 1.633                 | 0.983                 | 0.783                 |

Tabla 16. Cálculo de las diferencias de voltaje entre cada par de electrodos.

| Configuración de electrodos                   | $\Delta_1 = V_1 - V_2$<br>[V] | $\Delta_2 = V_2 - V_3$<br>[V] | $\Delta_T = \Delta_1 - \Delta_2$<br>[V] |
|---|-------------------------------|-------------------------------|---|
| 1 cm. De diámetro<br>0.3 cm. de separación    | 2.167                         | 0.350                         | 1.797                                   |
| 1 cm. De diámetro<br>3.16 cm. de separación   | 2.337                         | 0.100                         | 2.237                                   |
| 1.9 cm. De diámetro<br>0.3 cm. de separación  | 1.367                         | 0.333                         | 1.034                                   |
| 1.9 cm. De diámetro<br>1.97 cm. de separación | 1.300                         | 0.017                         | 1.283                                   |
| 3.15 cm. de diámetro<br>0.3 cm. de separación | 0.650                         | 0.200                         | 0.430                                   |

### Anexo 3:

En este anexo se presentan los diagramas completos de ambos medidores, cabe mencionar que la segunda parte del circuito es exactamente igual para ambos medidores:

#### Diagrama completo del Medidor Anular:

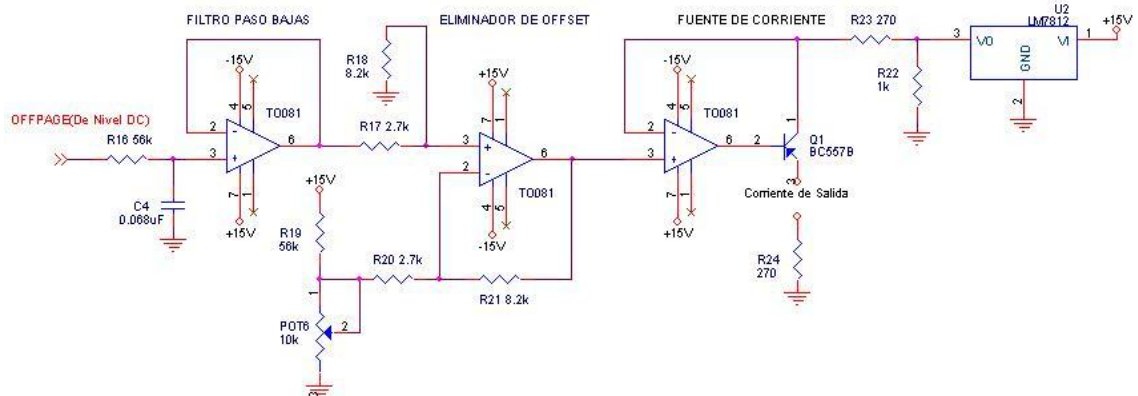
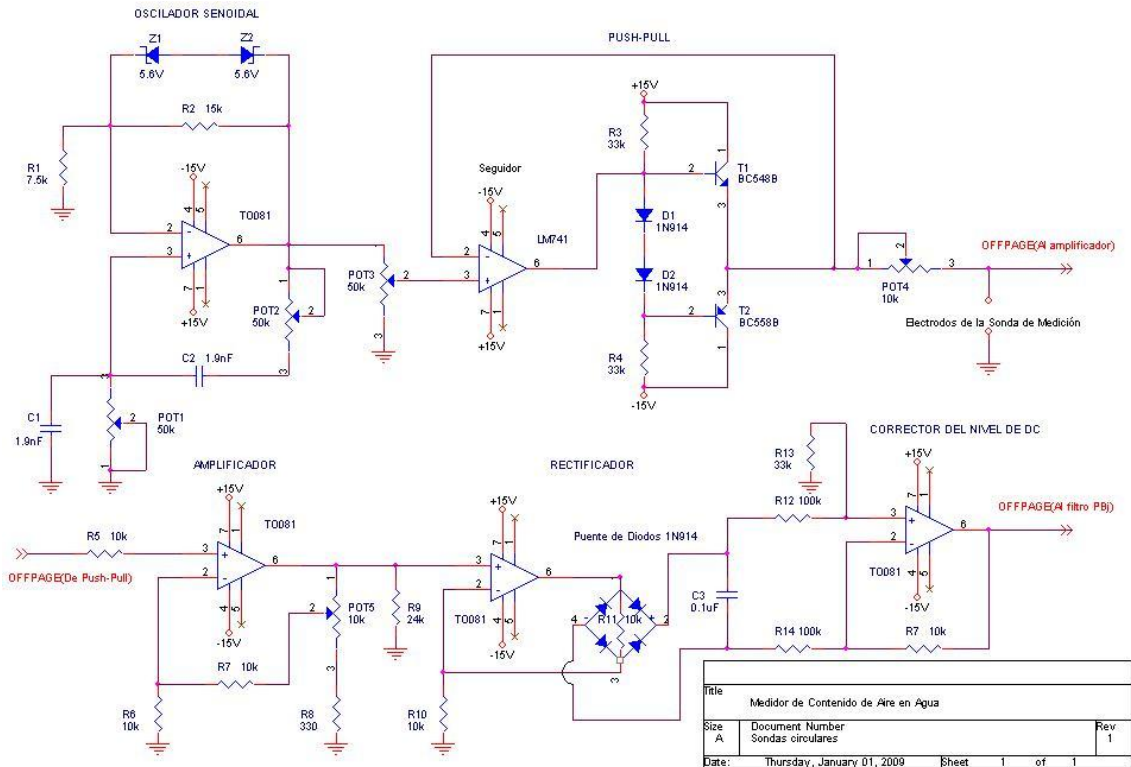
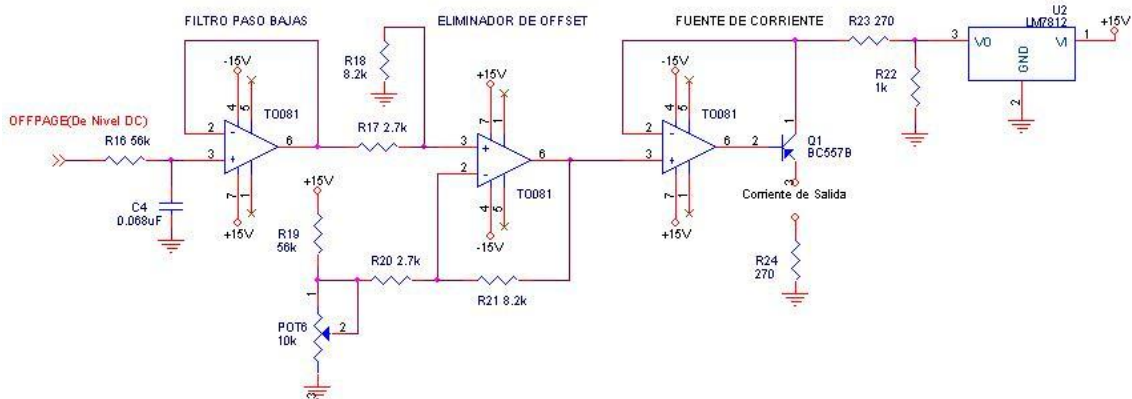
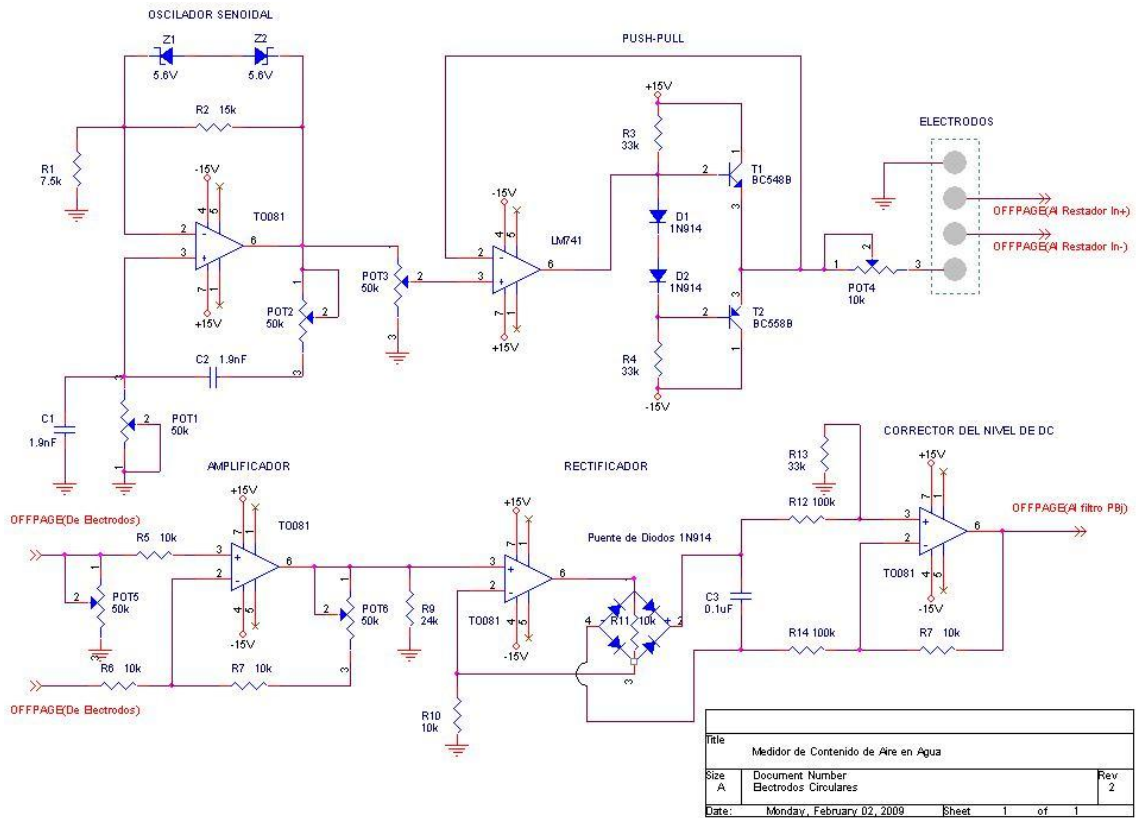


Diagrama completo del Medidor Lineal:

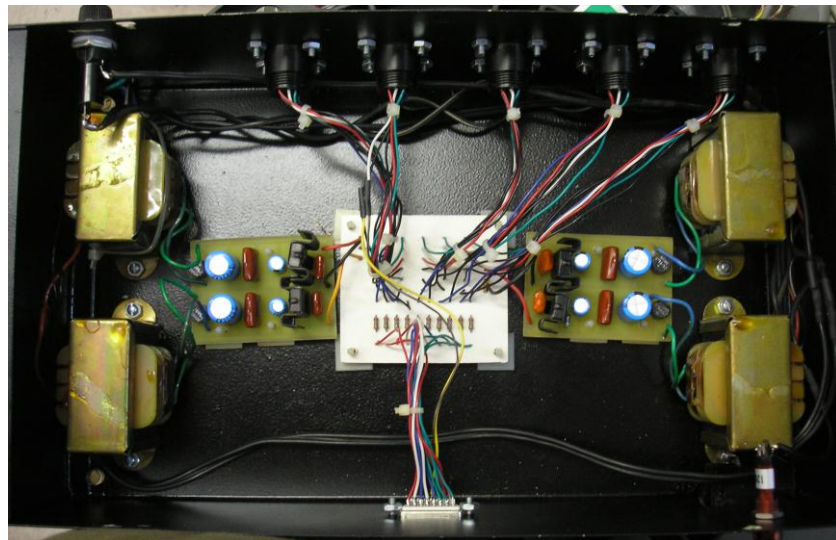


#### **Anexo 4:**

Por último, en este anexo se presentan las fotos de los circuitos armados y los gabinetes que se construyeron para la Comisión Federal de Electricidad:

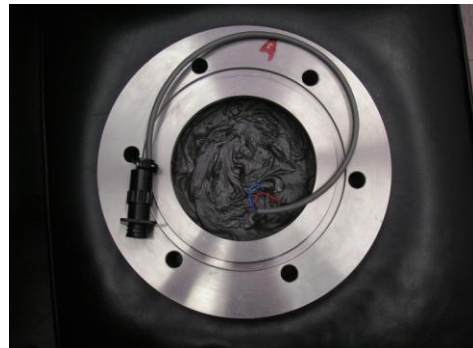
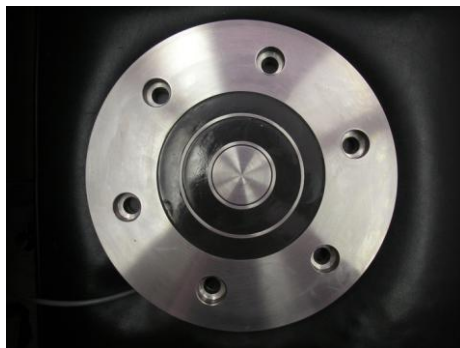
- Gabinete del sistema de dos electrodos anulares concéntricos:

En las fotos puede verse el gabinete de frente, con el conector que se utilizó para polarizar cada uno de los 2 circuitos de medición por cada sonda anular, con el foco indicador del encendido y el interruptor para accionarla, y una vista interna de las dos fuentes bipolares independientes empleadas.



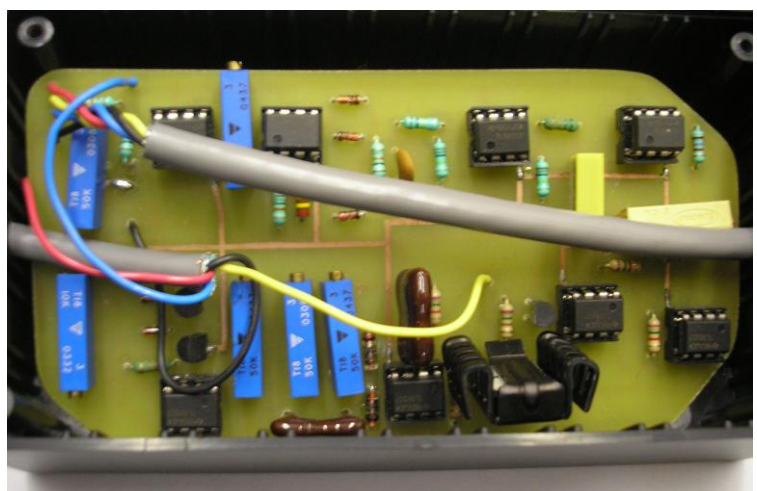
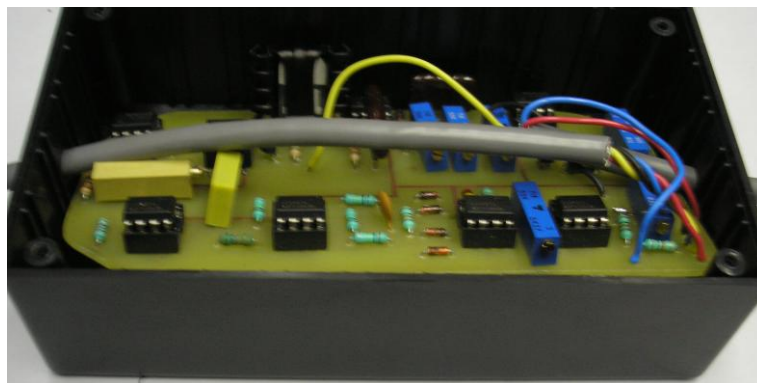
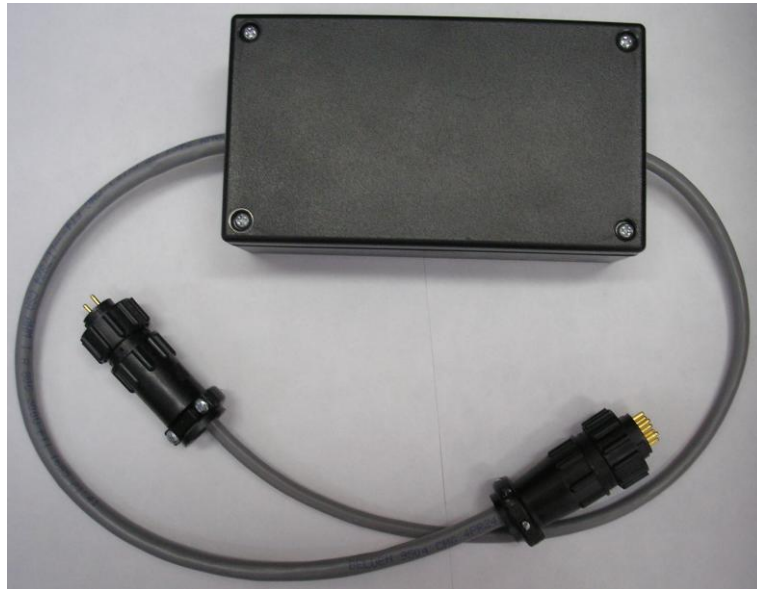
- **Sondas de medición anulares concéntricas:**

En la imagen siguiente se pueden apreciar las 5 sondas anulares ensambladas. Cada una de ellas cuenta con un conector especial para su interconexión con cada medidor de contenido de aire en agua.



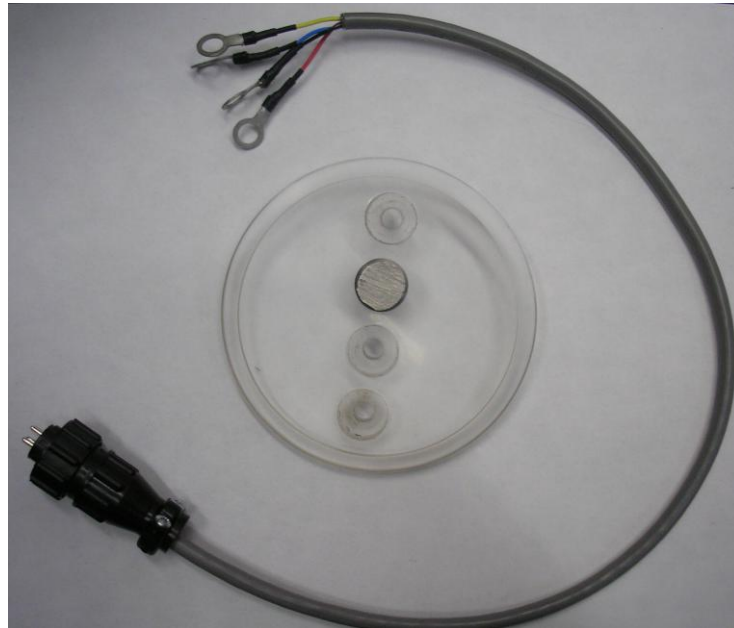
- Medidor de Contenido de aire en agua:

El diseño para el medidor anular y lineal es el mismo, únicamente cambia el circuito impreso del interior de las cajas.



- Electrodo de medición circular alineado:

En la foto puede apreciarse uno de los 4 electrodos montados en la base acrílica diseñada para ellos. También se puede ver el conector diseñado para acoplar la sonda con el medidor.



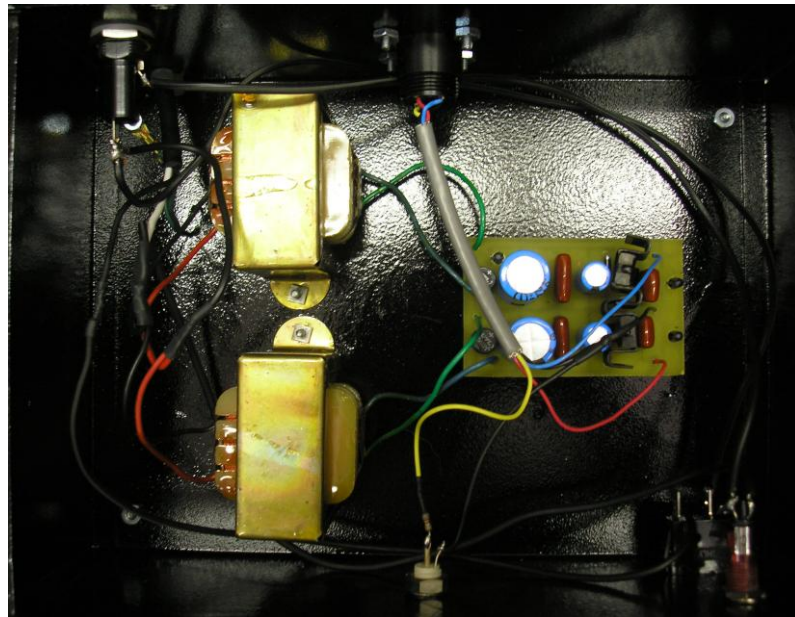
- Gabinete del sistema de cuatro electrodos circulares:

El gabinete diseñado para el prototipo de medidor de cuatro electrodos circulares alineados es más pequeño que el gabinete para el medidor de sondas anulares, ya que en su interior sólo se cuenta con una fuente bipolar de alimentación.

También se puede notar la diferencia en cuanto al puerto de salida. Como en este caso se cuenta sólo con una señal y su tierra, se decidió emplear un conector coaxial para este fin.

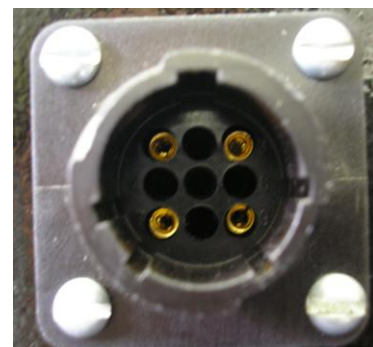






- Conectores empleados para la interconexión del sistema:

Se emplearon conectores de alta resistencia y con seguro de acoplamiento para ambos medidores, lo único que cambió entre uno y otro fue el número de pines útiles de los mismos.



# II. Bibliografía

---

---

## **Libros consultados:**

1. Torres Herrera Francisco.  
Obras Hidráulicas, Ed. Limusa, México D.F., 1987
2. Daily James W., Harleman Donald R.F.  
Dinámica de los fluidos con aplicaciones en la ingeniería, Ed. Trillas, México, 1975
3. Vennard John K., Street Robert L.  
Elementos de Mecánica de Fluidos, Ed. Continental, México, 1979
4. Miyara Federico  
Osciladores Senoidales, Universidad Nacional de Rosario, Argentina, 2004
5. Ruiz Robredo Gustavo  
Electrónica Básica para Ingenieros, Publicaciones Universidad de Cantabria, España, 2001

## **Referencias adicionales:**

6. IEEE Power Engineering Society  
IEEE Guide for the Rehabilitation of Hydroelectric Power Plants, N.Y. Estados Unidos, 2006

## **Tesis consultadas:**

7. García García, Michelle A.  
Simulación numérica cuasi-bifásica de los aireadores de las obras de excedencia en presas  
[http://132.248.9.9:8080/tesdig/ips/entrada.jsp?entrada=Procesados\\_2005/0601603/Index.html](http://132.248.9.9:8080/tesdig/ips/entrada.jsp?entrada=Procesados_2005/0601603/Index.html)
8. Cazares Morales Héctor F.  
Diseño y desarrollo de un medidor de contenido de aire en agua

**Artículos consultados:**

9. Z. C. Feng y L. G. Leal  
Origen: Annual Review of Fluid Mechanics Vol. 29: 201 (Enero 1997)  
Nonlinear bubble dynamics.
10. Roger E.A. Arndt  
Origen: Annual Review of Fluid Mechanics Vol. 34: 143-175 (Enero 2002)  
Cavitation in vortical flows.
11. Kalumuck K.M., Chahine G.L.  
Origen: J. Fluids Eng. 122: 465– 70 (2000)  
The use of cavitating jets to oxidize organic compounds in water.
12. Gong C, Hart DP.  
Origen: J. Acoust. Soc. Am. 5: 1– 8 (1998)  
Ultrasound induced cavitation and sonochemical yields.
13. Saidarriaga J., Navarrete M., Galeano L.  
Origen: Revista de Ingeniería Uniandes (1992)  
Aireación de flujos de alta velocidad, una metodología alterna para el diseño de aireadores.

**Páginas de Internet consultadas:**

14. [http://www.unicrom.com/Tut\\_push-pull.asp](http://www.unicrom.com/Tut_push-pull.asp)