



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA LA
DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE AIRE EN AGUA
EN MODELOS HIDRÁULICOS**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECATRÓNICO

PRESENTA

JOSÉ ALBERTO ORTIZ GUTIÉRREZ



DIRECTOR DE TESIS: ING. RODOLFO PETERS LAMMEL

MÉXICO, D.F.

2007



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mi papá, José Antonio.
A mi mamá, Alejandra.
A mis hermanos, Rodrigo
Mónica y Ramón.
A Neki

AGRADECIMIENTOS

A mi papá, gracias por haber sido mi ejemplo a seguir.

A mi mamá, gracias por seguir adelante en los momentos difíciles.

A mis hermanos: Rodrigo, Mónica y Ramón, gracias por estar siempre a mi lado.

A toda mi familia, gracias por su apoyo y en especial a mi abuelita Yola por abrirme las puertas de su casa durante este tiempo y a Neki por llenar nuestras vidas de alegría.

Al Ing. Rodolfo Peters Lammel, por su guía en el desarrollo de este trabajo, pero sobre todo por su amistad.

A mis sinodales, por dedicar parte de su valioso tiempo a la revisión de esta tesis.

A mis amigos, en especial al Ing. Alejandro Domínguez Castanedo, por que sin su ayuda, este trabajo no hubiera sido posible.

A todas las personas del departamento de Instrumentación del Instituto de Ingeniería, a mis maestros y compañeros de la carrera, gracias por sus enseñanzas y amistad.

A mi universidad, POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	5
I. CONCEPTOS GENERALES	
1.1 Conductividad eléctrica	8
1.2 Electrólisis	10
1.3 Cavitación	10
II. MEDIDOR DE CONTENIDO DE AIRE EN AGUA	
2.1 Descripción general	12
2.2 Fuente de voltaje	15
2.3 Oscilador senoidal	16
2.3.1 Puente de Wien	17
2.4 Push – Pull	19
2.5 Amplificador	21
2.6 Rectificador	23
2.7 Nivel de DC	25
2.8 Filtro	26
2.9 Offset	28
2.10 Fuente de corriente	29
2.11 Electrodo	31
III. PROTOTIPO PARA EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA	
3.1 Similitudes	35
3.2 Restador	36
3.3 Electrodo	37
IV. RESULTADOS	
4.1 Medidor de contenido de aire en agua	44
4.1.1 Calibración	44
4.1.2 Pruebas	46
4.1.3 Gráficas	48
4.2 Prototipo	49
4.2.1 Calibración	49
4.2.2 Pruebas	49
4.2.3 Gráficas	51
4.3 Comparación	52
CONCLUSIONES	54
RECOMENDACIONES	56
APENDICES	57
BIBLIOGRAFÍA	60

INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es describir el diseño y desarrollo de un dispositivo capaz de determinar el contenido de aire en agua a petición de la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.) al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (U.N.A.M.).

La Comisión necesita este dispositivo para colocarlo en el vertedor de la planta hidroeléctrica de “El Cajón” y así poder determinar el contenido de aire en el agua que pasa por éste, después de que cierta cantidad de aire es inyectada en el flujo de agua por medio de los aireadores.



Planta hidroeléctrica “El Cajón”

El vertedor de una planta hidroeléctrica es el canal por el cual el agua excedente de la presa es desalojada cuando se llega a un nivel crítico de la capacidad nominal de la presa.

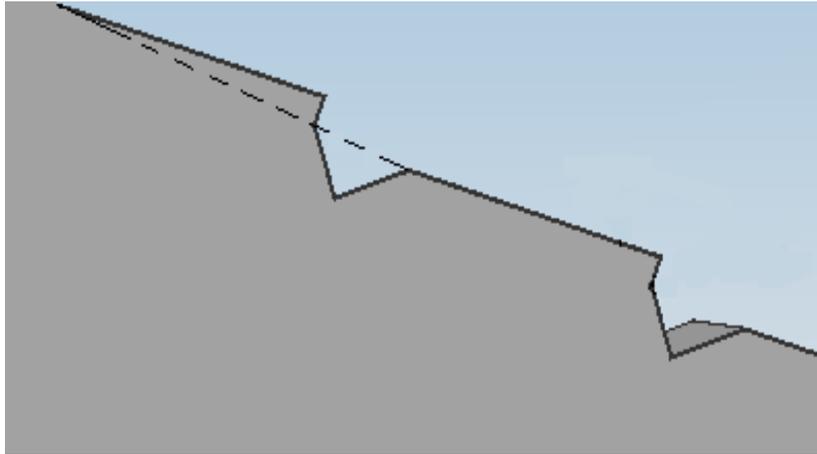


Vertedor de la planta hidroeléctrica “El Cajón”

Las dimensiones del vertedor son aproximadamente 800 metros de largo y 91 metros de ancho, por lo que la cantidad de agua que pasa por éste es muy grande. Hablamos de gastos aproximados de 14,864 metros cúbicos por segundo a máxima capacidad y gastos promedio de 5,000 metros cúbicos por segundo y tirantes de hasta 4 metros de altura y velocidades promedio de 46 metros por segundo. Debido a esto, la superficie por la que corre el agua, llega a desgastarse y en ocasiones es tal el desgaste, que se forman depresiones o fisuras de dimensiones considerables.

La medida que tomó la C.F.E. para minimizar el desgaste en el vertedor, es la implementación de aireadores a lo largo de éste. La función de los aireadores es inyectar aire al flujo de agua en su parte más cercana a la plantilla y de esta forma crear una capa de aire entre el agua y la superficie del vertedor. Por diferencia de densidades el aire tiende a subir a través del agua, realizándose una mezcla aire – agua que no es constante en su proporción por que a lo largo del trayecto el aire inyectado sale del agua y se incorpora a la atmósfera.

Por esta razón se incorporaron aireadores cada 100 metros, asegurando así que en el flujo de agua haya por lo menos un 4 por ciento de aire en todo el trayecto del vertedor.



Aireador.

Ya tomada esta medida preventiva, lo que se quiere hacer es monitorear el contenido de aire en el agua en diferentes puntos de la plantilla, colocando cada 25 metros un dispositivo de medición y de esta forma corroborar que el diseño de los aireadores es correcto, para su implementación en plantas hidroeléctricas que se desarrollen posteriormente.

También se va a describir en este trabajo, el desarrollo y diseño de un prototipo de medidor de contenido de aire en agua para el laboratorio de hidráulica de la C.F.E. con ubicación en Cuernavaca, Morelos.

CAPÍTULO 1

CONCEPTOS GENERALES

1.1 CONDUCTIVIDAD

En este primer capítulo voy a explicar algunos conceptos que son necesarios conocer, para explicar el funcionamiento del medidor de contenido de aire en agua.

Quiero comenzar hablando de la conductividad eléctrica del agua, por que es el principio de funcionamiento del medidor desarrollado que funciona de la misma forma que un conductímetro.

La conductividad eléctrica se define como la capacidad que tienen las sales inorgánicas en solución (electrólitos) para conducir la corriente eléctrica. El agua pura prácticamente no conduce la corriente, sin embargo el agua con sales disueltas conduce la corriente eléctrica de mejor manera. Los iones cargados positiva y negativamente son los que conducen la corriente y la cantidad conducida dependerá del número de iones presentes y de su movilidad. En la mayoría de las soluciones acuosas, entre mayor sea la cantidad de sales disueltas, mayor será la conductividad.

Temperatura de la muestra 25 °C	Conductividad, $\mu\text{S}/\text{cm}$
Agua ultra pura	0.05
Agua de alimentación a calderas	1 a 5
Agua potable	50 a 100
Agua de mar	53000

Valores de conductividad de algunas muestras típicas.

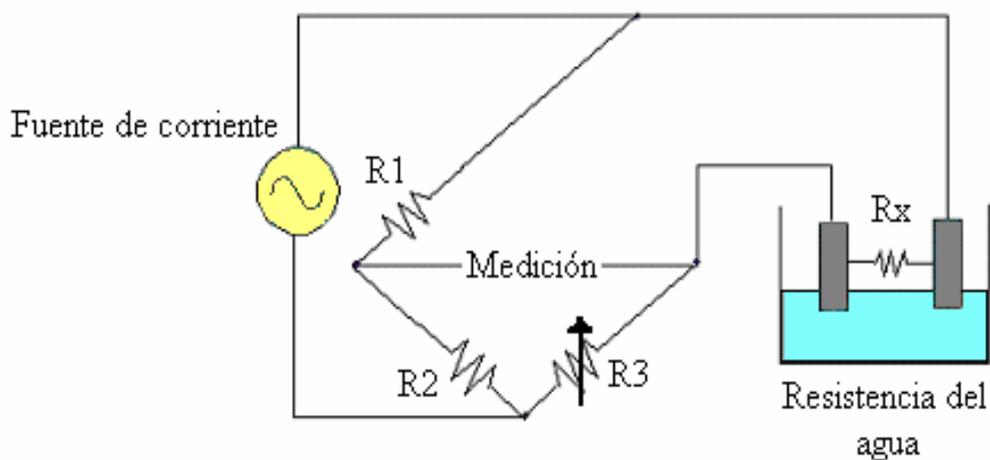
Un aumento en la temperatura, disminuye la viscosidad del agua y permite que los iones se muevan más rápidamente, conduciendo más la electricidad.

Este efecto de la temperatura es diferente para cada ion pero típicamente para soluciones acuosas diluidas, la conductividad varía de 1 a 4 % por cada grado centígrado.

La conductancia eléctrica es el recíproco de la resistencia que se mide en ohms, del agua. Es decir que el agua presenta una oposición al paso de la corriente eléctrica a lo que se llama resistencia, la cual puede ser medida. La solución agua – sales inorgánicas, se comporta como un conductor eléctrico donde se pueden aplicar las leyes físicas de la resistencia eléctrica. Las unidades, en el sistema internacional, de la conductancia eléctrica son siemens / m.

Para realizar la medición de la conductancia se puede hacer mediante un puente de Wheatstone, por medio del cual se puede medir la resistencia del agua y sacando su valor recíproco obtener el valor de la conductancia.

En la siguiente figura, las resistencias R1 y R2 son fijas y su valor va de acuerdo con el intervalo de conductancia que se quiere medir. La resistencia Rx es la que proporciona la solución a la cual se le va a medir la conductancia, en nuestro caso el agua de la presa. La resistencia R3 se varía en forma continua hasta poner en equilibrio el puente.



Puente de Wheatstone.

1.2 ELECTRÓLISIS

Siendo la conductividad eléctrica la propiedad empleada en el principio de funcionamiento que se va a utilizar para el medidor de contenido de aire en agua, ahora es turno de explicar un fenómeno que se podría presentar en nuestro dispositivo y más específicamente en los electrodos de éste y como lo vamos a evitar.

La electrólisis consiste en la descomposición mediante una corriente eléctrica de sustancias ionizadas denominadas electrólitos. Se aplica una corriente eléctrica continua mediante un par de electrodos conectados a una fuente de alimentación eléctrica y sumergidos en el agua. El electrodo conectado al polo negativo se conoce como cátodo y el conectado al positivo se conoce como ánodo. Cada electrodo atrae a los iones de carga opuesta ocurriendo así una reacción de oxidación – reducción.

En nuestro caso, no vamos a usar una fuente de corriente eléctrica continua, lo cual nos ayuda a evitar la electrólisis y el desgaste de nuestros electrodos de medición por la oxidación.

1.3 CAVITACIÓN

Como se comentó anteriormente la plantilla del vertedor sufre daños y la razón principal es la presencia de la cavitación.

La cavitación o aspiración en vacío es un efecto hidrodinámico que se produce cuando el agua o cualquier otro fluido pasa a gran velocidad por una arista afilada, produciendo una descompresión del fluido. Puede ocurrir que se alcance la presión de vapor del líquido de tal forma que las moléculas que lo componen cambian inmediatamente a fase de vapor, formándose burbujas o, más correctamente, cavidades. Las burbujas formadas viajan a zonas de mayor presión e implotan (el vapor regresa a la fase líquida de manera súbita, aplastándose bruscamente las burbujas) produciendo una estela de gas y un rápido desgaste de la superficie que origina este fenómeno.

La implosión causa ondas de presión que viajan en el líquido. Éstas pueden disiparse en la corriente del líquido o pueden chocar con una superficie. Si la zona donde chocan las ondas de presión es la misma, el material tiende a debilitarse metalúrgicamente y se inicia una erosión que, además de dañar la superficie, provoca que ésta se convierta en una zona de mayor pérdida de presión y por ende de mayor foco de formación de burbujas de vapor.

Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una pared sólida cuando implosionan, las fuerzas ejercidas por el líquido al aplastar la cavidad dejada por el vapor dan lugar a presiones localizadas muy altas, ocasionando picaduras sobre la superficie sólida.

El proceso físico de la cavitación es casi exactamente igual que el que ocurre durante la ebullición. La mayor diferencia entre ambos consiste en cómo se efectúa el cambio de fase. La ebullición eleva la presión de vapor líquido por encima de la presión ambiental local para producir el cambio a fase gaseosa, mientras que la cavitación es causada por una caída de la presión local por debajo de la presión del vapor.

Para que la cavitación se produzca, las burbujas necesitan una superficie que facilite su formación. Esta superficie puede ser la pared de un contenedor o depósito, impurezas del líquido o cualquier otra irregularidad. El factor más determinante en cómo se produce la cavitación es la temperatura del líquido. Al variar la temperatura del líquido varía también la presión de vapor de forma importante, haciendo más fácil o difícil que para una presión local ambiente dada la presión de vapor caiga a un valor que provoque cavitación.

La cavitación se presenta también en el fondo del vertedor. El agua y el aire presentes en el flujo son sometidos a cambios de presión dando lugar este último a burbujas que, con la fuerza del agua, se descomponen en tamaños microscópicos, saliendo disparadas a gran velocidad. Su importancia radica en la constancia y repetición del fenómeno, lo que favorece el desgaste de la plantilla.

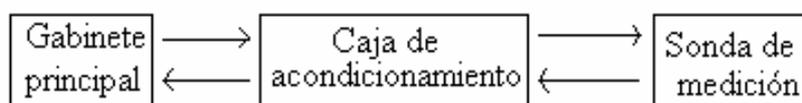
CAPÍTULO 2

MEDIDOR DE CONTENIDO DE AIRE EN AGUA

2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

Ahora que conocemos el principio de funcionamiento del dispositivo, así como algunos conceptos necesarios para entender su funcionamiento, podemos comenzar de lleno a describir las partes que integran el medidor de contenido de aire en agua, pero antes de hacer esto es mejor hacer una pequeña reseña de lo que se va a desarrollar, enlistar las partes o bloques que integran nuestro circuito y platicar un poco de los electrodos de medición para que más adelante, cuando se mencione alguna de las partes o elementos que lo integran, se entienda mejor a que se refiere.

Los elementos del medidor de contenido de aire en agua van a estar distribuidos de la siguiente manera: un gabinete principal, una caja acondicionadora y una sonda de medición.



En el gabinete principal se encuentran las fuentes de alimentación (2), los conectores hembra de ocho pines que conectan el gabinete principal con las cajas de acondicionamiento (5), un conector DB15 en el cual se encuentran las señales de salida de nuestro medidor listas para realizar una adquisición de datos, la clavija que conecta el gabinete a la línea (127 volts), un botón de encendido y apagado, un foco indicador de encendido, y un fusible. Véase apéndice 1.

Una caja de acondicionamiento contiene dos circuitos impresos, cada uno corresponde a un anillo de medición. Aquí también encontramos todos los elementos que constituyen el medidor de contenido de aire en agua que se describen en este capítulo. También cuenta con un conector macho de ocho pines

que se conecta al gabinete principal y un conector macho de tres pines que se conecta a la sonda de medición. Véase apéndice 2.

Más adelante se verán detalladamente las sondas de medición, pero por ahora basta con mencionar que están compuestas por dos anillos de medición concéntricos de diferente diámetro y un elemento central en donde se inyecta la señal senoidal y que se comparte para los dos anillos.

Ya teniendo estas bases, necesarias para entender algunas cuestiones que se van a explicar más adelante, se va a hacer una descripción general del circuito ayudándonos por el siguiente diagrama de bloques:



Diagrama de bloques del medidor y del prototipo.

El primer bloque corresponde al oscilador senoidal, por medio del cual se obtendrá la señal de alterna que se necesita para que nuestro dispositivo funcione.

Esta señal, antes de ser inyectada al elemento central de la sonda de medición debe pasar por una etapa de amplificación en corriente que es el segundo bloque.

Es aquí donde la señal pasa a la sonda de medición por medio de su elemento central y debido a la conductancia eléctrica del agua, la señal se transporta a través de ésta y los anillos de medición concéntricos la reciben, cerrando así el circuito. Hasta este punto un solo circuito es capaz de generar la señal y mandarla a los dos anillos pero de aquí en adelante es necesario que la señal que pasa por cada anillo sea independiente, así que los siguientes bloques forman un circuito que se debe repetir por cada anillo.

El tercer bloque corresponde a la etapa de amplificación de voltaje, esta etapa es necesaria, pues en este punto nuestra señal ya pasó por el agua a través de los electrodos de medición y esto atenúa dicha señal por lo que hay que amplificarla.

Después de la amplificación viene la etapa de rectificación, en este bloque lo que se quiere lograr es obtener una señal de corriente directa partiendo de la señal de alterna que tenemos después de la amplificación. El quinto bloque corresponde al nivel de DC, donde después de la rectificación, las salidas de éste son restadas, de forma que se tiene una señal de corriente directa con menos rizados presentes y con un offset menor.

Para que la señal que tenemos quede lista, es necesario hacerla pasar por una etapa de filtrado, para que cualquier señal de ruido o cualquier rizo existente en nuestra señal, sean eliminados de ésta.

El séptimo bloque es un corrector de offset. Es decir que gracias a esta parte de nuestro circuito podemos hacer que nuestro nivel de DC se encuentre en un valor de 0 V en su nivel más bajo para que se pueda tomar como referencia.

Por último se colocó una fuente de corriente. Debido a que el medidor de contenido de aire en agua se coloca a lo largo del vertedor y el análisis de la señal que se obtiene se va a realizar a varios cientos de metros de distancia, se pueden presentar pérdidas si se transmite la señal en voltaje pero si nuestra señal de la medición la transformamos en una señal de corriente y ya en el lugar donde se va a analizar la señal, la volvemos a convertir a una señal de voltaje lista para su análisis, las pérdidas se reducen sustancialmente.

2.2 FUENTE DE VOLTAJE

Fue necesario desarrollar una fuente de voltaje que fuera capaz de energizar a todos los elementos del circuito. De esta forma se diseñó una fuente bipolar de ± 15 volts. Ya en el dispositivo final, se necesitó colocar en el gabinete principal, dos fuentes iguales para poder alimentar los circuitos de los dos anillos de medición, cuya alimentación es independiente entre sí.

La razón de utilizar fuentes bipolares es que era necesario polarizar los circuitos integrados que se utilizan en el desarrollo del dispositivo.

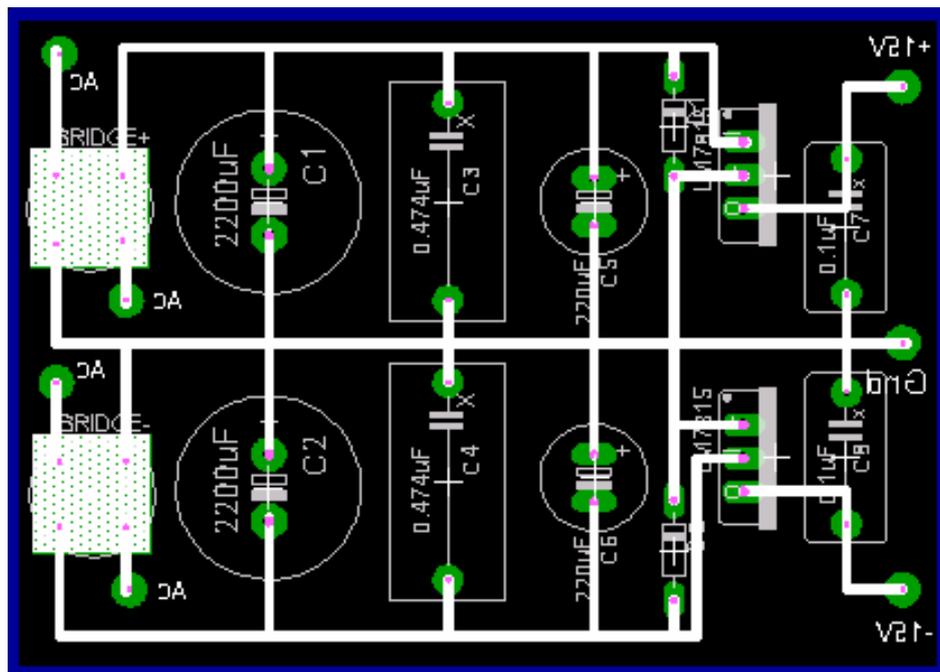
La fuente cuenta con dos transformadores de 127V a 24V (uno para la parte positiva y el otro para la parte negativa).

Después del transformador se colocó una etapa de rectificación, la cual transforma la corriente alterna que suministra la línea y el transformador, a corriente continua. Esto se hizo por medio de un puente de diodos el cual convierte la señal de AC en un tren de pulsos.

Después de la etapa de rectificación viene la etapa de filtrado. En esta etapa se transforma la señal que proviene del puente de diodos a una señal de DC, la cual aún tiene ondulaciones no deseadas llamadas rizados. Esta etapa la conforman tres capacitores en paralelo de 2200 μF , 0.47 μF y 220 μF respectivamente.

Después de la etapa de filtrado se colocó un diodo y un regulador LM7815 en la parte positiva de la fuente y un 7915 en la parte negativa. Así podemos asegurar que tenemos los ± 15 volts necesarios. Después se agregó un capacitor de $0.1 \mu\text{F}$ para evitar posibles oscilaciones del regulador.

Con el diseño terminado de la fuente se realizó el circuito impreso que se presenta a continuación.



Circuito impreso de la fuente de alimentación.

2.3 OSCILADOR SENOIDAL

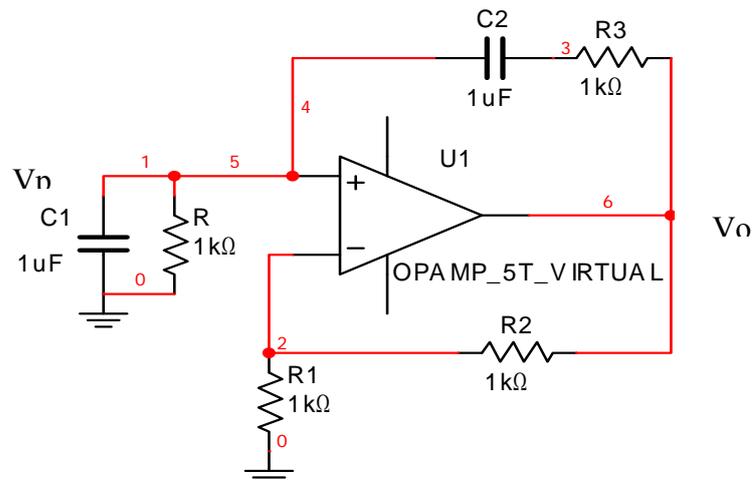
Como se comentó anteriormente, la variación de la conductividad eléctrica es el principio de funcionamiento del dispositivo y básicamente lo que tenemos que hacer es medir la resistencia del agua. Se podría lograr esto utilizando un aparato parecido a un multímetro comercial pero se podría presentar el fenómeno que se explicó anteriormente de la electrólisis. Para evitar que se presente la electrólisis y que se desgasten nuestros electrodos de medición, vamos a incorporar un oscilador senoidal en nuestro dispositivo.

Utilizando corriente alterna en lugar de corriente directa se reducen los efectos de la electrólisis.

Se utilizó un oscilador senoidal por que este tipo de onda es una de las formas de onda fundamentales y por su uso en diferentes aplicaciones como señal de prueba, de referencia o como señal portadora.

2.3.1 PUENTE DE WIEN

El circuito que se utilizó para generar la señal deseada fue el oscilador de puente de Wien. Es un circuito que utiliza los amplificadores operacionales como principio de funcionamiento.



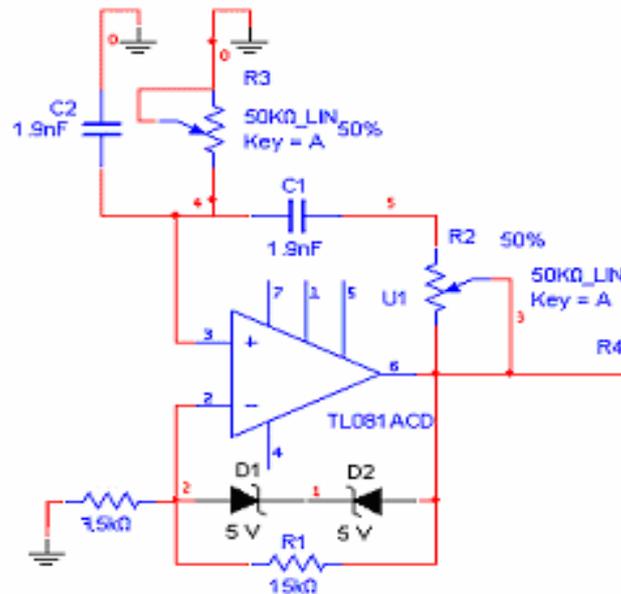
Oscilador de puente de Wien

En este circuito se emplea tanto realimentación negativa, a través de R2 y R1, como retroalimentación positiva, a través de los circuitos RC en serie y en paralelo y si se utilizan los mismos valores en los componentes de los circuitos RC se simplifica su análisis y su empleo. Este circuito se puede ver como un amplificador no inversor que amplifica a V_p guardando la relación que se muestra a continuación:

$$A = V_o / V_p = 1 + (R_2 / R_1)$$

Si se cumple con la condición de que $R_2 / R_1 = 2$ se alcanza la estabilidad neutral, debido a que las realimentaciones positiva y negativa se aplican en cantidades iguales formando un puente balanceado.

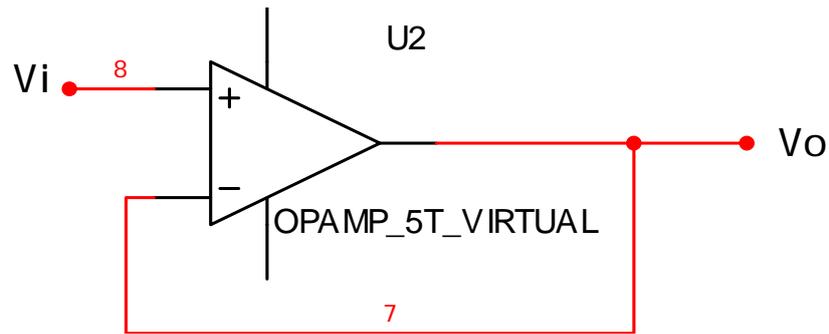
En nuestro circuito oscilador agregamos un diodo para controlar el valor de R2. En niveles de señal bajos los diodos están apagados, por lo tanto no tienen ningún efecto, pero cuando la oscilación va creciendo, los diodos son llevados de forma gradual a la conducción en medios ciclos alternados.



Oscilador terminado.

Como se muestra en la figura anterior, se colocaron dos potenciómetros en el circuito. Estos potenciómetros nos permiten variar la frecuencia y la amplitud de nuestra señal, para alcanzar los valores deseados. Utilizamos una frecuencia de 5 kHz y una amplitud de 14.5 volts. El valor de la frecuencia lo planteamos nosotros simplemente para que fuera mayor a los 60 Hz de la línea de alimentación para evitar cualquier imprevisto y la amplitud se escogió al hacer varias pruebas, pues con esa amplitud de señal, nuestro dispositivo se comportaba de mejor manera.

A continuación colocamos un amplificador operacional con configuración de seguidor para acoplar impedancias.



Configuración de un seguidor.

El seguidor tiene una ganancia unitaria pero la impedancia de entrada y de salida son diferentes. Por ejemplo el 741 tiene una impedancia de entrada de $2 \times 10^{10} \Omega$ y la impedancia de salida es de $3.7 \times 10^{-4} \Omega$.

2.4 PUSH – PULL

Ahora que tenemos la señal senoidal que necesitamos para nuestro dispositivo, es necesario que realicemos una amplificación de corriente. Esta amplificación es necesaria por que nuestra señal debe pasar del elemento central de la sonda de medición a los anillos de medición y el conductor en dicho caso es el agua, por lo que para que la señal viaje de mejor manera, debemos amplificar la corriente de nuestra señal senoidal para que sin importar la resistencia que presente el agua, la conductividad sea buena.

Como la resistencia asociada al agua varía dependiendo de las sales disueltas en ella, como de la temperatura y presión de cada lugar, en vez de tener que variar nuestro circuito para cada caso, amplificamos la corriente de tal forma que aun que la resistencia sea pequeña, al contar con una corriente mayor, nuestro voltaje sea lo suficientemente grande para que se detecte la señal en los electrodos.

Esto lo logramos utilizando un amplificador de potencia o push – pull. Es un amplificador que utiliza dos transistores y cada uno de ellos se encarga de amplificar una sola fase de la onda de entrada. Cuando un transistor esta en funcionamiento el otro esta en corte y viceversa.

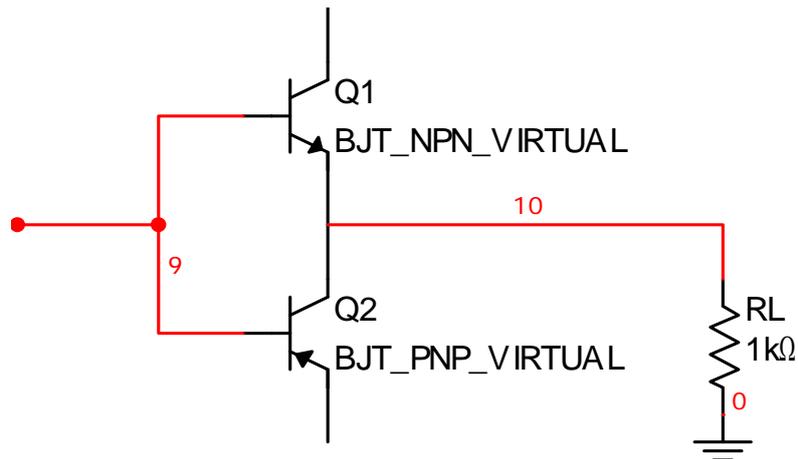


Diagrama de push – pull

Normalmente un amplificador emisor común se utiliza para amplificar señales pequeñas, pero en nuestra configuración, la tensión de la señal de salida tiene prácticamente la misma amplitud que la señal de entrada (ganancia unitaria) y la misma fase.

Nuestro amplificador tiene dos transistores, uno NPN y otro PNP de las mismas características. La señal de entrada llega a la base de ambos transistores y el transistor Q1 tendrá polarización directa en los semiciclos positivos y a través de la resistencia de carga aparecerá una señal que está en fase con la entrada. En los ciclos negativos el transistor Q1 se pone en corte y no aparecerá una señal de salida.

El transistor Q2 tendrá polarización directa en los semiciclos negativos y a través de la resistencia de carga aparecerá una señal que esta en fase con la entrada. En los ciclos positivos el transistor Q2 se pone en corte y no aparecerá una señal de salida.

Para evitar que la onda de salida se distorsione debido a la caída de tensión de 0.7 volts que hay entre la base y el emisor de los transistores Q1 y Q2 (distorsión de cruce) ponemos entre las bases de dichos transistores un par de diodos como se muestra en la siguiente figura:

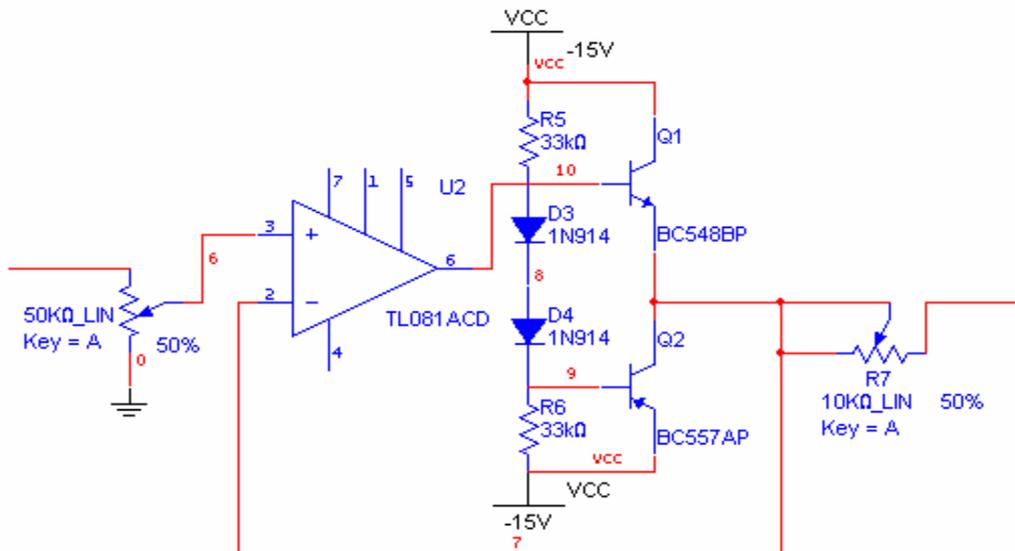


Diagrama de push – pull con diodos

Estos diodos se colocan para polarizar a los transistores de salida con corrientes de polarización baja pero suficientes para que su punto de trabajo esté en la región lineal. De este modo el diodo D3 hace que el transistor Q1 esté en la región lineal con una corriente de colector baja y lo mismo sucede a Q2 con el diodo D4, es decir que ambos transistores conducen, pero cuando se aplica nuestra señal senoidal a la entrada de nuestro amplificador, sucede lo que se explicó con anterioridad, que un transistor está en la región lineal mientras el otro está en corte.

2.5 AMPLIFICADOR NO INVERSOR

Una vez que la señal pasó por el agua, regresa a nuestro circuito a través de los electrodos de medición, pero la amplitud de esta señal es muy pequeña, por lo que necesitamos amplificarla para poder ver claramente los cambios de nivel que sufre al variar la cantidad de aire y agua.

Para que la amplitud de nuestra señal atenuada por el agua aumente, lo que hicimos fue utilizar un amplificador operacional con configuración de amplificador no inversor.

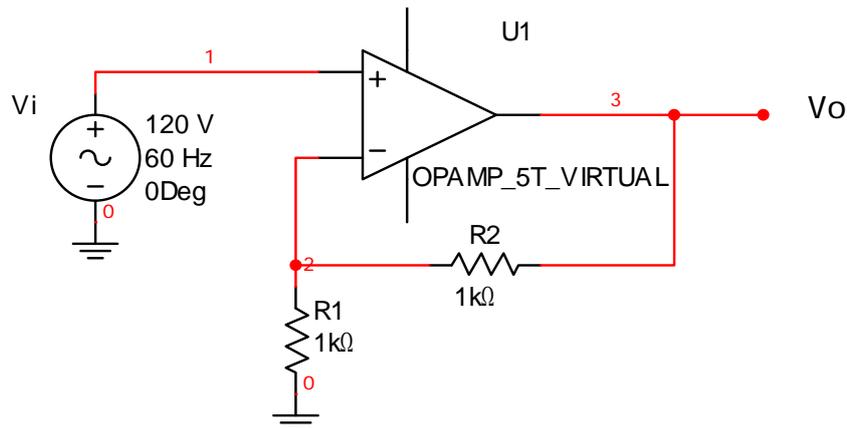


Figura amplificador no inversor.

La señal de entrada de nuestro amplificador es la señal senoidal atenuada. A la salida vamos a tener una señal en fase a la original pero con una mayor amplitud.

La señal de entrada se amplifica según un factor llamado ganancia. Este factor es un valor que al multiplicarlo por la señal de entrada nos da la amplitud de la salida. Este factor está directamente relacionado con los valores de las resistencias R1 y R2 como se muestra a continuación:

$$\text{Ganancia} = A = 1 + (R2 / R1)$$

Por lo que el voltaje de salida (V_s) es igual al voltaje de entrada (V_i) multiplicado por el factor de ganancia (A).

Con esta configuración obtenemos un factor de ganancia que es constante, pero como en nuestro caso la señal de V_i puede atenuarse de diferente forma dependiendo de las características del agua por donde pasa, por eso colocamos en la realimentación, un divisor de voltaje con una resistencia fija y una resistencia variable. De este modo, aun que las características del agua cambien, se puede realizar un ajuste para que la amplitud de V_s sea la deseada.

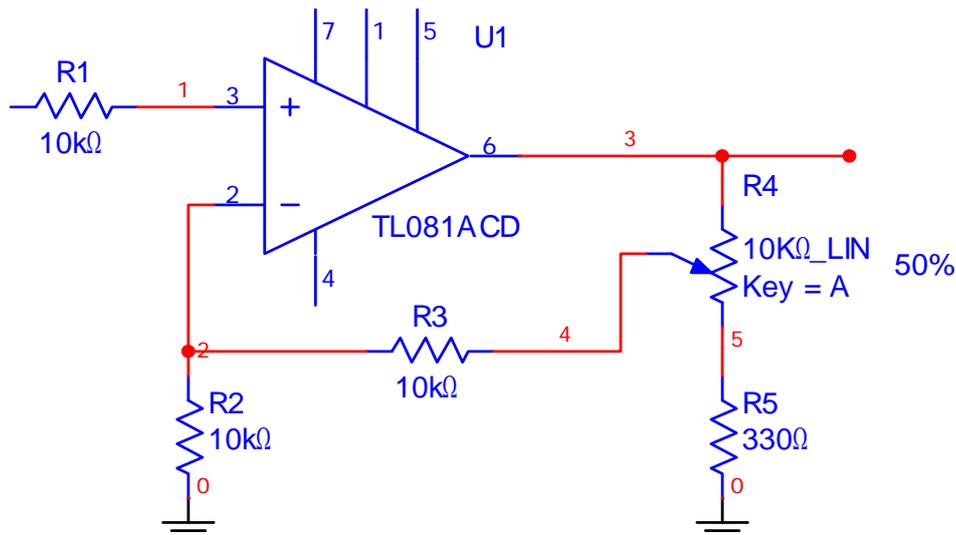


Imagen de amplificador como lo utilizamos.

2.6 RECTIFICADOR

Tenemos ahora una señal senoidal con una amplitud tal, que las variaciones en la señal que genera el aire en el agua, se detectan de una manera correcta. Pero ahora lo que queremos es obtener una señal de corriente directa que puede ser interpretada de mejor manera y si así se desea, realizar una adquisición de datos para su análisis.

Para lograr transformar la señal de AC utilizamos un circuito rectificador de onda completa, usando un puente de diodos como el que se muestra en la siguiente figura:

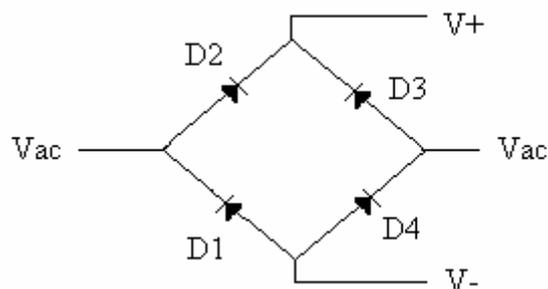
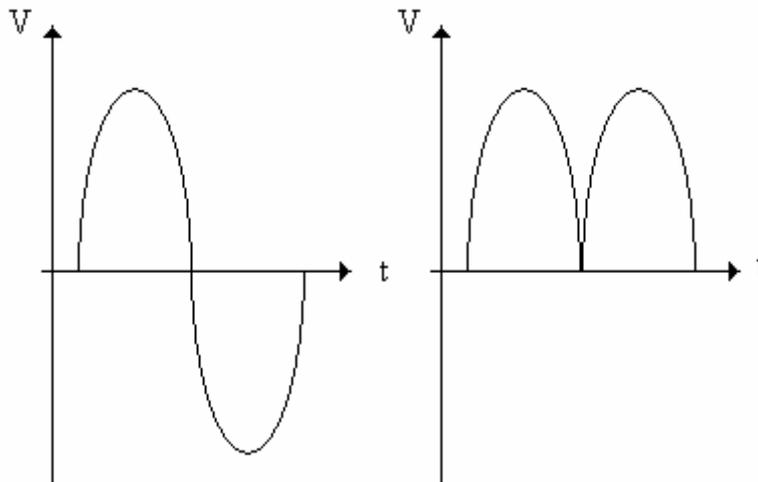


Figura de puente de diodos

Durante el semiciclo positivo de nuestra señal de alterna, los diodos D2 y D4 conducen y en el momento en que hay un cambio de polaridad dejan de conducir, pero los diodos D1 y D3 conducen.

De esta manera, el voltaje de salida es igual al de entrada para los semiciclos positivos y para los semiciclos negativos, la señal de salida es igual a la señal de entrada pero invertida, por lo que la señal queda de la siguiente manera:



Señal entrada y salida rectificada.

Ahora ya tenemos una señal sin semiciclos negativos, es decir que tiene una sola polaridad. Pero el implementar únicamente el puente de diodos tiene un problema. El problema es que los diodos tienen un voltaje de polarización de 0.7 volts y por lo tanto, hasta que nuestra señal de entrada alcance los 0.7 volts de amplitud comienza la rectificación.

Lo que necesitábamos era un circuito que nos permitiera que los diodos se enciendan desde el momento en que la polaridad de nuestra señal cambie. Para lograrlo, se colocó el puente de diodos en la realimentación de un amplificador operacional de la siguiente manera:

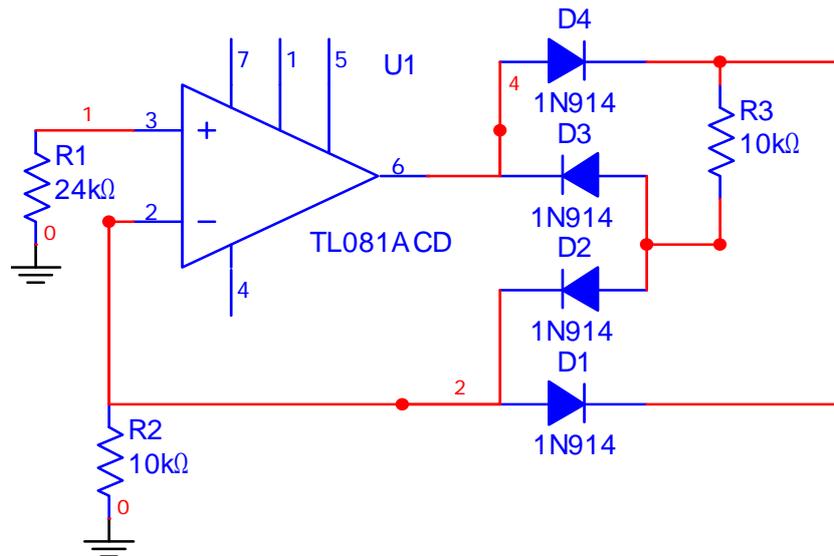


Imagen del rectificador como quedó.

De esta forma el amplificador operacional proporciona el voltaje necesario para encender los diodos en el instante que cambia la polaridad.

2.7 NIVEL DE DC

Una vez que se realizó la rectificación, utilizando un puente de diodos, colocamos las salidas de nuestro puente directamente a un amplificador operacional con una configuración diferencial, como se muestra en la siguiente figura:

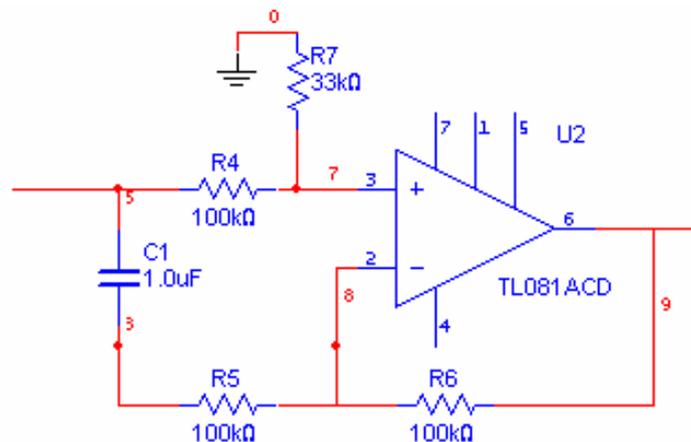


Diagrama del nivel de DC

Estas salidas tienen una amplitud diferente pero las irregularidades que presenta, tienen la misma frecuencia y sentidos contrarios por lo que, aun que sus magnitudes son distintas, al restar la señal de menor amplitud a la que tiene

mayor amplitud, tenemos una señal de DC con una amplitud igual a la resta de ambas pero con un comportamiento mejor a las señales de entrada, haciendo las irregularidades más pequeñas, casi imperceptibles.

2.8 FILTRO

Una vez que ya tenemos una señal de DC, se coloca un filtro de primer orden, para evitar la presencia de ruido en nuestra señal.

Vamos a utilizar un filtro “pasa bajas” para evitar así el ruido provocado por la línea de alimentación de 60 Hz. Como la frecuencia de corte de nuestro filtro está determinada por la función $f = 1 / (2\pi RC)$ tenemos:

$$R = 56 \text{ k}\Omega$$

$$C = 0.068 \text{ }\mu\text{F}$$

$$F = 41.8 \text{ Hz}$$

De tal manera que nuestro filtro no permite el paso de frecuencias mayores a 41.8 Hz y así no nos tenemos que preocupar de las frecuencias \geq a 60 Hz que es el tipo de ruido más común.

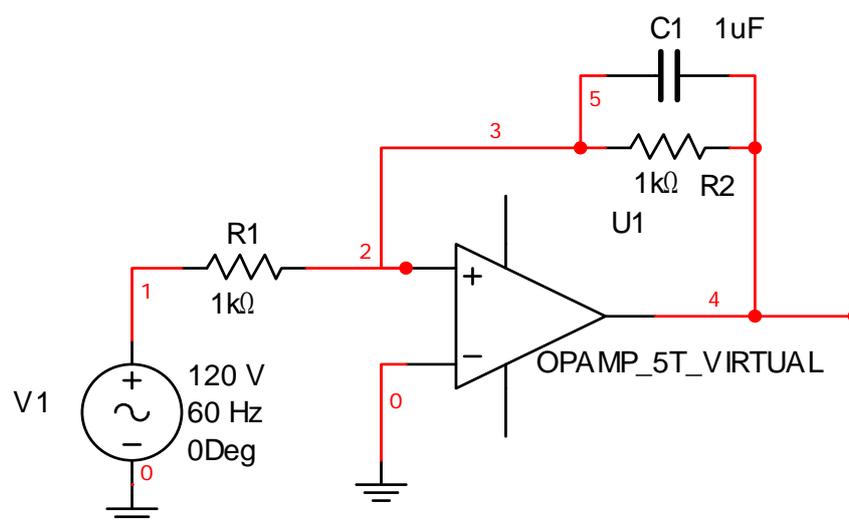


Imagen de un filtro “pasa bajas” activo.

Un filtro pasivo está constituido únicamente de elementos pasivos como resistores, capacitores o inductores y el filtro activo, incluye un amplificador operacional en su arquitectura. Nosotros optamos por utilizar un filtro activo por que presenta algunas ventajas sobre los pasivos. Una de estas ventajas es la posibilidad de los filtros activos a tener una ganancia mayor a la unitaria, por que los elementos pasivos son incapaces de agregar energía a la señal.

Otro inconveniente de los filtros pasivos es que en varias topologías se utilizan elementos inductivos, los cuales son poco prácticos. Además, utilizando un amplificador operacional con realimentación, se pueden generar todo tipo de filtros (pasa bajas, pasa altas, pasa banda y rechazo de banda) utilizando únicamente resistores, capacitores y amplificadores operacionales.

Tanto la frecuencia de corte, como la magnitud de la banda de paso de los filtros pasivos, se alteran con la adición de un resistor de carga en la salida del filtro. Pero en el caso de filtros activos sí se puede agregar, por el uso del amplificador operacional.

El comportamiento de nuestro filtro se puede describir en torno a la frecuencia:

Si la frecuencia es cero ($\omega = 0$) la impedancia del capacitor es infinita y funciona como un circuito abierto. Los voltajes de entrada y de salida son iguales.

Si la frecuencia aumenta a partir de cero, la impedancia del capacitor disminuye con respecto a la impedancia del resistor y el voltaje de entrada se divide entre la impedancia resistiva y la impedancia capacitiva y por esto, el voltaje de salida es más pequeño que el voltaje de entrada. En nuestro caso no fue necesario pero gracias al uso de un filtro activo podríamos haber tenido una ganancia de R_2 / R_1 en lugar de una ganancia unitaria.

Por último si la frecuencia es infinita, la impedancia del capacitor es cero y éste actúa como un circuito corto, conectando de ese modo la salida del circuito del amplificador operacional a tierra.

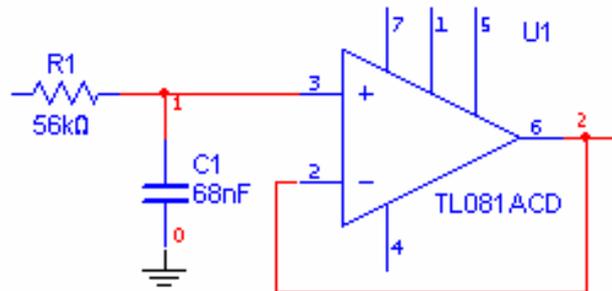
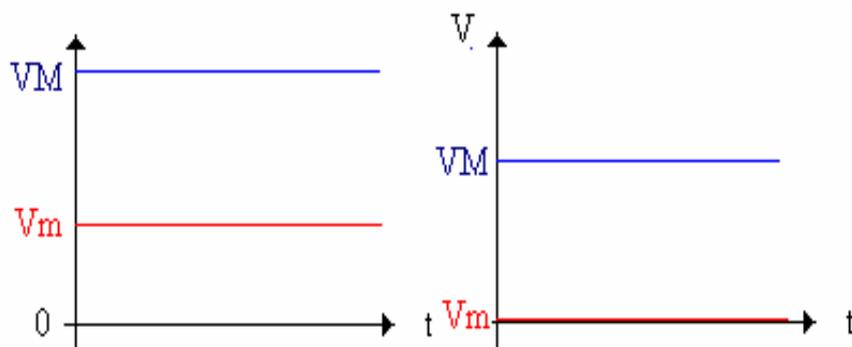


Imagen de filtro como lo utilizamos.

2.9 OFFSET

En este bloque de nuestro circuito, lo que se hace es eliminar un nivel de voltaje que no se requiere de nuestra señal previamente filtrada. Es decir, como se muestra en la siguiente figura, el nivel más bajo de nuestra señal se encuentra por arriba del cero.



Señales de entrada y de salida.

La razón para que quitemos este nivel que se tiene por arriba del cero es muy sencilla. A la hora de analizar la señal de salida que se tiene de nuestro dispositivo, es mas fácil entender su comportamiento si la variación va de una señal de amplitud cero hasta una amplitud máxima, por que de este modo cualquier valor que se encuentre entre este rango, se detecta y se sabe que es debido a la presencia de aire en el agua. De otra forma si se tiene un valor de

voltaje inicial diferente a cero, se hace necesario restar de todas nuestras mediciones el voltaje inicial y se vuelve un trabajo repetitivo y tedioso.

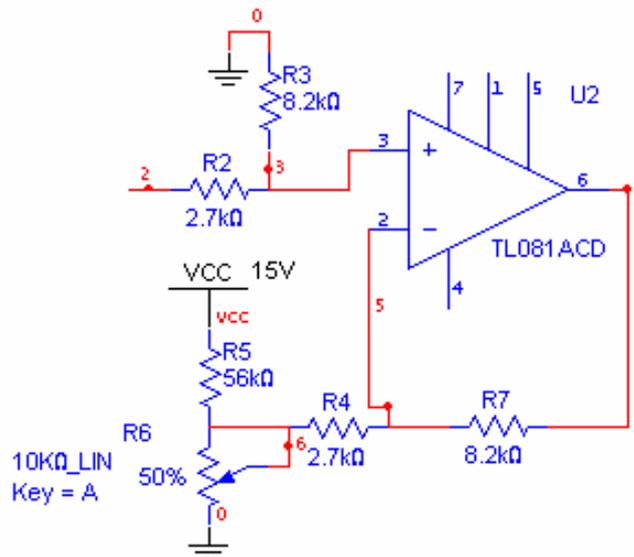


Imagen de circuito del offset.

Como se muestra en la figura anterior, se utilizó un amplificador operacional con configuración de restador, para poder eliminar ese nivel que no se quiere en la señal de salida.

En la entrada positiva se tiene la señal proveniente de nuestro filtro paso bajas (la señal con el nivel que se quiere quitar) y en la entrada negativa se tiene una señal de DC con una amplitud igual a la amplitud que se quiere quitar de nuestra señal. Para lograr que la amplitud de la señal que se va a restar sea igual a la deseada, se utilizó un divisor de voltaje con un potenciómetro, que nos permitiera variar la amplitud hasta alcanzar el valor que lograra eliminar por completo ese nivel indeseado.

2.10 FUENTE DE CORRIENTE

Ya tenemos una señal, que varía desde 0 volts hasta una amplitud máxima de 8.5 volts, por lo que está lista para que se analice, se realice una adquisición de datos o se haga con ella lo que se quiera. En nuestro caso, la Comisión Federal de Electricidad, (C.F.E.) va a realizar una adquisición de datos, pero hay un problema que necesitamos resolver.

Nuestros dispositivos de medición se van a colocar a lo largo del canal de demasías, el cual tiene varios cientos de metros de largo, y la adquisición de datos se va a realizar en un cuarto de control que se encuentra en un extremo del vertedor. Por esta razón, las distancias que separan a nuestro dispositivo de medición, de la tarjeta de adquisición, son grandes y podría haber pérdidas en la señal que se transmite. Para minimizar estas pérdidas se convierte nuestra señal de voltaje en una señal de corriente.

Para lograr esto colocamos una fuente de corriente, la cual convierte nuestra referencia de voltaje en una referencia de corriente.

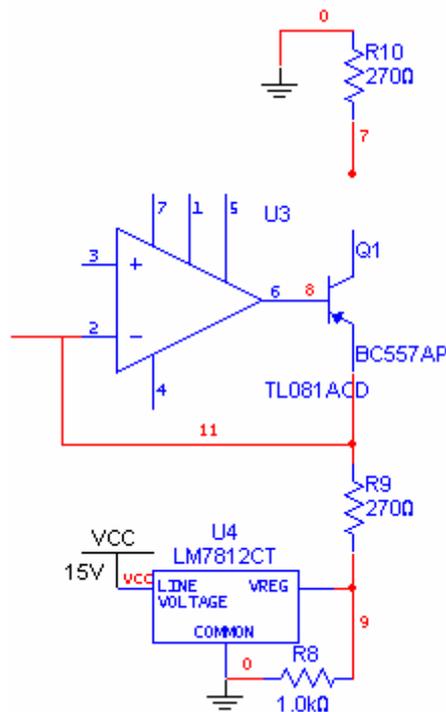


Imagen de fuente de corriente.

Este circuito funciona de la siguiente manera. Gracias al amplificador operacional que se colocó antes del transistor, podemos fijar nuestro voltaje. Es decir que el voltaje que tengamos en la entrada positiva, se fijará gracias a la realimentación de nuestro circuito.

Conectado a nuestro emisor, tenemos un regulador de voltaje de 12 volts, del cual podemos obtener la corriente que nosotros necesitemos. En el colector,

tenemos nuestra salida. Aquí ocurre lo siguiente, debido a que tenemos nuestro voltaje fijo gracias al amplificador operacional, si nuestra carga aumenta o disminuye, nuestra corriente también aumenta o disminuye y así nuestra señal, que al inicio era una señal que variaba en voltaje, se ha convertido en una señal de referencia en corriente.

2.11 ELECTRODOS

Al inicio de este proyecto, se mencionaron algunos detalles que delimitaban el trabajo como por ejemplo el principio de funcionamiento de éste, que es la conductividad eléctrica del agua y la sonda de medición que se va a utilizar.

Esta sonda de medición ya estaba diseñada de antemano y las personas encargadas del proyecto en la Comisión Federal de Electricidad nos pidieron que desarrolláramos el medidor de contenido de aire en agua de tal forma que funcionara utilizando los mismos electrodos de medición.

La sonda de medición tiene que estar en contacto con el agua que pasa por el vertedor para que nuestro dispositivo pueda detectar el contenido de aire que hay en ésta. Pero al trabajar con volúmenes tan grandes de agua y por la pendiente del canal de demasías, velocidades también grandes, es necesario que nuestra sonda de medición no sea invasiva; es decir, que no interfiera en el camino del agua pues la fuerza de arrastre de ésta se la podría llevar aguas abajo o definitivamente romperla.

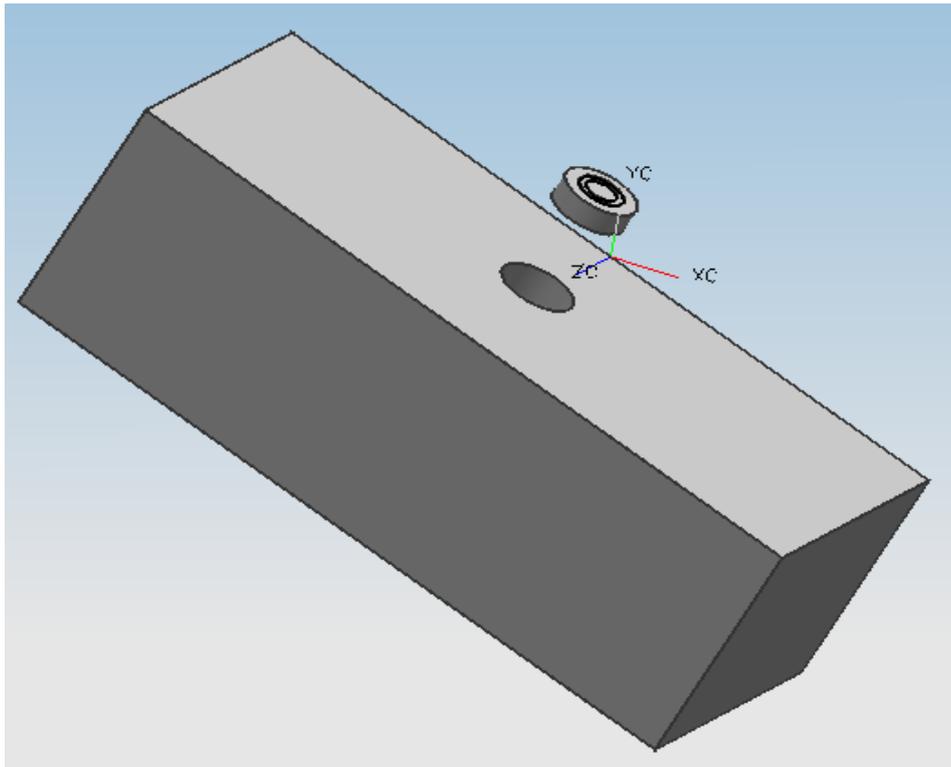


Imagen vertedor con sonda y registro

Como se muestra en la figura anterior la sonda funciona también como la tapa de un registro, el cual está diseñado para colocar todos los elementos eléctricos que deben estar aislados del agua. Véase apéndice 3.

Por estas razones era necesario utilizar una sonda de las mismas características que ya se tenían, pues la planta hidroeléctrica ya había sido diseñada para que se instalaran sensores de esas dimensiones en el vertedor.

La C.F.E. nos facilitó las dimensiones de la sonda de medición y en los talleres del Instituto de Ingeniería de la U.N.A.M. se mandaron hacer 5 sondas más como se establecía en el acuerdo entre las dos partes.

Estas sondas son todas iguales y están constituidas de la siguiente manera: la parte exterior es de acero inoxidable (porque va a estar en contacto con el agua). Esta parte es la más pesada y fuerte porque es la que funciona como brida o tapa del registro.

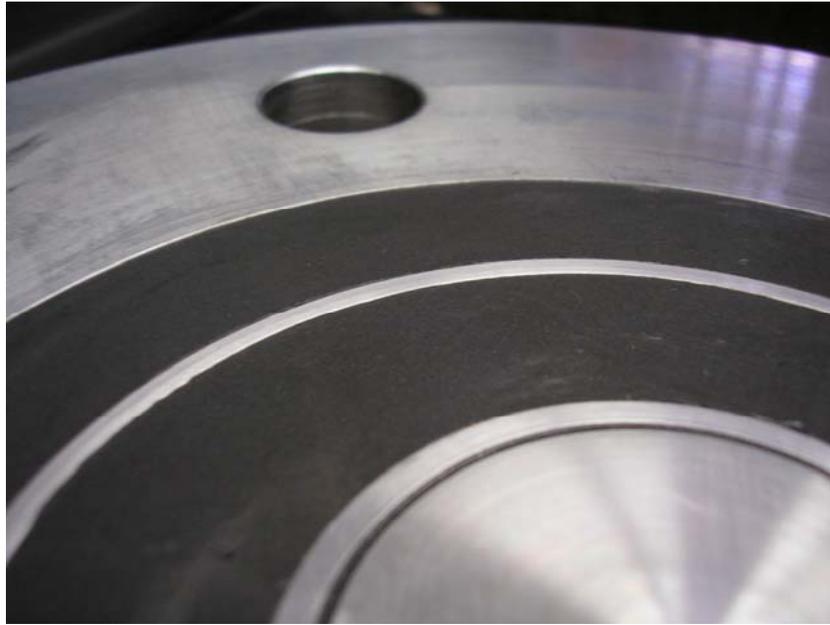
En la parte central de la sonda se encuentran propiamente los electrodos de medición que también son de acero inoxidable. La primera parte es un elemento circular central que tiene 4.7 centímetros de diámetro en el cual se inyecta la señal senoidal que se genera en nuestro circuito eléctrico. Concéntricos a este elemento circular se encuentran los 2 anillos de medición de 3 milímetros de espesor en los cuales se recibe la señal atenuada que pasa por el agua. El primer anillo tiene una separación de 0.5 milímetros con respecto al elemento central y el segundo anillo tiene una separación de 24 milímetros con respecto al elemento central.

Todos estos elementos están unidos entre sí por una resina epóxica llamada plastiacero. Esta resina es muy maleable por lo que nos permitió rellenar los espacios entre los elementos que conforman la sonda y al entrar en contacto con el catalizador ésta se endurece de tal forma que es muy difícil de romper la unión de estos elementos. También se utilizó esta resina, porque funciona como aislante entre los elementos metálicos y de esta manera la única forma de que la señal eléctrica pase de un elemento al otro es por medio del agua.



Vista superior de las 5 sondas de medición.

En la imagen se muestran las 5 sondas de medición que se hicieron y se pueden apreciar los elementos que las constituyen. Además de lo ya mencionado, cuentan con un conector hembra de 3 pines que conecta las sondas con las cajas de acondicionamiento, que es donde está el circuito del medidor de contenido de aire.



Acercamiento a los electrodos de medición.

CAPÍTULO 3

PROTOTIPO PARA EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Una vez terminado el medidor de contenido de aire en agua que se desarrolló para su implementación en la planta hidroeléctrica de “El Cajón” se comenzó a desarrollar un prototipo para la medición del contenido de aire, pero esta vez para que se utilizara en el laboratorio de Hidráulica de la Comisión Federal de Electricidad.

Se quería desarrollar un nuevo aparato que tuviera el mismo principio de funcionamiento que el anterior, pero que tuviera algunas mejoras. Así que se tomó gran parte del circuito desarrollado anteriormente y se le hicieron algunos cambios tanto en la electrónica como en la sonda de medición.

Como ya se platicó con anterioridad, el primer medidor en realidad hace dos mediciones simultáneas de una misma zona y después de hacer pruebas en el laboratorio nos convencimos de que esto no era necesario. El dispositivo alcanza su mejor sensibilidad mientras más cerca estén las burbujas de la plantilla y de esta forma aun que las dos mediciones se hagan con campos de profundidad diferentes, la respuesta de nuestro circuito es muy parecida por que se le da una prioridad a las más cercanas al sensor y comparativamente, las más alejadas no son tan representativas en la señal de salida aun cuando sí las detecta nuestro dispositivo.

3.1 SIMILITUDES

Las similitudes entre el primer dispositivo y el prototipo que se desarrolló son muchas, porque se partió del circuito que ya se tenía y se le hicieron algunas mejoras. De esta manera, el principio de funcionamiento sigue siendo la conductividad eléctrica del agua.

Como se muestra en el diagrama de bloques de la página 13 de este trabajo, la única diferencia, es el cambio en el bloque número tres, pues antes tenía un amplificador de voltaje y ahora tenemos un restador.

Justamente en el bloque tres es en donde las señales que vienen de nuestra nueva sonda de medición se acoplan a nuestro circuito y este cambio se debió al funcionamiento de nuestro prototipo y al cambio de nuestra sonda.

La nueva sonda, como se describirá más adelante, tiene ahora 4 electrodos en lugar de los dos que tenía el anterior. Esos cuatro electrodos tienen la misma separación entre sí.

La señal senoidal se inyecta al agua a través del electrodo número 1. En los electrodos 2 y 3 se recibe la señal que pasa por el agua, atenuándose de diferente forma para los dos electrodos. En el electrodo 2, la señal recorre una menor distancia, por lo que la resistencia que le presenta el agua y las burbujas de aire, es menor a la del electrodo 3. El cuarto electrodo es tierra.

Todos los bloques que se repiten en los dos dispositivos no se van a explicar de nuevo, dado que ya se desarrollaron en el tema anterior.

3.2 RESTADOR

Este bloque es el único que cambió entre el medidor de contenido de aire en agua y el prototipo para el laboratorio. Uno de los cambios que se va a comentar más adelante fue el de la sonda de medición, la cual ahora cuenta con una configuración de cuatro electrodos de medición. El restador se hizo necesario por que la idea es tener la señal de los electrodos 2 y 3 como entradas en nuestro restador y tener como salida una señal que será una combinación lineal de las entradas.

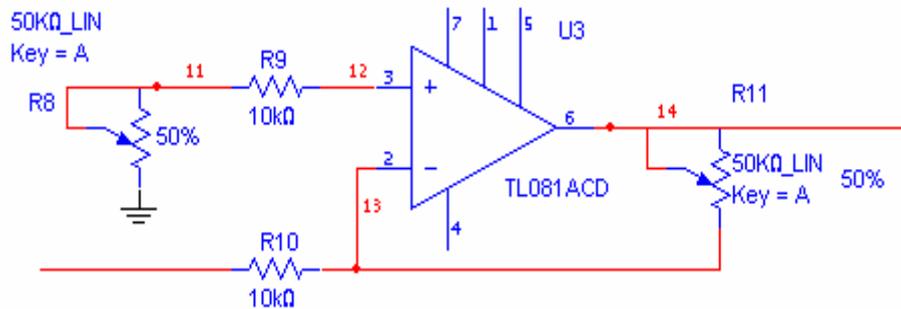


Diagrama del amplificador de diferencia

En nuestro caso R9 es igual R10 y R8 es igual a R11. Cuando esta condición se cumple, se dice que las resistencias forman un puente balanceado, por lo que la ecuación que rige a nuestro amplificador operacional con configuración de amplificador de diferencia es:

$$V_o = (R_2 / R_1) (V_2 - V_1)$$

Por lo que nuestra señal de salida es proporcional a la diferencia verdadera de las entradas. Con un factor de amplificación de R2/R1.

Al colocar el restador inmediatamente después de la sonda de medición nos da la ventaja que si en nuestra medición del contenido de aire hay una variación debida al cambio del nivel del agua o a algún objeto externo que sea detectado por los electrodos 2 y 3 simultáneamente, no provoquen un cambio drástico en el valor de la salida debido a la resta realizada.

3.3 ELECTRODOS

Al agregar el restador ya teníamos pensado que nuestra nueva sonda de medición debía de ser de cuatro electrodos. Pero faltaba decidir las dimensiones de los electrodos y la separación entre ellos.

Para poder tomar la decisión de cómo serían los electrodos se realizaron varias pruebas, una vez que ya se tenía el nuevo circuito listo.

Se dispuso que los electrodos fueran circulares y que solamente una cara estuviera en contacto con el agua, como en la sonda anterior.

Una vez que sabíamos que serían circulares, tuvimos que decidir el diámetro de los electrodos y su separación.

Como ya se mencionó anteriormente, las dimensiones de la sonda número 1 ya estaban predeterminadas por que debían de poder colocarse como tapas de los registros del vertedor. Recordamos que en esos sensores se tenían varias partes que se unieron con una resina y que la parte más pesada y grande era la que servía como brida. A esta parte se unieron los anillos de medición. El diámetro máximo que estaba disponible para poner los anillos era de 13.5 centímetros.

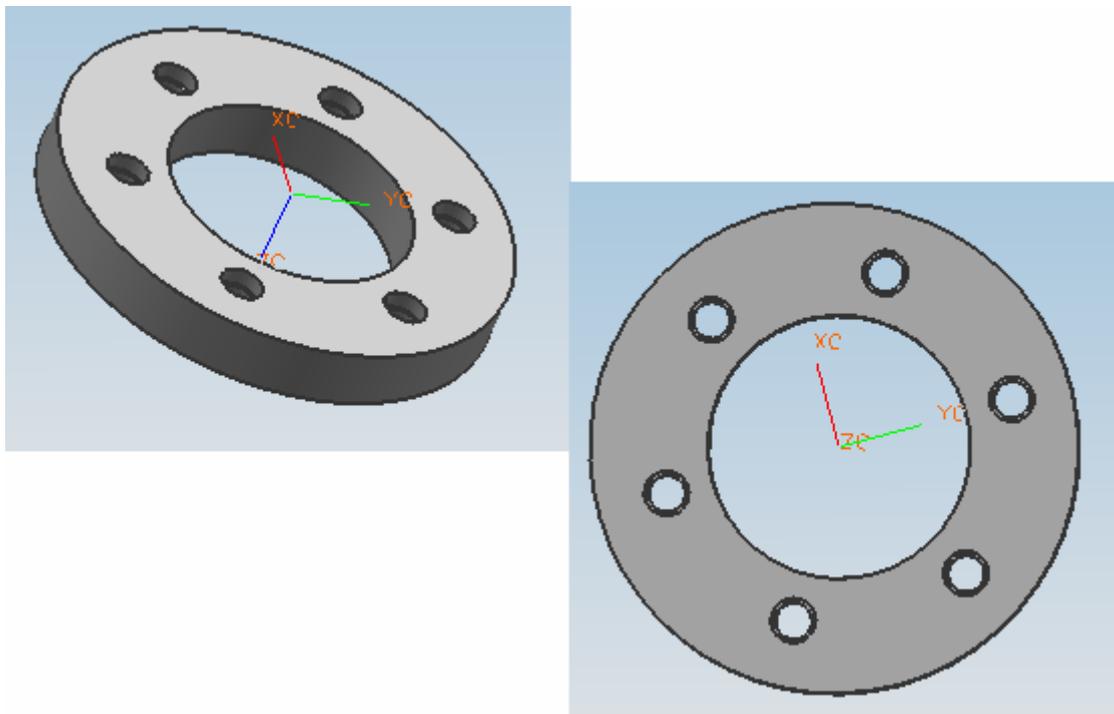


Figura de los 13.5 cm libres.

Se planteó que nuestra nueva sonda fuera de 13.5 centímetros para que, si se toma la decisión de que este prototipo se implemente en una planta hidroeléctrica, se puedan incorporar los cuatro electrodos en el área libre de las bridas que se fabrican para colocar en los registros.

Ya teniendo fijo el tamaño total de la sonda, nos dispusimos a hacer pruebas con diferentes diámetros de electrodos y diferentes separaciones que cumplieran con el límite de los 13.5 centímetros.

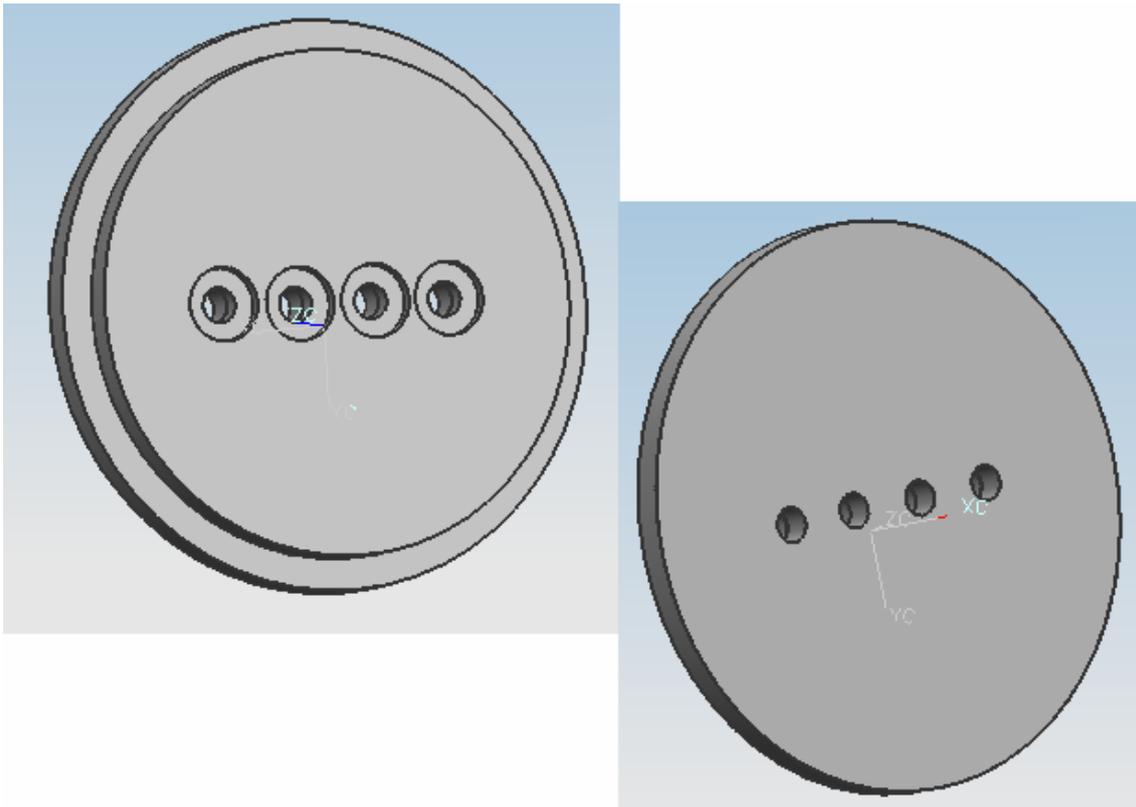


Figura de sonda, electrodos y separación

Decidimos hacer las pruebas con tres diferentes tamaños de electrodos y diferentes separaciones. La separación mínima sería de 3 milímetros partiendo del valor de la separación del elemento central de la sonda 1 con el anillo de medición más cercano y va a ser para todos los electrodos. La separación máxima va a ser diferente para cada electrodo, pues lo que se va a hacer es tomar la longitud de la sonda (13.5 cm.) y restar cuatro veces el diámetro de los electrodos y con ese valor dividirlo entre 3.

Los electrodos más pequeños fueron de 1 centímetro de diámetro y la separación máxima fue de:

$$13.5 - 4(1) = 9.5 \text{ cm}$$

$$9.5 / 3 = \underline{3.16 \text{ cm}}$$

Después lo que hicimos fue tomar la longitud máxima y dividirla entre el número de electrodos que tenemos (4) y el número de espacios entre los electrodos (3) y de esta forma obtener un tamaño de electrodos y de separación igual:

$$13.5 / 7 = \underline{1.9 \text{ cm}}$$

Así, el diámetro de valor medio que probamos fue de 1.9 centímetros y la separación de la misma longitud. Ya no se pueden tener electrodos más grandes de 1.9 cm y tener separaciones mayores de 1.9 cm al mismo tiempo.

Por esta razón el tercer grupo de electrodos, que son los mas grandes, únicamente pueden tener la mínima separación y partiendo de este punto obtuvimos el diámetro de los electrodos más grandes.

$$13.5 - 3 (.3) = 12.6$$

$$12.6 / 4 = \underline{3.15 \text{ cm}}$$

Ya teniendo los valores de los diámetros de los electrodos y las separaciones posibles, tenemos 5 combinaciones que se probaron para obtener el tamaño y separación definitivos.

La forma en que se realizaron las pruebas fue simple. Se improvisó una sonda para cada configuración y se probó cada sonda con el circuito final del prototipo. La prueba constó de tener un recipiente lleno de agua hasta cierto nivel (6 cm) y medir las señales que teníamos en los electrodos y después variar la cantidad de agua, reduciendo la altura de ésta cada centímetro, y volver a medir las señales en los electrodos hasta llegar a la altura de 1 cm de agua. V1 se refiere al voltaje del electrodo 1, V2 al electrodo 2, V3 al electrodo 3 y el electrodo cuatro no se anota por que está conectado a tierra.

Teniendo los datos en una tabla, lo que se hizo fue ver con cual configuración teníamos mayor variación entre los valores (por que sería más fácil detectar esos cambios) y también ver cual tenía cambios más constantes (no cambios tan bruscos).

Tabla número 1 para 6 centímetros de agua:

Diámetro (cm)	1	1	1.9	1.9	3.15
Separación (cm)	.3	3.16	.3	1.9	.3
V1 (volts)	4.8	4.3	2.9	2.6	1.6
V2 (volts)	2.8	2.1	1.6	1.4	1
V3 (volts)	2.4	2	1.4	1.3	0.8

Tabla número 2 para 5 centímetros de agua:

Diámetro (cm)	1	1	1.9	1.9	3.15
Separación (cm)	.3	3.16	.3	1.9	.3
V1 (volts)	4.9	4.3	3.2	2.6	1.5
V2 (volts)	2.8	2.1	1.8	1.4	0.9
V3 (volts)	2.4	2	1.5	1.3	0.7

Tabla número 3 para 4 centímetros de agua:

Diámetro (cm)	1	1	1.9	1.9	3.15
Separación (cm)	.3	3.16	.3	1.9	.3
V1 (volts)	4.9	4.4	2.9	2.7	1.6
V2 (volts)	2.8	2.1	1.6	1.4	1
V3 (volts)	2.4	2	1.4	1.3	0.8

Tabla número 4 para 3 centímetros de agua:

Diámetro (cm)	1	1	1.9	1.9	3.15
Separación (cm)	.3	3.16	.3	1.9	.3
V1 (volts)	5.1	4.6	3	2.8	1.7
V2 (volts)	2.8	2.3	1.8	1.5	1
V3 (volts)	2.5	2.2	1.4	1.4	0.8

Tabla número 5 para 2 centímetros de agua:

Diámetro (cm)	1	1	1.9	1.9	3.15
Separación (cm)	.3	3.16	.3	1.9	.3
V1 (volts)	5.2	4.8	3.4	2.9	1.6
V2 (volts)	3	2.4	2	1.6	1
V3 (volts)	2.8	2.3	1.6	1.4	0.8

Tabla número 6 para 1 centímetros de agua:

Diámetro (cm)	1	1	1.9	1.9	3.15
Separación (cm)	.3	3.16	.3	1.9	.3
V1 (volts)	5.5	5	3.8	3.2	1.8
V2 (volts)	3.2	2.4	2.2	1.7	1
V3 (volts)	2.8	2.3	1.7	1.5	0.8

De estas tablas concluimos que la mejor opción eran los electrodos de 1.9 centímetros de diámetro con la separación de 3 milímetros por que son los que más variación tuvieron. Comparando la tabla 1 y la 6 si sacamos la diferencia entre los valores de V1, V2 y V3 son:

$$V1 = 3.8 - 2.9 = 0.9$$

$$V2 = 2.2 - 1.6 = 0.6$$

$$V3 = 1.7 - 1.4 = 0.3$$



Sonda de medición del prototipo.

La sonda final se realizó en acrílico para que fuera muy sencilla su instalación en el modelo del laboratorio de Cuernavaca. Se utilizaron los electrodos que se seleccionaron como se muestra en la figura y además cuenta con un conector hembra de 4 pines.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En este capítulo comenzamos a describir el funcionamiento de nuestros dispositivos, una vez que ya se terminó su construcción. Para comenzar se va a platicar del medidor de contenido de aire en agua y después se hablará del prototipo que se realizó para el laboratorio de Cuernavaca.

Se desarrollará el análisis de los dos dispositivos de manera separada para poder realizar una comparación del comportamiento de ambos.

4.1 MEDIDOR DE CONTENIDO DE AIRE EN AGUA

4.1.1 CALIBRACIÓN

Como ya se comentó anteriormente, el medidor cuenta con una sonda de medición que tiene dos anillos o electrodos. Estos dos anillos de medición se diferencian entre sí por sus diámetros, lo que indica que la separación del elemento central y los anillos de medición es diferente entre uno y otro.

Dicha separación determina la profundidad de campo de nuestro dispositivo (en nuestro caso la C.F.E. nos pidió que obtuviéramos una profundidad mínima de campo de 1 cm con el anillo interior y una profundidad mínima de campo de 3 cm con el anillo exterior).

El término de profundidad de campo se refiere a la altura máxima en la cual nuestro sensor es capaz de realizar mediciones. Más allá de este límite, nuestro sensor es incapaz de detectar las burbujas presentes en el líquido. Gracias a que la necesidad de detectar las burbujas es únicamente en la parte baja del fluido, es decir pegado a la plantilla del vertedor, este comportamiento nos es útil y facilita el trabajo de laboratorio.

Esta altura máxima de funcionamiento (h), nos es muy útil para realizar las pruebas de laboratorio, debido a que conociendo el área que ocupan los electrodos y la profundidad de campo de nuestro dispositivo, podemos calcular el volumen de acción de nuestro sensor, a este volumen lo vamos a nombrar volumen de control (V).

Para facilitar las cosas, vamos a mantener el área (a) constante en todas las pruebas realizadas con el medidor de contenido de aire en agua en el laboratorio, de modo que la única variable que tenemos va a ser la altura del agua (x) de nuestro contenedor en el cual vamos a hacer las pruebas.

Comenzamos las pruebas con una x mayor que la h para comprobar que por arriba del valor de la profundidad de campo, nuestro dispositivo es sordo, es decir que no detecta el aire presente y para encontrar el valor de h experimentalmente.

Después tenemos un volumen de control el cual tiene un 100 % de agua y en donde x es igual a h , por lo que nuestro dispositivo no detecta el aire arriba del agua. Entonces partimos de la h como altura máxima y fijamos el volumen de control para comenzar a variar la concentración de aire y agua que se contiene en dicho volumen.

Para realizar las variaciones en el porcentaje de aire y agua, lo que hacemos es disminuir la altura del agua, desde el valor en que $x = h$, hasta que $x = 0$, es decir partimos de 100 % de agua a 100 % de aire, respectivamente.

De esta forma, podemos obtener el valor mínimo y el valor máximo de la salida de nuestro dispositivo y encontrar la zona en la que nuestro medidor funciona mejor.

4.1.2 PRUEBAS

Debido a la diferencia de diámetros de los electrodos, éstos funcionan de forma diferente. Tienen valores de la señal de salida diferente y tienen profundidades de campo diferente. Estas diferencias se mostrarán a continuación, cuando se analice el comportamiento por separado de cada anillo.

Para comprobar que nuestro dispositivo funcionaba correctamente se hicieron varias pruebas. En estas pruebas, realizamos varios ajustes en los valores de los potenciómetros, que nos permitieran obtener la mejor respuesta de nuestro circuito. Una vez que el comportamiento del dispositivo fue el deseado, se realizaron varias pruebas utilizando un recipiente en el cual se colocó la sonda de medición al fondo y se llenó de agua hasta el tope. Se fue reduciendo la altura del agua para encontrar el valor de h en el cual nuestro medidor detectara la presencia del aire.

De esta forma se encontró que por arriba de 2 centímetros nuestro sensor no detectaba nada, por lo que todas las pruebas restantes se hicieron partiendo de esa altura para no hacer varias mediciones innecesarias.

Primero comenzamos con el anillo de menor diámetro y que es el electrodo con un funcionamiento más limitado en todos los aspectos, por que solamente alcanza una amplitud máxima de 2.2 volts a la salida y tiene una profundidad de campo de aproximadamente 1.5 centímetros.

De esta manera obtuvimos la siguiente tabla. El termino h se refiere a la altura en centímetros, de la columna de agua que está por encima de nuestra sonda. Los valores de $V1$ hasta $V6$, representan los voltajes de salida de nuestro dispositivo en 6 pruebas diferentes.

h (cm)	V1 (V)	V2 (V)	V3 (V)	V4 (V)	V5 (V)	V6 (V)
2	0	0	0	0	0	0
1,5	0	0	0,1	0	0	0
1	0,1	0	0,1	0,1	0,1	0,08
0,5	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,24
0	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2

Tabla 4.1- Valores de salida del anillo interno

Una vez obtenidos estos valores, sacamos una tabla con los valores promedio de los voltajes de salida para cada altura, obteniendo la siguiente tabla:

h (cm)	Vprom (V)
2	0,000
1,5	0,017
1	0,080
0,5	0,307
0	2,200

Tabla 4.2- Valores de salida promedio

Una vez que se obtuvieron estos valores, nos dispusimos a realizar las pruebas del anillo exterior. Para estas pruebas utilizamos el mismo recipiente que antes con la sonda de medición hasta el fondo y vertimos agua hasta el tope. Después fuimos quitando el agua poco a poco hasta obtener una variación que nos permitiera definir una altura de trabajo. En este caso fue una $h = 4$ centímetros la que se eligió, porque a partir de esa altura se comenzaron a ver cambios.

De esta forma obtuvimos la siguiente tabla:

h (cm)	V1 (V)	V2 (V)	V3 (V)	V4 (V)	V5 (V)
4	0	0	0	0	0
3,5	0	0,1	0	0	0
3	0,1	0,1	0	0	0
2,5	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3
1,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6
1	1,5	1,5	1,2	1,3	1,6
0,5	5,3	5,2	5	4,9	5,4
0	8,5	8,4	8,5	8,5	8,5

Tabla 4.3- Valores de salida del anillo externo.

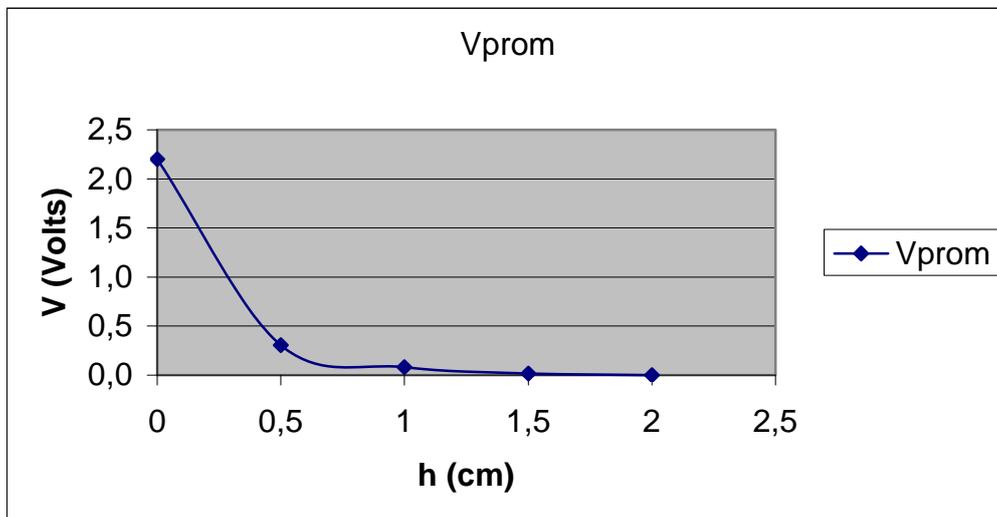
Después, utilizando los valores promedio de los voltajes de salida, obtuvimos la siguiente tabla:

h (cm)	Vprom (V)
4	0
3,5	0,02
3	0,04
2,5	0,12
2	0,26
1,5	0,56
1	1,42
0,5	5,16
0	8,48

Tabla 4.4- Valores de salida promedio

4.1.3 GRÁFICAS

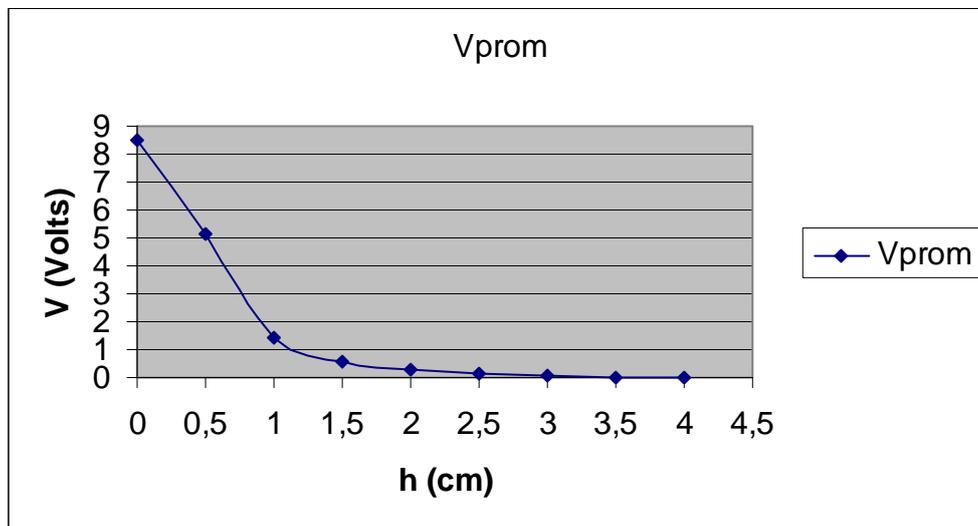
Utilizando los valores promedio de las pruebas del anillo interno, se obtiene la gráfica 4.5 que se muestra a continuación:



Gráfica 4.5- Valores promedio del anillo interno

Cuando tenemos una altura $h = 0$ centímetros, tenemos un voltaje promedio de 2.2 volts, que es nuestro voltaje máximo y que se obtiene cuando tenemos una mezcla de 0% de agua y 100% de aire.

De igual manera, se utilizaron los valores promedio de los voltajes de salida del anillo externo, para obtener la siguiente gráfica:



gráfica 4.6- Valores promedio del anillo externo.

4.2 PROTOTIPO

4.2.1 CALIBRACIÓN

La forma de realizar la calibración de nuestro prototipo, es igual a la del medidor. Colocamos la sonda de medición en la parte inferior de un contenedor y vertemos agua hasta donde nos permite el recipiente la primera vez y vamos reduciendo la cantidad de agua hasta comprobar que nuestro dispositivo tiene variaciones en la salida. Así encontramos la profundidad de campo de nuestro prototipo y que es diferente de la profundidad de campo del medidor.

4.2.2 PRUEBAS

En la tabla que se presenta a continuación se encuentran los valores de nuestra señal de salida al ir variando la altura del agua que hay en nuestro contenedor. Iniciamos las pruebas con una altura del agua de 10 centímetros y vamos reduciéndola cada medio centímetro hasta llegar a una altura de 0, en donde tenemos nuestro valor de voltaje mayor.

Se realizaron varias pruebas y se colocaron en la tabla las 6 más representativas. En cada una de las columnas se puede encontrar también, el valor de h (cm) en el cual nuestra señal del voltaje sufre un cambio. El cambio, como se puede ver, comienza con un pequeño salto, por ejemplo en V2 con una h de 6 centímetros tenemos un cambio de 0.7 a 0.8 volts. Pero a partir de h = 4.5 centímetros los cambios comienzan a ser mayores por lo que se puede decir que es a partir de esta altura que nuestro dispositivo, en el caso de V2 tiene su profundidad de campo.

h(cm)	V1 (V)	V2 (V)	V3 (V)	V4 (V)	V5 (V)	V6 (V)
10	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	0,6	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	0,6	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	0,6	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	0,7	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	0,9	0,9	0,8	0,7	0,7	0,6
4,5	1	1	0,9	0,9	0,7	0,7
4	1,1	1,2	1	1	0,9	0,9
3,5	1,4	1,4	1,3	1,3	1,1	1,1
3	1,8	1,7	1,6	1,5	1,5	1,5
2,5	2,2	2,2	2,2	2,1	2	1,9
2	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	5	5,3	5,1	5,2	5	5,1
0,5	6,6	6,6	6,4	6,6	6,5	6,5
0	7,4	7,4	7,4	7,6	7,4	7,2

Tabla 4.7- Pruebas realizadas en el laboratorio

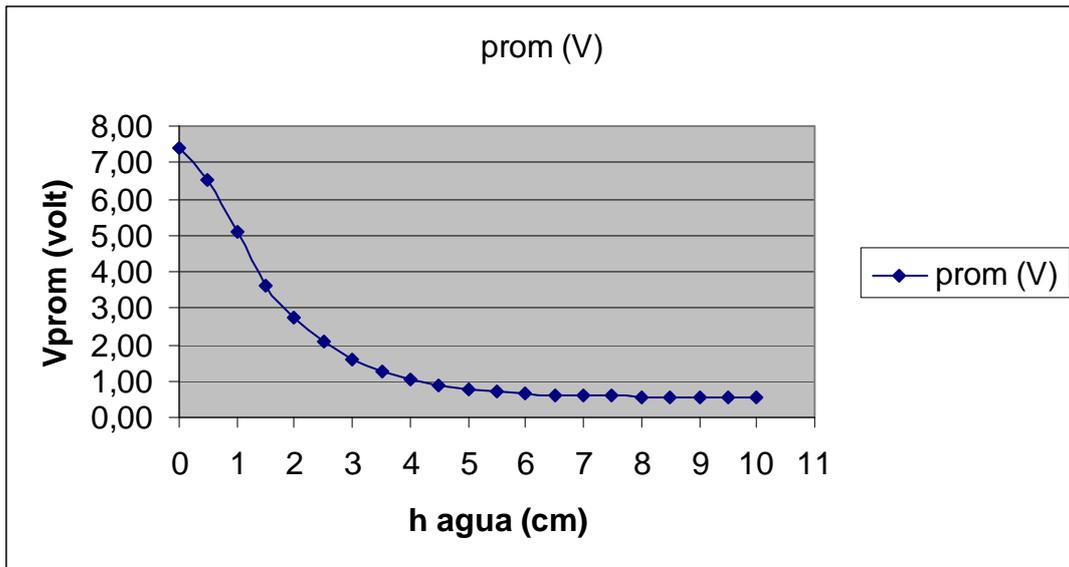
Para ver el comportamiento del dispositivo en general, lo que se hizo fue sacar los valores promedio de los voltajes para cada altura y así encontrar el comportamiento de nuestro prototipo y mostrarlo en la siguiente gráfica.

h(cm)	Vprom (V)
10	0,55
9,5	0,53
9	0,53
8,5	0,55
8	0,57
7,5	0,60
7	0,60
6,5	0,60
6	0,63
5,5	0,70
5	0,77
4,5	0,87
4	1,02
3,5	1,27
3	1,60
2,5	2,10
2	2,77
1,5	3,62
1	5,12
0,5	6,53
0	7,40

Tabla 4.8- Valor promedio

4.2.3 GRÁFICAS

De esta gráfica podemos sacar los siguientes datos: a partir de 6 centímetros encontramos que la variación comienza a ser mayor por lo que podemos asegurar que el prototipo es capaz de detectar las burbujas de aire a dicha altura. Pero a partir de los 3.5 centímetros es donde encontramos que nuestro dispositivo funciona mejor. Esto es bueno si se considera que lo que más nos importa es saber la cantidad de aire que se encuentra en la parte baja del fluido.



Gráfica 4.9- Valores promedio

4.3 COMPARACIÓN

Una vez que se realizaron las pruebas de los dos dispositivos y se obtuvieron las tablas y gráficas necesarias para cada uno de éstos, se puede realizar una comparación del comportamiento y funcionamiento de ambos y decidir cual de los dos se comporta de mejor manera.

Comencemos por mencionar que el medidor de contenido de aire en agua puede obtener dos mediciones diferentes en un mismo instante, esto debido a sus dos anillos de medición. Mientras que el prototipo solo puede realizar una medición. La única ventaja de obtener las dos mediciones simultáneas es la de poder comparar los valores obtenidos y verificar que sean los correctos. Por otra parte, las mediciones realizadas por el anillo externo incluyen a las mediciones realizadas por el anillo interno. Por esta razón se puede pensar que el incluir dos electrodos de medición en el medidor es innecesario.

Ya propiamente hablando del funcionamiento de los dos dispositivos se pueden comparar los siguientes datos.

La altura máxima de funcionamiento del medidor es de 1.5 centímetros en el anillo interno y de 3.5 centímetros en el anillo externo. Por otra parte, la altura máxima de funcionamiento de el prototipo para el laboratorio es de 6 centímetros por lo que es notoriamente superior el segundo. Este punto es el más importante de la comparación por que nos dice que el prototipo detecta la presencia de burbujas en una zona mayor que el primer medidor.

CONCLUSIONES

Como se planteó desde un principio, el objetivo de este trabajo era poder diseñar y construir un dispositivo capaz de medir la concentración de aire en el agua. Este objetivo se cumplió satisfactoriamente, pues se desarrolló el medidor y se le realizaron pruebas de funcionamiento que mostraron que el medidor funcionó correctamente. Los encargados de este proyecto por parte de la Comisión Federal de Electricidad nos pidieron que este primer dispositivo lograra funcionar con 1 y 3 centímetros de campo de trabajo o profundidad de campo de cada uno de los electrodos como mínimo y logramos aumentar en el primer valor de 1 a 1.5 centímetros y en el segundo de 3 a 3.5 centímetros, por lo que se puede decir que funcionó mejor de lo esperado.

Una vez que se realizaron las pruebas necesarias y se comprobó el buen funcionamiento del primer dispositivo, se planteó realizar un prototipo de medidor que partiera de las mismas características del medidor inicial, pero que presentara un mejor comportamiento. Entonces nos propusimos el nuevo objetivo de diseñar y construir este prototipo y comprobar, realizando las mismas pruebas que se le hicieron al primer medidor, que el segundo dispositivo se comporta de mejor manera que el primero.

Las pruebas hechas al prototipo mostraron que se comporta de mejor manera que el medidor inicial, por lo que nuestro segundo objetivo se cumplió de buena manera. Estas mejoras se deben a la nueva configuración de cuatro electrodos que se diseñó en el Instituto de Ingeniería y los cambios pertinentes que se realizaron a los circuitos del dispositivo original. De esta forma pudimos obtener una profundidad de campo de casi 6 centímetros, el doble de lo que se pidió originalmente como meta a alcanzar.

Los dos aparatos propuestos en este trabajo tienen la ventaja de ser de fácil manejo, de un bajo costo y desmontables, lo que permite intercambiar medidores de posición.

Como último paso, se mostraron los dos dispositivos a las personas de la Comisión Federal de Electricidad, se les planteó la forma en que ambos aparatos funcionan y se realizaron pruebas en su laboratorio en Cuernavaca, Morelos. Una vez que se mostraron los dos aparatos funcionando, ellos decidieron que solamente se desarrollaría uno de los dos, siendo el que presentara el mejor funcionamiento, el que se realizaría para que se colocara en la planta hidroeléctrica de “El Cajón”.

RECOMENDACIONES

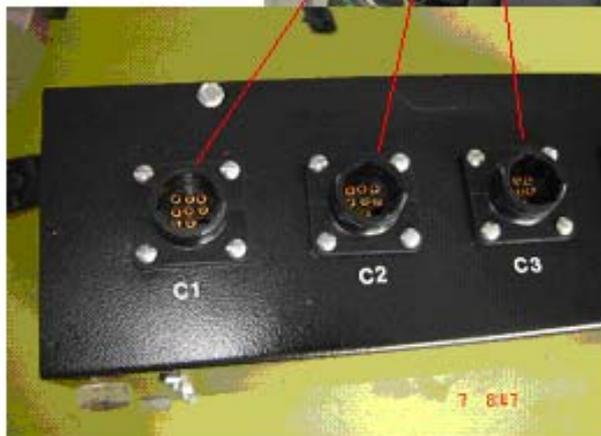
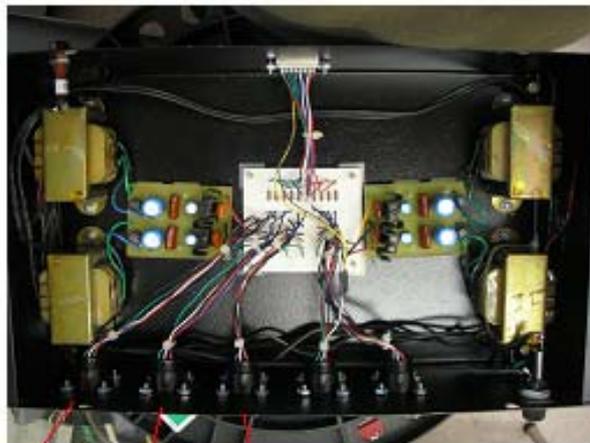
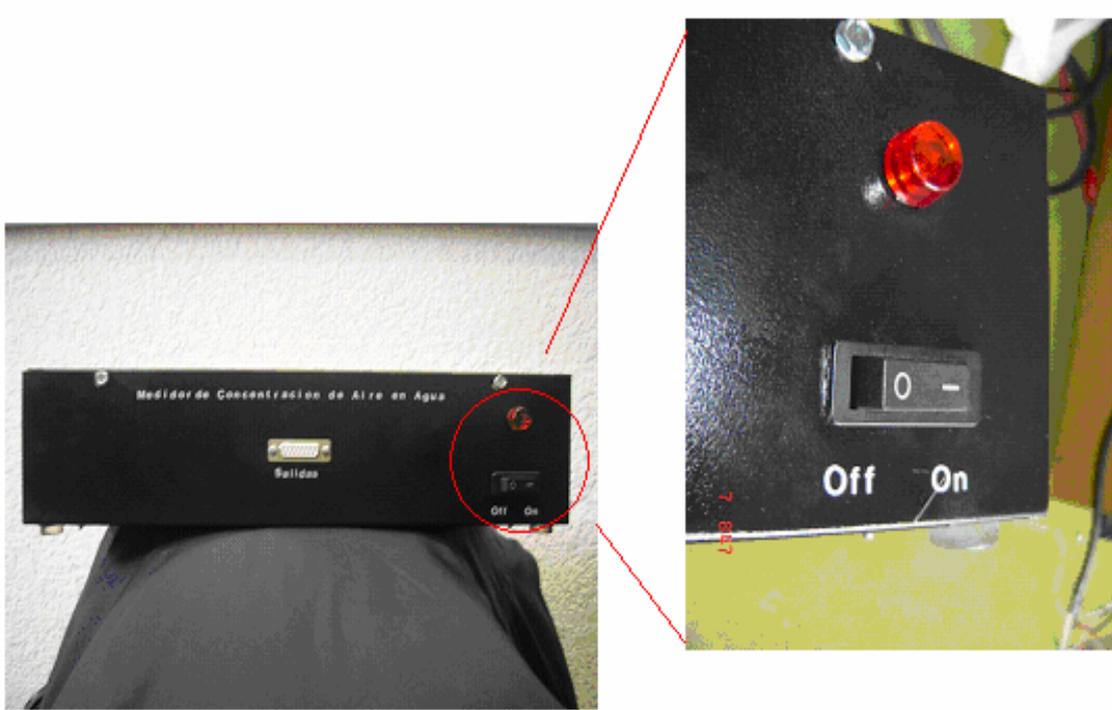
La calibración de los dos dispositivos, se realizó en el Instituto de Ingeniería, por la necesidad de realizar cambios a algunos elementos de los circuitos que se utilizaron, así como la facilidad de contar con el material necesario y los aparatos de medición, como el osciloscopio. La recomendación es, que para trabajos posteriores, se realice la calibración de los dispositivos en el modelo del laboratorio de hidráulica de la C.F.E. en Cuernavaca, debido a que las condiciones dinámicas que se presentan en el modelo, cambian un poco el comportamiento del dispositivo de las condiciones estáticas que se presentan en el Instituto.

Durante el desarrollo de este trabajo, también utilizamos un método alternativo para analizar el contenido de aire en el agua. Este método es muy prometedor pero lo tuvimos que dejar a un lado debido a las limitaciones que se presentaron y la recomendación es, que se desarrolle de una manera más completa en trabajos posteriores. Este método consta de utilizar una cámara de vídeo de alta velocidad, para grabar el flujo de agua que pasa por el vertedor. Para poder analizar el aire que se encuentra en el agua, se colocaron varios elementos luminosos y al incidir la luz emitida en las burbujas presentes, éstas se iluminan de forma que se distinguen perfectamente las zonas con aire y las que únicamente tienen agua.

Después se analizaron los vídeos obtenidos y se encontraron varias formas de analizar los resultados. Una de ellas era medir el diámetro de las burbujas y el número de éstas. Este método es un poco lento, pero también se utilizó otra forma de análisis, que consta de analizar el espectro de colores presentes en la imagen y conociendo el color con el que iluminamos las burbujas, sacar el porcentaje de zonas coloreadas del total de la imagen y así conocer cuanto es aire y cuanto agua.

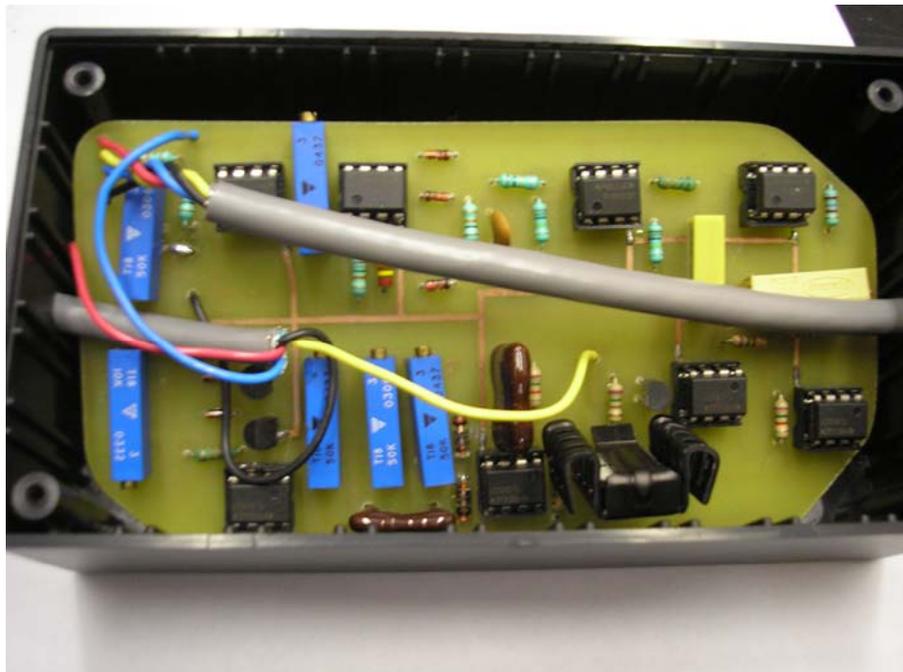
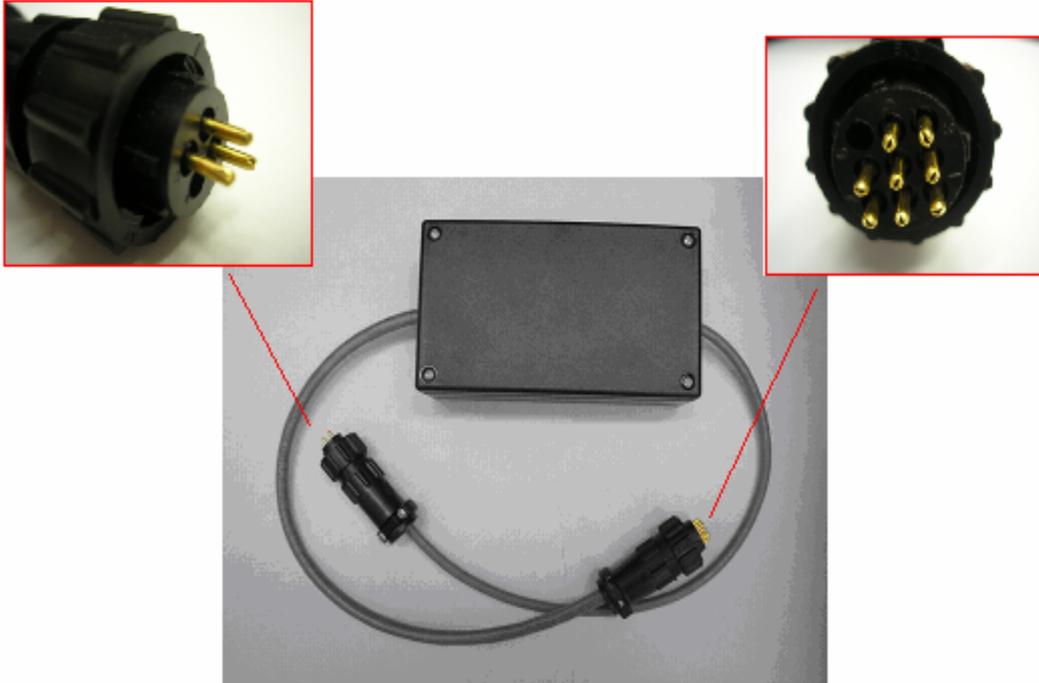
APÉNDICE 1

GABINETE PRINCIPAL



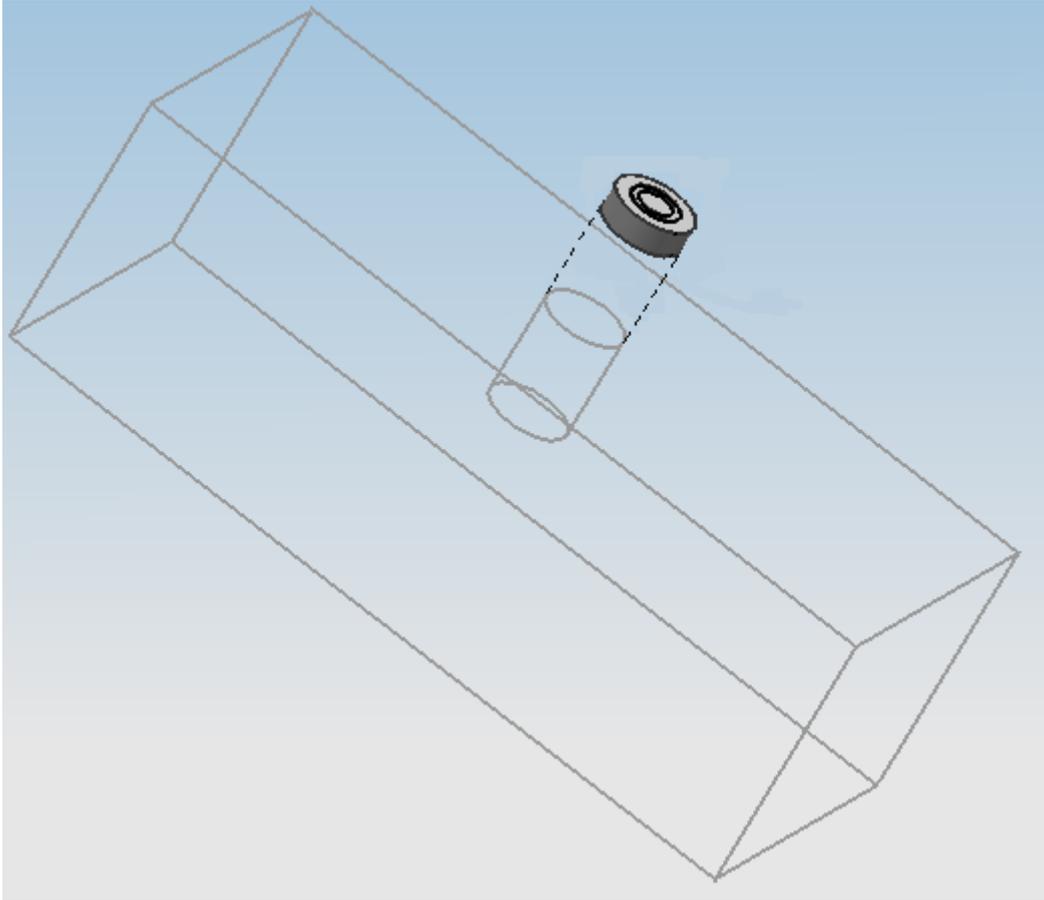
APÉNDICE 2

CAJA DE ACONDICIONAMIENTO



APÉNDICE 3

REGISTRO Y SONDA EN EL VERTEDOR



BIBLIOGRAFÍA

1.- CAVITATION.

Ronald Young
Ed. McGraw - Hill
1989

2.- ANÁLISIS BÁSICO DE CIRCUITOS EN INGENIERÍA.

J. David Irwin
Ed. Prentice - Hall Hispanoamericana, S.A.
6ª Edición.

3.- CIRCUITOS ELÉCTRICOS.

James W. Nilsson
Ed. Prentice – Hall
6ª Edición.

4.- CIRCUITOS ELECTRÓNICOS: ANÁLISIS, SIMULACIÓN Y DISEÑO.

Norbert R. Malik
Ed. Prentice – Hall
6ª Edición.

5.- DISEÑO CON AMPLIFICADORES OPERACIONALES Y CIRCUITOS INTEGRADOS ANALÓGICOS.

Sergio Franco
Ed. McGraw – Hill
3ª Edición.