



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUÍMICA

“ESTIMACION DE LA VELOCIDAD DE FLUIDOS
ELECTROLITICOS EN CANALES ABIERTOS Y
CERRADOS POR MEDIO DEL FENOMENO DE
DESPOLARIZACION”.

T E S I S

Que para obtener el Título de
INGENIERO QUÍMICO

p r e s e n t a

SERGIO GUILLERMO ILLINGWORTH TESTA

México, D. F.

1983



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

- I N D I C E -

		Pag.
	INTRODUCCION.....	1
CAPITULO 1	MEDIDORES DE FLUJO.....	4
	Clasificación y análisis de los - diferentes medidores de flujo.....	4
CAPITULO 2	POLARIZACION.....	32
	2.1.- Naturaleza de la polarización..	32
	2.2.- Medición de la polarización....	40
	2.3.- Tipos de polarización.....	42
	2.4.- Polarización por concentración.	46
CAPITULO 3	APLICACION DE LA DESPOLARIZACION A LA MEDICION DE LA VELOCIDAD DE FLUIDOS..	56
CAPITULO 4	METODOS EXPERIMENTALES.....	62
	4.1.- El Polaflux.....	62
	4.2.- Construcción de los electrodos.	65
	4.3.- Mecanismo de operación del Pola flux.....	67
	4.4.- Análisis de resultados.....	73
	4.5.- Experimentación en canales - - / abiertos.....	83
	4.6.- Análisis de resultados.....	87
CAPITULO 5	CONCLUSIONES.....	95
CAPITULO 6	BIBLIOGRAFIA.....	99

I N T R O D U C C I O N

La medición de las propiedades de un fluido es una de las principales variables a medir dentro de un proceso. En la mayoría, si no en la totalidad de las plantas químicas, existe la necesidad de medir las variables "flujo", "presión", "temperatura", etc. y hemos considerado precisamente a la medición de la velocidad de un fluido una de las más importantes para el buen funcionamiento y operación de un proceso.

Una medición de flujo acertada es esencial para la determinación de un balance de material en los procesos de separación tales como la destilación, extracción, cristalización, así como en operaciones de transformación y es extremadamente importante en la selección de equipo para el manejo de fluidos tales como bombas, compresores, tuberías, válvulas, etc.

Como consecuencia de la importancia de la medición de la velocidad de un fluido, la selección de un medidor apropiado es fundamental para el buen resultado del proceso al que se aplique, y necesario para el diseño de la planta química, de manera que el ingeniero debe comenzar con una cuidadosa elección respecto al tipo de medidor adecuado para cada sección del proceso en cuestión. Esto dependerá de la importancia de una operación en particular y de su criterio individual, dependiendo de las consideraciones de exactitud, mantenimiento, tipo de indicador, flexibilidad, disponibilidad, costo y resistencia a los fluidos procesados.

Desde luego que ésto no es nada fácil desde el momento en que hay fluidos demasiado corrosivos que precisan un cierto tipo de medidor únicamente, no importando que el precio de éste sea elevado. O quizá haya ocasiones en que definitivamente no exista en el mercado ningún medidor aplicable a las condiciones tan drásticas del proceso, y, en ese caso, lo pertinente es tratar de adaptar de la mejor manera posible el medidor que más se aproxime a dichas condiciones.

A veces es necesario usar recubrimientos para evitar una corrosión demasiado rápida, pero en ocasiones estos recubrimientos impiden que el aparato desarrolle toda la capacidad para la que fue diseñado, y ésto causará problemas de exactitud, o requerirá de un mantenimiento demasiado frecuente. No obstante, día con día se introducen al mercado nuevos medidores, o quizá, medidores con mecanismos ya conocidos, pero con modificaciones que permiten aplicarlos a casi cualquier proceso. El costo puede ser un poco elevado, pero definitivamente, para el poco mantenimiento y la gran utilidad que va a brindar, es realmente una buena inversión la que se realiza, sobre todo tomando en cuenta la importancia de la medición de la velocidad de los fluidos, que ya señalábamos antes, y el hecho de que se tendrá la confianza de que nuestro proceso no se va a interrumpir abruptamente debido a la falla de ese equipo. Además no debemos olvidar que este tipo de medidores se usan muy frecuentemente para regular la cantidad de fluido que se introduce a determinado equipo que generalmente es de mayor importancia, como por ejemplo un reactor, y el hecho de que nos arriesgáramos a colocar un medidor de bajo costo, pero no lo suficientemente confiable, haría que se pusiera en peligro, si no el reactor mencionado, sí la calidad del producto final, que se habría visto afectado por un aumento o disminución del reactivo que fue erróneamente agregado debido al mal medidor.

Es debido a ésto que poco a poco se han ido desarrollando diferentes tipos de medidores de flujo, cada uno con un mecanismo diferente o mejorado, pero siempre tratando de que cada vez se logre una mayor precisión.

Haciendo un poco de historia, podríamos mencionar que la necesidad e importancia de medir el flujo se presentó desde el tiempo de los faraones del antiguo Egipto, quienes utilizaban presas o vertederos para medir el agua de irrigación de sus cultivos. También se tiene conocimiento de que los romanos usaron placas de orificio para medir el agua de distribución urbana en los tiempos del César.

Esto viene a demostrar que la variable "flujo" ha sido de primordial importancia hasta nuestros días, ya que podemos encontrar medidores de flujo hasta en las viviendas de la comunidad, los cuales se utilizan para la medición del agua y el gas consumidos por una familia.

En el siglo XVIII Bernoulli estableció la relación básica entre la presión y la velocidad; además, Venturi publicó un reportaje sobre el tubo de flujo que lleva su nombre. Sin embargo, no fue sino hasta 1887 que Clemence Herschel desarrolló el tubo Venturi comercial. El estudio sobre la placa de orificio para la medición de flujo gaseoso fue comenzado por el científico Weymouth en 1903.

Con el transcurso del tiempo se han venido perfeccionando las técnicas de medición de flujo en cuanto a precisión, teniendo mejores sensores de presión diferencial que representan mayor seguridad y mayor amplitud en el campo de aplicación. También han aparecido otros medidores que se basan en diferentes principios teóricos, como el rotámetro, los medidores electromagnéticos, los que utilizan el ultrasonido, etc. y es precisamente el objetivo de este trabajo mostrar un nuevo modelo de medidor de flujo, cuyo principio se basa en la despolarización de dos electrodos colocados en una solución electrolítica.

Creemos que, así como los estudios anteriores a este respecto han contribuido al desarrollo de la industria química, principalmente a partir del siglo XIX, el nuestro será también de provecho para ésta.

CAPITULO 1

M E D I D O R E S D E F L U J O

Debido a que el tema principal de este trabajo versará sobre el desarrollo, las características, la experimentación y los primeros resultados y posibles perspectivas de un nuevo tipo de medidor de flujo tanto en tuberías como en canales expuestos a la intemperie, creemos que es conveniente hacer una somera revisión de los sistemas de medición utilizados en la actualidad por las diferentes industrias para satisfacer requerimientos, o bien muy generales, o bien sumamente específicos, de acuerdo a los procesos químicos que se llevan a cabo, o a las sustancias que se están manejando.

Desde luego, al describir los diferentes equipos de acuerdo a su principio de funcionamiento, sólo se hará en forma relativamente abreviada, ya que el estudio profundo de cada aparato queda fuera de la finalidad de este trabajo. La medición del flujo de fluidos a que se hará referencia a continuación, incluye una descripción de los aparatos y técnicas más comúnmente empleados para determinar la cantidad total de flujo en cierto lapso, o la velocidad de flujo en un instante determinado, con un especial énfasis a las aplicaciones más generalizadas en los procesos industriales.

Clasificación y análisis de los diferentes medidores de flujo.

1.- Medidores en los que la velocidad de flujo es proporcional a la variable que se está midiendo.

1.1.- Presión diferencial.

1.1.1.- Placa de orificio.

1.1.2.- Tubo Venturi.

1.1.3.- Tubos de baja pérdida de presión.

1.1.4.- Tobera.

1.1.5.- Medidor de codo.

1.1.6.- Tubo Pitot.

1.1.7.- Pitot-Venturi.

- 1.2.- Area variable:
 - 1.2.1.- Rotámetro.
- 1.3.- Velocidad:
 - 1.3.1.- Turbina.
- 1.4.- Diferencial nivel-área:
 - 1.4.1.- Canales.
 - 1.4.2.- Vertederos.
- 1.5.- Fuerza (Momentum angular):
 - 1.5.1.- Mássico tipo impulsor turbina.
 - 1.5.2.- Embraque histéresis.
 - 1.5.3.- Doble turbina.
 - 1.5.4.- Coriolis.
 - 1.5.5.- Giroscópico.
- 1.6.- Térmico:
 - 1.6.1.- Transferencia de calor.
 - 1.6.2.- Alambre caliente.
- 1.7.- Otros:
 - 1.7.1.- Ultrasónico.
 - 1.7.2.- Magnético.
 - 1.7.3.- Swirlmeter.
 - 1.7.4.- Flujo sólido.

2.- Medidores cuantificadores.

- 2.1.- Desplazamiento positivo de líquidos:
 - 2.1.1.- Disco.
 - 2.1.2.- Aspa rotatoria.
 - 2.1.3.- Embolo oscilante.
 - 2.1.4.- Embolo reciprocante.
 - 2.1.5.- Lóbulo rotatorio.
- 2.2.- Bombas:
 - 2.2.1.- Embolo.
 - 2.2.2.- Diafragma.
 - 2.2.3.- Peristáltica.
 - 2.2.4.- Proporcionamiento.

2.3.- Desplazamiento positivo de gases:

2.3.1.- Tipo campana.

2.3.2.- Fuelles.

2.3.3.- Lóbulos impulsores.

1.1.- Principios generales de los medidores de presión diferencial.

Debido a que la mayor parte de los medidores de flujo originan una diferencia de presión, en la sección donde se toma la medida se pueden utilizar dispositivos sencillos y fáciles de usar para medir la presión e indicar esta diferencia. Uno de los instrumentos para medir la diferencia de presión es el manómetro de tubo, en forma de U, que contiene un fluido que no puede ser idéntico ni miscible en el fluido que estamos estudiando. Generalmente se utiliza un fluido más pesado que el que se va a medir, pero en algunas ocasiones se utiliza un fluido más ligero, en cuyo caso el tubo en U se invierte. Un caso típico de esto es cuando nos encontramos en presencia de un material pastoso.

El medidor de presión diferencial se fundamenta en el teorema de Bernoulli, el cual dice que una corriente de fluido posee la cualidad de que la suma de la energía de presión, la energía cinética y la energía potencial en un punto, es igual a la suma de las energías en otro punto, más las pérdidas debidas a la fricción entre esos dos puntos.

Este principio es aplicado para la medición de flujo, alterando la velocidad de una manera predeterminada, comúnmente mediante una reducción del diámetro. La reducción, conocida como elemento primario de medición, hace que el fluido se contraiga y, una vez que el fluido permanece constante, la velocidad de éste aumenta al pasar por la reducción y, por lo tanto, la presión estática disminuye al mismo tiempo, según la ley de la conservación de la energía. La diferencia entre las presiones antes y después de la reducción, llamada comúnmente diferencial, representa un índice de la velocidad de flujo.

La presión diferencial medida es convertida a unidades de flujo por medio del dispositivo de medición. La forma más sencilla de este dispositivo es un manómetro en forma de U donde el flujo se determina midiendo la diferencia de niveles entre ambas columnas de mercurio.

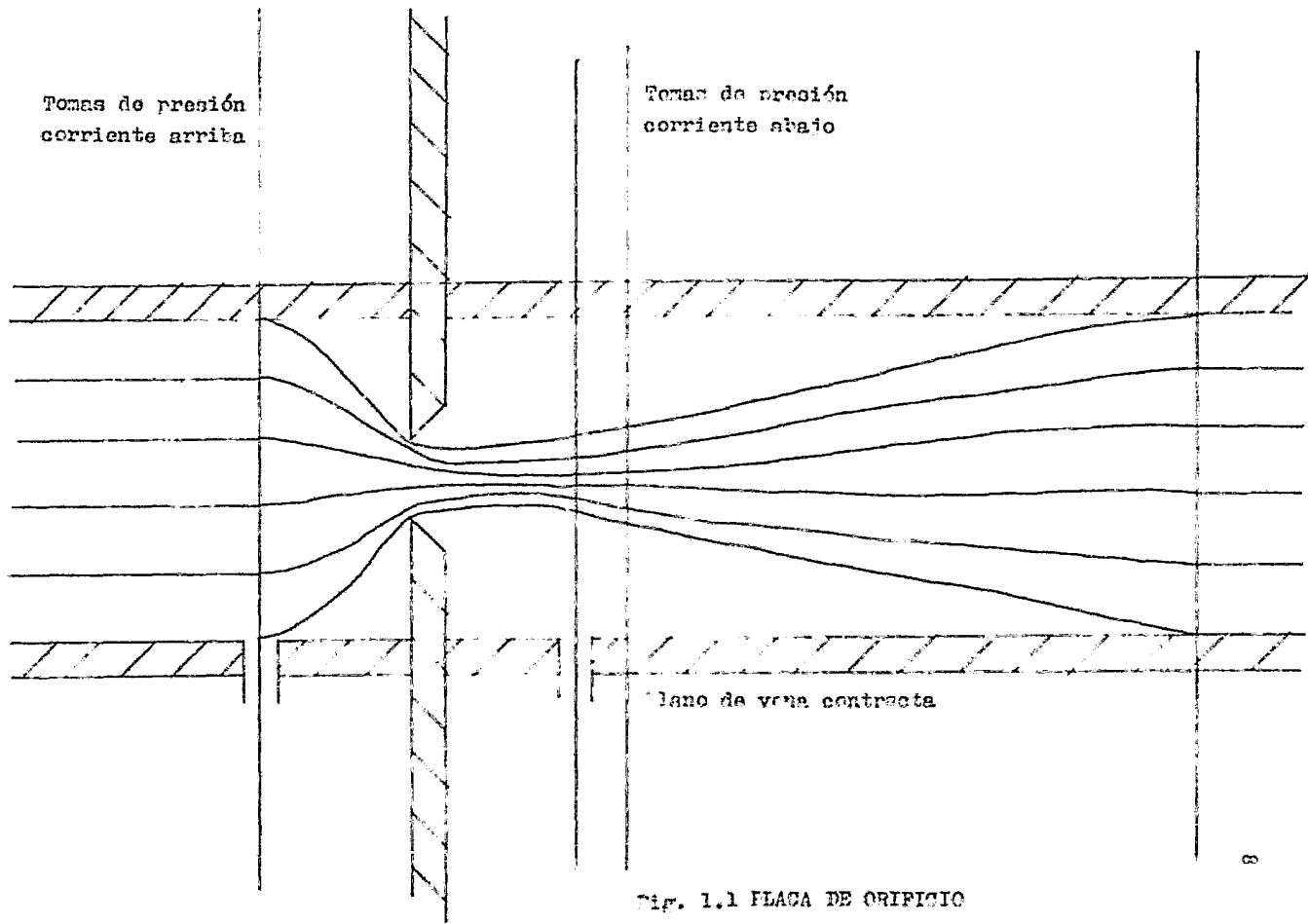
Una de las características principales de este tipo de -- medidores es que no proporcionan lecturas directas para la medición del flujo másico o volumétrico, por lo que es necesario hacer uso de las ecuaciones básicas para obtener el gasto. Además dependen de una reducción en el camino del flujo, la cual produce un cambio en la velocidad. Este cambio, sin embargo, - no es grande, y después de un pequeño recorrido del fluido al pasar dicha reducción, vuelve a adquirir su velocidad inicial.

Las ecuaciones básicas de flujo suponen que la velocidad es uniforme a través de una sección transversal dada en la - - práctica. Sin embargo, la velocidad de flujo en cualquier sección transversal se aproxima a cero en la capa adyacente a la pared de la tubería, y varía a través del diámetro. Este perfil de velocidad de flujo tiene un efecto importante sobre la - relación entre la velocidad de flujo y la presión diferencial.

1.1.1.- Placa de orificio.

Un medidor de orificio es uno de los ejemplos típicos de los medidores de velocidad mediante presión diferencial. Normalmente consiste en una placa plana con un orificio perforado en el centro. La placa perforada se inserta perpendicularmente a la dirección del flujo, obligando a éste a pasar a través -- del orificio.

De acuerdo a la posición y forma de la reducción con respecto a la placa de orificio, podemos encontrar placas con orificio concéntrico, excéntrico o segmental, los cuales pueden ser de corte afilado o cuadrado. El espesor de la placa depende del gasto que se esté manejando.



Tomas de presión
corriente arriba

Tomas de presión
corriente abajo

Plano de vena contracta

Fig. 1.1 PLACA DE ORIFICIO

La placa de orificio delgada, con perforación concéntrica, de corte afilado, tiene en particular importantes ventajas incluyendo su manufactura económica para altas presiones, facilidad de instalación y rapidez de reemplazamiento.

La localización exacta de la toma de presión corriente -- arriba es relativamente poco importante, excepto para una relación de diámetros alta. Desde dos y medio diámetros de tubería a medio diámetro de tubería corriente arriba, la presión es -- casi constante sobre todas las relaciones de diámetros comerciales. Desde medio diámetro de tubería corriente arriba de la placa, hay un incremento gradual en la presión de una magnitud apreciable en relación de diámetros, arriba de 0.5. Abajo de esta relación no hay un incremento gradual importante de la -- presión. La localización de las tomas de presión corriente -- abajo es muy importante. Las mejores condiciones se obtienen localizando la toma de presión en la vena contracta para distintas relaciones de diámetros y tipos de orificio.

Debido a las pérdidas tan grandes de fricción por los remolinos generados, en el momento de la reexpansión del flujo -- después de la vena contracta, la recuperación de presión en un medidor de orificio es pobre, por lo que ésto es una gran desventaja en este tipo de medidores.

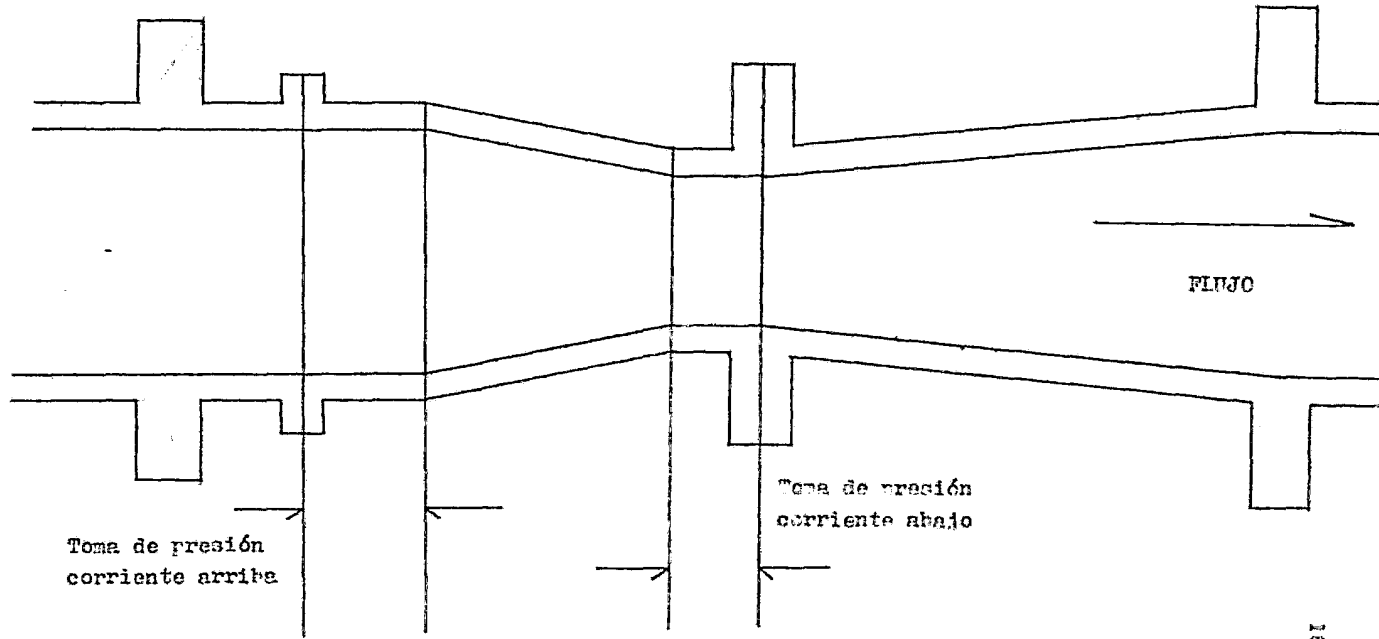
La placa de orificio concéntrico no es recomendada para -- materiales pastosos ni fluidos sucios, donde los sólidos pueden acumularse alrededor de aquella. La placa de orificio de -- corte afilado no se recomienda para fluidos fuertemente corrosivos, los cuales tienden a redondear el corte afilado del orificio. La cantidad de flujo que puede manejar la placa de orificio está limitada únicamente por el tamaño de la tubería, y -- en cuanto a la exactitud, puede decirse que es bastante grande.

1.1.2.- Tubo Venturi.

La teoría, el comportamiento general, y los cálculos para

Fig 1.2

TUBO VENTURI CLASICO



el tubo Venturi, los tubos de baja presión y las toberas de flujo, son similares a los de la placa de orificio. Sin embargo, en estos elementos hay un continuo contacto entre el fluido y la superficie del elemento primario, en contraste a la placa de orificio, donde el contacto sólo existe en el corte afilado. La superficie final del elemento primario puede tener un efecto importante sobre el coeficiente, que en este caso aumenta con el incremento del número de Reynolds (al inverso del caso de la placa de orificio de corte afilado). El coeficiente calculado para este caso es menos confiable que para una placa.

El tubo Venturi consiste de las siguientes partes:

a) Sección cónica convergente corriente arriba, cuya sección transversal disminuye conforme nos acercamos a la garganta del elemento primario, y la velocidad aumenta con la consecuente disminución de presión.

b) Una garganta cilíndrica en la cual no existe ni aumento ni disminución de presión.

c) Un cono de recuperación divergente, en el cual la velocidad disminuye y la presión se recupera.

Las tomas de presión se colocan a medio diámetro de tubería corriente arriba en el principio de la convergencia, y en la mitad de la garganta.

Este dispositivo no tiene cambios bruscos en su contorno ni esquinas afiladas ni proyecciones dentro de la corriente de flujo. Debido a esto, puede ser utilizado para materiales pastosos y para líquidos sucios.

Hay un ahorro sustancial de potencia cuando se miden grandes cantidades de flujo. La pérdida de presión resultante es solamente el 10 ó 25% de la pérdida de presión que existe en los dispositivos de medición que funcionan con la placa de orificio. Los tubos Venturi son frecuentemente usados para medir grandes flujos de aire a baja presión.

La mayor limitación para el tubo Venturi es el costo para el mismo tubo, y frecuentemente para la instalación de la longitud necesaria en los tamaños más grandes. Un tubo Venturi es mucho más difícil de inspeccionar que una placa de orificio. Además, la seguridad de medición con un tubo Venturi puede ser menor que con una placa de orificio, a menos que el tubo Venturi sea diseñado específicamente para un rango de flujo determinado.

Debido a la considerable área de contacto del fluido con el cono de entrada, los efectos debidos a la presión son apreciables principalmente cuando tratamos con líquidos viscosos. No obstante el tubo Venturi es considerado el mejor medidor de presión diferencial para medir líquidos con gran concentración de sólidos.

El tubo Venturi es un medidor adecuado para líquidos y gases, y puede medir desde un galón por minuto para líquidos o desde un pie cúbico por minuto para gases, hasta cualquier velocidad máxima, limitada solamente, como ya se mencionó, por el tamaño de la tubería. El costo varía de acuerdo al material usado, siendo la fibra de vidrio más barata que el acero al carbón, y éste más económico que el acero inoxidable.

1.2.- Medidores de área variable.

1.2.1.- El Rotámetro.

El rotámetro es un medidor de flujo que consiste en un tubo de medición que se adelgaza gradualmente dando una forma casi cónica, y en un flotador que se mueve libremente hacia arriba o hacia abajo dentro del tubo. Este tubo está montado verticalmente, con el extremo más angosto en el fondo. El fluido que se mide entra por el fondo del tubo y pasa alrededor del flotador, empujando a éste hacia arriba, y sale después por la parte superior del tubo.

Cuando no hay fluido a través del rotámetro, el flotador-

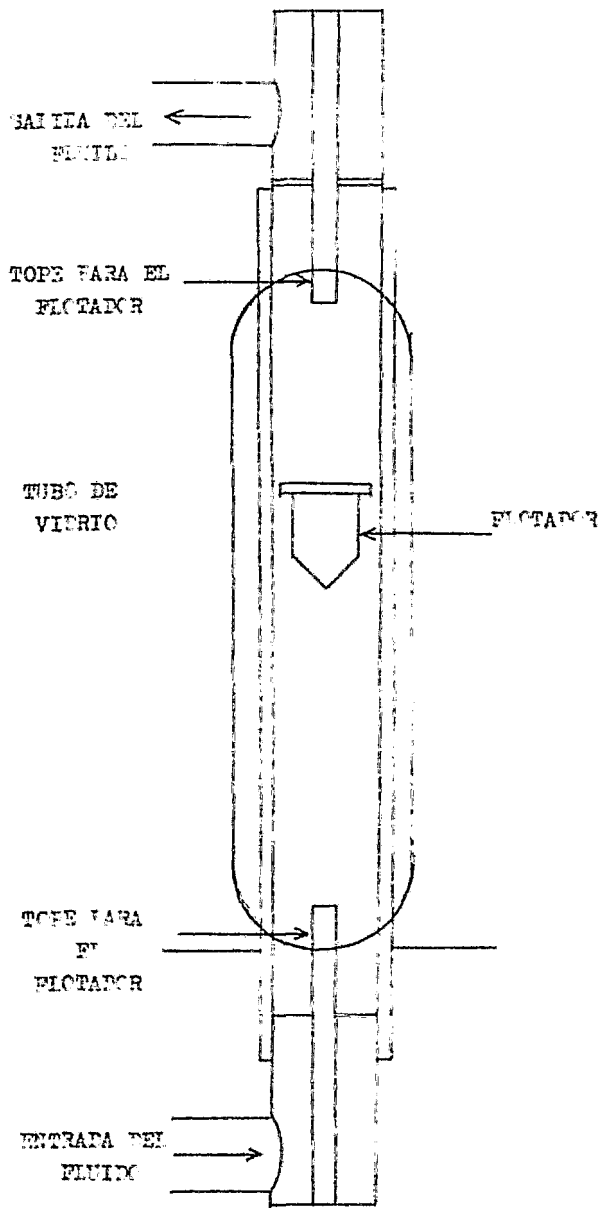


Fig. 1.3.- RECAMERA DE FLOTE DE VIDRIO

permanece en el fondo, y tiene un diámetro aproximadamente -- igual al del tubo. Cuando el fluido entra al tubo, el efecto -- de arrastre del fluido levanta al flotador, y lo elevará tanto más arriba cuanto mayor sea la velocidad de dicho fluido. Hay una pequeña abertura anular entre el flotador y el tubo. La -- caída de presión ocasionada al forzar al fluido a pasar a través de esa abertura o espacio anular aumenta, y levanta al flo tador para incrementar el área entre éste y el tubo, hasta que las fuerzas hidráulicas actúan sobre él, equilibrándose con su propio peso.

En los rotámetros la reducción del área varía en propor-- ción a la velocidad de flujo, y la presión diferencial a tra-- vés de la reducción permanece constante, en contraste con los medidores de reducción constante, como la placa de orificio o el tubo Venturi, que tienen una abertura fija, y la presión -- diferencial a través de sus reducciones es proporcional al flu jo. Cada posición del flotador corresponde a una velocidad de flujo en particular, para un fluido de una misma densidad y -- viscosidad. Es necesario proveer al medidor de una escala de -- calibración o lectura sobre el tubo, y así la velocidad de flu jo puede ser determinada por observación directa de la posi-- ción del flotador dentro del tubo.

Generalmente los tubos son de vidrio, precisamente para -- hacer factible la observación del flotador dentro de aquél, pe ro también a veces se utilizan tubos metálicos, donde el vi-- drio no es satisfactorio. En este caso, la posición del flota-- dor debe ser determinada directamente por técnicas eléctricas-- o magnéticas. El uso de técnicas indirectas para determinar la posición del flotador también nos puede proporcionar una lectu ra directa. Los rotámetros de este tipo pueden transmitir se-- ñales eléctricas, magnéticas o impulsos directamente a contro-- ladores o registradores.

Existe una gran variedad de fluidos líquidos que puede -- manejar el rotámetro. Hay una amplia gama de selección de tu-- bos, flotadores, accesorios y empaques que están disponibles -- para un servicio particular determinado. También se pueden me--

dir líquidos muy pesados, como el mercurio, pero como son materiales más pesados (generalmente) que el flotador, el rotámetro es entonces invertido. El flujo, en este caso, entrará por la parte superior del tubo, y saldrá por el fondo. Cuando el tubo esté lleno de líquido estático, el flotador, por ser más ligero, se dirigirá a la parte superior del rotámetro. Cuando el flujo comienza, la fuerza del líquido hacen que el flotador sea arrastrado, y tomará entonces una posición relacionada con la velocidad del flujo.

En cuanto al manejo de gases, el rotámetro es un medidor barato que causa una caída de presión esencialmente constante y baja, generalmente menor a 1 lb/pul^2 manométricas. Cuando se utiliza con materiales pastosos, el rotámetro tiende a limpiarse por sí mismo, debido a la velocidad del flujo y a la libertad del flotador para moverse verticalmente. La precisión de los rotámetros con escala logarítmica es tan alta que sólo permiten errores de 0.5%.

1.3.- Medidores de velocidad.

1.3.1.- Turbina.

El principio de operación consiste en que un rotor, que gira libremente, y que está montado coaxialmente en el centro de la tubería, posee mamparas que están separadas moderadamente, y que gira a una velocidad angular proporcional a la velocidad del fluido que recorre la tubería. Entonces, mediante la medida exacta de la velocidad del rotor, la velocidad o flujo volumétrico del fluido que nos interesa puede obtenerse fácilmente, teniendo en cuenta que conocemos la constante de calibración del aparato.

Los problemas de rozamiento o fricción que presentaban este tipo de medidores para aplicaciones industriales y para los medidores de gran tamaño, fueron resueltos hasta que se introdujo al mercado el balero de tungsteno. Aún así, en la actualidad todavía hay algunos problemas sin resolver. A dife

rencia de los medidores más comunes, el medidor de turbina es sensible a la viscosidad, por lo que los medidores calibrados con agua, por ejemplo, darán diferentes curvas para el factor de medición al emplearlos con un líquido diferente. Las razones que explican esto son complejas, y se relacionan con el hecho de que una curva de error para los medidores de turbina es afectada por una combinación de fuerzas de empuje hacia arriba, obstaculizadoras y de fricción que afectan al rotor y a los baleros en diferente grado. Se han desarrollado medios para convertir a los medidores de turbina tanto más prácticos cuanto más exactos, usando múltiples registradores de señal.

Un incremento mayor en exactitud ha sido posible al desarrollar contadores de medidores de turbina. Generalmente se utiliza un factor de medición promedio en base al rango de velocidades del fluido que se mide, el cual se obtiene analizando la curva de calibración del medidor. Con el empleo de técnicas microprocesadoras, aparentemente no hay ninguna razón técnica para no poder programar el contador para utilizar el factor de medición exacto que corresponda a la velocidad de fluido a la que el medidor está operando.

Este tipo de medidores son muy sensibles a las condiciones de instalación. Se registraron desviaciones en los factores de calibración de hasta 1% en un medidor de 50 mm cuando se alteró la configuración de una manguera flexible 100 diámetros corriente arriba del medidor. Desde luego que éste es un caso extremo, pero sirve para ilustrar el problema.

1.4.- Medidores de diferencial nivel-área.

Los canales, vertederos y medidores similares desarrollan una diferencia de nivel que es usada para medir la velocidad de flujo. Su principal aplicación es la medición de la velocidad del agua en canales abiertos, incluyendo irrigación, sistemas de desagüe, aguas negras e instalaciones similares en que el flujo es manejado en conductos que generalmente no están completamente llenos con el líquido.

Las características de medición de los canales y vertederos pueden ser establecidas a partir de las dimensiones físicas, sin necesidad de calibrar el flujo. Las derivaciones teóricas están basadas en datos de prueba que cubren un amplio rango de operación. Esto es de gran importancia para aplicaciones de flujos de 10 000 GPM o más, donde la calibración del flujo podría resultar difícil y cara. Son muy comunes, ya en nuestros días, mediciones en vertederos de millones de galones por día.

Para vertederos rectangulares, trapezoidales y canales Parshall, el flujo es aproximadamente proporcional a $3/2$ de la potencia de la diferencia de nivel medida. Para vertederos de hendidura en V el flujo es proporcional a $5/2$ de dicha potencia. Esto da como resultado un amplio margen de medición de flujo en un dispositivo simple de 75 a 1 para vertederos rectangulares, trapezoidales y para canales Parshall. Arriba de 500 a 1 para vertederos con hendidura en V nos brinda una relación directa entre la diferencia de nivel y el volumen real de flujo sin necesidad de corregir para determinada densidad de líquido.

1.4.1.- Canales.

El ejemplo clásico relativo a este tipo de medidores es el denominado canal Parshall. Fue desarrollado por R. L. Parshall en la estación experimental del Colegio de Agricultura de Colorado, en cooperación con la división de irrigación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Este elemento primario es un canal tipo Venturi. Las pérdidas de nivel son de aproximadamente de $1/4$ de las que tienen los vertederos para la misma capacidad. En este medidor no tenemos que eliminar la velocidad del fluido antes del medidor, que sería el caso de los vertederos. Las altas velocidades en el sistema tienden a eliminar depósitos de lodo, fango, y otros desechos sólidos, los cuales pueden acumularse y alterar la medición. El medidor puede construirse con materiales de la localidad, y la calibración está basada en sus dimensiones físicas. Existen

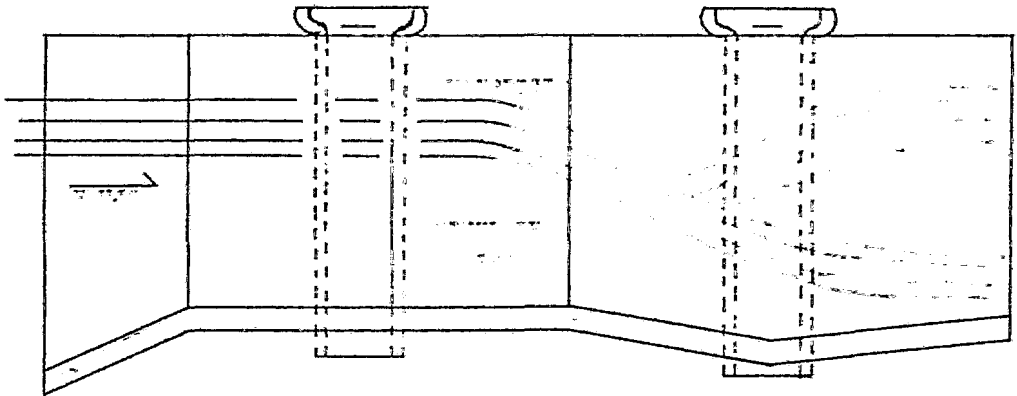
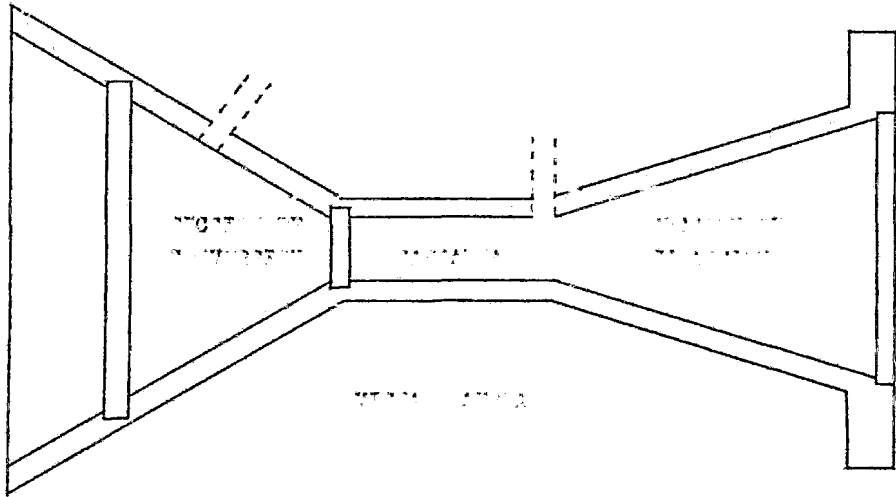


Fig. 1.4.- [Illegible text]

medidores con una amplitud de garganta desde 3 pulgadas hasta 40 pies, con capacidades de 13 hasta 900 000 GPM.

Este tipo de medidor no da una exactitud muy buena; sin embargo, requiere de poco mantenimiento y, en todo caso, la exactitud que brinda es la adecuada para usos de irrigación, drenaje, etc.

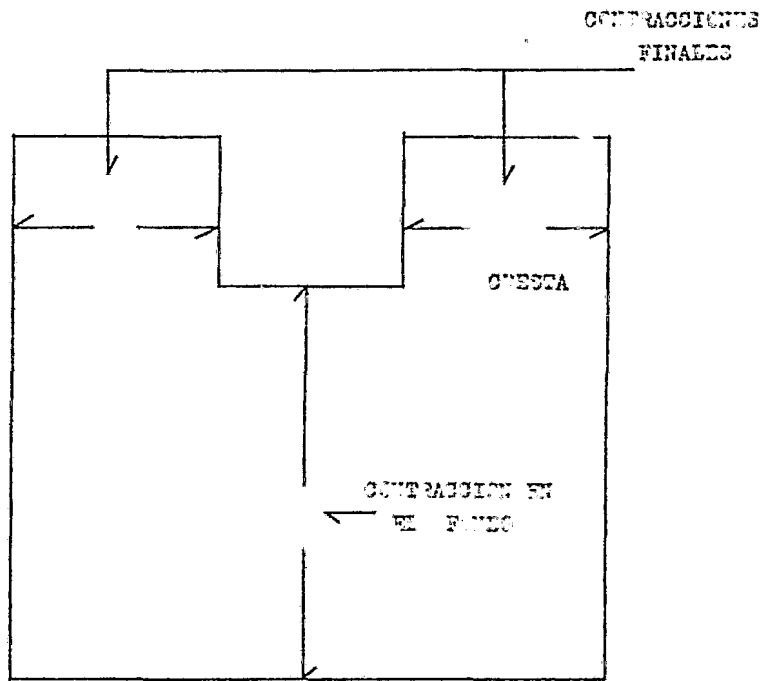
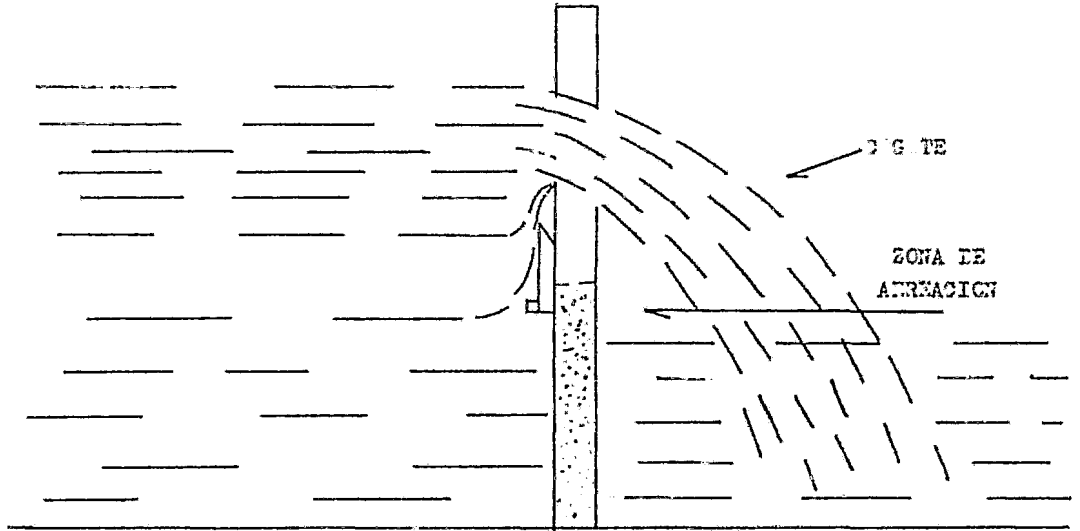
El nivel después del medidor no tiene efectos sobre la medición aún cuando el nivel del líquido corriente abajo alcance el 70% del nivel que se encuentra antes de la garganta en la sección de conversión. Ambos niveles están referidos a la sección del piso del canal. Para canales menores a 1 ft. de amplitud, la relación de niveles tiene un máximo de 60%. Esta es la forma de medición más preferida y usada.

Cuando las condiciones de operación son tales que el nivel del fluido corriente abajo excede al 70% del nivel corriente arriba, aparece entonces la operación con sumersión. La medición puede obtenerse con un nivel corriente abajo tan grande como el nivel corriente arriba. Sin embargo esto requiere un factor de corrección basado en los niveles corriente arriba y corriente abajo en los cálculos de flujo. La exactitud disminuye, y no se utiliza equipo estándar para la lectura exterior directa.

1.4.2.- Vertederos.

Los vertederos tienen una abertura en la parte superior de un dique que atraviesa el canal por el que fluye el líquido que va a ser medido. La abertura puede ser, como ya se mencionó antes, rectangular, trapezoidal o de hendidura en V. El caso especial de un vertedero trapezoidal con una pendiente de 1-4 se conoce como un vertedero Cippoletti. Esta forma induce a simplificar los cálculos de flujo. Los vertederos de hendidura en V tienen un ángulo que va de 30 a 90 grados, dependiendo de la capacidad de flujo que se requiera.

Fig. 1.5.-FLUJO EN UN VERTEDERO



La diferencia de nivel es medida en la alberca a una distancia adecuada corriente arriba del vertedero, comparada con la cresta horizontal de un vertedero rectangular o trapezoidal o en el punto bajo de la hendidura en V del vertedero. Generalmente se dispone de diferencias de nivel menores a 0.1 ft para mediciones mínimas de flujo, y de más de 0.1 ft para un flujo máximo. Bajo condiciones muy favorables, puede admitirse una diferencia de nivel de hasta 1.25 ft. Estos límites se pueden encontrar fácilmente con un diseño práctico de una hendidura en V de 30 grados, que medirá flujos mínimos de 1 GPM, mientras que para un valor máximo, un vertedero rectangular o trapezoidal está limitado solamente por la longitud de la cresta.

Los vertederos con hendidura en V son usados para los flujos más pequeños, y tienen un coeficiente constante desde 3 hasta 399 GPM con un flujo proporcional a la cabeza elevada a $5/2$. El coeficiente se incrementa bruscamente en un 2% para flujos menores a 1 GPM, y cambia relativamente poco para flujos por encima de 500 GPM. Esto sucede para la hendidura de 30 grados, ya que la hendidura de 90 grados no es muy recomendable. Los vertederos rectangulares y Cinoletti se utilizan para flujos más grandes. Un vertedero rectangular con una cresta de 2 ft de longitud desarrolla una diferencia de 0.2 ft para 250 GPM, y de 1 ft para 2700 GPM. Para estos vertederos el flujo es directamente proporcional a la longitud de la cresta y a la cabeza elevada a $3/2$.

El muro del vertedero puede ser un dique en un canal natural o en una caja del vertedero. El recipiente localizado antes del vertedero debe ser suficientemente grande para que los efectos de la pared del fondo y las laterales se puedan considerar despreciables. Es importante que el nivel del líquido después del muro sea inferior al claro, para que el fluido que pase a través de éste tenga posteriormente una caída libre. El corte del muro puede ser de forma aguda o recta. Es común biselar el muro del lado posterior del corte con un ángulo de 45 grados y con un filo de $1/32$ del corte. Para rectangulares y

Cippoletti debe ser cuidadosamente biselada la cresta. Este tipo de medidores es suficientemente exacto para sus requerimientos. Tienen un error de $\pm 2\%$ cuando se ha hecho una buena instalación en base al elemento primario.

1.5.- Medidores de fuerza.

En muchos procesos industriales el fluido es vendido en base a su peso. Similarmente, las personas que utilizan combustibles en aparatos aéros deben saber indispensablemente la velocidad de consumo de dicho líquido. Una familia de medidores de flujo para medir flujo másico directamente, opera bajo el principio del momento angular de un cuerpo, y en su relación al par fuerza-distancia. Varios métodos que aplican esta relación se han usado para diseñar y construir medidores de flujo másico. Actualmente sólo el medidor del tipo impulsor turbina ha encontrado una considerable aceptación comercial, y sus características se señalan a continuación.

1.5.1.- Medidor de flujo másico tipo impulsor turbina.

Este medidor utiliza dos elementos de rotación en la corriente de flujo: un impulsor y una turbina. Ambos elementos contienen canales a través de los cuales fluye el fluido. El impulsor es manejado a una velocidad constante mediante un motor a través de un cople magnético, e imparte una velocidad angular al fluido a medida que éste recorre el medidor. La turbina localizada enseguida del impulsor absorbe todo el momento angular del fluido, y entonces recibe un par proporcional al momento angular. La turbina está frenada por un resorte que se deflexiona en un ángulo proporcional al par ejercido sobre el resorte por la turbina, (y ésta a su vez por el fluido), dando así una medida indirecta del flujo de masa.

1.6.- Medidores Térmicos.

Los medidores de flujo térmicos pueden dividirse en dos categorías;

a) Los medidores de flujo que miden el aumento en temperatura de un fluido después de que una cierta cantidad de calor le ha sido añadida. Son los llamados medidores tipo transferencia de calor.

b) Los medidores de flujo que miden el efecto del fluido sobre un cuerpo caliente. Son los denominados de alambre caliente o medidores termopares.

Ambos medidores pueden ser utilizados para la medición en términos de masa, y son muy usados en servicio de gas.

1.6.1.- Medidor tipo transferencia de calor.

En este medidor, el calor es añadido a la corriente del fluido con un calentador de inmersión eléctrico. Este calentador transfiere el calor al fluido, y para determinar la cantidad de calor que es transmitida al fluido, utilizamos un wattmetro. Se colocan entonces termómetros o termopares antes y después del calentador, y conociendo las temperaturas que ambos registran, el calor específico del fluido y la cantidad de calor añadida, mediante una sencilla fórmula podemos determinar la velocidad del fluido.

Un medidor de flujo de este tipo de construcción tiene muchos problemas de área. Los sensores de temperatura y el calentador deben sobresalir en la corriente del fluido. De esta manera, estos componentes (particularmente el calentador) son fácilmente dañados por la corrosión. Además, la integridad de la tubería se ve modificada, aumentando así el peligro de fugas.

1.6.2.- Medidor de alambre caliente.

El funcionamiento de este medidor es como sigue: dos termopares se conectan en serie para formar una termopila. Esta termopila se calienta haciendo pasar corriente alterna a través de ella. Un tercer termopar se coloca directamente en la corriente del fluido, fuera del circuito de la termopila. La corriente alterna no pasará a través de este tercer termopar y, por lo tanto, no lo calentará. Una vez habiendo colocado la

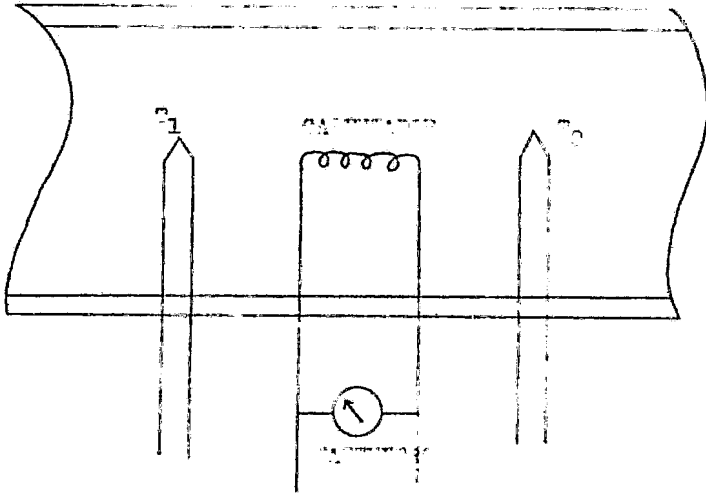


Fig. 1.6 - TRANSFORMER WITH TWO PRIMARY WINDINGS AND ONE SECONDARY WINDING

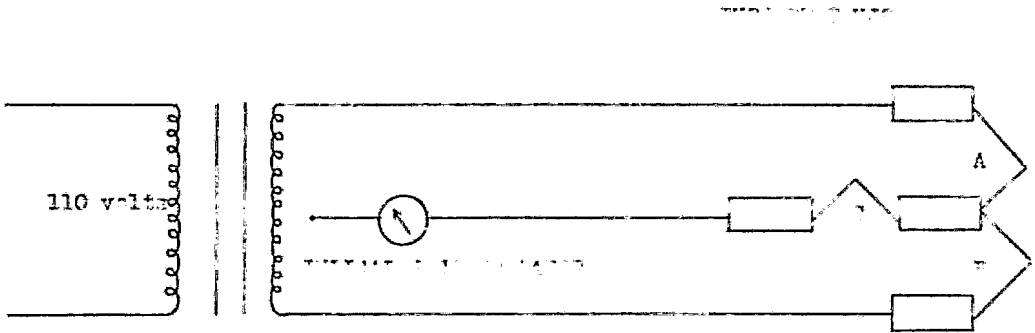


Fig. 1.7 - TRANSFORMER WITH ONE PRIMARY WINDING AND ONE SECONDARY WINDING

termopila también en la corriente del fluido, y habiéndole ya pasado corriente alterna para calentarla, al comenzar a fluir la corriente, ésta enfriará la termopila. Ya que la potencia de la corriente alterna en la termopila se mantiene constante, ésta logrará un equilibrio de temperatura, y producirá una fuerza electromotriz que será una función de la temperatura del fluido, así como de su velocidad, densidad, calor específico y conductividad térmica. El tercer termopar alcanzará la temperatura del fluido, generando una fuerza electromotriz que también será proporcional a la temperatura del fluido, y que cancela el efecto de la temperatura sobre señales externas de la termopila calentada. Mediante ecuaciones que relacionan las variables arriba señaladas, se obtiene como resultado la velocidad del fluido.

1.7.- Medidores con características especiales.

1.7.1.- Medidores Ultrasónicos.

Cuando se transmite una onda de sonido contra la dirección de un flujo, aquella pierde velocidad. Si el sonido se transmite en la dirección del flujo, toma más velocidad. Este es el principio básico de los medidores ultrasónicos.

Si la velocidad del sonido en el fluido en reposo es C , y la velocidad del flujo es V , la velocidad real de la onda de sonido en el líquido en movimiento es $C \pm V$, donde el signo positivo se refiere a las ondas de sonido que se transmiten en la dirección del flujo, y el signo negativo a las que se transmiten en dirección contraria.

En el tipo más sencillo de estos medidores, se colocan dos transductores en determinada sección de la tubería, de manera que ciertos impulsos puedan ser transmitidos desde uno de ellos hacia el otro, en un ángulo θ con respecto a la dirección del flujo. Si conocemos C , D y θ (D es el diámetro interno de la tubería), deberá ser posible determinar la velocidad promedio del fluido, V , midiendo ya sea corriente arriba o corriente abajo, el tiempo de tránsito.

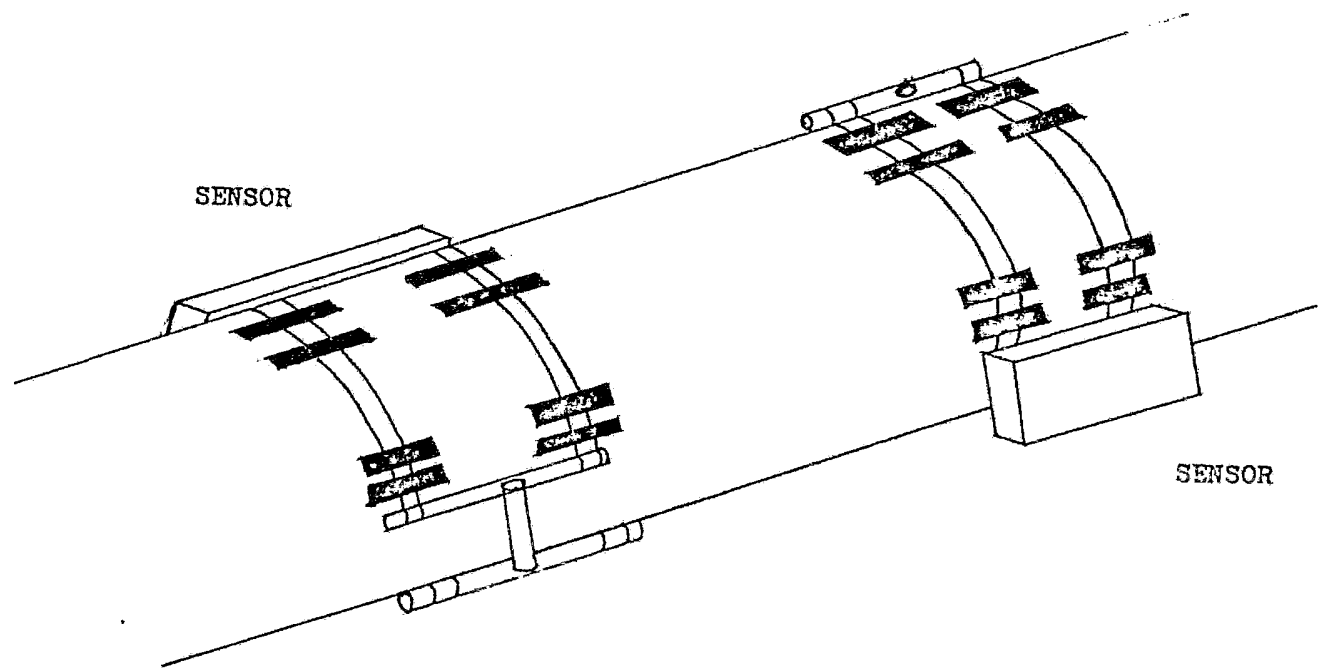


Fig. 1.8 MEDIDOR DE FLUJO MEDIANTE ULTRASONIDO

De cualquier manera, hay ciertas dificultades con este método. C está sujeto a variaciones impredecibles debido a la densidad y a la temperatura, y no puede conocerse con verdadera exactitud. La velocidad del fluido se determina únicamente a lo largo de la banda ultrasónica, mientras que el flujo volumétrico se deduce del área total de la tubería. Las fluctuaciones de temperatura y la presencia de contaminantes pueden tener cierto efecto en la medida que se realiza. El perfil de velocidades afectará también la exactitud de ésta, así como los depósitos en las paredes de la tubería.

2.1.- Medidores de desplazamiento positivo de líquidos.

Estos medidores dividen el líquido en volúmenes conocidos, basados en las dimensiones físicas del medidor, contando los o totalizándolos. Estos instrumentos son mecánicos, ya que con una o más partes móviles localizadas sobre la corriente de flujo, separan físicamente al fluido en incrementos. La energía para mover estas partes es proporcionada por la corriente misma del flujo, y se traduce en pérdidas de presión entre la entrada y salida del medidor. La exactitud de estos medidores en general depende de la minimización de los espacios entre las partes móviles y las partes estacionarias del medidor.

2.1.1.- Medidor de disco.

Este medidor se utiliza ampliamente para servicio de agua residencial. La parte móvil de este medidor consiste en un balón ajustado a un disco radial y a un eje axial. Esta parte se encaja y divide en cuatro espacios a la cámara: dos por encima del disco del lado de la entrada, y dos por abajo del disco del lado de la salida. Como el líquido procura fluir a través del medidor, la caída de presión desde la entrada a la salida causa que el disco se bambolea, y en cada uno de los ciclos desplaza un volumen igual al volumen de la cámara de medición menos el volumen del disco y la bola. El extremo del eje axial se mueve en forma circular a una leva que está conectada a un tren de engranes y al registrador-totalizador.

Este medidor tiene una exactitud de ± 1 a 2%. El medidor se utiliza y construye generalmente para tuberías pequeñas. Su máxima capacidad es de alrededor de 150 GPM.

2.1.2.- Medidor de aspa rotatoria.

Este medidor tiene aspas con muelles y resortes tensados que incrementan el sello del líquido. Entre el rotor montado excéntricamente, y la envolvente, se transporta el fluido desde la entrada hasta la salida, donde es descargado debido a la disminución de volumen. Este tipo de medidor es el que más ampliamente se utiliza en la industria petrolera, y se aplica en la medición de servicios, tales como gasolina y crudos, con una capacidad de hasta 17 500 GPM. La exactitud de este equipo es de $\pm 0.1\%$.

En resumen, los medidores de desplazamiento positivo de líquidos son los instrumentos más ampliamente usados para medir flujo volumétrico cuando hay compra-venta de un material. Como resultado de esto, hay una gran variedad de medidores que cubren un amplio espectro de requerimientos. Su simplicidad, buena exactitud, bajo costo y disponibilidad garantizan su consideración primaria cuando se va a seleccionar un medidor volumétrico.

2.2.- Bombas.

Una bomba medidora de flujo es una bomba de desplazamiento positivo que provee al fluido en proceso de una velocidad predecible y exacta. Normalmente el diseño, aplicación, especificaciones y usos de las bombas concierne a los ingenieros mecánicos y diseñadores de maquinaria. Las bombas de medición, no obstante, son usadas para medir velocidades de flujo, y en muchos casos, hay elementos de control final en casetas de instrumentación.

Existe una gran variedad de bombas controladoras de volumen disponibles comercialmente. Muchas de éstas están diseñadas para resolver las necesidades de una aplicación muy particular, como por ejemplo añadir hipoclorito de sodio a una pis-

cina, o proveer agentes químicos a un cromatógrafo, por lo que cada industria tiene sus propios tipos de bombas medidoras, -- aunque ésto no impide que haya también un buen número de bombas que pueden satisfacer un gran número de requerimientos sin ser específicamente para algo en especial.

2.2.1.- Bombas de émbolo.

La bomba de émbolo se emplea muy frecuentemente, y consta, como su nombre lo indica, de un émbolo que se mueve dentro de una cámara. En cada carrera del émbolo se libera un volumen fijo de líquido. La velocidad del flujo será entonces una función del diámetro del émbolo, de la longitud de la cámara y de la velocidad del émbolo. Este produce una presión en una sola dirección, por lo que el flujo producido es pulsante. Si se quiere evitar ésto, es necesario instalar un tanque acumulador a la descarga de la bomba. Otro método para reducir la pulsación es utilizar una bomba que emplee una combinación de más de una cámara-émbolo en paralelo. Comercialmente existen bombas que poseen hasta cuatro cilindros.

La principal desventaja de las bombas de émbolo respecta su servicio como medidoras de flujo, es que en ellas ocurren fugas en los empaques del émbolo y en el asiento de la válvula por lo que su exactitud y precisión bajan. Estas fugas pueden minimizarse utilizando dos válvulas en serie tanto en la succión como en la descarga.

2.2.2.- Bombas de diafragma.

Las bombas llamadas de diafragma utilizan una membrana -- flexible para transmitir una fuerza pulsante al fluido bombeado, sin permitir fugas externas como en las bombas descritas -- anteriormente. El diafragma puede hacerse de teflón, neopreno, o de metal flexible, y puede ser movido mediante un émbolo. La presión del diafragma se balancea hidráulicamente, y, con ayuda de placas de soporte, opera en una baja magnitud controlada de deflexión. Así, el límite de endurecimiento del material -- del diafragma no se excede.

2.2.3.- Bombas peristálticas.

En este tipo de bombas, el fluido es movido hacia adelante prensando progresivamente un tubo flexible desde la entrada hasta la descarga. Este tubo puede hacerse de un material que posea suficiente capacidad para recuperar su forma original inmediatamente después de la compresión. Ese movimiento puede lograrse de dos maneras: a) mediante rodillos que se conectan a un cuerpo rotatorio, y que prensan el tubo contra una pared -- circular; o b) mediante una leva de dedos operados sucesivamente, y que prensan el tubo sobre una superficie plana.

El tubo proporciona un volúmen fijo, y es de fácil mantenimiento y de rápido reemplazo. Normalmente estas bombas manejan únicamente bajas velocidades y bajas diferencias de presión, y por ello han encontrado gran aceptación en los campos médico y biomédico, donde se requieren altas exactitudes y esterilización del fluido.

2.2.4.- Bombas de proporcionamiento.

A veces es necesario mezclar múltiples fluidos en una determinada proporción, dependiendo de la velocidad de flujo, y para ello se emplean frecuentemente las bombas de proporcionamiento. Consisten éstas en muchos tubos de la misma o de diferentes medidas, que se colocan en paralelo para proporcionar un determinado flujo a través de cada uno de ellos. Esto permite, de acuerdo al tamaño de cada tubo, que cada uno de ellos - bombee, independientemente de la velocidad del motor y de su capacidad general de bombeo, la cantidad que es necesaria para la mezcla que vamos a efectuar.

2.3.- Medidores de desplazamiento positivo para gases.

2.3.1.- Medidor tipo campana.

Este es un medidor de laboratorio usado por los fabricantes de medidores, como un estándar primario mediante el cual - son calibrados los demás medidores, y que no puede utilizarse para medir flujo continuo.

El medidor consiste en un tanque anular cuya sección central está cerrada herméticamente al flujo de aire, pero abierta al tubo de entrada. El volumen anular se llena con aceite o agua, que actúan como sello. La campana es un tanque abierto - en el fondo, y con un domo cerrado, y se balancea mediante - tres contrapesos igualmente espaciados, que se pueden variar - para alterar la presión dentro de la cámara. El medidor que va a calibrarse se conecta al medidor de campana, ésta se sumerge en el tanque anular desplazando un volumen conocido de aire a través del medidor que se está probando, y así puede calibrarse éste.

2.3.2.- Medidor de fuelles.

El medidor de tres o cuatro cámaras se usa por los vendedores de gas para poder surtirlo a residencias y comercios. La sección de medición consiste en dos cámaras herméticamente cerradas, pero flexibles; tiene un disco metálico rígido, y los fuelles están hechos de un elastómero denso y flexible, y están colocados uno a cada lado. Las cuatro cámaras se conectan a la entrada y salida del medidor por medio de tubos apropiados. El flujo gaseoso que entra y sale por las cuatro cámaras es controlado por válvulas corredizas, las cuales son manejadas con un mecanismo de manivelas y eslabón, que a su vez están conectados al disco rígido de la cámara. El desplazamiento de las cámaras se ajusta para dar un flujo igual y continuo de gas. El mecanismo de manivelas se conecta también a un tren de engranes para registrar y totalizar el volumen de flujo a través del medidor. La exactitud de un medidor de este tipo no se afecta al cambiar de un gas a otro.

CAPITULO 2

P O L A R I Z A C I O N .

2.1.-Naturaleza de la polarización.

Ya que el principio fundamental mediante el cual operará nuestro nuevo equipo de medición de flujo de fluidos es el fenómeno de la polarización electrolítica, es imprescindible - - efectuar un análisis sobre este proceso antes de adentrarnos - en el estudio y desarrollo de dicho equipo medidor. En realidad, y como se verá más adelante, el fenómeno del que se obtiene provecho es el de la despolarización, y es precisamente por ello que estudiaremos en primer lugar este fenómeno, para entender perfectamente los usos y aplicaciones que puede tener, - posteriormente, para nuestros fines. Para ello, y para ilustrarnos prácticamente, comenzaremos con el siguiente ejemplo:

Si se sumergen dos electrodos de platino en una solución de ácido sulfúrico, y se conectan a través de un galvanómetro con una batería que posea una fuerza electromotriz menor de -- 1.7 volts, se encontrará que, aún cuando al principio fluye corriente a través del circuito, su magnitud, mostrada por el -- galvanómetro, decrece rápidamente, y al término de un tiempo -- muy corto se vuelve cero. Entonces, si se elimina del circuito la batería, y aquél se cierra mediante un alambre, se observará que el galvanómetro se desvía hacia el lado contrario. Al -- desarrollar una fuerza electromotriz que actúa en dirección -- contraria a la de la batería, los electrodos poseerán no solamente la cualidad de detener el paso de la corriente, sino que también tendrán la habilidad de enviar una corriente en dirección contraria a través del circuito durante cierto tiempo después de ser retirada la batería. Esta fuerza electromotriz, al comenzar, es aproximadamente igual a 1.7 v. El fenómeno que -- tuvo lugar se conoce como polarización.

Dicho fenómeno se debe a que los gases formados en los -- electrodos no se liberan completamente, siendo cierta cantidad

de ellos absorbida por los electrodos. Esto ocasiona que los mencionados electrodos funcionen como electrodos de gas. Eliminando la batería, los electrodos y la solución de ácido sulfúrico constituyen una celda de gas, la cual, al conectar los electrodos, produce una corriente en el sentido opuesto.

Evidentemente, se puede concluir que se requiere de una corriente de 1.7 v para electrolizar ácido sulfúrico con electrodos de platino. Ya que se ha encontrado que el agua puede descomponerse en sus elementos al ser colocada entre electrodos de platino que reciben una corriente de 1.23 v (el valor teórico de la fuerza electromotriz de la celda hidrógeno-oxígeno), es probable que este valor corresponda al trabajo requerido para descargar los iones sobre los electrodos; la diferencia entre este valor y el de 1.7 v, después de deducir la cantidad de fuerza electromotriz usada para vencer la resistencia óhmica del circuito, representa la presión adicional necesaria para liberar los gases de las superficies lisas de cada electrodo de platino. Este voltaje adicional, la diferencia entre el voltaje real observado, y el voltaje teórico, se denomina voltaje de polarización.

El fenómeno de la polarización también se observa en celdas donde los productos de la electrólisis son metálicos. Por lo tanto, cuando se sumergen electrodos lisos de platino en una solución de sulfato de cobre, y se conectan a una batería que posea una fuerza electromotriz menor de 1.5 v, la corriente que fluye a través del circuito disminuirá hasta cero en poco tiempo. El cobre depositado en uno de los electrodos de platino, y el oxígeno absorbido por el otro, constituyen una celda voltaica, cuya fuerza electromotriz actúa en dirección contraria a la de la batería. Un fenómeno similar se ha observado en celdas que contienen electrolitos fundidos, y se ha estudiado en ellas la variación de la polarización.

La polarización también ocurre cuando una solución de un electrolito se electroliza entre electrodos construidos con el

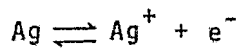
metal de que consta la solución. De esta manera, cuando una corriente se hace circular entre electrodos de plata sumergidos en una solución de nitrato de plata, la fuerza electromotriz - excede a aquella necesaria para vencer la resistencia óhmica - de la solución. Esto se debe a un incremento en la concentración del electrolito alrededor del ánodo, y de una disminución de su concentración en los alrededores del cátodo. Esto da como resultado la formación de una celda de concentración cuya fuerza electromotriz es opuesta a la externa que mantiene la corriente a través de la solución. Este tipo de polarización se denomina "polarización por concentración", y puede evitarse mediante una vigorosa agitación de la solución.

El efecto de la polarización es incrementar la fuerza - electromotriz requerida para mantener una corriente a través - de una celda electrolítica y, por consiguiente, la energía consumida en el proceso.

Desde el punto de vista de rendimiento de una celda, es importante poder reducir la polarización. Muchas veces esto se logra añadiendo diferentes sustancias a la celda, con el fin de acelerar los procesos que se desarrollan lentamente en los electrodos. Las sustancias que son capaces de hacer esto se denominan despolarizadoras. Por ejemplo, la reducción de polarización en un cátodo en donde se produzca hidrógeno, podrá lograrse agregando ciertas sustancias que reaccionen con el hidrógeno que va formándose.

El voltaje de un electrodo depende de la magnitud de la corriente en una forma no lineal. El comportamiento de las interfaces metal-electrolito a este respecto es similar a la de las interfaces semiconductor-electrolito y metal-semiconductor. Si no existe ningún voltaje o corriente externa aplicados al sistema, la interfase electrodo-electrolito tiende a conservar su potencial característico. La fuerza conductora que surge a partir del establecimiento del potencial del electrodo, es la tendencia de las especies químicas para establecer condiciones

de equilibrio energético entre la interfase y la totalidad de ambas fases. Consideremos un electrodo de plata en una solución de nitrato de plata. Estadísticamente cierto número de átomos de plata en el electrodo tenderán constantemente a abandonar su superficie y penetrar a la solución en forma de iones de plata. Simultáneamente, cierto número de iones de plata de la solución tenderán a introducirse en la superficie del electrodo. Si la probabilidad para que ocurran estas dos reacciones es la misma en ambas direcciones, el sistema estará en equilibrio:



y por lo tanto, las velocidades de reacción hacia la izquierda y hacia la derecha de la ecuación son idénticas.

Esas velocidades de reacción en uno y otro sentido en el equilibrio se denominan "corrientes de intercambio", ya que cada proceso individual conlleva un mecanismo de transferencia de carga. Las velocidades en uno y otro sentido dependen de la diferencia de potencial eléctrico a través de la interfase. La diferencia de potencial en turno se origina por la doble capa eléctrica. En el proceso de equilibrio, la composición de la doble capa cambia hasta que las velocidades de reacción en uno y otro sentido son iguales.

La doble capa consiste de capas relativamente compactas de carga en el lado del metal, y de capas relativamente difusas de carga opuesta en el lado de la solución. La carga de dicho espacio, visto de cierta manera, nos muestra en general el comportamiento de un condensador; de cualquier manera, la capacidad del condensador llamado interfase es constante solamente alrededor de valores de potencial limitados, donde no tengan lugar cambios drásticos en la estructura de la doble capa. La dependencia de las velocidades de la reacción electroquímica sobre el potencial, va en contra de las fuerzas electrostáticas que actúan sobre las especies cargadas de la interfase. Los campos eléctricos en la doble capa determinan enormemente-

el estado energético de las especies reaccionantes y, por consiguiente, la probabilidad de reacción.

Al mismo tiempo que el potencial del electrodo se modifica mediante la aplicación de una corriente externa o voltaje, la reacción en el electrodo en uno de los sentidos se vuelve diferente a la reacción en sentido inverso. La relación entre corriente y voltaje para cada reacción individual puede representarse aproximadamente por la expresión:

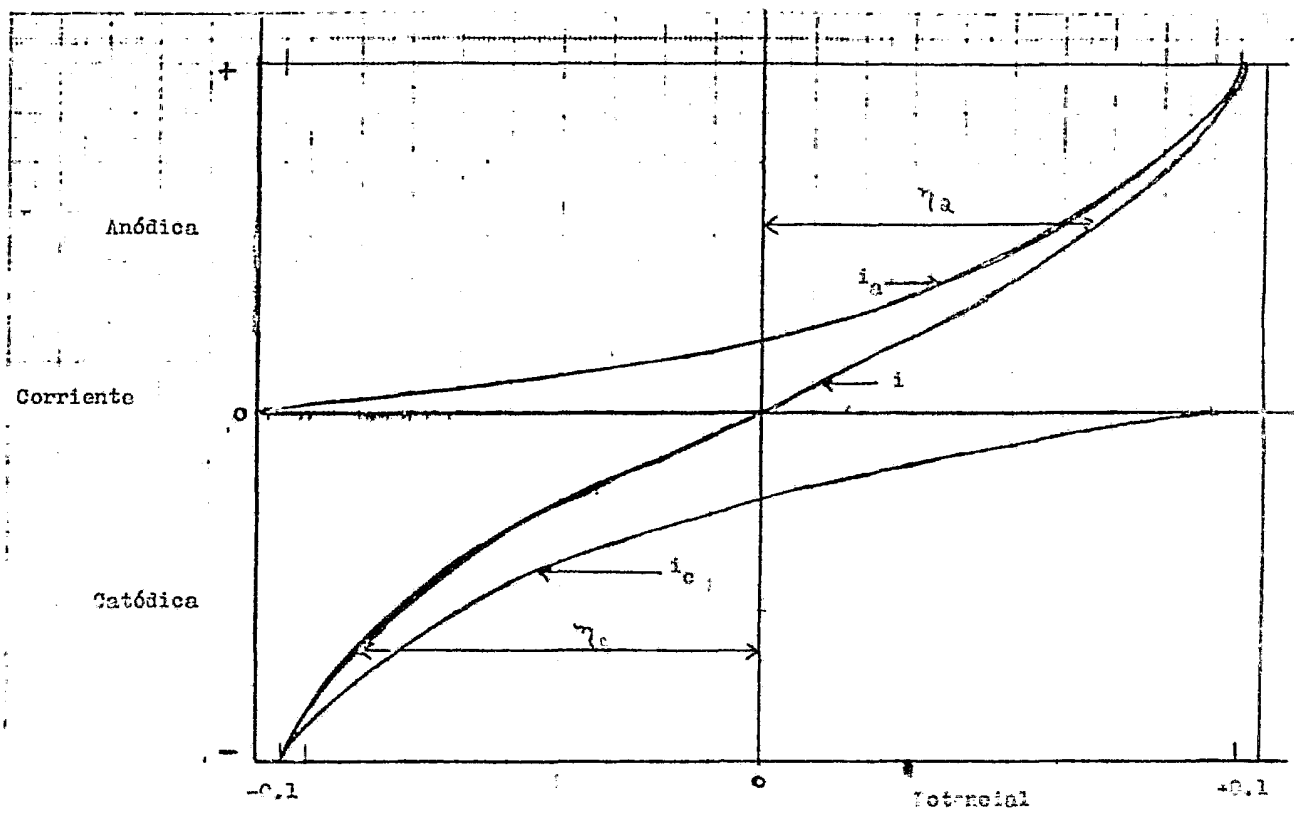
$$i = i_0 \exp (Zie_0 \alpha \eta / kt)$$

$$\eta = kt / Zie_0 \alpha (\log i - \log i_0)$$

donde i_0 es la corriente de intercambio, η es la desviación del voltaje de su valor de equilibrio, Zi es el cambio de valencia resultante de la reacción de transferencia de carga, α es el coeficiente de transferencia, y e_0 es la carga electrónica. La cantidad η se denomina sobrevoltaje, un término muy relacionado con polarización.

La clase de polarización dominante que controla la velocidad de corrosión de muchos metales en agua carente de aire, o en ácidos no oxidables, es el sobrevoltaje de hidrógeno en las áreas catódicas del metal. De acuerdo a la anteriormente citada definición de polarización, el sobrevoltaje de hidrógeno es la diferencia de potencial entre un cátodo en el que se desprende hidrógeno, ϕ (medida), y un electrodo de hidrógeno en equilibrio en la misma solución, o H_2 s.v. = ϕ (medida) - .059pH. Por lo tanto, el sobrevoltaje de hidrógeno se mide precisamente como se mide la polarización. En forma ideal, el sobrevoltaje de hidrógeno incluye solamente la polarización por activación (que se detallará más adelante), que correspondería a la reacción: $2H^+ \rightarrow H_2 - 2e^-$, pero se han reportado valores que incluyen también otros tipos de polarización.

De cualquier forma, polarización es un término que tiene un significado más amplio que sobrevoltaje, y no se utiliza --



gráfica 2.1 Curva Representativa de Polarización

i_a = corriente anódica i_c = corriente catódica
 η_a = sobrepotencial asociado η_c = sobrepotencial asociado
 i = corriente total

solamente para determinar la desviación del potencial de su valor termodinámico de equilibrio, como ya se vio, sino también para desviaciones de cualquier valor de circuitos abiertos estáticos que tengan lugar debido al paso de corriente.

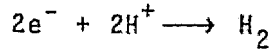
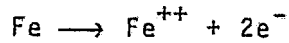
El sobrevoltaje se refiere al cambio del potencial del electrodo causado por el flujo de corriente, por lo cual sólo se eligen condiciones de corriente experimentales, tales que, por ejemplo, solamente se lleve a cabo una reacción en el electrodo, ya sea creación de hidrógeno, de oxígeno, o la disolución o depósito de un material. La polarización, en contraste, se refiere al cambio en el potencial del electrodo sin restricción de que se efectúe únicamente una reacción. La polarización, por ejemplo, puede involucrar un determinado cambio de voltaje en un cierto rango de evolución de hidrógeno y oxígeno simultáneamente, por lo cual la reacción en el electrodo cambia de un proceso a otro.

La gráfica de corriente contra voltaje se denomina curva de polarización, y se traza para una sola reacción electroquímica. Además de la curva de polarización, se trazan las corrientes para las reacciones en uno y otro sentido, individualmente. En el potencial de equilibrio, las corrientes para ambas reacciones son iguales y de signo contrario. Cuando tenemos un potencial anódico alto, relativo al valor de equilibrio la reacción catódica (de reducción) desciende hasta cero, y cuando tenemos altos potenciales catódicos, la reacción anódica (de oxidación) se vuelve cero.

Frecuentemente, se establece un aparente potencial de equilibrio sin que fluya una corriente externa, mediante diferentes reacciones opuestas, de tal manera que los productos de la reacción anódica no son idénticos a los reactivos de la reacción catódica. Este es el caso de muchos procesos de corrosión y de fenómenos relativos a la pasividad.

Por ejemplo, durante la reacción de fierro con ácidos, se

llevan a cabo las siguientes reacciones electroquímicas: -



El proceso anódico es la oxidación electroquímica del fiero, con liberación de dos electrones por molécula. Estos electrones se consumen en el proceso catódico, consistente en la -evolución de hidrógeno. El potencial bajo estas circunstancias se determina en gran manera por los procesos particulares que -permiten las corrientes de intercambio más grandes. Este potencial se denomina potencial mezclado, establecido mediante polarización interna mutua. En condiciones bajo las que se obtiene un potencial mezclado, se presume que cada reacción individual procederá a su velocidad característica, dependiendo únicamente del voltaje particular y de la actividad de las especies participantes, pero independiente de otros procesos que -se efectúen simultáneamente en el electrodo.

Como un último ejemplo de polarización, se considerará un electrodo de mercurio en una solución de cloruro de sodio. Aquí no están presentes cantidades significativas de iones mercuriosos en la solución, que podrían mantener una corriente de equilíbrio de magnitud apreciable. Los iones cloruro se adsorberán preferentemente a la superficie de mercurio y tenderán a producir una capa de carga negativa en el lado de la interfase correspondiente a la solución. La adsorción de iones cloruro -procederá hasta que las fuerzas electrostáticas, las fuerzas -químicas de bajo grado y las fuerzas de presión osmótica se --equiparen y el sistema se encuentre en equilibrio. El potencial que se establece de esta manera se denomina "potencial de adsorción". No ocurre una transferencia de carga real en ninguna dirección a través de la interfase, así como tampoco hay --cambio de corriente. Bajo la aplicación de una corriente externa, el voltaje del electrodo cambia su valor, hasta que el cambio es igual al impuesto externamente. Por consiguiente, el pontencial del electrodo puede acomodarse a cualquier valor deseado, dentro de ciertos límites, sin la necesidad de un flujo de

corriente continua de magnitud apreciable. Los electrodos que muestran este comportamiento se denominan "idealmente polarizables". Esto significa que la polarización puede mantenerse con una cantidad mínima de flujo de corriente. Si, de cualquier manera, el electrodo de mercurio es anodizado a un potencial suficientemente positivo, los iones mercuriosos penetrarán a la solución y precipitarán debido a los iones cloruro. El potencial entonces será cercano al del electrodo $\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2$. Si la corriente se interrumpe, el potencial asume el valor de este par, y no cambia en forma aparente bajo la acción de pulsos de polarización catódica o anódica pequeños.

En contraste con los electrodos idealmente polarizables, los sistemas que exhiben muy poca polarización se denominan -- "reversibles". Tanto más reversible sea un electrodo, menos polarizable será.

2.2.- Medición de la polarización.

En la siguiente figura se muestra una celda de dos compartimientos separados por un vidrio poroso en forma de disco, indicado por la letra G. Supóngase que el electrodo que se va a polarizar es el señalado con la letra B, mediante la corriente proveniente de D. El capilar L (llamado Luggin) de la celda de referencia R (c de un puente salino entre R y B) se coloca cerca de la superficie de B, minimizando así potenciales extraños causados por la caída IR a través del electrolito. La fuerza electromotriz de la celda B-R se anota para cada valor de corriente leído en el amperímetro A, permitiéndose un tiempo suficiente para que se establezcan condiciones estables. La polarización en B, ya sea ánodo ó cátodo, se anota en volts, con referencia al electrodo R de la media celda, para varias densidades de corriente. Los potenciales se convierten generalmente a la escala del electrodo normal de hidrógeno. Este se denomina el método directo para la medición de la polarización, y es el método que se usa principalmente en estudios de corrosión.

La distancia correcta del capilar L con respecto a B se ha discutido ampliamente en la literatura, debido al efecto perturbador del capilar en relación con la distribución de corriente al electrodo. Una manera de vencer la caída IR sin tener que colocar el capilar cerca del electrodo, es instalar un contacto oscilatorio en el punto Y, el cual interrumpe la corriente durante las medidas del potencial. Estas medidas a varias frecuencias del contacto oscilatorio se extrapolan a una frecuencia cero. La ventaja de este interruptor o método indirecto, para medir la polarización, es que se elimina por completo la caída IR, tanto en la zona entre el electrodo y el capilar, como a través de películas sobre el electrodo, pudiendo así colocarse el capilar lejos de la superficie de aquél.

Una desventaja es que los rápidos cambios que acompañan a la disminución de polarización, pueden llevarnos a un error, considerando que la polarización es menor cuando, mediante el método directo, vemos que en realidad es mayor.

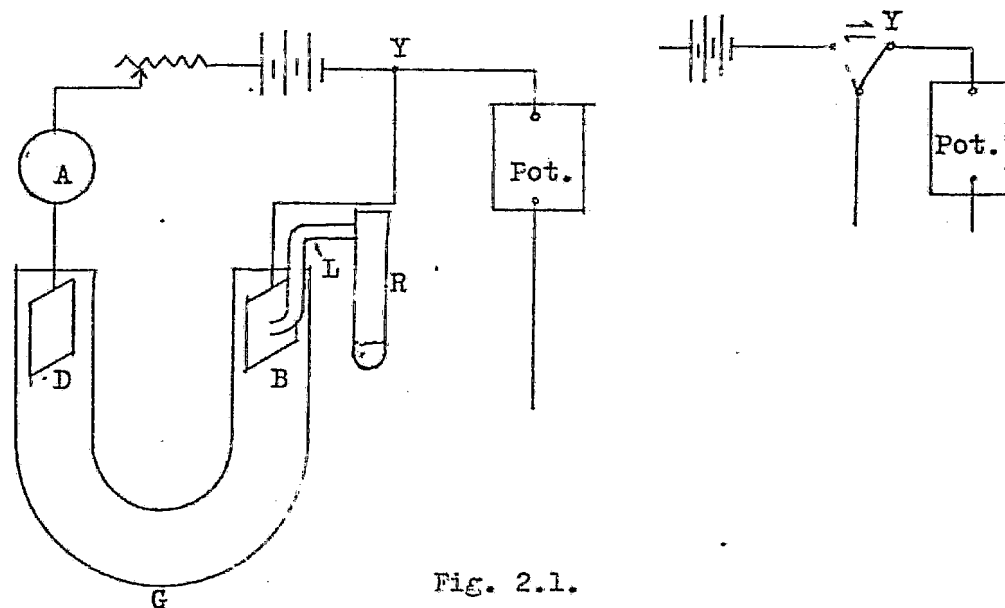


Fig. 2.1.

2.3.- Tipos de polarización.

Los diferentes tipos de polarización que se presentan en un electrodo pueden clasificarse en tres categorías:

2.3.1.- Polarización por concentración

Si se coloca un cátodo de cobre en una solución diluida de sulfato de cobre, cuya actividad del ión Cu se representa por (Cu^{++}) , entonces el potencial de oxidación E_1 , en ausencia de corriente externa, está dado por la ecuación de Nernst:

$$E_1 = -0.337 - \frac{0.0592}{2} \log (\text{Cu}^{++})$$

Cuando la corriente fluye, el cobre se deposita en el electrodo, haciendo decrecer la concentración superficial de iones Cu^{++} a una actividad $(\text{Cu}^{++})_s$. El potencial de oxidación- E_2 del electrodo se convierte ahora en:

$$E_2 = -0.337 - \frac{0.0592}{2} \log (\text{Cu}^{++})_s$$

Debido a que $(\text{Cu}^{++})_s$ es menor a (Cu^{++}) , el potencial del cátodo polarizado es menos noble o más activo que en ausencia de corriente externa. La diferencia de potencial, $E_2 - E_1$, es conocida como polarización por concentración, equivalente a:

$$E_2 - E_1 = \frac{0.0592}{2} \log \frac{(\text{Cu}^{++})}{(\text{Cu}^{++})_s}$$

Cuanto mayor sea la corriente, menor será la concentración de iones cobre en la superficie del electrodo, o menor será $(\text{Cu}^{++})_s$; entonces, mayor será la correspondiente polarización. Se alcanza una polarización por concentración infinita cuando $(\text{Cu}^{++})_s$ se aproxima a cero en la superficie del electrodo; a la densidad de corriente correspondiente a este límite de bajo valor de $(\text{Cu}^{++})_s$ se le denomina "densidad de corriente limitante". Obviamente, en la práctica, la polarización nunca puede llegar a ser infinita; por el contrario, se establece otra reacción en el electrodo a un potencial más elevado que el que correspondía a la primera reacción. En el caso de depó-

sito de cobre, el potencial se aproxima al de la evolución de hidrógeno: $2H^+ \rightarrow H_2 - 2e^-$. Este hidrógeno en forma gaseosa se desprenderá al mismo tiempo que el cobre se deposita.

Si i_L es la densidad de corriente limitante para un proceso catódico, e "i" es la densidad de corriente aplicada, puede verse que:

$$E_2 - E_1 = \frac{RT}{nF} \ln \frac{i_L}{i_L - i}$$

Conforme i se aproxime a i_L , $E_2 - E_1$ tenderá al infinito.

La densidad de corriente limitante (amp/cm²) puede evaluarse a partir de la expresión:

$$i_L = \frac{DnF}{\delta t} c \times 10^{-3}$$

donde D es la constante de difusión para el ión que se reduce, n y F tienen su significado usual, δ es el grosor de la capa de electrolito que carece de movimiento y que está próxima a la superficie del electrodo (aproximadamente a 0.05 cm en una solución sin agitación), t es el número de transferencia de todos los iones de la solución, excepto del ión que se reduce; y c es la concentración del ión en difusión, expresado en moles por litro. Debido a que D para todos los iones a 25°C en una solución diluida es aproximadamente igual a 1×10^{-5} cm²/s, la densidad de corriente limitante se puede reducir a:

$$i_L = 0.02 nc$$

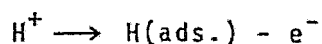
Para el H^+ y el OH^- , tiene D el valor particular de 9.3×10^{-5} y 5.2×10^{-5} respectivamente, y por ésto los valores correspondientes de i_L son mayores.

La polarización por concentración en un ánodo polariza al electrodo en la dirección catódica, opuesta a la dirección del cambio de potencial cuando el electrodo se polariza como cátodo. Para un ánodo de cobre, el valor superior limitante para la polarización corresponde a la formación de sales saturadas-

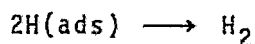
de cobre en la superficie del electrodo. El valor limitante no es tan grande como para la polarización catódica, donde la actividad del Cu^{++} se aproxima a cero.

2.3.2.- Polarización por activación

Esta es una polarización causada por una lenta reacción - en el electrodo. O, para verlo de otra manera, la reacción en el electrodo requiere de una energía de activación para poderse llevar a cabo. El ejemplo más importante es el de la reducción de los iones de hidrógeno en el cátodo, llamando al correspondiente término de polarización como sobrevoltaje de hidrógeno. $\text{H}^+ \rightarrow 1/2 \text{H}_2 - \text{e}^-$. En un cátodo de platino, se suponen las siguientes reacciones:

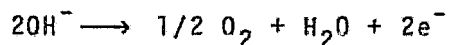


donde H(ads) representa a los átomos de hidrógeno adsorbidos - en la superficie metálica. La relativamente rápida reacción es seguida por una combinación de átomos de hidrógenos adsorbidos para formar moléculas de hidrógeno y burbujas de hidrógeno gaseoso:



Esta reacción es relativamente lenta, cuya velocidad determina el sobrevoltaje de hidrógeno sobre platino. El paso lento controlante de la descarga de los H^+ no es siempre el mismo, ya - que varía con el metal, la densidad de corriente y el medio - - circundante.

También se produce una elevada polarización por activación con la descarga de OH^- en el ánodo, acompañada por evolución de oxígeno:



A esto se le conoce como sobrevoltaje de oxígeno. El sobrevoltaje puede también ocurrir con descarga de Cl^- o Br^- , pero los valores a una densidad dada de corriente son mucho más pequeños que para la evolución de H_2 o de O_2 .

La polarización por activación es también característica de la deposición o disolución de iones metálicos. El valor puede ser pequeño para metales que no poseen transición, como plata, cobre o zinc, pero es mayor para metales de transición, como fierro, cobalto, níquel, cromo, etc. El anión asociado con el ión metálico influencia los valores de sobrevoltaje metálico más que en el caso del sobrevoltaje del hidrógeno. El paso controlante en dicha reacción no se ha determinado con precisión, pero en algunos casos es probablemente una velocidad lenta de hidratación del ión metálico a medida que abandona la capa superficial del electrodo, o de deshidratación del ión hidratado a medida que penetra al electrodo.

La polarización por activación, η , de cualquier clase, se incrementa de acuerdo a la densidad de corriente i , conforme a la ecuación de Tafel:

$$\eta = \beta \log \frac{i}{i_0}$$

donde β y el término i_0 son constantes para un metal y unas condiciones dadas, y que son, ambas, dependientes de la temperatura. La corriente de intercambio, i_0 , representa la densidad de corriente equivalente a las reacciones en un y otro sentido que se llevan a cabo en el electrodo en condiciones de equilibrio. Tanto mayor sea i_0 y tanto menor sea β , menor será el sobrevoltaje correspondiente.

2.3.3.- Caída IR

Las mediciones de la polarización incluyen un término denominado caída de potencial óhmico a través ya sea de una porción del electrolito que rodea al electrodo, o ya sea a través de una película, producto de la reacción metálica, en la superficie, o ya sea de ambos. Esta contribución a la polarización es igual a IR , donde I es la intensidad de corriente, y R equivale a l/K , que representa el valor en ohms de la resistencia, que tiene una longitud l y una conductividad específica K . El producto IR decrece simultáneamente con el corte de la corriente.

2.4.- Polarización por concentración.

Las reacciones en los electrodos, siendo heterogéneas por naturaleza, están asociadas a la formación de gradientes de -- concentración, como resultado de los fenómenos de transferen-- cía de masa que son parte integrante del proceso total del -- electrodo. Dicho de manera más clara, el transporte de masa -- iónico hacia o a partir de un electrodo, puede ocurrir en uno- o más de los siguientes tres mecanismos: difusión, migración,- y convección. La velocidad total de transferencia de masa, N_t , puede expresarse como:

$$N_t = -D_i \frac{\delta C}{\delta x} - C u_i \frac{\delta \phi}{\delta x} - UC$$

donde D_i es el coeficiente de difusión, u_i es la movilidad iónica, ϕ es el potencial, U es la velocidad del movimiento -- del seno del fluido en la dirección de la transferencia, x es la distancia ortogonal a la superficie del electrodo, y C es -- la concentración de las especies reactivas, i .

En celdas que emplean electrolitos sólidos y semisólidos, la convección no existe, y la velocidad debida al transporte - difusional puede calcularse a partir de una solución adecuada de la ecuación de difusión, para cierto número de condiciones de frontera. En electrolitos líquidos, generalmente está pre-- sente cierta clase de convección (aún la simple fuerza gravita-- cional de la tierra), y entonces se requiere un análisis hidro-- dinámico.

Una vez que se ha calculado la concentración interfacial, se puede calcular la pérdida de potencial adicional que resulta de la existencia del mencionado gradiente de concentración. Esta pérdida de potencial es igual a la fuerza electromotriz - de una celda de concentración sin transferencia. Entonces, la polarización por concentración puede definirse como:

$$\Delta E_{\text{conc}} = \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_i}{C_o}$$

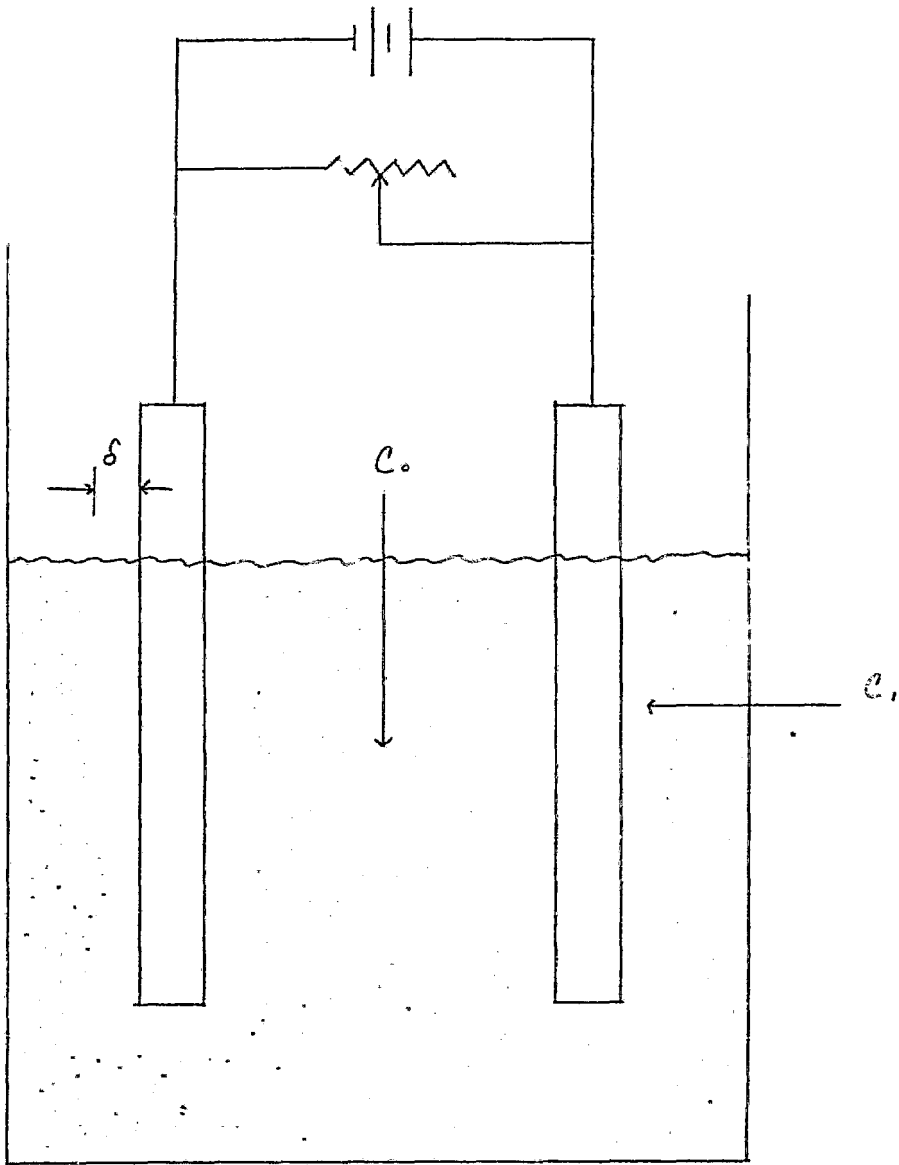


Fig. 2.2

POLARIZATION FOR CONCENTRATION

donde C_i y C_o representan las concentraciones en la interfase y en el seno, respectivamente, de las especies reaccionantes. Si se quiere determinar más de una especie, por ejemplo en el caso de una reacción redox, donde se forman dos gradientes --- (un aumento en la concentración de una de las especies y un -- descenso en la concentración de la otra), deben considerarse - las relaciones de concentración de ambas especies en el cálculo de la polarización por concentración.

Puede decirse entonces que la polarización por concentración representa un cambio en el potencial de un solo electrodo como consecuencia de cambios de concentración del electrolito en los alrededores inmediatos de la superficie de los electrodos, resultado ésto de un paso de corriente neto. Se debe re-- marcar que la polarización por concentración tiene que conside-- rarse separadamente para cada electrodo en una celda, ya que - sólo puede discutirse en relación a cada reacción de media cel-- da.

El denominado coeficiente de transferencia de masa, k_L se define por la ecuación:

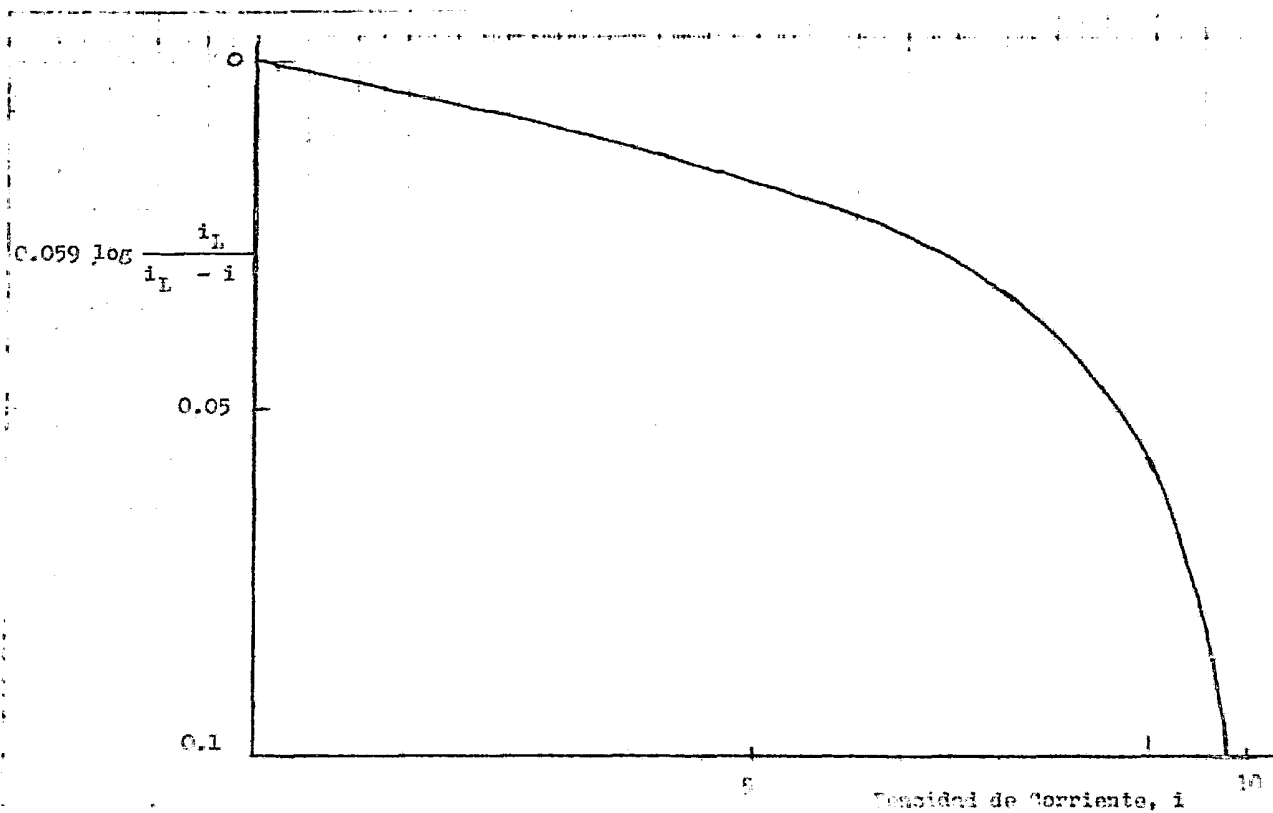
$$N_t = k_L \cdot \Delta C$$

donde N_t es la velocidad total, y ΔC es la diferencia de concentración. Esto puede relacionarse con la velocidad electro-- química y con el grosor de la capa en la frontera, δ , así:

$$N_t = \frac{I (1 - t_i)}{nF} = k_L \Delta C = \frac{D}{\delta} \Delta C$$

A partir de datos de coeficientes de transferencia de masa es posible obtener fácilmente el término δ . t_i es el número de - transporte del ión al que se determina el potencial. Como se - muestra en la ecuación, las velocidades de transferencia de ma-- sa deberían igualarse solamente en la parte no migraciona-- de la corriente total. El grosor de la capa de la frontera de - - transferencia de masa, δ , generalmente es diferente del grosor de la capa de la frontera hidrodinámica.

El grosor de la capa en la frontera, δ , se identifica con



gráfica 2.3 Dependencia de la polarización por concentración en un cátodo respecto a la densidad de corriente

la ecuación de Nernst. Este grosor es más pequeño que el grosor verdadero de la capa en la frontera, δ_E , que alcanza al punto donde la concentración es igual a la del seno de la solución, C_0 .

Es conveniente relacionar la polarización por concentración con la densidad de corriente aplicada, i , y con la densidad de corriente limitante, i_L . Esta última, es el valor obtenido cuando la diferencia de concentración es la máxima, es decir, cuando $\Delta C = C_0$. Puede deducirse de las ecuaciones anteriormente citadas que la polarización por concentración (para un proceso donde el electrodo se consume) es:

$$\Delta E_{\text{conc}} = \frac{RT}{nF} \ln \left[\frac{i_L - i}{i_L} \right]$$

donde i_L es la densidad de corriente limitante para el proceso que efectúa el consumo. La polarización por concentración también ocurre en el otro electrodo, donde se genera una especie y la concentración aumenta. Para este caso el valor será:

$$\Delta E_{\text{conc}} = \frac{RT}{nF} \ln \left[\frac{i_L' + i}{i_L'} \right]$$

La obtención de las anteriores ecuaciones se basa en una relación lineal entre la diferencia de concentración y la densidad de corriente. Pero éste puede no ser el caso. Por ejemplo, en la convección libre que existe en los electrodos verticales (resultado de la fuerza natural de flotación debida al gradiente de densidades en presencia del campo gravitacional), la densidad de corriente es proporcional a $(\Delta C)^{5/4}$. En base a esta relación se muestra fácilmente que la expresión para la polarización por concentración para un proceso de consumo será

$$E_{\text{conc}} = \frac{RT}{nF} \ln \left[1 - \left(\frac{i}{i_L} \right)^{4/5} \right]$$

La polarización por concentración en el electrolito de una celda puede ser muy significativa, cuando se emplean ya sea concentraciones bajas en el seno de la solución, o bien --

cuando se tienen grandes gradientes de concentración como resultado de una pequeña transferencia de masa dentro de la celda. Es esencial una buena transferencia de masa en las celdas electroquímicas para obtener procesos de altas velocidades.

La importancia relativa de la polarización por concentración, como parte de la polarización total de un electrodo, representa un área donde se requiere un análisis individual de la transferencia de masa para cada caso particular. Esta necesidad, muy a menudo pasada por alto en el tratamiento de la cinética de los electrodos, ha conducido muchas veces a una mala interpretación de los datos experimentales.

La medición directa de la polarización por concentración mediante técnicas estáticas no es posible, ya que lo que se mide en realidad es la suma de todos los tipos de polarización que están presentes (por ejemplo la suma de las polarizaciones por concentración y por activación). Solamente las técnicas -- que emplean la interrupción del flujo de corriente (como el -- qué ya se especificó con anterioridad) han podido conducir a separar ambas polarizaciones, ya que la polarización por activación decae mucho más rápido que la polarización por concentración.

Muchas mediciones de sobrevoltaje de oxígeno e hidrógeno se han realizado con una agitación que consiste en un constante burbujeo de gas, y con una concentración del electrolito de 0.1 a 1 N. Se ha determinado un valor aproximado de ζ bajo estas condiciones, a temperatura ambiente, de la siguiente manera:

La velocidad de disolución de barras de zinc de 13 cm^2 de superficie se midió en una solución con un volumen total de 50 cm^3 y que contenía: a) ácido clorhídrico 0.02 M, nitrato de potasio 0.06 M y cloruro de sodio 0.5 M; b) ácido sulfúrico -- 0.0229 N, nitrato de potasio 0.06 M y sulfato de sodio 0.5 N. Las soluciones se agitaron con nitrógeno, y la velocidad de disolución se incrementó precisamente al aumentar la velocidad de burbujeo. Cuando se tuvo ésta al máximo, la solución (a) di

solvió el zinc a una velocidad de 16.9 mg en 4 minutos, y la solución (b) a un promedio de 13.3 mg en el mismo tiempo. Este es un proceso de primer orden donde controla la difusión, y δ se calcula de la ecuación de Nernst integrada:

$$\frac{D}{\delta} = \frac{2.3 V}{A t} \log \frac{a}{a - x}$$

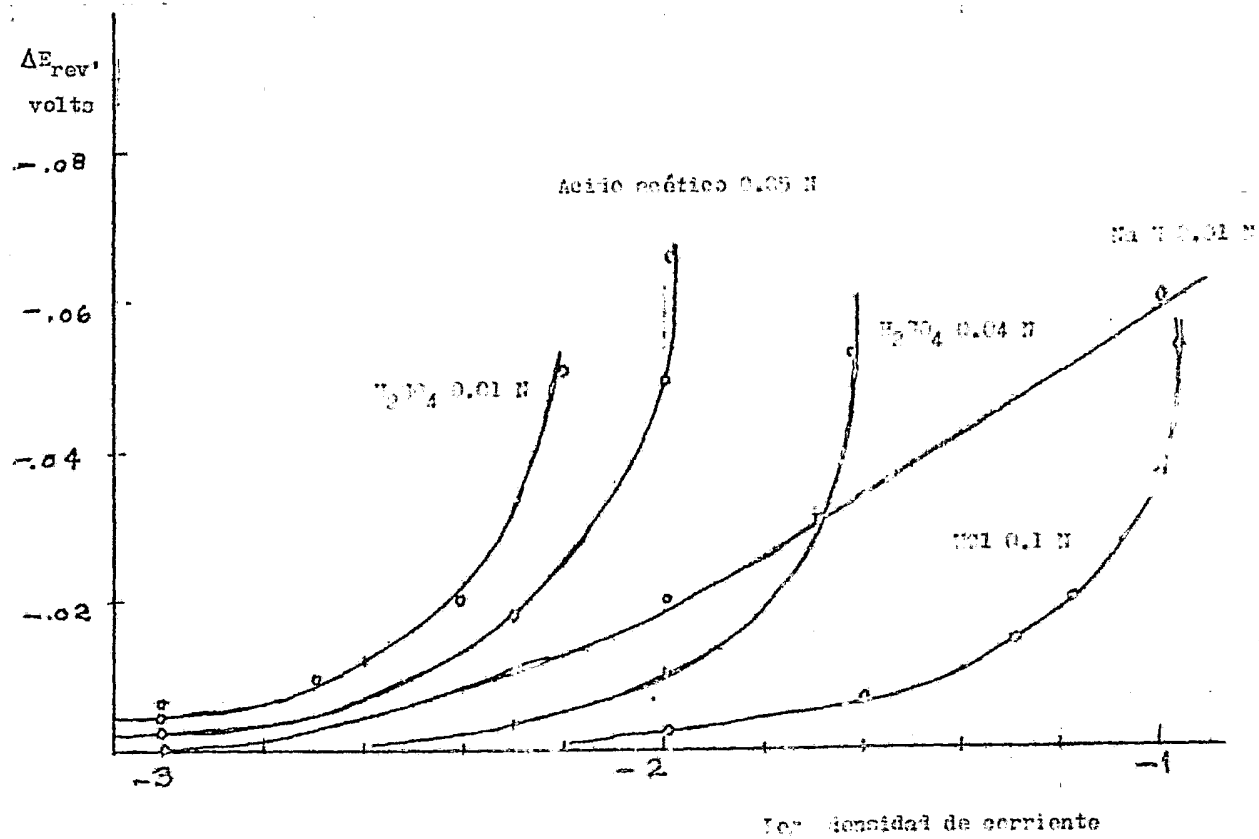
donde A = área, V = volumen de la solución, a = capacidad total de disolución, y x = cantidad disuelta en el tiempo t. Los anteriores experimentos dieron como resultado los valores de 0.0048 y 0.0044 para δ (expresados en centímetros). El valor que se ha usado para los posteriores ha sido 0.005, con una $F = 10^5$ coulombs. Ni D ni δ varían mucho con cambios razonables en la concentración del ácido, la base, la sal o el amortiguador, y no se ha intentado determinar valores exactos para algún caso determinado. El burbujeo de gas en la superficie del electrodo tiene poco efecto en δ , ya que es en realidad un medio de agitación más bien inoperante.

2.4.1.- Polarización por concentración en soluciones salinas neutras.

Si consideramos una solución salina, como por ejemplo cloruro de sodio 0.5 N en agua pura, de tal manera que la concentración de iones hidrógeno sea igual a la de iones hidroxilo, y a su vez sea igual a 1.4×10^{-7} moles por litro, e introducimos un cátodo inerte y agitamos la solución mediante burbujeo de gas, la mayor parte de la corriente será acarreada por diferentes iones, y los hidroxilos producidos abandonarán la superficie del cátodo por difusión. Los valores numéricos se sustituyen entonces en la siguiente ecuación:

$$\Delta C_{OH^-} = 10^3 \frac{5 \times 10^{-3} i}{4 \times 10^{-5} \times 10^5} = 1.25 i$$

Cada incremento en 10 unidades en la densidad de corriente incrementará el pH de la superficie en una unidad, y la fuerza electromotriz reversible de un electrodo de hidrógeno cambiará por 0.059 volts. Si una base débil se encontrara presente en la solución salina, tendría una capacidad amortiguado



gráfica 2.3 Polarización por concentración en varias soluciones

ra muy pequeña hacia los iones hidroxilo, y daría por resultado una polarización por concentración similar.

2.4.2.- Polarización por concentración en soluciones ácidas.

Para cada solución ácida ocurrirá un fino aumento en el pH de la superficie cuando ΔC del ácido se aproxime a la concentración de ácido original, al mismo tiempo que se alcanza la corriente limitante. Si la corriente se incrementa más allá de lo necesario para la difusión del ácido, la superficie del cátodo se vuelve alcalina. En este caso particular la ecuación puede ser aplicada hasta $i = 1.3 \times 10^{-3}$ cuando el pH de la superficie se eleve hasta 7. Con una más alta densidad de corriente, se produce en exceso el ión hidroxilo, y como éste se difunde hacia afuera, se encuentra con el ácido, que a su vez lo neutraliza en una región dentro de la capa de la frontera. Como al lado de la superficie alcalina se coloca un electrodo reversible de hidrógeno, si se colocara exactamente en la superficie del cátodo, mostraría un potencial de 0.5 volts o más con respecto a uno situado en el seno de la solución.

2.4.3.- Polarización por concentración en soluciones amortiguadoras.

Con una solución amortiguadora consistente en un ácido débil y su sal, se observa una apreciable polarización por concentración con una densidad de corriente más baja que con la misma concentración de ácido fuerte. Esto se debe a que el pH depende de la relación ácido/sal, y como la concentración del ácido de la superficie decrece, la concentración de la sal se incrementa en igual magnitud. Para resolver un problema de este tipo, podría emplearse la siguiente ecuación:

$$\Delta C = 10^3 \frac{\delta i}{DF}$$

2.4.4.- Polarización por concentración en soluciones de ácido únicamente.

En soluciones que contengan solamente ácido, las mediciones de la polarización por concentración deben extenderse más-

allá de la difusión del ácido. Ciertos investigadores, usando un método de interruptor para separar el efecto de concentración del verdadero sobrevoltaje, ha postulado que existe un exceso de iones hidroxilo, y una carencia de electroneutralidad en la superficie de cátodo, forzada por el flujo de corriente. Otros investigadores desarrollaron curvas de sobrevoltaje para ácido clorhídrico 5 N, con densidades de corriente del orden de 100 amp/cm^2 . Estos autores tuvieron cuidado de no incluir la polarización por concentración en las mediciones, e intentaron calcular la corriente a la cual aquélla sería apreciable. En tanto que su método para los cálculos no se acomodaba a los valores experimentales, y el valor escogido por ellos para δ (0.01 cm) era francamente incorrecto, acertaron sin embargo al asignar otras razones para las desviaciones en la pendiente encontradas con densidades de corriente muy elevadas, ya que establecieron por principio que δ tendría que ser evaluado, ya que la intensa aparición del hidrógeno con tales densidades seguramente haría descender su magnitud por abajo de 0.005 cm.

2.4.5.- Polarización por concentración en soluciones de base fuerte.

La polarización por concentración puede representarse por una curva que es posible predecir si la solución en un principio es 0.01 N de hidróxido de sodio en cloruro de sodio 0.5 N. La pendiente será menor que 0.059 v/unidad de log de i , aproximándose a este valor mediante una densidad de corriente suficientemente alta.

Es preferible, para mediciones de sobrevoltaje de hidrógeno, evitar correcciones por polarización por concentración al máximo, ya que esto conlleva cierta incertidumbre. Es mejor medir el sobrevoltaje en función tanto de la densidad de corriente como de la composición de la solución, y es obviamente preferible variar estas condiciones separadamente.

CAPITULO 3APLICACION DE LA DESPOLARIZACION A LA MEDICION
DE LA VELOCIDAD DE FLUIDOS

Hemos visto en los capítulos precedentes, en primer lugar los métodos convencionales para la medición de flujo en canales abiertos y en canales cerrados, y en segundo lugar, hemos explicado en qué consiste el fenómeno de la polarización, haciendo resaltar el hecho de que no es conveniente la presencia de ese fenómeno en los procesos electrolíticos normales debido a que el efecto resultante es una disminución en el rendimiento de la operación que se lleva a cabo, y, algunas veces, también ocasiona el deterioro de los electrodos que intervienen en el proceso. Se hizo ver que era conveniente evitar la polarización, y se mencionaron algunos métodos para lograr ese propósito, haciendo hincapié en los procedimientos de despolarización más adecuados para cada caso.

Sin embargo, vamos a ver ahora que, precisamente a partir de uno de los métodos más sencillos de despolarización, se logró idear un mecanismo mediante el cual puede obtenerse, casi directamente, una lectura de la velocidad de flujo de un fluido.

El método de despolarización que se tomó en cuenta fue el que consiste en agitar la solución en que se encuentran los -- electrodos, para así evitar que se concentre alrededor de cada uno de ellos la sustancia que tienda a hacerlo. Estudiando este método se pensó que, dependiendo de la velocidad de agita-- ción de la solución, sería más o menos efectiva la despolariza ción de los electrodos y, consecuentemente, variaría también la lectura de algún aparato que estuviera conectado a los elec-- trodos y que registrara la corriente que circulara a través de ellos.

De esta manera, se pensó que si la solución, en lugar de-

encontrarse encerrada en un recipiente, simplemente circulara a través de los electrodos, la medida en que éstos se despolarizaran sería asimismo una medida de la velocidad en que el fluido pasa a través de ellos.

Se ideó entonces un sistema en el que se suministrara corriente eléctrica a un par de electrodos para electrolizar ligeramente una solución. Al colocarse los electrodos en dicha solución, e iniciar el flujo de corriente eléctrica, los electrodos poco a poco van a polarizarse, a medida que electrolizan la solución. Sin embargo, si esa solución se agita, o como se señaló anteriormente, simplemente se hace circular a través de los electrodos, como en una tubería, los electrodos se despolarizarán en mayor grado cuanto más elevada sea la velocidad del electrolito. Si al mismo tiempo se conecta un amperímetro también a ambos electrodos, éste registrará la intensidad de corriente que circula por ellos, y obviamente será mayor a medida que los electrodos sean despolarizados más efectivamente. Entonces, puede establecerse una relación lineal entre la medida que se obtiene del amperímetro y la velocidad del fluido.

Desde luego, dependiendo del electrolito que va a ser motivo de medición, se deberá hacer una calibración del equipo-detector, ya que para cada solución, habrá una capacidad de polarización diferente. Para dicha calibración, puede usarse cualesquiera de los métodos que se emplean para calibrar los diferentes medidores de flujo que se encuentran comercialmente. Es posible que el método preferido sea el uso de un rotámetro, debido a su popularidad como un medidor bastante preciso.

Existe sin embargo un trabajo realizado en la Universidad de Génova, en Italia, que es bastante similar en su funcionamiento al sistema que vamos nosotros a desarrollar. Se indica en ese escrito que el aparato que los autores elaboraron para medir la velocidad de fluidos puede ser calibrado mediante la corriente limitante de difusión, expresada como una función de la velocidad del fluido y de su viscosidad, de acuerdo a la ex

presión:

$$i_L = K \frac{\sqrt{W}}{\sqrt[5]{6}}$$

Revisando anteriores artículos, los autores descubrieron uno donde se hacía referencia a una solución electrolítica con una composición definida, y que constaba de un electrodo pequeño que fungía como cátodo, y de un electrodo que presentaba -- una gran superficie, y que hacía las veces de ánodo, ambos colocados dentro de la tubería o conducto por donde fluía el líquido. Cada una de las especies dentro de la solución se movía desde el seno de la solución hasta el electrodo, principalmente mediante difusión, es decir, bajo el efecto de un gradiente de concentración. El número de transporte iónico de las especies reaccionantes se vuelve despreciable, de manera que la -- densidad de corriente catódica dependerá del grosor de la capa de difusión, del coeficiente de difusión de las especies, y de su diferencia en concentración entre el seno de la solución y la superficie catódica, de acuerdo con la ecuación:

$$i_{cat} = \frac{D}{\delta} ZF (C_{cat} - C_0)$$

Por otro lado, la densidad de corriente en el ánodo es menor que en el cátodo, debido a la diferencia de tamaños. De esta manera, la concentración de las especies en el ánodo es -- aproximadamente igual a la del seno de la solución. Con esas -- consideraciones, la polarización anódica puede expresarse así:

$$\eta = \frac{RT}{ZF} \ln \frac{C_{an}}{C_0}$$

De acuerdo a este pequeño estudio, los autores propusieron que bajo ciertas condiciones de operación, se podía establecer una relación entre la corriente de la celda, y la velocidad del fluido a través de los electrodos. Ya que el coeficiente de difusión es una propiedad de las especies reaccionantes, relacionada con su concentración y con la temperatura, la densidad de corriente limitante puede expresarse entonces en -- términos de una variable, es decir, el grosor de la capa de difusión. En particular, bajo condiciones de flujo laminar, pue-

de decirse que:

$$\delta \approx \frac{1}{\sqrt{W}}$$

donde W es la velocidad del fluido; y resumiendo las dos ecuaciones anteriores, podemos obtener que:

$$(i_{\text{cat}})_L = \sqrt{W}$$

Ya que en el trabajo efectuado por estos autores los electrodos ahora sí son del mismo tamaño, puede asumirse que la relación D/δ es aproximadamente igual para ambos. Entonces es posible calcular la polarización anódica mediante:

$$\eta = \frac{RT}{ZF} \ln 2$$

Haciendo las sustituciones adecuadas, y poniendo por ejemplo la temperatura de 300°K, el valor de η sería de 0.018/Z, y por lo tanto la polarización anódica es despreciable.

El método es aplicable a mediciones con diferentes temperaturas, si se conoce la dependencia del coeficiente de transferencia de masa con la temperatura. Ambas cantidades, D y δ son una función de la viscosidad, que al mismo tiempo es afectada por la temperatura. La relación entre estas cantidades y la viscosidad cinemática se expresa de la siguiente forma:

$$\delta \approx D^{1/3} \nu^{1/6}$$

Y si además recordamos que la relación entre D y ν es: $D = 1/\nu$ tendremos que:

$$\frac{D}{\delta} = \nu^{-5/6}$$

Finalmente, combinando esta ecuación con la deducida anteriormente, tendremos:

$$(i_{\text{cat}})_L = K \frac{\sqrt{W}}{\nu^{5/6}}$$

siendo K una constante de proporcionalidad que se determina experimentalmente.

Como se puede observar, el método iniciado por estos autores es de gran similitud con respecto al que nosotros estamos desarrollando, aunque ellos no mencionan en realidad ningún --

aparato específico, sino solamente dan una idea de cómo puede ser o más bien de cómo funciona, y, además, aunque aparentemente se obtienen resultados más directos, tienen que calibrar -- primero el aparato mediante una gráfica de velocidades contracorriente, exactamente como nosotros.

Volviendo de nuevo a nuestro equipo, la principal ventaja que tiene es que al haber alguna variación en la velocidad, ésta se detecta inmediatamente. Esto tiene su principal aplicación en la medición de flujo en canales abiertos, donde algunas veces el flujo de la capa en contacto con la atmósfera es diferente al flujo en las capas inferiores a ésta, circunstancia que no puede detectarse con medidores comunes. En cambio, con nuestro medidor, se podría obtener una serie de datos proveniente cada uno de ellos, de un diferente nivel del líquido. Mediante los datos que se obtuvieran en cada uno de dichos niveles se podría trazar un perfil de velocidades que nos mostraría el comportamiento del flujo. Puede brindarnos esto una idea de los cambios de velocidad que hay entre un nivel y otro -- contiguo, o mostrarnos las turbulencias que surgen a lo largo del canal, así como los incrementos o decrementos de la velocidad después de un cambio de dirección o de un desnivel del conducto.

Si este sistema de medición electrolytica se emplea en algún canal conteniendo un líquido cuyo incremento en velocidad puede resultar peligroso por una u otra causa, puede adaptarse le una alarma al microamperímetro, de tal manera que hiciera sonar una chicharra o incluso que cerrara una compuerta si la aguja indicadora llegase a un valor previamente establecido. Desde luego, esto también puede aplicarse a flujo en canales cerrados o tuberías, donde tendría infinidad de aplicaciones, -- por ejemplo, al controlar la velocidad de entrada de un determinado fluido a un reactor, donde al incrementar aquélla, ocasionaría una peligrosa elevación de la temperatura.

Podría pensarse que esto que se acaba de señalar quizá --

fuera un sistema muy complicado de instalar, tanto en la construcción del equipo medidor como la interconexión de éste con una compuerta o válvula que se abriera o cerrara a una orden de aquél; sin embargo, ambos son en realidad muy sencillos en su funcionamiento y construcción. La descripción de nuestro -- equipo medidor de velocidad por despolarización, al que se dio el nombre de Polaflux, se verá más adelante. (Por cierto, el -- nombre de Polaflux no es una marca de aparato, sino un término que se fijó para designar nuestro equipo, como lo son también -- los nombre de "espectroscopio" o "polarógrafo"). En cuanto a -- la válvula que se mencionó, existen ya en el mercado compuer-- tas automáticas que funcionan mediante un solenoide que se activa en el momento de recibir una orden (o mejor dicho, en el momento en que se cierra el circuito eléctrico de la válvula), y es entonces cuando se cierra o se abre la compuerta. Cuando -- deja de existir la situación de emergencia, el circuito eléc-- trico se abre nuevamente, y la válvula retorna a su posición -- inicial.

Como podrá observarse, las aplicaciones de nuestro medi-- dor de velocidad, ya sea actuando independientemente o en com-- binación con otros equipos, son muy numerosas. De allí nuestro interés en desarrollarlo y en estudiar sus posibilidades, como se verá en los capítulos siguientes.

CAPITULO 4

M E T O D O S E X P E R I M E N T A L E S

4.1.- El Polaflux.

Para realizar las pruebas correspondientes a nuestro trabajo, fue necesario construir un instrumento que contuviera -- los elementos necesarios para efectuar una polarización en soluciones electrolíticas y, al mismo tiempo, que nos proporcionara cierta medida de la corriente eléctrica que circulara a través de él. Más específicamente, se trata del empleo de un instrumento gracias a cuyo circuito en puente se aprovecha el doble fenómeno de la polarización y su respectiva despolarización, que se da en el líquido en el que se pretende determinar la velocidad de flujo, como consecuencia de la aplicación de un pequeño voltaje al fluido en cuestión a través de un pequeño sensor.

El fenómeno de polarización a que se hace referencia, se manifiesta cuando por efecto de un voltaje aplicado a una solución a través de un par de electrodos, se lleva a cabo una -- electrólisis en el medio en cuestión, ya que con ello se provoca la descomposición parcial del fluido, generándose en las interfaces de los electrodos con la solución, películas gaseosas que causan una resistencia eléctrica extra, alterándose, a su vez, el valor de la intensidad de corriente que debería circular por el circuito electrodo-líquido-electrodo, de acuerdo -- con la conductividad eléctrica del fluido. No obstante, si la corriente circulante es pequeña (del orden de unos cuantos microamperes), la electrólisis resulta incipiente, la descomposición es imperceptible, y la polarización adquiere características de reversibilidad instantánea.

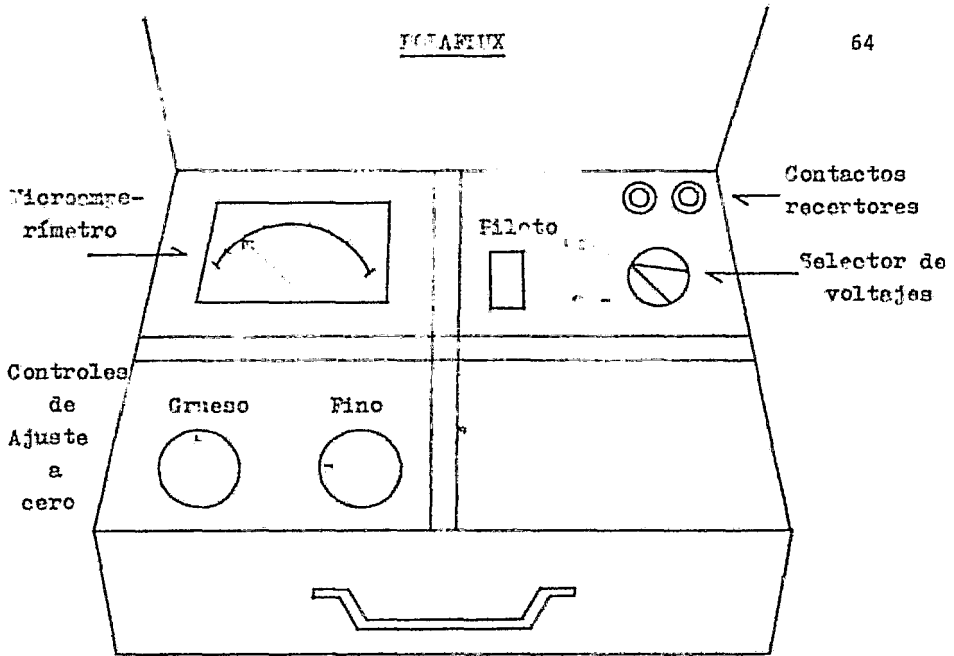
En estas circunstancias, cuando el líquido o la solución en la que se ha provocado este fenómeno se pone en movimiento -- haciéndose fluir entre los electrodos, arrastrará, al desplazarse, la película gaseosa polarizante, reduciendo la resisten

cia eléctrica extra generada con la electrólisis, en forma tal que la intensidad de corriente que circula por el fluido resulta proporcional a la velocidad de flujo del líquido.

Ahora bien, para hacer posible lo anterior, se propone un circuito formado por una resistencia potenciométrica R_1 (de aproximadamente 5 000 ohms); una resistencia variable o reóstato R_2 (de aproximadamente 1 000 ohms); un sensor S , estructurado por dos electrodos soportados en un dispositivo (el cual se describirá con detalle más adelante); un microamperímetro A , con o sin amplificador; y por último una fuente de corriente directa (que esté en condiciones de proporcionar 1.5 y 3 volts de preferencia) la cuál puede ser autónoma, es decir, en base a una batería, o bien depender de la corriente de línea mediante un transformador. La estructura del circuito y su práctica colocación en un estuche se muestra en la figura 4.1.

En un compartimiento se encuentra solamente el microamperímetro. En el compartimiento contiguo se encuentran las baterías (ocultas a la vista), y el control selector de encendido y apagado y de voltajes. Su tope es el valor de 3 y lts, ya que un valor superior generalmente no se utiliza. De hecho, el valor que empleamos más frecuentemente en nuestras experiencias fue el de 1.5 volts. Al lado del selector se colocó además una pequeña luz piloto, para indicarnos que las baterías se encuentran en buen estado. En la sección situada arriba del selector se colocaron los contactos receptores de los cables provenientes de los electrodos.

Como se puede apreciar, el Polaflex es un instrumento muy fácil de transportar, tanto por su reducido tamaño, como por su poco peso, lo que nos puede brindar la opción de colocar varios electrodos fijos en diferentes tuberías o canales que nos interesen, y poseer un solo equipo detector, llevándolo con bastante comodidad de un lugar a otro para tomar las lecturas que nos sean necesarias en determinado momento, lo cual estará definitivamente a favor de la economía de una empresa.



CIRCUITO DEL POLARON

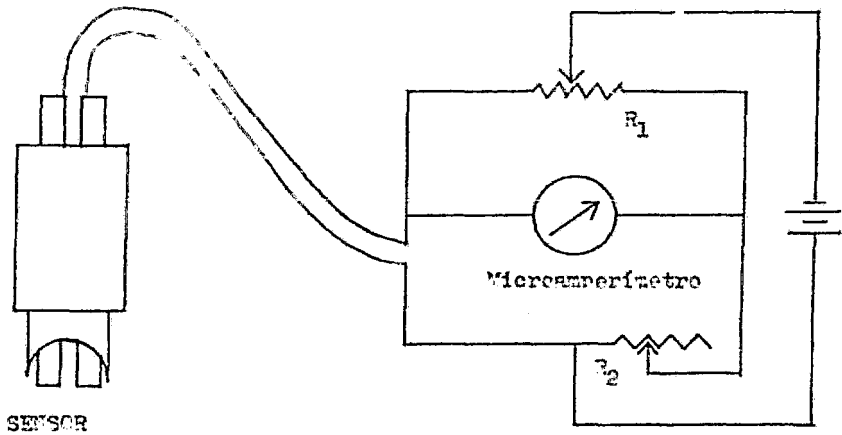


Fig. 4.1.

4.2.- Construcción de los electrodos

La fabricación de los electrodos que utilizaríamos para las experiencias en tuberías, representó un problema un poco más complejo que la construcción del aparato detector o Polax anteriormente descrita, debido a que aunque a veces se creía que cierto diseño iba a funcionar, al momento de hacer algunas experiencias fallaba en algún detalle.

Lo que primero se determinó fue que los electrodos estarían soportados por un material no conductor que se introduciría en el extremo de enmedio de una "T" colocada en una tubería, como lo muestra la figura 4.2. La forma peculiar de la pieza que contendrá a los electrodos, se debe a que su parte inferior está moldeada de acuerdo a la parte interna de la "T". Debe conservarse dicha estructura para así evitar turbulencias que podrían ocasionar malas mediciones en la sección de los electrodos. Los electrodos, ya colocados en la pieza soporte, tienen la apariencia que se muestra en la figura 4.3. La pieza completa se denomina sensor.

Los electrodos deberían ser de un material que no fuera fácilmente atacado por los productos de la electrólisis, así es que el primer material que se pensó utilizar fue el acero inoxidable, pero se tuvieron problemas para conseguirlo, ya que se requerían piezas cilíndricas de 0.5 cm de diámetro y 6 cm de longitud. Además, ciertas pruebas preliminares dieron el antecedente de que el acero inoxidable sí era atacado por la electrólisis.

Entonces se pensó en conseguir grafito de las mismas dimensiones, y aunque aparentemente era todavía más difícil conseguir que el acero, resultó más fácil, ya que se acudió a Union Carbide de México, y se consiguieron bastantes barras de grafito tal como las necesitábamos, ya que la mencionada compañía las utiliza precisamente en la fabricación de baterías.

Salvado este obstáculo, lo siguiente era determinar el --

INSTALACION DEL SENSOR EN LA TUBERIA

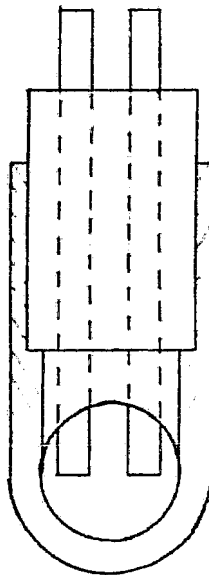
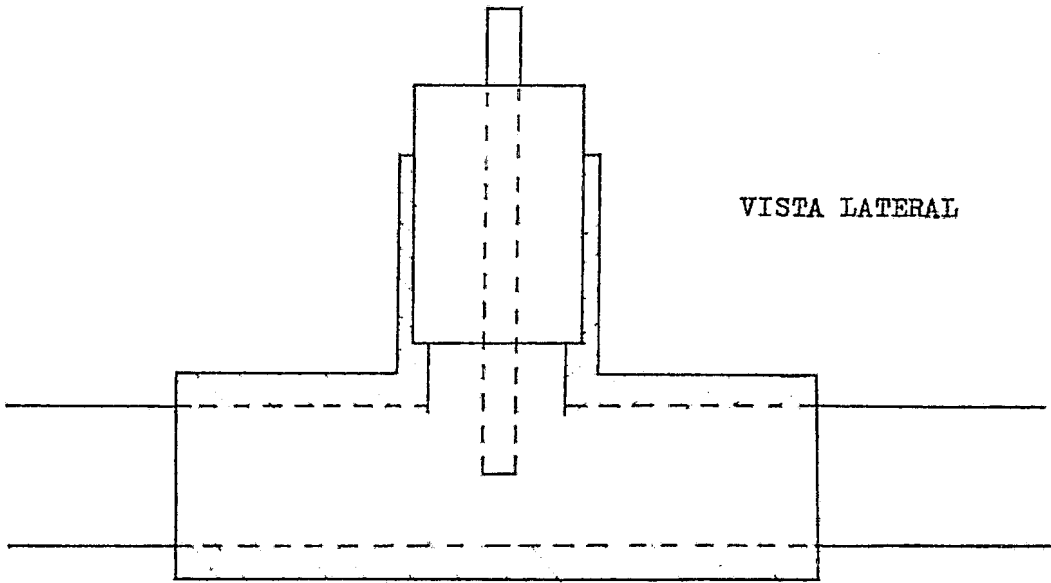


Fig. 4.2

material adecuado donde irían soportados los electrodos, y finalmente se resolvió que éste fuera resina poliéster. Al conseguir dicho material, se mandó a un torno, y allí se le dió la forma que se requería para el acople perfecto dentro de la "T". También allí se le hicieron las dos horadaciones que contendrían, cada una de ellas, a un electrodo.

Aparentemente ya estaba todo listo para hacer las pruebas experimentales. Se consiguieron tramos de tubería de cloruro de polivinilo (PVC) para colocarlos en el equipo de medición de velocidad de fluidos del laboratorio de Ingeniería Química, para situar entre ellos la "T" ya provista de nuestro sensor, y se instalaron en forma provisional como una tubería más de dicho equipo. Sin embargo, al no ser una instalación definitiva o profesional, hubo fugas de agua en algunas uniones, y la persona encargada de dicho laboratorio, el Ing. Bazán, en lugar de ayudarnos a solucionarlas para seguir adelante con nuestro experimento, simplemente removió la tubería provisional y nos prohibió seguir utilizando dicho equipo. Debido a eso, -- adaptamos nuestra tubería en una de las mesas de trabajo del laboratorio 4 F de la Facultad de Química (que es un laboratorio de electroquímica principalmente), y fue allí donde realizamos nuestras experiencias y donde obtuvimos los datos que -- nos sirvieron para determinar el comportamiento del equipo.

4.3.- Mecanismo de operación del Polaflux

Una vez colocada la tubería de PVC en la mesa del laboratorio, con su correspondiente conexión para la entrada de agua se situó el Polaflux al lado de aquella y se conectaron los -- electrodos (ya situados dentro del sensor y éste dentro de la "T") a los contactos receptores del equipo, mediante sus respectivos cables.

En el extremo final de la tubería se encontraba una válvula, igualmente de PVC, que regulaba el flujo de líquido a través de ella, permitiéndonos así obtener diferentes velocidades de flujo. Nos daba además la facilidad de que cuando estaba to

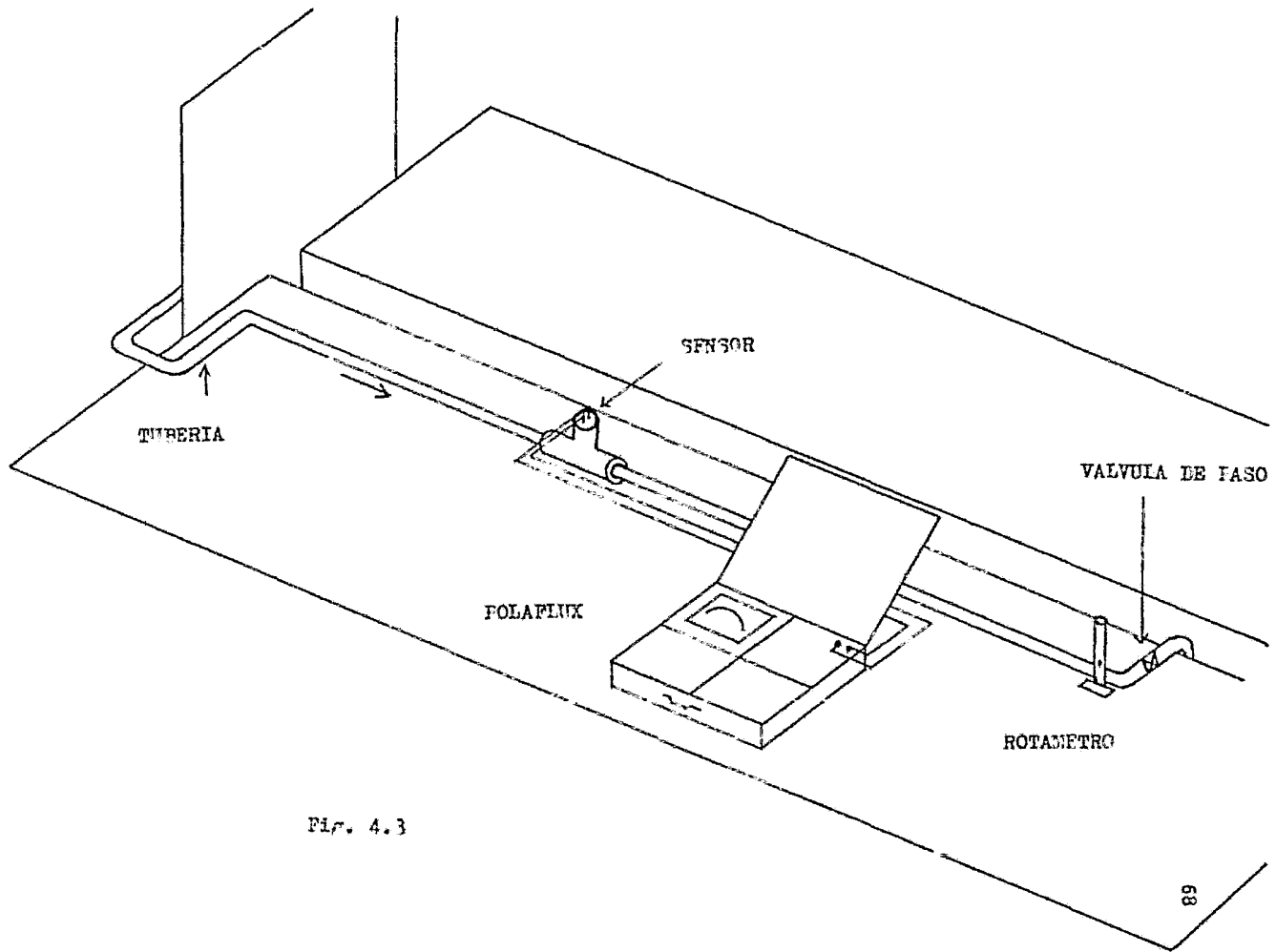


Fig. 4.3

talmente cerrada, mantenía llena de agua la tubería, lo cual nos era de gran ayuda en el momento de la calibración.

Antes de la válvula, estaba colocado un pequeño rotámetro que, aunque no nos daba un dato directo de velocidad, se podía relacionar su lectura a una gráfica que habíamos determinado con anterioridad. Las lecturas que nos proporcionaba el rotámetro eran porcentajes de flujo, las cuales tomábamos como base para las lecturas del microamperímetro.

Habiendo colocado los cables de conexión entre el Polaflex y los electrodos, se procedía a llenar de agua la tubería permitiendo que ésta fluyera unos momentos, y cerrando a continuación la válvula de salida, para que el agua permaneciera en reposo dentro de la tubería. Entonces se accionaba el selector del Polaflex y se situaba en 1.5 volts. La aguja del microamperímetro comenzaba entonces a tener actividad, y su tendencia era, primero, subir bastante, y después, ir descendiendo lentamente hasta determinado valor. Era aquí donde comenzaban a actuar los controles "fino" y "grueso" del medidor, que corresponden a las resistencias internas de las que ya se había hablado al citar los constituyentes del Polaflex. Si la aguja, ya en su descenso, cruzaba el valor de cero y parecía que quería descender más, mediante los controles mencionados se llevaba hacia arriba nuevamente, hasta estabilizarla precisamente en el cero de la escala. Si sucedía lo contrario, es decir, -- que la aguja subiera a un valor demasiado elevado o hasta pretendiera rebasar el valor máximo de la escala, los controles actuaban en este caso bajando la aguja hasta el valor citado anteriormente, es decir, el de cero.

La explicación de lo que sucede con la aguja del microamperímetro es sencilla, y se basa precisamente en el fundamento del Polaflex. Al hacer girar el selector al voltaje de 1.5 v, -- la batería del equipo comienza a mandar energía eléctrica a los electrodos, y, por lo tanto, éstos comienzan a electrolizar la solución. El microamperímetro, en este momento, comien-

za a marcar el amperaje que existe entre ambos electrodos debido a la circulación de dicha corriente eléctrica; de ahí que, en su primer movimiento, suba a un valor elevado. Pero entonces surge la polarización, impidiendo, paulatinamente, que exista diferencia de potencial entre ambos electrodos. Esto nos lo va indicando la aguja del microamperímetro, ya que comienza a bajar lentamente, a medida que aumenta la polarización entre los electrodos, pues ya que el agua no tiene ningún movimiento, no hay ningún factor antipolarizante que descontamine a los electrodos. Esta polarización llega entonces a un máximo, y ya que la aguja no muestra variación alguna en el amperaje existente, es cuando se realiza el ajuste o calibración llevándose al valor de cero.

Teniendo el microamperímetro en ese valor, se procedía entonces a abrir poco a poco la válvula de paso, para que así el agua, al circular, comenzara a despolarizar a los electrodos. La válvula se abría de tal manera que el flotador del rotámetro ascendiera a la primera subdivisión, y entonces se tomaba la lectura del microamperímetro, ya que al comenzar a despolarizarse los electrodos, iban a permitir un mayor flujo eléctrico, y por lo tanto se iba a registrar un aumento en el amperaje. La lectura se tomaba cuando la aguja ya no mostraba variación alguna. El siguiente paso era abrir un poco más la válvula hasta que el flotador del rotámetro llegara a la segunda marca, y se tomaba de nuevo la lectura del microamperímetro; y se continuaba así hasta llegar al valor máximo que permitiera el rotámetro. Se realizaba esta misma operación varias veces para corroborar los datos precedentes, y así poder relacionarlos con la velocidad del fluido.

Los datos representativos se muestran en las siguientes páginas. Los valores obtenidos en la experiencia 1 se separan ligeramente de los obtenidos en las subsecuentes experiencias, pero esto se debió principalmente a que en dicha experiencia se corrigieron aún algunos detalles. De cualquier forma, son bastante homogéneos como para no tomarlos en cuenta. Cabe decir que siempre se mantuvieron condiciones similares.

VALORES OBTENIDOS

EXPERIENCIA # 1

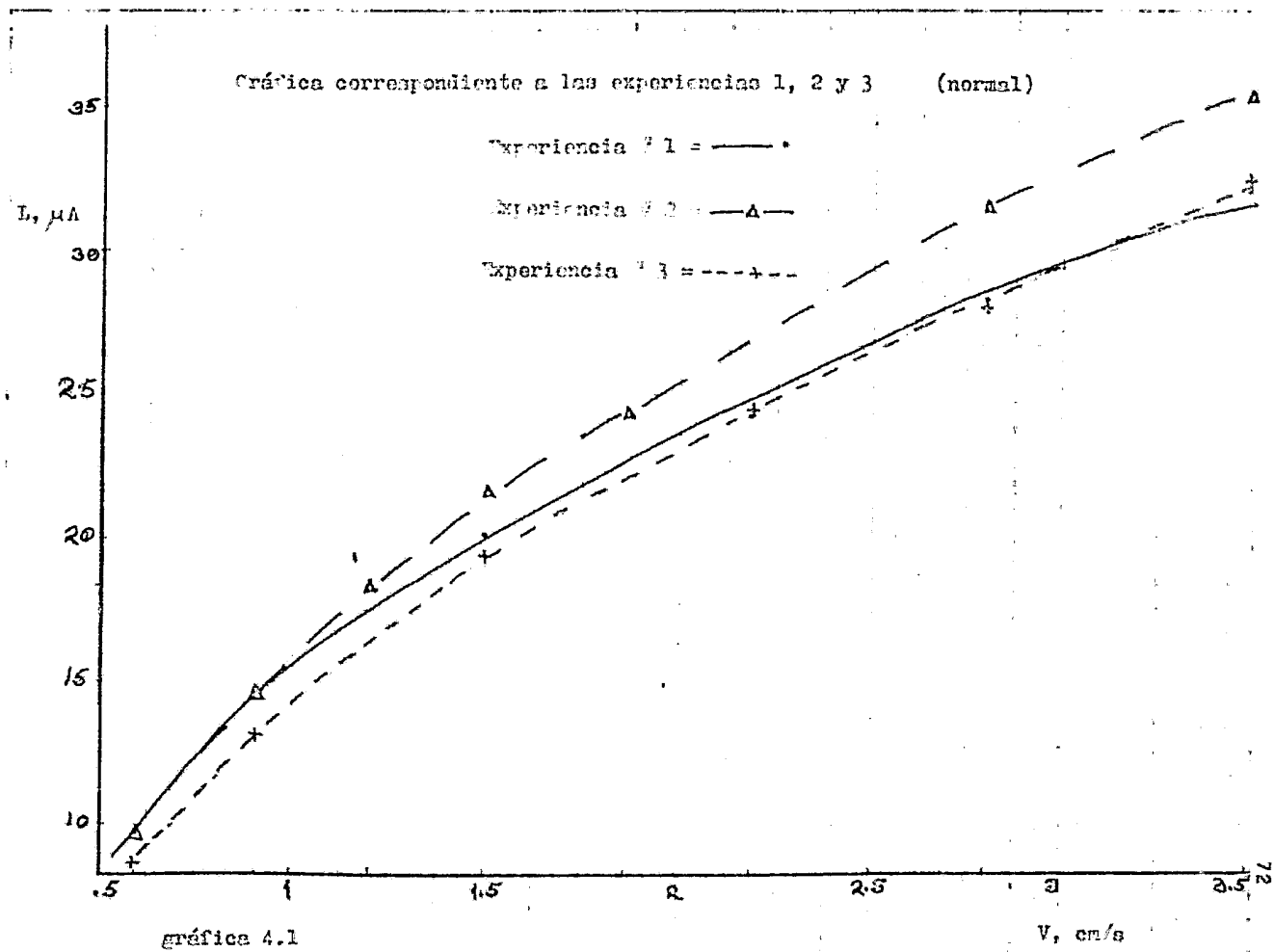
V (cm/s)	L (μ A)
0.5916	9.8
0.9011	14.6
1.4956	20.19
2.186	24.2
2.7903	28.2
3.4874	32.1

EXPERIENCIA # 2

V (cm/s)	L (μ A)
0.5916	9.8
0.9011	14.6
1.20	18.4
1.4956	21.62
1.860	24.26
2.7903	31.62
3.48	35.48

EXPERIENCIA # 3

V (cm/s)	L (μ A)
0.5916	8.81
0.9011	13.18
1.4956	19.27
2.186	24.26
2.7903	28.18
3.480	32.35



gráfica 4.1

$V, cm/s$

4.4.- Análisis de resultados.

Modelo Matemático.

Como podemos observar en la gráfica 4.1., el trazo de los valores obtenidos experimentalmente, en los tres casos representativos, asemeja una curva parabólica. Asimismo, puede apreciarse que las curvas más parecidas entre sí son las correspondientes a los experimentos 2 y 3, ya que la curva correspondiente a la experiencia 1 parece tener otro tipo de inclinación, aunque en realidad es muy similar en forma a las de las otras experiencias. Se tratará ahora de encontrar una ecuación que satisfaga su comportamiento.

Para esto, era necesario hacer varios intentos de diferentes tipos de gráficas, hasta que pudiéramos obtener una recta. Por tal motivo, se trazaron las gráficas de logaritmo de L contra logaritmo de V, (siendo L la lectura del microamperímetro y V la velocidad del fluido), $\log L$ vs. V, $\log V$ vs. L, y se observó finalmente que la gráfica que proporcionaba con más exactitud una recta era la de $\log L$ vs $\log V$, como se puede apreciar, para la experiencia 1, en la gráfica 4.2.

Habiendo hecho el trazo aproximado de la recta, se procederá a establecer su ecuación. Para ello, contamos con los siguientes valores:

$\log L$	$\log V$
0.9912	-0.228
1.1643	-0.0452
1.3053	0.1748
1.3838	0.34
1.4502	0.4456
1.5065	0.5425

Tomaremos ahora dos puntos de la recta para determinar la pendiente de la misma. Los puntos serán: P_1 (-0.0452, 1.1643), P_2 (0.34, 1.3838). Considerando la ecuación de la pendiente, y sustituyendo los valores correspondientes, tenemos:

$$m = \frac{Y_2 - Y_1}{X_2 - X_1} = \frac{1.3838 - 1.1643}{0.34 - (-0.0452)} = 0.5698$$

Tomaremos ahora la ecuación general de las rectas, y determinaremos el valor de su constante. Utilizaremos para ello, nuestro punto 1, y sustituiremos sus valores en dicha ecuación

$$y = mx + b; \quad b = y - mx; \quad b = 1.1643 - 0.5698(-0.0452) = \\ b = 1.19$$

Y ahora, con nuestras constantes ya determinadas, "m" y "b", podemos determinar la ecuación general que será válida para nuestros valores. En nuestro caso particular, "y" equivale a log L, y "x" equivale a log V. Para efectuar de manera más fácil los cálculos, consideraremos a $b = 1.19 = \log 15.4882$

$$y = mx + b; \quad \log L = 0.5698 \log V + \log 15.4882$$

$$\log L - \log 15.4882 = 0.5698 \log V$$

$$\log V = \frac{\log L - \log 15.4882}{0.5698} \quad \dots$$

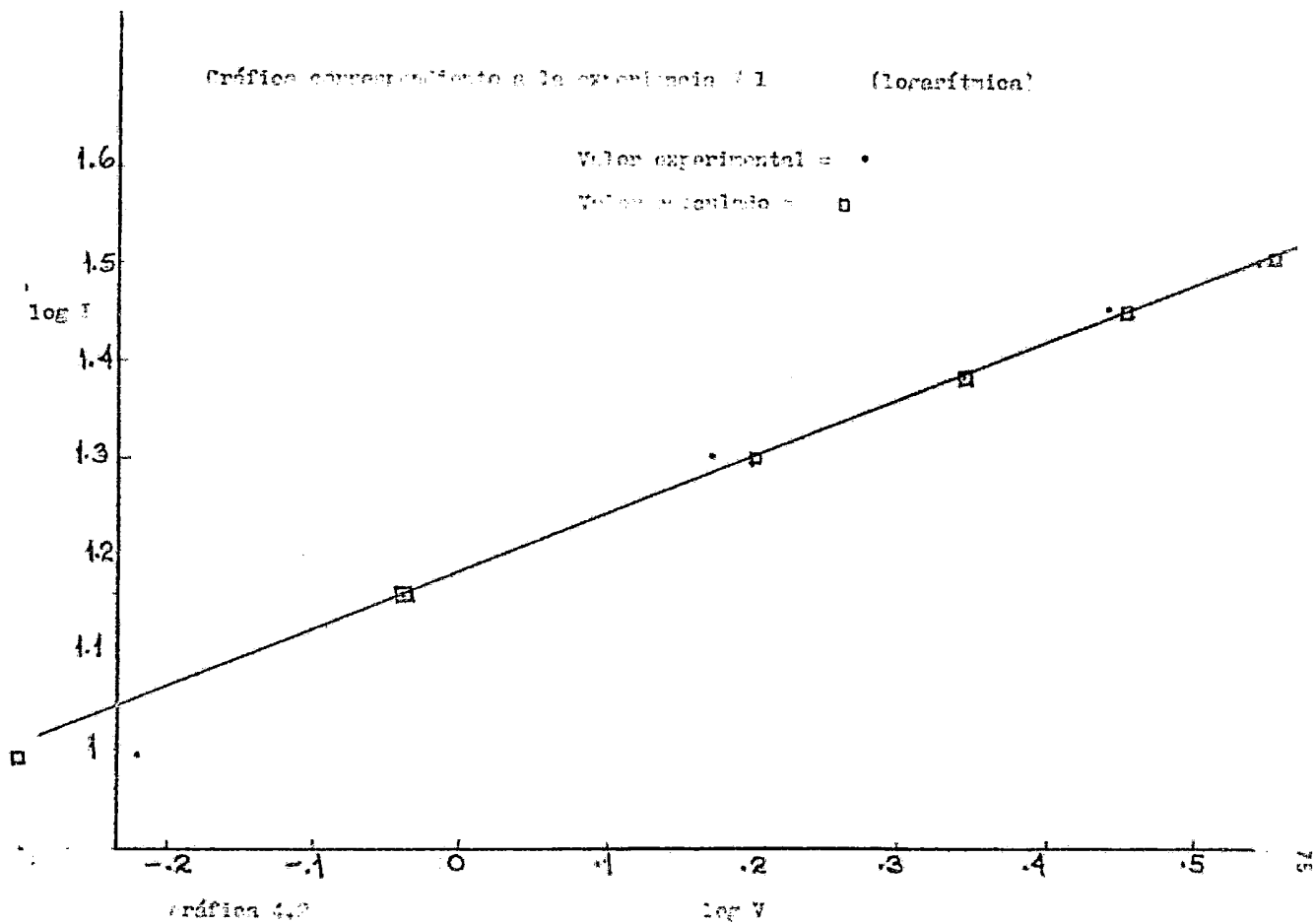
$$\log V = 1.755 \log L - 1.755 \log 15.4882$$

$$V = \frac{L^{1.755}}{15.4882^{1.755}} = 0.00815 L^{1.755}$$

Esta será entonces nuestra ecuación general que se podrá aplicar a los valores correspondientes al experimento 1. La siguiente tabla nos muestra una comparación entre los valores reales y los calculados a partir de la ecuación:

Velocidad real cm/s	Velocidad calculada cm/s
0.5916	0.4474
0.9011	0.9007
1.4956	1.5910
2.186	2.1865
2.7903	2.8598
3.4874	3.5898

Gráfico correspondiente a la ecuación (1) (logarítmica)



Para el experimento 2 se tomaron también los valores de los logaritmos para trazar la recta correspondiente, y que se puede apreciar en la gráfica 4.3. Los valores considerados son

log L	log V
0.99	-0.228
1.165	-0.0452
1.265	0.079
1.335	0.1748
1.385	0.269
1.50	0.4456
1.550	0.5425

Para este caso, los puntos que se tomaron en consideración fueron: P_1 (-0.0452, 1.165) y P_2 (0.269, 1.385). El procedimiento que se siguió fue similar al del experimento 1, y las constantes que se obtuvieron fueron: $m = 0.6983$ y $b = 1.1965$.

Con dichas constantes, y haciendo las sustituciones adecuadas en la ecuación general de la recta, se llegó a:

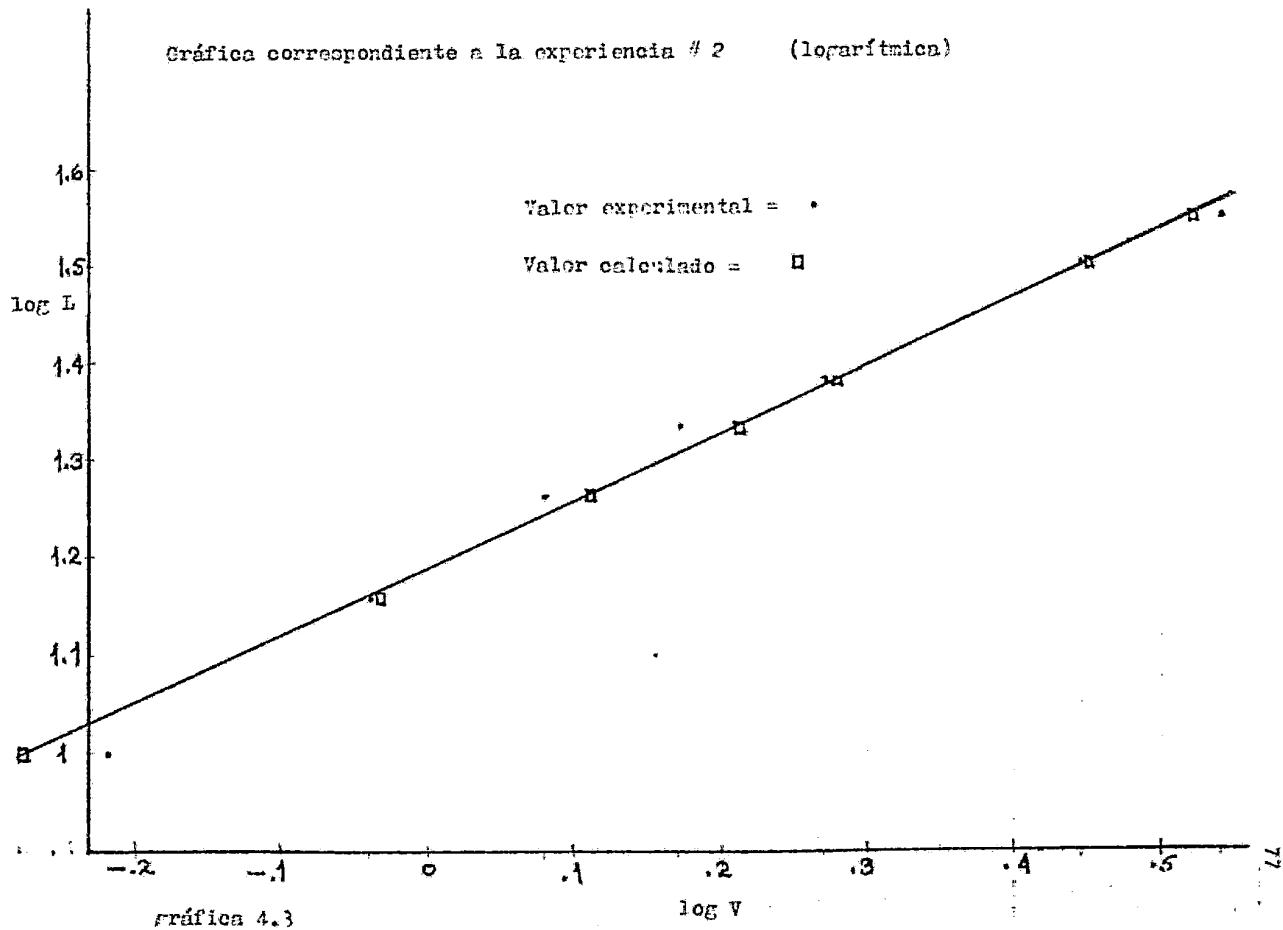
$$V = 0.02 L^{1.432}$$

y utilizando esta ecuación, la comparación existente entre los valores reales y los calculados es la siguiente:

Velocidad real cm/s	Velocidad calculada cm/s
0.5916	0.525
0.9011	0.929
1.20	1.2949
1.4956	1.6313
1.860	1.9239
2.7903	2.8117
3.480	3.3159

Por último, para el experimento 3, y siguiendo un procedimiento similar, se utilizaron los siguientes valores logarítmicos:

Gráfica correspondiente a la experiencia # 2 (logarítmica)



log L	log V
0.945	-0.228
1.120	-0.0452
1.285	0.1748
1.385	0.340
1.450	0.4456
1.510	0.5425

Para el presente caso, los puntos sobre la recta que fueron utilizados son: P_1 (-0.0452, 1.120) y P_2 (0.4456, 1.450). Con estos datos las constantes obtenidas fueron: $m = 0.6723$ y $b = 1.150$

Finalmente, la ecuación que se obtuvo derivada de dichos datos fue:

$$V = 0.0194 L^{1.4874}$$

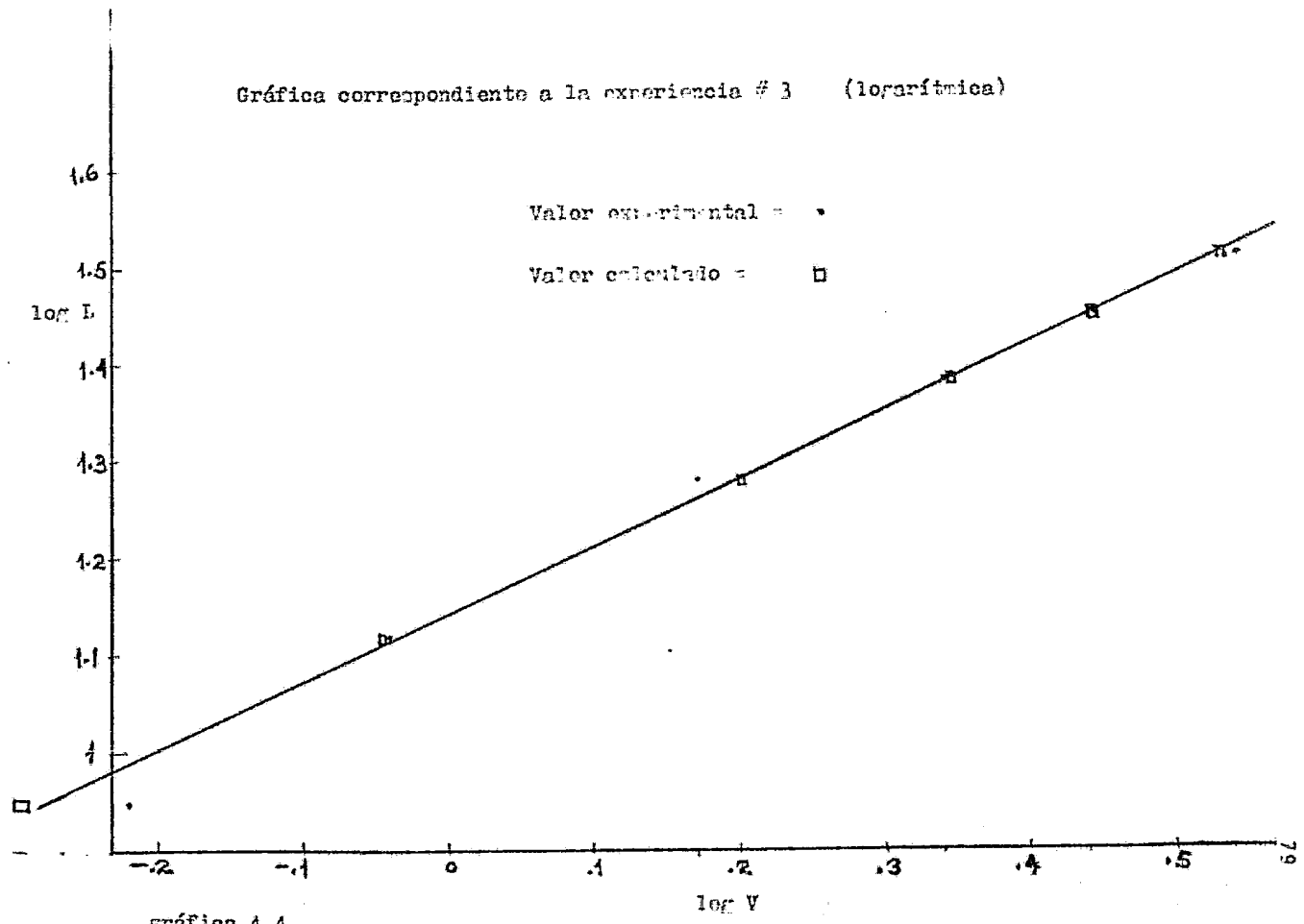
que, como se puede apreciar, es bastante similar a la que se obtuvo con el experimento 2. Esto nos obliga a considerar a estos dos experimentos, precisamente, como los más representativos del comportamiento del Polaflox.

La comparación de los datos obtenidos experimentalmente, con los calculados, para el experimento 3, es la siguiente:

Velocidad real cm/s	Velocidad calculada cm/s
0.5916	0.4935
0.9011	0.8985
1.4956	1.5810
2.186	2.2268
2.7903	2.7825
3.480	3.4165

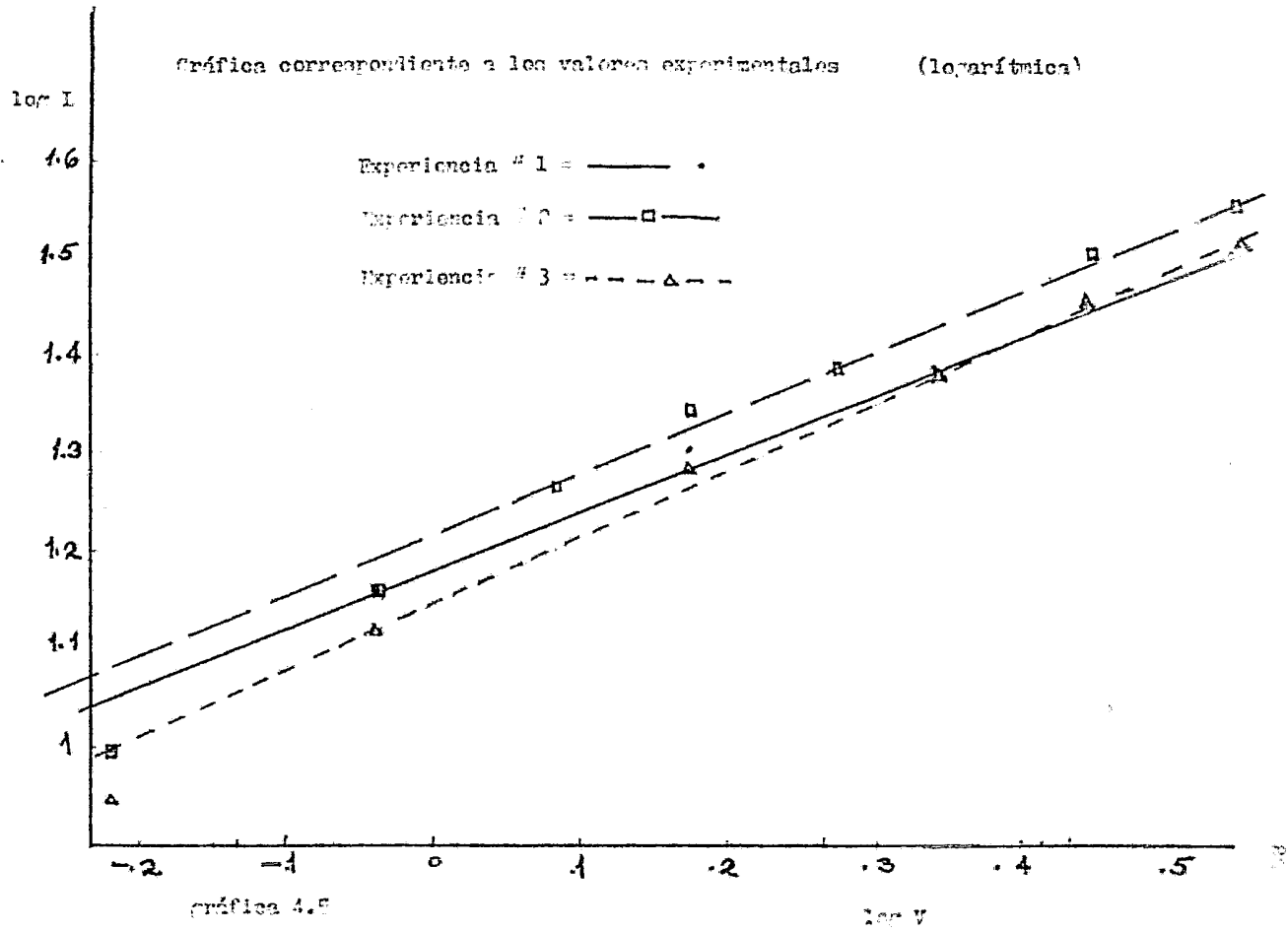
La comparación de los resultados experimentales con los calculados, tanto para este último experimento, como para la comparación entre éste y los dos anteriores, puede verse fácilmente en las gráficas 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7, tanto para los valores normales como para los logarítmicos.

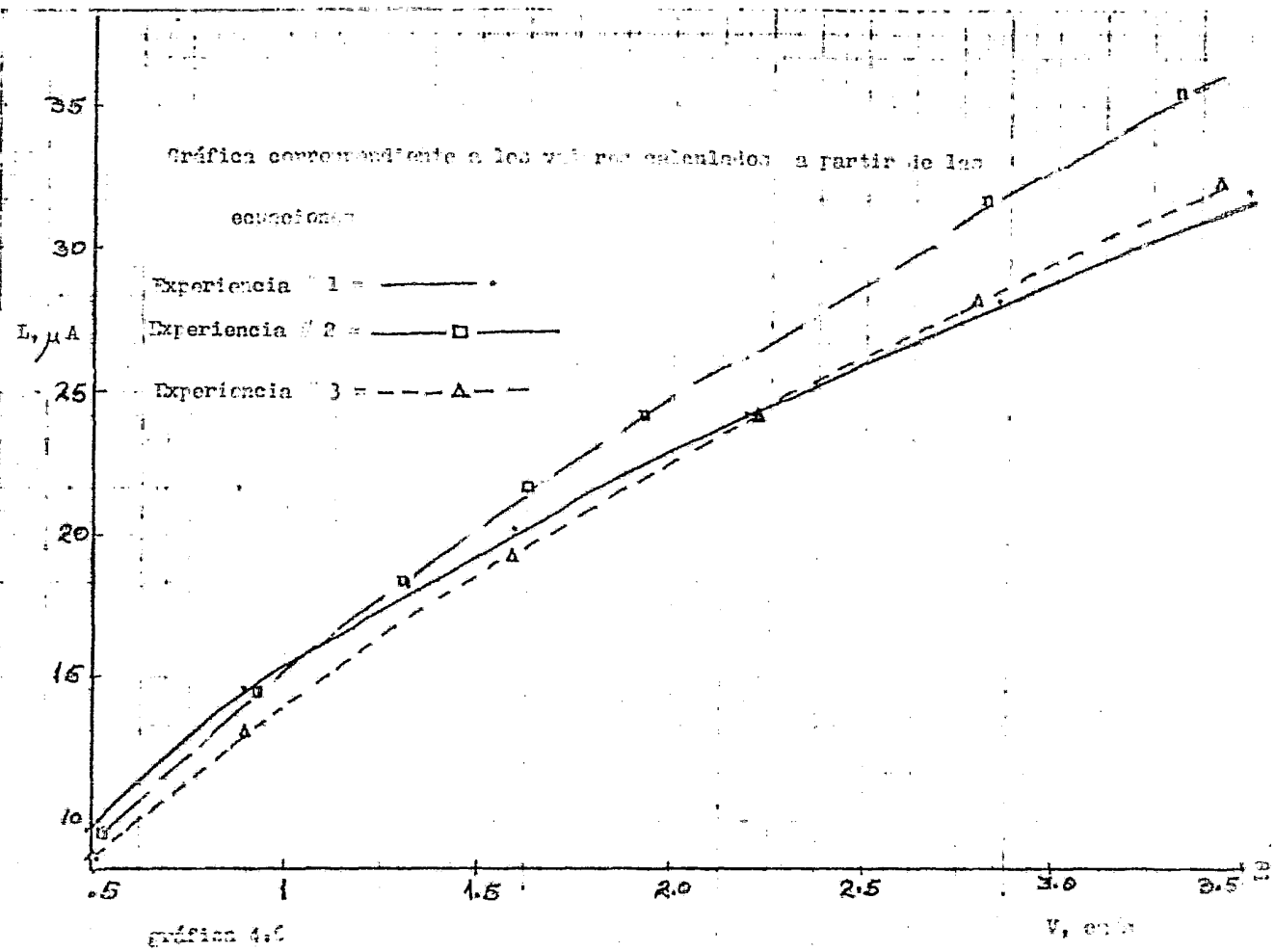
Gráfica correspondiente a la experiencia # 3 (logarítmica)

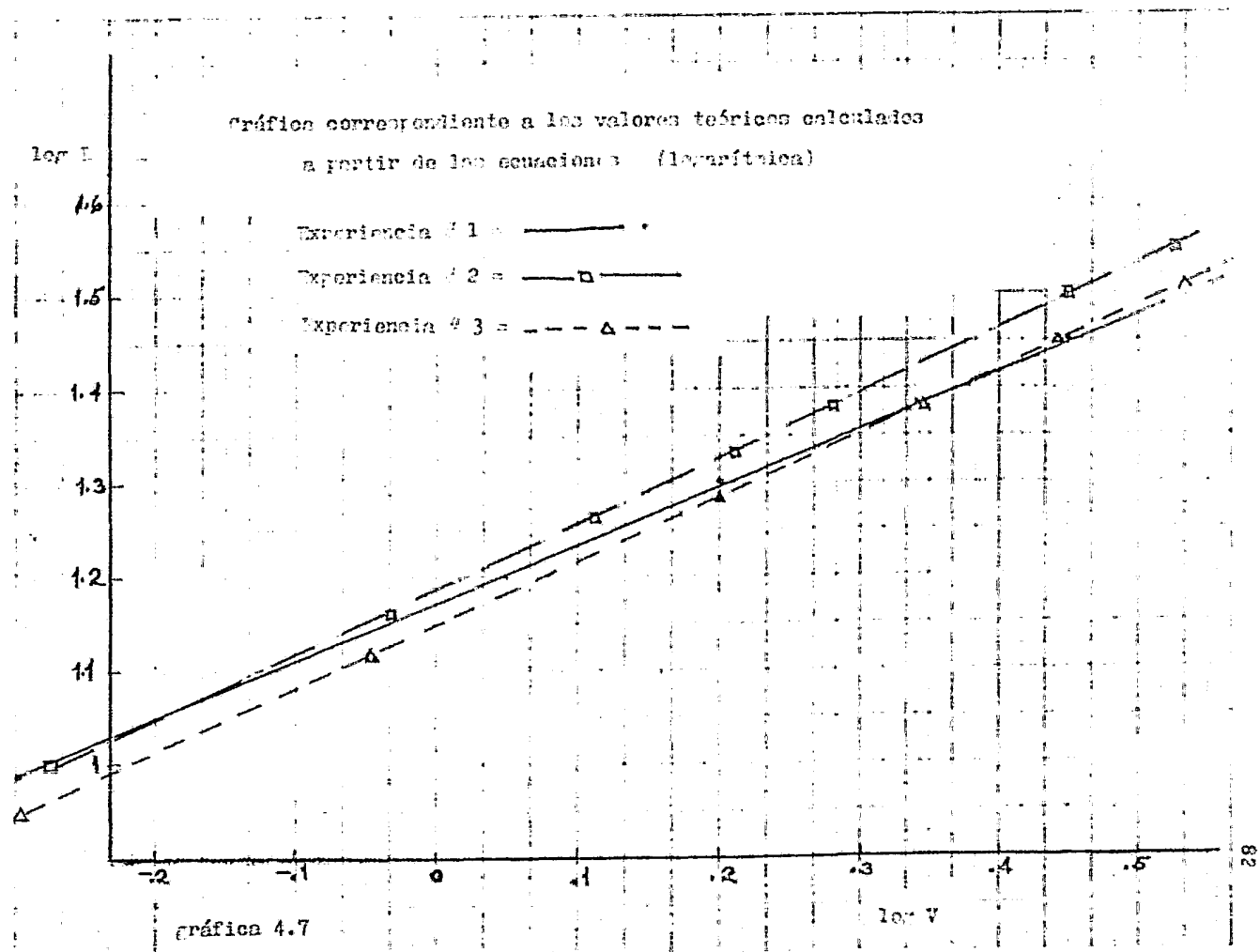


gráfica 4.4

Gráfica correspondiente a los valores experimentales (logarítmica)







4.6.- Experimentación en canales abiertos.

Habiendo concluido ya la fase correspondiente a canales cerrados o tuberías, el siguiente paso era hacer pruebas con nuestro equipo en canales abiertos.

Para esto recurrimos al Instituto de Ingeniería, ya que en ese lugar existe un laboratorio de pruebas sumamente completo, y para nuestros fines resultaba excelente. El equipo que utilizamos está construido de acrílico transparente, lo que facilita enormemente la observación detallada de los diferentes movimientos que se llevan a cabo durante el recorrido del agua a través del canal. Su longitud es de aproximadamente 3 metros, lo que proporciona una homogenización adecuada de las corrientes circulantes, y una estabilización de la velocidad de flujo. No es muy ancho, pues tiene escasamente 10 centímetros de lado a lado, lo que llega a causar turbulencias por la cercanía entre ambas paredes.

Existían dos formas de variar el flujo. Una de ellas era mediante la utilización de un elevador mecánico (o soto) colocado en el extremo inferior del canal. Es decir, su posición original es completamente horizontal, y a medida que se va accionando el elevador, el canal va adquiriendo cierta inclinación, dando así más velocidad al agua que circula por él.

La otra forma de variar la rapidez de flujo era haciendo girar una válvula que se encontraba a la salida de la bomba -- que impulsa al líquido. La operación de la bomba es como sigue: Una vez lleno de agua el tanque de abastecimiento de agua que está conectado a la succión de la bomba, se acciona ésta, después de comprobar que la válvula de descarga de la bomba se encuentra abierta. Entonces la bomba manda el agua, mediante una tubería, hacia uno de los extremos del canal por donde emerge, y comienza así a recorrerlo hasta llegar al otro extremo, donde se hace desembocar de nuevo en el tanque de abastecimiento, completando así su ciclo. Abriendo o cerrando la válvula de descarga de la bomba, nos daba una gama diferente de velocidades.

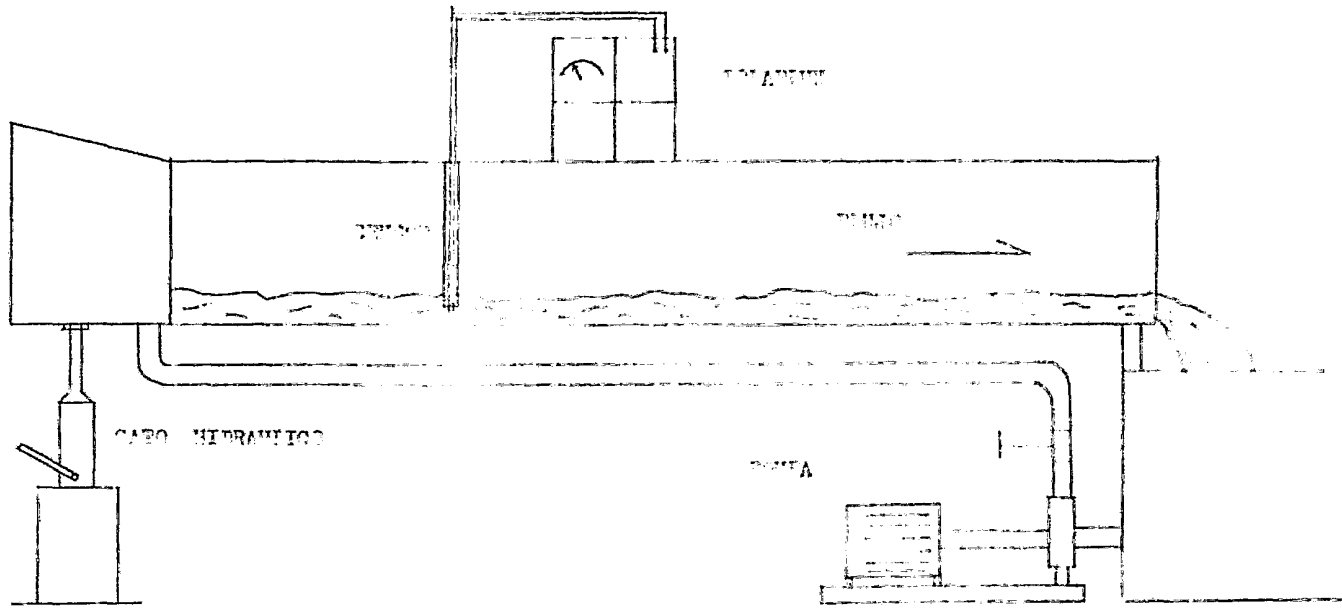


FIG. 4.4. SCHEMATIC OF THE DAM WATER LEVEL MEASUREMENT SYSTEM

El principal obstáculo a vencer en la construcción de un nuevo sensor, ya que el que habíamos empleado en nuestras anteriores experimentaciones en tuberías era inoperante en este caso.

Lo primero que se pensó fue colocar una pequeña placa de acrílico (de 8 por 10 cm aproximadamente) en el extremo inferior de una barra también de acrílico, y sostener ésta por su parte superior, de los bordes del canal. La placa pequeña serviría, a su vez, para soportar los electrodos que se fueran a utilizar.

El primer elemento que se pensó emplear como electrodo -- fue el cobre, y en las pruebas preliminares que realizamos en el laboratorio de nuestra Facultad, las laminillas de cobre se comportaron perfectamente. Se introdujeron (ya colocadas en el sensor) en un recipiente lleno de agua, se conectaron los correspondientes cables al Polaflex, y se encendió éste. Se observó la paulatina polarización de los electrodos mediante el microamperímetro, y después de un momento se calibró éste a cero. Se introducía entonces un agitador al recipiente, y al menor movimiento del agua, la aguja del microamperímetro comenzaba a ascender. Cuando el agua volvía al reposo la aguja retornaba a su valor inicial, y si se volvía a agitar el agua, la aguja se movía instantáneamente. Una respuesta de este tipo nos habría dado la pauta para iniciar nuestras pruebas en el Instituto de Ingeniería, pero desgraciadamente observamos que los electrodos se habían atacado en una forma muy rápida, y entonces su funcionamiento iba a ir en decremento poco a poco, hasta ser nulo, de tal manera que, aunque a primera vista habíamos tenido éxito, deberíamos reemplazar dichos electrodos por otros de diferente material, que no sufrieran cambio alguno en el proceso de la polarización.

Pensamos entonces en colocar electrodos de acero inoxidable, pero al realizar de nuevo pruebas preliminares, se vio -- que tampoco este material nos iba a ser útil.

Fue entonces que determinamos usar de nuevo grafito, y colocamos esas pequeñas barras de ese material, de las utilizadas en lapiceros en nuestra plaquita soporte. Inmediatamente observamos, en las primeras pruebas, el buen funcionamiento de nuestros nuevos electrodos, así como el mínimo ataque que habían sufrido. Se decidió entonces realizar las pruebas definitivas en el Instituto de Ingeniería con ese sensor. Sin embargo, al tener instalado nuestro equipo ya dentro del canal - abierto, y al comenzar dentro de éste a fluir el agua se observó que la presión de ésta era muy grande, y hacía bambolear a nuestra plaquita, causando así una enorme variación en el resultado de la polarización efectuada por los electrodos. Entonces se decidió eliminar la placa soporte y fijar los electrodos únicamente en la barra de acrílico que antes sostenía a la plaquita, situándolos exactamente en el extremo inferior de dicha barra, ya que al incrementarse la velocidad del agua ésta baja de nivel, y si los electrodos se encontraran muy por encima de su nivel, llegaría un momento en que no hubiera contacto entre agua y electrodos. También se decidió cambiar los electrodos de grafito por unos de cromo-níquel.

Después de realizar los mencionados cambios, retornamos al Instituto de Ingeniería para efectuar de nuevo nuestras experiencias. También se había observado en nuestra primera prueba, que si utilizábamos el elevador para poner el canal en inclinación y así incrementar la velocidad del agua, ésta era sumamente grande, y sobrepasaba con mucho los valores de velocidad que habíamos utilizado en nuestras experiencias en canales cerrados.

Es decir, los electrodos se despolarizaban totalmente, y entonces, no importando hasta qué altura se elevara el canal, los electrodos no se iban a despolarizar aún más, y por lo tanto no se iba a registrar cambio alguno en nuestro microamperímetro. Fue así como se determinó que en lugar de hacer variar la velocidad con el elevador, el canal se iba a mantener en posición horizontal y lo que se iba a variar era la abertura de la válvula de descarga de la bomba.

Un factor que no se pudo eliminar fue el hecho de que no era posible calibrar el microamperímetro a cero con el agua en quietud, ya que el canal carecía de compuertas para mantenerlo lleno una vez que dejara de funcionar la bomba. Por lo tanto, se determinó que la calibración a cero se haría en la mínima velocidad posible.

Con las consideraciones anteriores se llevaron a efecto las pruebas, que en este segundo intento sí dieron frutos. La calibración se realizó como se había pensado, y al ir abriendo la válvula de descarga e ir incrementándose la velocidad del agua, se despolarizaban lentamente los electrodos, y el amperímetro iba marcando, a cada nueva abertura de la válvula, un mayor valor.

Se realizaron algunas corridas, pero las más significativas son las que se enlistan en la siguiente página, y en base al promedio de ellas (tercer grupo de valores) se estudió el comportamiento del Polaflex.

4.6.- Análisis de resultados.

Como se puede apreciar en la próxima gráfica, (4.8) el comportamiento del Polaflex fue un tanto diferente, o mejor dicho, un tanto más marcado que en las experiencias en canales cerrados. En aquellos casos se notaba que la relación entre el amperaje y el incremento en la velocidad era más o menos uniforme, y se pudo trazar una gráfica logarítmica que representaba con bastante exactitud su interrelación. Es decir, se vería que en tanto se iba incrementando la velocidad, los valores en el microamperímetro no guardaban la misma proporción, es decir, a medida que aumentaba la velocidad, los incrementos del amperaje eran menores.

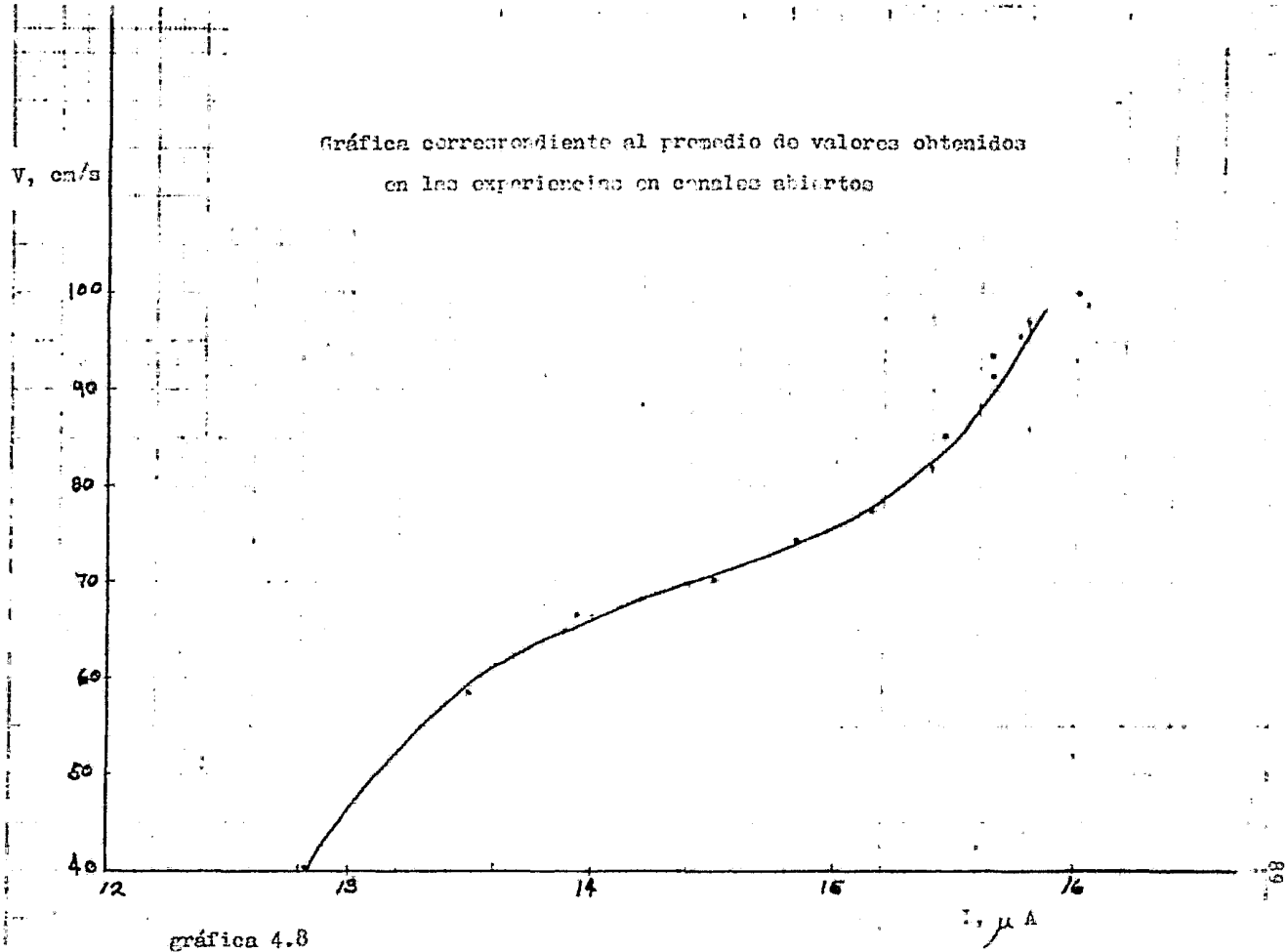
Sin embargo, en nuestra experiencia en canal abierto, se observa que cuando las velocidades ya son relativamente grandes, el comportamiento mencionado anteriormente se sigue, pero

VALORES OBTENIDOS

EXPERIMENTO # 1		EXPERIMENTO # 2	
V (cm/s)	L (μ A)	V (cm/s)	L (μ A)
40.0	12.75	40.0	12.9
58.5	13.5	58.5	13.5
66.6	14.0	66.6	13.9
70.0	14.9	70.0	14.1
74.0	15.2	74.0	14.5
77.5	15.5	77.5	14.8
82.0	15.8	82.0	15.0
85.4	15.8	85.4	15.1
88.0	16.0	88.0	15.2
91.5	16.1	91.5	15.2
93.5	16.0	93.5	15.3
95.5	16.0	95.5	15.5
97.0	16.1	97.0	15.5
99.0	16.1	99.0	16.0
100.0	16.0	100.0	16.0

PROMEDIO DE VALORES ENTRE AMBOS
EXPERIMENTOS

V (cm/s)	L (μ A)
40.0	12.82
58.5	13.5
66.6	13.95
70.0	14.5
74.0	14.85
77.5	15.15
82.0	15.4
85.4	15.45
88.0	15.6
91.5	15.65
93.5	15.65
95.5	15.75
97.0	15.8
99.0	16.0
100.0	16.0



al inicio de la prueba, es decir, cuando las velocidades son bajas, se nota una respuesta diferente: precisamente lo contrario a lo que se esperaba. Existe un rango de velocidades en las cuales, a medida que aumenta, los incrementos en el amperaje, que deberían ser cada vez menores, son mayores.

Este comportamiento puede deberse a muy diferentes factores. Quizá el hecho de que ya que el inicio del experimento es con el nivel de agua muy bajo y justamente sobre la zona de polarización, es posible que existan turbulencias más marcadas, debido a lo pequeño del área de flujo. Entonces, con muy poca variación en la velocidad, se originan grandes cambios en el amperaje de los electrodos; pero después de esta relativa inestabilidad, se vuelve al comportamiento normal. Puede observarse que el final de la gráfica es similar al de las gráficas en canales cerrados, es decir, que llega un momento en que, aunque se siga aumentando la velocidad, el amperaje ya no varía, debido a que ya se llegó a la velocidad límite donde los electrodos están totalmente despolarizados.

En consecuencia, la obtención de una ecuación que se adaptara a este comportamiento no fue tan sencilla como en el caso de los canales cerrados. En aquellos experimentos fue posible determinar una sola ecuación, relativamente sencilla, que se adaptara a los valores que habíamos determinado.

En el presente caso, no resultó el procedimiento mencionado. Se graficó L (lectura) contra V (velocidad), $\log L$ vs. V , L vs. $\log V$, $\log L$ vs. $\log V$, $1/L$ vs. $1/V$, L vs. L/V , V vs. V/L , y en ninguno de los casos se obtenía una línea recta que nos pudiera dar la pauta para determinar una ecuación.

Entonces se estableció que solamente la combinación de dos ecuaciones relacionadas perfectamente en una misma fórmula podría adaptarse a los valores que poseíamos.

Primero se determinó la ecuación que satisfacía la segunda parte de la gráfica, es decir, a los valores mayores.. Para ello, tenía que graficarse $\log L$ vs. $\log (V - c)$. Para la determinación de esta constante "c" se hizo lo siguiente: se escogen dos puntos de la gráfica, que en nuestro caso fueron: -- P_1 (14.5, 70.0) y P_2 (15.75, 95.5). Se determina entonces una L_3 (que será diferente a las L_1 y L_2 de los puntos escogidos), mediante la fórmula:

$$L_3 = \sqrt{L_1 L_2} = \sqrt{14.5 (15.75)} = 15.11$$

Se observa este valor de L_3 en la gráfica, y se determina qué valor de V le corresponde. En este caso, $V = 77.0$. Obtengamos entonces el valor de "c" mediante:

$$c = \frac{V_1 V_2 - V_3^2}{V_1 + V_2 - 2V_3} = \frac{70 (95.5) - 77^2}{70 + 95.5 - 2(77)} = 65.74$$

y entonces la gráfica se establecerá mediante los siguientes - datos:

$\log L$	$V - c$	$\log (V - c)$
1.1613	4.26	0.630
1.1717	8.26	0.917
1.1804	11.76	1.07
1.1875	16.26	1.2111
1.189	19.66	1.293
1.1931	22.26	1.3475
1.1945	25.76	1.411
1.1945	27.76	1.4434
1.1973	29.76	1.4736
1.1986	31.26	1.495
1.2041	33.26	1.522
1.2041	34.26	1.5348

Al trazar esta gráfica, se observa que es muy aproximada a una recta. En base a eso, se determina su ecuación de esta manera: tomando dos puntos de esta gráfica, determinaremos su pendiente (similarmenete a como lo hicimos para las experiencias en canales cerrados). Los puntos serán: P_1 (1.1613, 0.63) P_2 (1.1973, 1.4736).

$$m = \frac{1.4736 - 0.63}{1.1973 - 1.1613} = 23.43$$

Estableciendo la ecuación de la recta como sigue:

$$\log (V - c) = 23.43 (\log L) + b$$

podremos determinar la constante "b" con sólo dar valores a --
 $\log (V - c)$ y a $\log L$, tomándolos de nuestra tabla de datos o
 de la gráfica. Efectuando las operaciones adecuadas, obtendremos un valor de $b = -26.58$.

Y finalmente, sustituyendo los valores de "m" y "b" en la ecuación general indicada arriba, deducimos la siguiente ecuación:

$$V = 2.63 \times 10^{-27} L^{23.43} + 65.74$$

Aplicando esta fórmula, y omitiendo los valores pequeños para los cuales ésta no es satisfactoria, tendremos:

Velocidad real (cm/s)	Velocidad calculada (cm/s)
70.0	70.0
74.0	73.21
77.5	77.68
82.0	83.26
85.4	84.64
88.0	89.4
91.5	91.3
93.5	91.3
95.5	95.4
97.0	97.69
99.0	102.6
100.0	108.6

Ahora bien, para el cálculo del factor de corrección que se añadirá a la fórmula, para que ésta también se aplique a -- los valores correspondientes a las velocidades bajas, se hace lo siguiente: primero se determinan los valores que se habrían obtenido empleando la ecuación que se acaba de desarrollar, -- después se efectúa la resta entre estos valores y los reales, --

se calcula el logaritmo de estas cantidades, y se grafica éste contra el logaritmo de L. Los datos son los siguientes:

V real	V calculada	r (diferencia)	log r
40.0	65.97	25.97	1.4144
58.5	66.54	8.04	0.9052
66.6	67.46	0.86	-0.065

Como se puede apreciar, la diferencia entre la velocidad calculada y la real es cada vez menor, y es por eso que solamente se toman en cuenta estos tres valores. Al trazar la gráfica mencionada (gráfica 4.10), se puede observar que se aproxima bastante a una recta, y, aplicando el procedimiento seguido en gráficas anteriores, se llega a la ecuación:

$$r = 8.13 \times 10^{36} L^{-32.03}$$

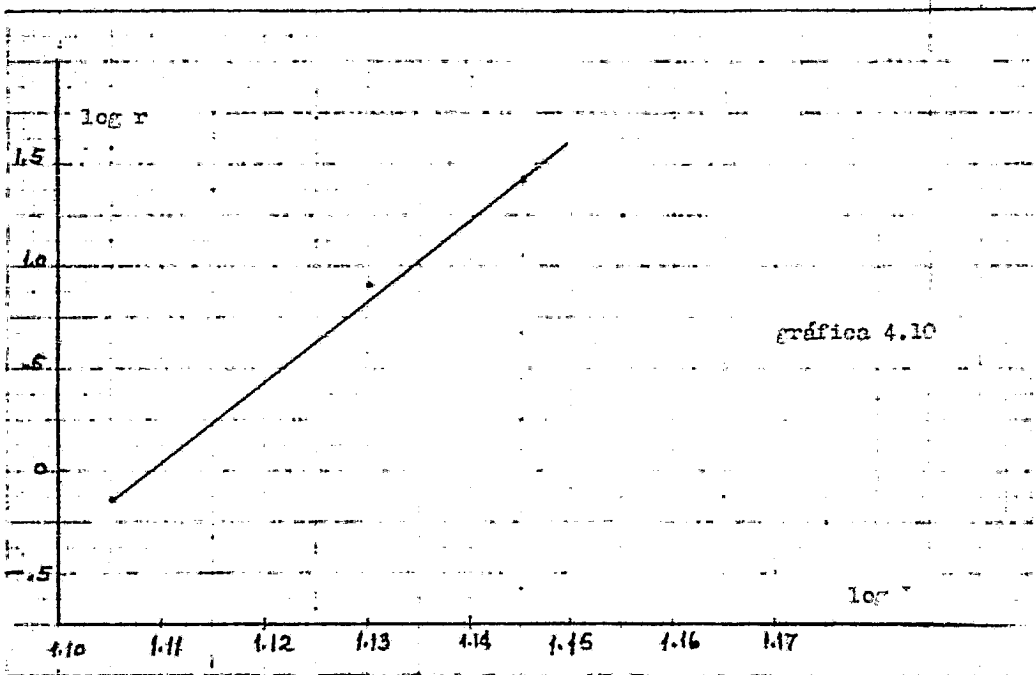
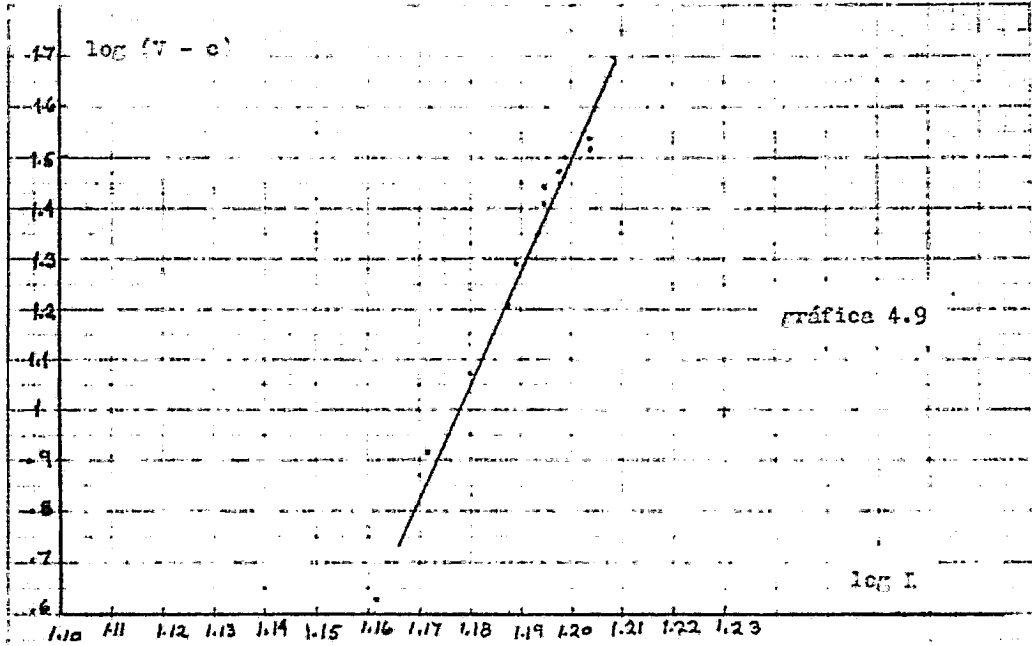
Y conjuntando esta ecuación con la fórmula que ya habíamos determinado, tendremos finalmente:

$$V = 2.63 \times 10^{-27} L^{23.43} + 65.74 - 8.13 \times 10^{36} L^{-32.03}$$

que al emplearla nos da los siguientes resultados:

Velocidad real cm/s	Velocidad calculada cm/s
40.0	39.4
58.5	61.47
66.6	65.6
70.0	69.48
74.0	72.97
77.5	77.55
82.0	83.18
85.4	84.57
88.0	89.35
91.5	91.3
93.5	91.3
95.5	95.4
97.0	97.69
99.0	102.6
100.0	108.6

siendo ésta la posibilidad más cercana de adaptar una fórmula al comportamiento general del Polaflex en canales abiertos.



CAPITULO E

C O N C L U S I O N E S

Observando los resultados derivados de nuestras experiencias en canales cerrados, podemos inferir algunos detalles de importancia.

En primer lugar, podemos darnos cuenta de que a medida -- que el flujo adquiere velocidad, la lectura que se registra en nuestro microamperímetro tiende a un cierto valor máximo. Es -- decir, existirá una velocidad después de la cual la aguja de -- nuestro medidor no realizará cambio alguno. Esto se debe a que a esa velocidad determinada, los electrodos estarán despolarizados completamente, y por más que se incremente el flujo, la -- cantidad de corriente que circula a través de los electrodos -- no podrá aumentar, ya que en ese momento específico se estará -- registrando la corriente neta que provee nuestra fuente de poder, pues no existirá para entonces resistencia alguna que mer -- me su cantidad.

Este hecho se corroboró cuando se iniciaron las experiencias en canales abiertos, ya que al tratar de iniciar nuestras lecturas, la aguja no registraba movimiento alguno, debido a -- la excesiva velocidad de fluido que teníamos. Fue necesario, -- como se señaló oportunamente, bajar bastante dicha velocidad, -- para que nuestros electrodos tuvieran oportunidad de polarizar -- se y a continuación despolarizarse paulatinamente permitiéndonos así tomar las lecturas pertinentes.

Este comportamiento quizá haga pensar que el Polaflex no -- puede ser útil cuando nos encontramos en presencia de grandes -- caudales, pero ésta sería, sin lugar a dudas, una apreciación -- a priori, ya que nuestro objetivo principal no fue trabajar -- con todas las posibilidades de flujos que podríamos encontrar -- en la industria química, sino simplemente mostrar las posibili -- dades que, a futuro, puede tener este instrumento.

Podríamos señalar que una forma de utilizar el Polaflux - a grandes flujos, se lograría haciendo diversas pruebas con -- electrodos diferentes, observando cuidadosamente el comporta-- miento de cada uno de ellos, de acuerdo a su espectro de res-- puesta, y de acuerdo también a las velocidades de flujo que se estuvieran estudiando.

El inconveniente de seguir estos pasos podría ser que al final de nuestra investigación encontraríamos un material que - funcionara perfectamente para nuestros requerimientos, pero -- que, desafortunadamente, fuera demasiado costoso o aún difícil de conseguir; o que, por otro lado, fuera demasiado frágil pa-- ra soportar el flujo a que estaría sometido. En estos casos, - no quedaría otro remedio que tratar de adaptar un material que se acercara lo más posible a los resultados que quisiéramos -- obtener, o, en caso extremo, prescindir de la utilización de - este tipo de medidor.

Quizá en algunos casos no sería necesario cambiar los - - electrodos en sí, es decir, no sería necesario cambiar el mate-- rial de que estuviera hecho, sino simplemente bastaría con cam-- biar su forma o aumentar su tamaño.

Debe considerarse también, aparte de un estudio sobre los electrodos, una evaluación acerca del voltaje que se va a su-- ministrar al sistema. Es probable que exista una relación bas-- tante estrecha entre el voltaje que se hace circular por los - electrodos, y la capacidad de éstos para polarizarse y despola-- rizarse cuando estén sometidos a un flujo violento. Es decir, - dicha relación sí existe, pero el mencionado estudio sería pa-- ra determinar el voltaje óptimo que nos permitiría tener una - buena capacidad de respuesta en nuestro amperímetro.

Desde luego no deben olvidarse otros factores que pueden-- verse afectados por el voltaje que hayamos determinado, como - son la composición de la solución, y la estructura externa de-- los electrodos. No sería conveniente aplicar el voltaje necesi--

rio para obtener lecturas confiables si al mismo tiempo la solución se descompone sensiblemente o la vida útil de los electrodos es de apenas unos días. Debe hacerse hincapié en que al variar un factor del Polaflux, no deben descuidarse las consecuencias que pueda tener en los demás elementos del sistema.

Pasando a otra cuestión, se hizo ver que el Polaflux es un instrumento sumamente sensible, y que detecta inmediatamente cualquier cambio en la velocidad del fluido. Sin embargo, esta facultad puede estar ya sea a favor nuestro, o en nuestra contra.

Indudablemente, lo que un ingeniero necesita al consultar un medidor de flujo es precisión, y a este respecto el Polaflux daría un excelente servicio. Esta precisión dependería fundamentalmente de los electrodos y de su posición en la tubería. Cuando estuvieran estos electrodos colocados en secciones transparentes (que generalmente sería cuando fueran utilizados en canales abiertos), si sufrieran alguna modificación respecto a su posición inicial, se podría detectar inmediatamente, y se corregiría, asegurando así una confiabilidad absoluta en las lecturas. No obstante, cuando dichos electrodos se encontraran en tuberías cerradas (que generalmente no son transparentes), no sería posible detectar, por lo menos en forma instantánea, si los electrodos hubieran sufrido alguna modificación respecto a su posición original, o si hubieran atrapado entre ellos alguna impureza que impidiera el correcto flujo de líquido a través de ellos, y, por lo tanto, quizá estuvieran detectando una velocidad que no sería la verdadera.

Estos podría evitarse o minimizarse adaptando un sensor que fuera relativamente fácil de desprender de su punto de sustentación, y efectuando una inspección en él cada vez que se sospechara de una conducta irregular del fluido que circulara a través de ese conducto, además, por supuesto, del mantenimiento preventivo a que se debería someter regularmente.

No debemos olvidar que una de las principales restricciones de este instrumento es el hecho de que sólo puede medir velocidades de fluidos electrolizables, y, aunque ésto reduce en cierta medida su espectro de acción, una de las aplicaciones en las que vemos mayor futuro para el Polaflex es en la medición de la velocidad del agua en ríos y canales, y debemos tener presente que, aunque común, el agua es vital para todos. Actualmente los sistemas existentes para medir esas velocidades son lentos, y podría decirse que menos confiables que utilizando el Polaflex. Adaptando un adecuado par de electrodos a un sensor diseñado para cierto canal específico, se tendría, con un Polaflex perfectamente calibrado, una medida rápida del caudal acuoso.

Es necesario recalcar que nuestro trabajo es puramente de introducción al estudio de este nuevo instrumento de medición y de sus aplicaciones. Hay todavía mucho que experimentar, evaluar, probar y analizar respecto al comportamiento del Polaflex. Hay muchas variables con las que se puede trabajar para encontrar nuevos usos y derivaciones a este instrumento.

En páginas anteriores ya se citó, por ejemplo, la facilidad y comodidad que resultaría de acoplar un sistema de alarma al elemento de lectura del Polaflex. Este implemento podría, al llegar la aguja a determinado valor, ya sea hacer sonar una chicharra, o bien cerrar una válvula de solenoide, cualidad que ahorraría tiempo y esfuerzo a las personas que laboraran en alguna determinada planta.

Creemos que con las bases que se han establecido y los pasos que se han dado sobre el estudio del Polaflex, serán de utilidad posterior a personas interesadas en dar un nuevo giro al área de la medición de flujo de fluidos.

CAPITULO 6

B I B L I O G R A F I A

- Abad, Abud, Bech, Rivero; SELECCION DE INSTRUMENTOS PARA LA --
MEDICION DE FLUJO, Tesis Universidad Nacional --
Autónoma de México, 1979.
- Bartolini, Fantini, Gallone; ANNALI DI CHIMICA, 1976, vol. 66-
"Fluid velocity measurements by the electrochemi-
cal method".
- Creighton, H. PRINCIPLES AND APPLICATIONS OF ELECTROCHEMISTRY
4th. edition, Wiley and Sons, Inc. New York.
- Hampel, C. THE ENCYCLOPEDIA OF ELECTROCHEMISTRY, Wiley and-
Sons, New York, 1964.
- Harrison, P. JOURNAL OF CHEMICAL ENGINEERING, 1980, enero 14,
p. 97. "Flow measurement- a state of art review"
- King, C. JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY, 1955, --
vol. 102, No. 4. "Concentration polarization and
overtoltage"
- Lipka, J. COMPUTACIONES GRAFICAS Y MECANICAS, Compañía Edi-
torial Continental y John Wiley and Sons, Inc. -
New York, 1976.
- Uhlig, H. CORROSION AND CORROSION CONTROL, Wiley and Sons,
Inc. New York.
- Villarreal, E. Solicitud de patente de invención # 175326
Secretaria de Patrimonio y Fomento Industrial.
México, D.F.