

# **Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad**

## **TESIS DE GRADO**

**PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE  
INGENIERO EN ELECTRICIDAD**

**Especialización:**

**Electrónica**

**T E M A :**

**“Estudio y Diseño del Control de una Planta  
Prototipo para la obtención de oro por medio  
de Lixiviación, Adsorción, Desorción y  
Precipitación Electrolítica.”**

**Presentado por:**

**Arturo Moncayo J.**

**GUAYAQUIL**

**ECUADOR**

**1 9 9 1**

## DEDICATORIA

### A MI PADRE

POR TODAS SUS ENSEÑANZAS,  
SABIDURIA Y AMOR DURANTE  
EL TIEMPO QUE COMPARTIÓ SU  
VIDA CON NOSOTROS.

### A MI MADRE Y HERMANOS

POR SU DEDICACION Y APOYO  
EN MIS ESTUDIOS.

## AGRADECIMIENTO

AL ING JAIME SANTORO  
DIRECTOR DE TESIS, POR SU  
AYUDA Y APOYO EN LA ELABO-  
CION DE LA MISMA.

AL INSTITUTO DE QUIMICA  
Y EN ESPECIAL A TODOS AQUE-  
LLOS QUE COLABORARON CON SU  
TIEMPO Y EQUIPOS

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN DE GRADO



ING. JAIME SANTORO D.  
DIRECTOR TESIS



ING. JORGE FLORES MACÍAS  
SUBDECANO



ING. RODRIGO BERREZUETA P.  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



ING. JUAN DEL POZO L.  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

## DECLARACION EXPRESA

" La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).

  
.....  
Nombre y firma del autor

## RESUMEN

En el primer capítulo, esta tesis trata los procesos que conforman el método aplicado para la extracción de oro de tierras que contienen oro finamente diseminado. Luego de esta descripción se procede al estudio del fenómeno electro-lítico como el punto más relevante en todas sus facetas. Conocidas sus variables se realiza los diagramas de bloques de los circuitos sensores de dichas variables para luego proceder a realizar los circuitos correspondientes en el último capítulo.

Dentro del contenido de esta investigación se puede resaltar las pruebas realizadas en el laboratorio de química, con soluciones standares de oro, las cuales arrojaron datos por demás interesantes, además de establecer un rango dentro del cual debería estar el potencial normal catódico de un electrodo de hierro en una solución de cianato doble de oro; que no se encuentra comumente en tablas.

También se puede recalcar, el control en lazo cerrado del proceso electrolítico. Además de la posibilidad de expandir toda esta circuiteria para el control de los otros procesos dentro de la planta de extracción de oro.

# INDICE GENERAL

RESUMEN

INDICE GENERAL

INDICE DE FIGURAS

INDICE DE TABLAS

INTRODUCCION

## CAPITULO 1

### 1 CONOCIMIENTO Y ESTUDIO DEL PROCESO DE EXTRACCION DE ORO

#### 1.1 El Proceso de Lixiviación para Extraer Oro

1.1.1 Teoría del Proceso de Cianuración

1.1.2 Tecnología de la Cianuración

#### 1.2 La adsorción en carbón activado

#### 1.3 La Desorción y Precipitación Electrolítica

#### 1.4 Diagramas de Operación de una Planta Prototipo

## CAPITULO 2

### 2 LA ELECTRO-DEPOSICION DE ORO Y SUS CARACTERISTICAS

#### 2.1 Teoría de la Electrólisis

2.1.1 Leyes de Faraday

#### 2.2 Electro-Deposición de Oro y su Reacción



## 2.3 Electro-Análisis

2.3.1 Factores que Afectan a la Curva Intensidad-Potencial.

2.3.2 Haz de Curvas Intensidad-Potencial en las Valoraciones.

2.4 Necesidad del Control del Contenido de Oro, Plata, Cobre, Hierro, y Sustancias Orgánicas, en las Soluciones a Electrolizarse.

2.5 Efectos y Rangos Permisibles de Voltaje, y Densidad de Corriente en el Proceso de Electro-Deposición de Oro.

2.5.1 Potencial Aplicado en la Electrólisis

2.5.2 Potencial de Descomposición

2.5.3 Cálculos Teóricos de los Potenciales Reversibles de una Celda con Cianuro de Oro.

2.5.4 Polarización: tipos de polarización

2.6 Curvas Experimentales Obtenidas a Partir de Soluciones estándares de Cianuro de Oro.

2.7 Métodos Utilizados en la Electro-Deposición de Metales: Método a Potencial Constante.

## CAPITULO 3

3 CONTROLES PARA LA ELECTRO-DEPOSICION:SENSORES,DIAGRAMAS DE BLOQUE,CALCULOS.

3.1 Control de Voltaje de la Celda Electrolítica para la Electro-Deposición de Oro.

3.1.1 Circuito Transductor Sensor de Voltaje



3.1.2 Diagrama de Bloques del Circuito Sensor de Voltaje.

3.2 Control de la Densidad de Corriente en la Celda Electrolítica para la Electro-Deposición de Oro.

3.2.1 Diagrama de Bloques del Circuito Sensor para la Corriente de la Celda.

3.3 Determinación del Tiempo de Deposición para un Proceso Electrolítico a Potencial Constante.

3.3.1 Cálculo del Tiempo de Deposición para una Solución standar de 100 ppm de cianuro de oro por litro.

3.3.2 Cálculo de la corriente inicial(máxima) de iones  $Au^+$  en una solución de cianuro de oro standar.

3.4 Rango en el Control de Flujo de la Solución en el Proceso Electrolítico.

#### CAPITULO 4

4 SISTEMA DE ADQUISICION Y CONTROL DE DATOS (VOLTAJES Y CORRIENTE) PARA UNA CELDA DE ELECTRO-DEPOSICION DE ORO.

4.1 Transductores: Conceptos Generales, Tipos de Transductores, Transductores Utilizados en el Proceso Electrolítico, Tipos de Electrodo

4.1.1 Conceptos Generales

4.1.2 Tipos de Transductores

4.1.3 Transductores utilizados en el proceso electroli-  
tico.

4.1.4 Tipos de Electroodos

4.2 Circuitos de Amplificación: Definición. Circuitos de  
Control Normalmente Utilizados en la Electro-  
Deposición. Amplificador de Instrumentación. Circuito  
Booster. Circuitos Utilizados. Criterios de Diseño.

4.2.1 Circuitos de Control Normalmente Utilizados en la  
Electro-Deposición.

4.2.2 Amplificador de Instrumentación.

4.2.3 Circuito Booster

4.2.4 Amplificadores Utilizados para el Control de la  
Electro-Deposición.

4.2.5 Criterios de Diseño (de los Amplificadores).

4.3 Circuitos de Control Digital: Sistema de Adquisición de  
datos (diagrama de bloques). Convertidor Analógico-  
Digital. Interfase de Entrada de Datos. Interfase de  
Salida de Datos. Etapa Visualizadora de Datos.

4.3.1 Sistemas de Adquisición de Datos

4.3.2 Convertidor Analógico-Digital

4.3.3 Interfase de Entrada de Datos.

4.3.3.1 Diagrama de la Interfase de Entrada de  
datos.

4.3.4 Interfase de Salida de Datos

4.3.4.1 Interfase Visualizadora de Datos

- 4.3.4.2 Diagrama de la Interfase Visualizadora de Datos.
- 4.3.4.3 Interfase de salida para el control del voltaje catódico.
- 4.3.4.4 Diagrama de la interfase de salida para el control del voltaje catódico.

## INDICE DE FIGURAS

- FIGURA # 1 Columnas de Adsorción
- FIGURA # 2 La Lixiviación y Adsorción
- FIGURA # 3 Desorción y precipitación electrolítica
- FIGURA # 4 Electrólisis
- FIGURA # 5 Electrodeposición de una solución de cianuro de oro.
- FIGURA # 6 Pila Electrolítica para Electroanálisis
- FIGURA # 7 Curva Intensidad - Potencial
- FIGURA # 8 Curva para el Potencial de Media Onda en un sistema Rápido
- FIGURA # 9 Curva para el potencial de Media Onda en un sistema lento
- FIGURA # 10 Curvas Intensidad - Potencial en las valoraciones
- FIGURA # 11 La Pila Electrolítica y el Potencial de Descomposición
- FIGURA # 12 Curva Referente al Potencial de Descomposición
- FIGURA # 13 Potencial de Descomposición en la Solución experimental # 1
- FIGURA # 14 Potencial de Descomposición en la Solución experimental # 2
- FIGURA # 15 Potencial de Descomposición en la Solución experimental # 3
- FIGURA # 16 Potencial de Descomposición en la Solución experimental # 4

- FIGURA # 17 Circuito Transductor Sensor de Voltaje
- FIGURA # 18 Diagrama de Bloques del Circuito Sensor de Voltaje Anódico y Catódico
- FIGURA # 19 Diagrama de Bloques del Circuito Sensor de Corriente de la Celda
- FIGURA # 20 Esquema del Flujo de la Solución en el proceso de desorción y precipitación electrolítica
- FIGURA # 21 Transductor "LVDT"
- FIGURA # 22 Transductor Piezo-Eléctrico y sus Circuitos de Amplificación y Linealización
- FIGURA # 23 Sensor Optico y su Enfoque
- FIGURA # 24 Electrodo Metálicos como Seguidores de Valoraciones
- FIGURA # 25 Esquema de un Amplificador Básico para el Control de una Celda Electrolítica
- FIGURA # 26 Amplificador Mejorado para el Control de una Celda Electrolítica de Bajo consumo de potencia
- FIGURA # 27 Amplificador Experimental(laboratorio) para Controlar una Celda Electrolítica Hasta de un Amperio
- FIGURA # 28 Amplificador de Instrumentación (con 3 amplificadores)
- FIGURA # 29 Circuito Sensor de Corriente de la Celda (con 3 Amplificadores)
- FIGURA # 30 Amplificador Difirencial (con 1 Amplificador)
- FIGURA # 31 Amplificador Logarítmico
- FIGURA # 32 Circuito Sensor de Voltaje Anódico y Catódico



- FIGURA # 33 Circuito Sensor y Linealizador de la Corriente de una Celda Electrolitica a Potencial Constante
- FIGURA # 34 Diagrama de Bloques del Sistema de Adquisición de Datos
- FIGURA # 35 Convertidor A/D "ADC 0808"
- FIGURA # 36 Diagrama de Tiempo del Convertidor A/D
- FIGURA # 37 Ejemplo de la Configuración de Puertos del "MC 6821".
- FIGURA # 38 Registros de Control del "MC 6821" y su descripción
- FIGURA # 39 Configuración de los Registros de Control del "MC 6821" para el Modo de Operación Handshaking de Introducción de Datos
- FIGURA # 40 Diagrama de Tiempo para el Modo Handshaking
- FIGURA # 41 Diagrama de Pines del "MC 6821"
- FIGURA # 42 Descripción del Registro de Control de los Contadores del Timer "MC 6840"
- FIGURA # 43 Ejemplo de la Programación en el Latch del Contador para Obtener una Salida en el Timer Operando en el Modo Duty Cycle
- FIGURA # 44 Diagrama de Pines del "MC 6840"
- FIGURA # 45 Diagrama de Pines del "74LS148"
- FIGURA # 46 Diagrama de Tiempo de la Interfase de Entrada de Datos
- FIGURA # 47 Interfase de Entrada de Datos
- FIGURA # 48 Diagrama de Tiempo de la Interfase Visualizadora de Datos



FIGURA # 49 Interfase Visualizadora de Datos

FIGURA # 50 Convertidor D/A con Voltaje de Referencia  
Positivo

FIGURA # 51 Convertidor D/A con Voltaje de Referencia  
Negativo

FIGURA # 52 Interfase de Salida para el Control de Voltaje  
Catódico

## INTRODUCCION

Esta tesis adjunta a su contenido la presentación del diseño de una planta de extracción de oro por los procesos de lixiviación, adsorción, desorción, y precipitación electrolítica, controlando sus variables físicas, químicas y eléctricas de la manera más sencilla y económica ajustable a la realidad de nuestro País. La comparación de los métodos y en especial el control de estos procesos es confrontado respecto a los métodos y controles que actualmente se utilizan en países más desarrollados que el nuestro en este campo; como son los Estados Unidos, Sudáfrica etc.

Los países anteriormente mencionados trabajan en algunas minas con estos mismos procesos, pero con un control mucho más sofisticado, exacto, y por ende más costoso. Podríamos hablar por ejemplo del sondeo de la concentración de la solución rica en oro desde el proceso inicial como es la lixiviación, hasta el proceso final que corresponde a la precipitación electrolítica, por medio del Espectógrafo de Adsorción Atómica que envía los datos a un Computador Central que toma las acciones pertinentes y correctivas para una mejor extracción del Oro.

La interrogante central entorno a la tesis giró en corroborar, si se podía lograr un control efectivo, barato y con un buen grado de exactitud; que se refleje en una buena eficiencia para la extracción de oro, y que a la vez pueda

ser controlado a través de un computador para hacerlo lo más automático posible.

El método de desarrollo de esta memoria consistió primero, en el estudio de los procesos mineros para la extracción de oro, prosiguiendo el estudio del proceso electrolítico de una manera más profunda; para de esta forma definir su procedimiento de control que sea a la vez a fin o compatible, con el control de los demás parámetros que corresponden a los procesos que anteceden a la electrólisis, en un proceso de extracción de Oro.

En resumen el objetivo principal de esta tesis es dar a conocer los procesos a seguir para la obtención de oro de tierras con ciertas características, fijar los parámetros que deben ser controlados, y concentrarse en el control del proceso electrolítico, no sin antes dejar esclarecidas todas las posibles interrogantes con respecto al control de los procesos antecedentes.

## CAPITULO 1

### 1.1 EL PROCESO DE LIXIVIACION PARA EXTRAER ORO

#### 1.1.1 TEORIA DEL PROCESO DE CIANURACION

El oro primario llamado también oro de minas, se encuentra en la corteza terrestre al estado nativo, es decir puro, en partículas muy finas de tamaño microscópico, mezclado pero no combinado con ningún elemento.

Generalmente, las partículas de oro se encuentran diseminadas en la roca conjuntamente con otros compuestos minerales como sulfuros de hierro (piritas), sulfuros de cobre (calcopiritas), sulfuros de plomo (galenas), sulfuros de plata, etc.

Desde tiempos inmemorables el hombre ha buscado el oro en la naturaleza y lo ha arrancado de las rocas que lo contienen, moliéndolo y separando las impurezas por lavados con agua. Posteriormente, para purificarlo se ha recurrido al fuego para quemar las impurezas y derretirlo separando dichas impurezas en la escoria; también se ha recurrido a la acción de los ácidos que atacan y disuelven casi todos los otros elementos excepto el oro.

Igualmente se ha utilizado hasta la presente fecha, el mercurio líquido que tiene la propiedad de amalgamar el oro separándolo de las impurezas que lo acompañan;



pero todos estos métodos son muy rudimentarios y de muy reducida eficiencia.

Hace justamente un siglo, Mac Arthur y Forrest (1887) inventaron un proceso que le llamaron de cianuración en el que se logró disolver partículas de oro mediante soluciones bajas de cianuro de sodio. Las soluciones con el oro disuelto, se filtraban y se ponían en contacto con Zinc en polvo que actúa como precipitante de oro trasladándolo de su estado líquido al estado sólido en forma de polvo precipitado. el diseño de la operación de precipitación con su dispositivo mecánico correspondiente, fue patentado bajo el nombre de Merrill-Crowe.

Prácticamente durante 100 años toda la producción de oro en el mundo ha sido obtenida tanto en Alaska, como en Mexico, Estados Unidos, Sud Africa y Rusia, por el método de cianuración basado exactamente en la concepción y reacciones químicas originales.

### 3.2.2 TECNOLOGIA DE LA CIANURACION

La proporción en que normalmente se encuentra el oro en relación con el resto de la roca, es de unos pocos de gramos (4 a 50gr) por 1 tonelada (1000 kilogramos) de mineral. Para disolver las partículas de oro que en tan reducida proporción se encuentran diseminadas en una gran masa de rocas y otras impurezas, se

pueden aplicar los principios de disolución por agitación o por percolación.

En la disolución por agitación es requisito previo que los sólidos estén molidos al grado de polvo fino y que la relación líquido- sólido sea de 1:4 es decir 4 m<sup>3</sup> de solución de cianuro por cada 1 tonelada de mineral, para lograr la debida fluidez. La agitación del conjunto se logra por medios mecánicos (agitador de hélice) o por medio de aire comprimido. El contacto entre el soluto (sólido) y el solvente (líquido) es muy efectivo por lo que las reacciones químicas son completas y más rápidas.

En las disoluciones por percolación los sólidos permanecen estáticos y deben tener tamaño uniforme que pueden variar de arena gruesa a trozos de 1" a 2". El líquido (solución diluida de cianuro de sodio al 0.05%) es el elemento dinámico que se desplaza verticalmente atravezando la masa de sólidos ya sea en sentido ascendente o descendente. La disolución por percolación es de efectos más lentos y puede efectuarse ya sea en estanques o amontonando el mineral en forma de pilas. En cualquier caso, la percolación tiene la gran ventaja de producir por drenaje soluciones limpias filtradas a través de la propia carga del mineral que sirve de filtro. Estas soluciones de cianuro con el oro disuelto pueden así



dirigirse directamente a la etapa siguiente de precipitación de oro al estado sólido.

En resumen la cianuración por cualquiera de los métodos, ya sea por agitación o por percolación, producen soluciones de cianuro que contienen el oro disuelto en concentraciones aproximadas de 1 gr de oro por cada 1 metro cúbico de solución (equivalente a 1 mg/lt ). Estas soluciones se someten a la precipitación Merrill Crowe o al moderno método de ADSORCION EN CARBON ACTIVADO para extraerles el oro disuelto.

### 2.2 - LA ADSORCION EN CARBON ACTIVADO

Una vez que se ha efectuado la cianuración, es decir que se ha disuelto el oro contenido en la roca mineral, el problema de EXTRAER el oro disuelto en las soluciones de cianuro se resuelve normalmente por cualquiera de los dos métodos siguientes:

1) El antiguo método de precipitación con polvo de zinc en una instalación o dispositivo Merrill- Crowe.

2) El moderno método de adsorción por carbón activado. La planta prototipo que hemos seleccionado para nuestro estudio, consta de un sistema de adsorción en carbón activado para extraer el oro disuelto en las soluciones de cianuro. Por lo tanto y dado al carácter de este

estudio, no es pertinente que nos extendamos en mayores detalles sobre el sistema Merrill- Crowe.

El sistema de adsorción por carbón activado en estudio puede consistir de 2 a un número predeterminado de columnas de acuerdo al volumen de solución a tratar, estas columnas tienen un fondo cónico y una malla sobre la que se sostiene la masa de carbón activado (figura #1).

### COLUMNAS DE ADSORCION

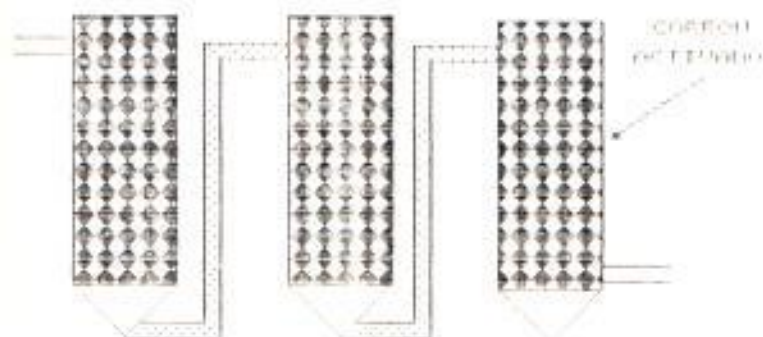


FIGURA # 1

El carbón activado elaborado con corteza de cocos, calcinado a 800°C, es el de mejor calidad para este objeto, pues aparte de ser muy duro y consistente, tiene una estructura porosa ideal en el que se produce el fenómeno físico-químico de la "ADSORCION" por el cual los iones de oro son normalmente atrapados y retenidos en los poros del carbón, quedando ahora al estado sólido aunque en tamaño microscópico.

La solución de cianuro con oro disuelto ya sea proveniente de un estanque de agitación, de percolación o de una pila descubierta, se hace circular a través de las columnas calculadas de carbón activado dispuestas en serie.

El carbón activado tiene una capacidad determinada de adsorción de oro que fluctúa de 5 a 12 gramos por kilogramo de carbón, dependiendo de la presencia de otros iones que inevitablemente el carbón también adsorbe como son los de plata, cobre y hierro. Cuando la solución estéril saliente de la última columna empieza a mostrar valores de oro no atrapados, significa que por lo menos las dos primeras columnas se encuentran saturadas por lo que se procede a retirar su contenido reemplazándolo por carbón nuevo re-activado. Las columnas de carbón nuevo se ubicarán ahora en las dos posiciones finales (ver figura 1).

El carbón retirado que se encuentra "CARGADO" con oro se somete al paso siguiente de desorción y precipitación electrolítica.

### 1.3 - LA DESORCIÓN Y PRECIPITACIÓN ELECTROLÍTICA

Resumiendo las fases del proceso, tenemos primeramente que el oro contenido en la roca original en la proporción normal de 4 gramos de oro por tonelada de roca, fue disuelto y extraído por soluciones de cianuro de sodio en proporciones aproximadas de 5 metros cúbicos por una tonelada de roca mineral. Es decir que los 4 gramos de oro originales fueron



transferidos al estado líquido a una dilución de  $(4/5000) = 0.8$  mg por litro.

En seguida mediante el proceso de adsorción, el oro fué capturado y depositado al estado sólido microscópico en los poros internos del carbón activado. En esta forma el oro se concentraría en la proporción de 12 gramos de oro por kilogramo de carbón si su adsorción fuera máxima, lo cual significa que los 4 gramos de oro originales contenidos en 1 tonelada de roca, fueron transferidos a 0.333 kilogramos de carbón activado saturado por adsorción.

Para recuperar el oro adsorbido por el carbón activado, este se sujeta a un proceso de desorción con soluciones químicas de cianuro- soda cáustica-alcohol en caliente, mediante el cual el oro se disuelve nuevamente pero ahora en volúmen muy reducido de unos pocos litros a altas concentraciones de 20 a 40 mg de oro por litro.

Estas soluciones auríferas son finalmente sometidas al proceso electrolítico para obtener el oro físico al estado sólido en forma de polvo precipitado electrolíticamente. Los controles del proceso en las plantas modernas son automatizados por computación con la indicación permanente del contenido de oro disuelto tanto al entrar como al salir el flujo continuo de solución de cianuro a las celdas electrolíticas.

El análisis del contenido químico de oro en las soluciones se efectúa en las plantas modernas por espectroscopía de absorción atómica, basada en la capacidad de los átomos libres de metales, en los gases o vapores luminosos al excitarlos en un arco eléctrico, de absorber la energía luminosa a unas longitudes de onda características para cada elemento. De esta manera, con alta sensibilidad y rapidez se detectan muchos elementos a la vez, lo que permite un control de proceso muy eficiente y seguro. El proceso descrito en conjunto ya es clásico en las instalaciones modernas y ha revolucionado la tecnología de las plantas procesadoras de minerales de oro ya sea a gran escala o a pequeña escala como es la minería en nuestro país.

El proceso en conjunto es uno de los más sencillos en su aplicación industrial y ha eliminado la necesidad de costosos equipos como grandes estanques agitadores, separadores de sólido-líquido, precipitadores, etc, para llegar a la electrólisis que se efectúa en sencillas cubas electrolíticas de corriente continua.

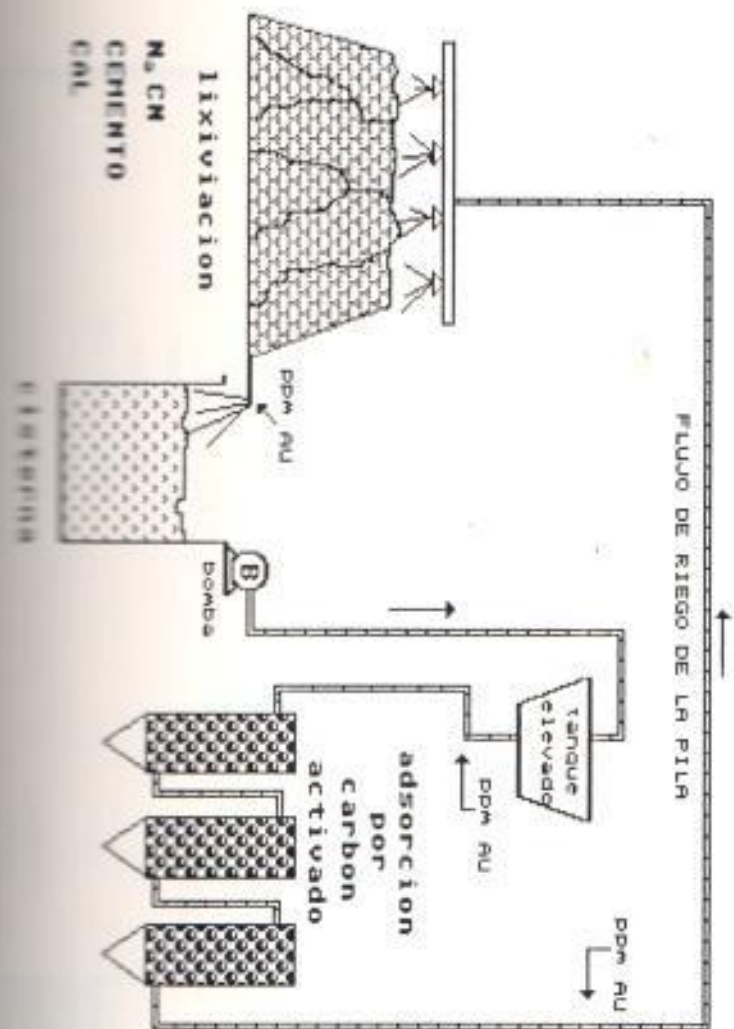
No obstante la correcta comprensión de la actual tecnología aplicada es mucho más difícil que los métodos estrictamente químicos y mecánicos de antaño, especialmente en lo que se refiere al control eficiente de la operación de la electrólisis cuando no se dispone de la complicada y costosa infraestructura de la computación y análisis por espectroscopía de absorción atómica ya mencionadas. El presente

estudio está orientado precisamente a desarrollar un método que permita evaluar y controlar electrónicamente la operación unitaria de la electrólisis cuando no se dispone del costoso control analítico-químico para la depositación sólida del oro de las soluciones que lo contienen.

#### 1.4 DIAGRAMAS DE OPERACION DE UNA PLANTA PROTOTIPO

En los siguientes esquemas presentamos los procesos seguidos por una planta prototipo para nuestro medio.





**CONCENTRACION**  
 $M_2CM = 0.050\% - 0.010\%$   
 $C_{sO} < 0.020\%$

FIGURA # 2

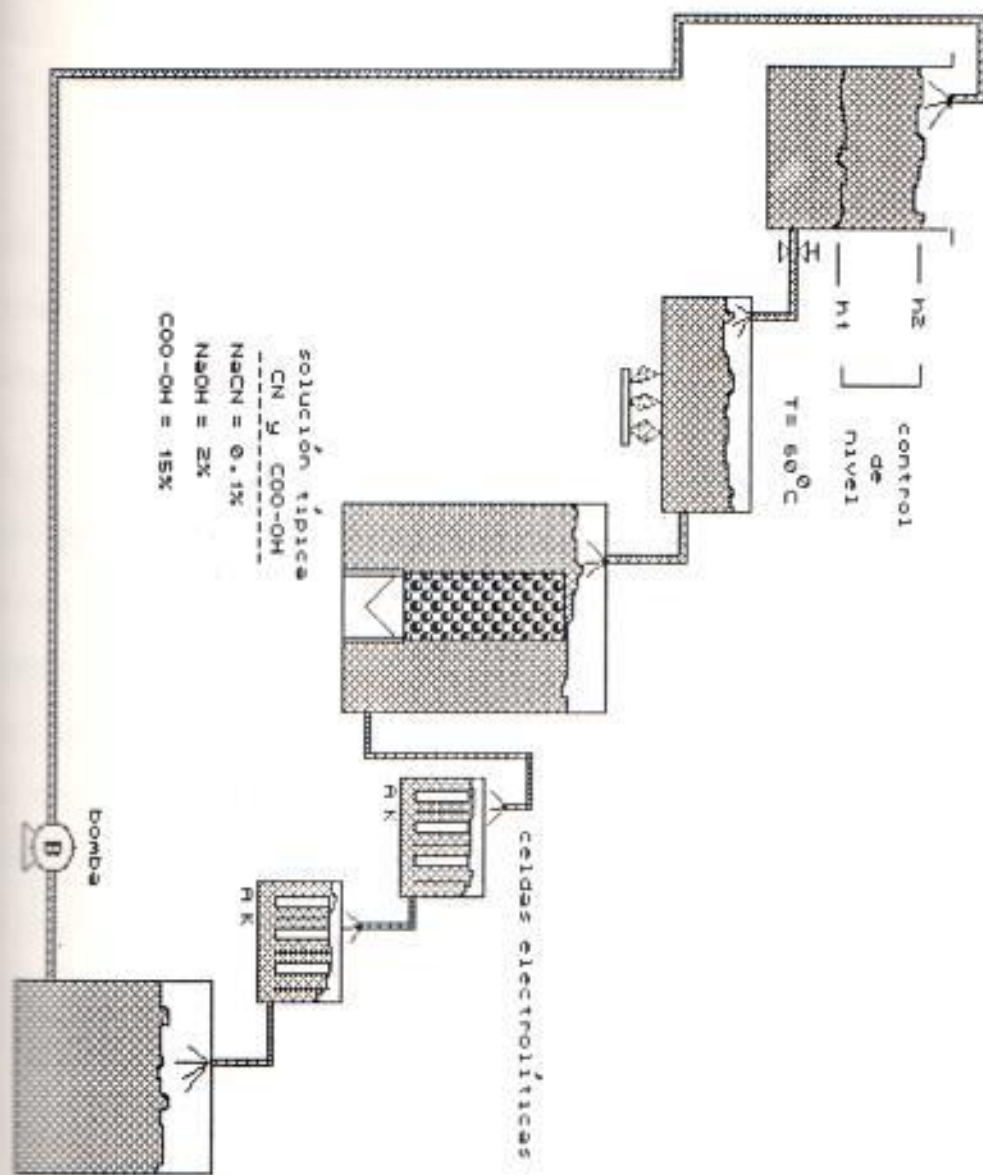


FIGURA # 3

## CAPITULO # 2

### 2.1- TEORIA DE LA ELECTROLISIS

El flujo de la electricidad por un conductor involucra una transferencia de electrones desde un punto de potencial más negativo a otro de menor negatividad.

Por otra parte en los conductores electrolíticos que incluyen electrolitos fuertes y débiles, la transferencia electrónica tiene lugar por migración iónica, positiva y negativa hacia los electrodos. Esa migración no solo involucra una transferencia de electricidad sino también transporte de materia de una parte a otra del conductor. A continuación presentamos un esquema de una celda electrolítica común. (figura # 4)

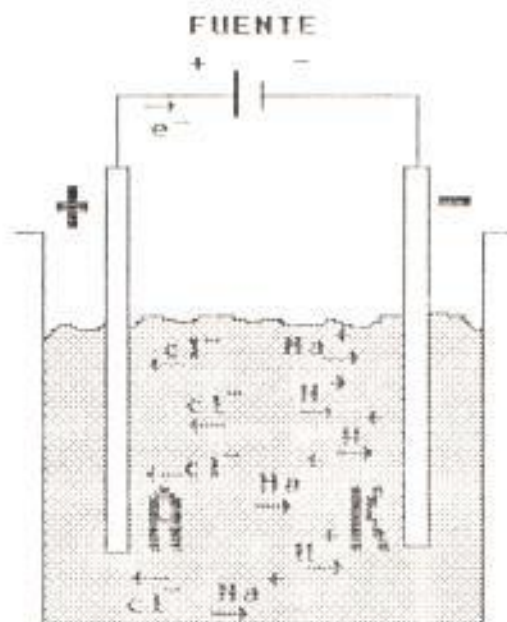


FIGURA # 4

El electrodo "C" conectado al polo (negativo) de la fuente es el cátodo, y es donde se produce el fenómeno de reducción, es decir en donde en este caso el ión hidrógeno (positivo) adsorbe un electrón y se convierte en un elemento monoatómico, para luego juntarse con otro átomo de hidrógeno y formar  $H_2$  (GAS).

El electrodo "A" conectado al polo (positivo) de la fuente es el ánodo, y es donde se produce el fenómeno de oxidación es decir donde los iones (negativos) son atraídos y depositan o liberan sus electrones formando  $Cl_2$  (GAS).

En la celda electrolítica del ejemplo los electrones entran por el electrodo conectado al lado (-) cátodo y abandonan la celda por el electrodo conectado al lado (+) ánodo. Bajo estas condiciones de oxidación y reducción se desarrolla el mecanismo de la electrólisis.

### 2.1.1 LEYES DE FARADAY

Michael Faraday encontró que las masas de una sustancia involucrada en la reacción de cualquier electrodo es directamente proporcional a la cantidad de electricidad que pasa por la solución, este enunciado se convirtió en la primera ley de Faraday de la electrólisis.

A partir de una serie de experimentos Faraday estableció su segunda ley de la electrólisis, según la cual las masas de diferentes sustancias producidas

por el paso de una corriente son directamente proporcionales a sus pesos equivalentes. Esta ley se puede establecerse de otra forma, anunciando que durante la electrólisis 96487 CULOMBIOS de electricidad darán un peso equivalente de cualquier sustancia.

La siguiente tabla contiene algunos elementos con su deposición en amperios/ hora

TABLA #1

	símbolo	peso atómico	valencia	equivalente químico	grano* $\frac{A}{H}$ con rendimiento del 100%
Cobre(cianuro)	Cu	63.6	1	63.6	2.7316
Oro (cianuro)	Au	197.2	1	197.2	7.3569
Plata	Ag	107.2	1	107.2	4.0274
Cadmio	Cd	112.4	2	56.2	2.0968
Cobalto	Co	58.9	2	29.5	1.0094
Cobre(sulfato)	Cu	63.6	2	31.8	1.1858
Hierro(sulfato)	Fe	55.8	2	27.9	1.0420
Plomo	Pb	207.2	2	103.6	3.8654
Níquel	Ni	58.7	2	29.3	1.0948
Estaño(cloruro)	Sn	118.7	2	59.4	2.2142
Estaño(sulfato)	Sn	118.7	2	59.4	2.2142

Luego de conocer algo de los fenómenos que rigen la electrólisis comenzaremos a introducirnos en las reac-



ciones químicas que se originan con las sustancias que componen la solución electrolítica, de la cual se va ha extraer el oro por electrodeposición.

## 2.2 ELECTRO DEPOSICION DEL ORO Y SU REACCION

Después de la elución o desorción, los metales preciosos contenidos en la solución se recuperan en celdas de electrodeposición. Generalmente estas celdas se fabrican en fibra de vidrio o porcelana y constan de ánodos de mallas de acero inoxidable (o láminas), y cátodos de virutas de acero inoxidable compactas.

La fuerza electromotriz (FEM) de esta reacción (de oro) es de aproximadamente 1.6 voltios, aunque en la práctica es sobre los 2.4 voltios por efecto del sobre potencial y polarización.

Las densidades de corrientes de este tipo de celdas son del orden de 0.3- 0.8Amp/Dcm<sup>2</sup> referidos a la superficie catódica. Los consumos energéticos oscilan entre 0.4-0.8 Kw.h/Onz de oro depositado. La reacción global en el proceso previo a la electrólisis que constituye la desorción se divide en 2 partes:

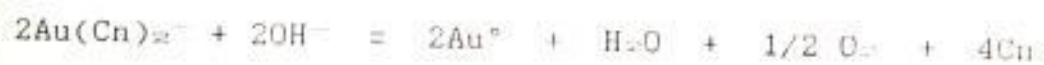


De donde se obtiene el componente principal tanto en la desorción, como para la deposición electrolítica el cual

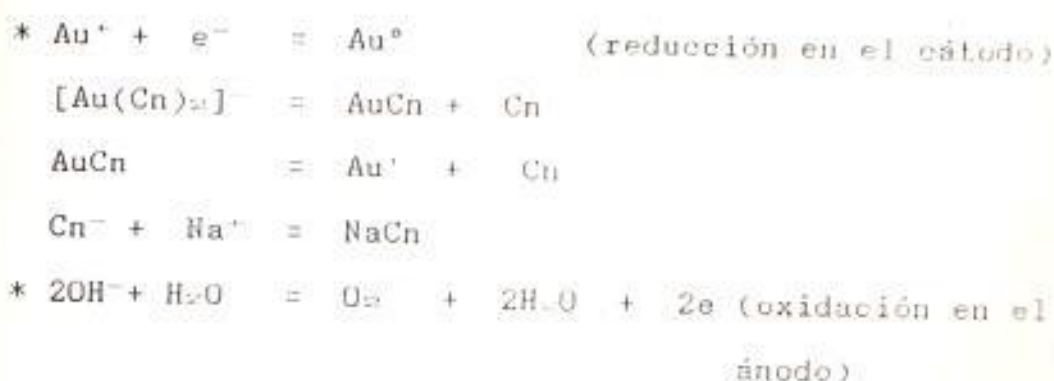
resulta ser:  $(\text{Cn}_2\text{Au})^-$ . A este compuesto se le añade  $\text{NaOH}$  para que la solución tenga una característica alcalina y evite la formación de ácido cianídrico  $\text{CnH}$  altamente venenoso. Los componentes primarios en la disolución a electrolizarse son:

- \*  $(\text{AuCn}_2)^-$  cianato doble de oro (por proceso de desorción)
- \*  $\text{NaOH}$  hidróxido de sodio (neutralizante)
- \*  $\text{H}_2\text{O}$  agua (medio de dilución acuosa)
- \*  $\text{XXX}$  sustancias extrañas (impurezas, otros minerales etc)

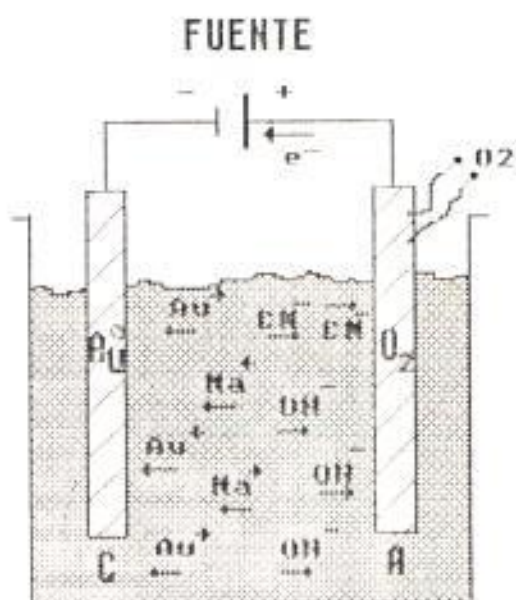
La reacción total de electrodeposición es básicamente la ecuación de cianuración de Elsner invertida, donde el oxígeno se libera en el ánodo y el oro se deposita en el cátodo.



Esta ecuación se puede dividir en varias:



A continuación mostramos en la figura #3 la electrodeposición de oro a partir de una solución de cianuro de oro.



celda electrolitica

figura # 5

### 2.3 ELECTRO-ANALISIS

En general los métodos eléctricos de análisis químicos se basan en las leyes fundamentales de la electroquímica.

Cuando se aplica una diferencia de potencial entre 2 conductores (electrodos) sumergidos en una disolución iónica (agua + una sal fuerte) provoca el paso de una corriente que se transmite en 3 distintas etapas :

- 1.-) Desplazamiento de los electrones desde los cables conductores hacia los electrodos.
- 2.-) Intercambio de electrones através de la superficie de separación electrodos- disolución.
- 3.-) Transporte de los electrones por el movimiento de las especies cargadas de la disolución.

De estas 3 etapas la segunda de ellas es la más importante para poner en marcha los métodos electroanalíticos. Esta etapa viene cuantificada por el potencial redox de un par.



Donde "ox" representa la especie oxidada y "Re" la especie reducida, y a todos estos pares se les asigna un potencial normal de reducción o potencial que toma el electrodo sumergido en una disolución a 20°C y que se conoce como  $E_0$  (potencial reversible del electrodo).

El potencial de reducción de un par es la suma de los potenciales de reducción de los electrodos o de los potenciales de las reacciones oxido-reducción. El potencial de reducción de un par se relaciona con el potencial normal através de la ecuación de NERST.

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} * \ln \frac{[\text{Ox}]}{[\text{Re}]}$$

donde:

[Ox] = concentración de la especie que se oxida

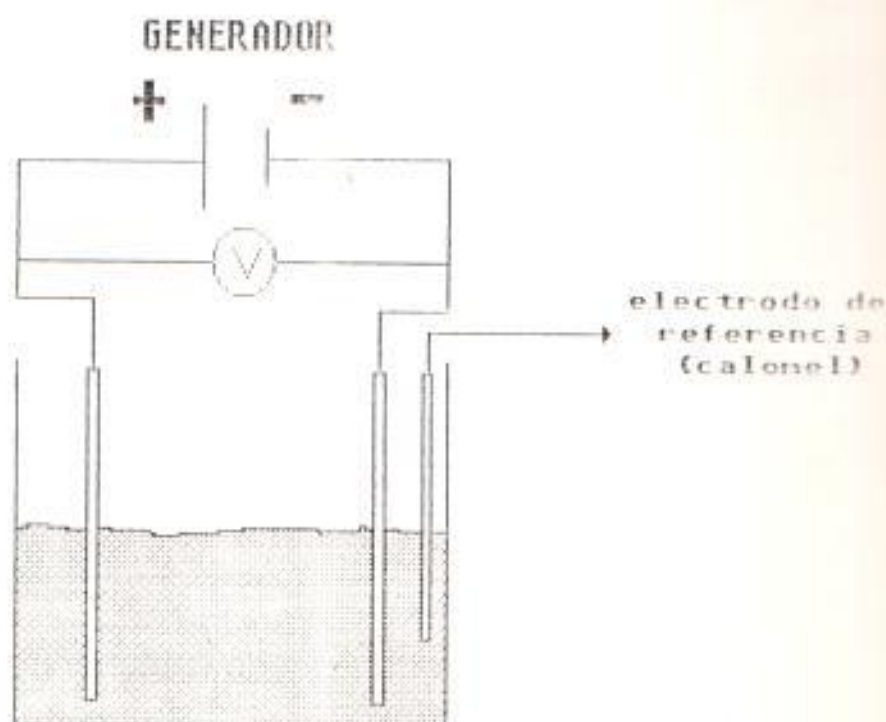
[Re] = concentración de la especie que se reduce

$E_0$  = potencial normal de la celda

Para conocer un poco más el fenómeno electroquímico estudiaremos las curvas intensidad-potencial que deben ser características de cada solución. Y que se obtienen a partir del siguiente esquema básico que se muestra en la siguiente figura.



## ESQUEMA BASICO



celda electrolítica

figura # 6

En este esquema además de los electrodos convencionales se ha añadido una semi pila de referencia (en general un electrodo de calomel saturado) de potencial fijo e independiente de la corriente que circula entre ánodo y cátodo. El procedimiento para este experimento es incrementar el potencial entre ánodo y cátodo mediante un generador, dando como resultado el incremento del potencial entre ánodo y el electrodo de referencia mientras que el potencial entre el cátodo y el electrodo de referencia lo hará en dirección opuesta.



Estas curvas se obtienen estudiando en cada caso el potencial del cátodo y ánodo frente al electrodo de referencia versus la intensidad que circula entre ambos, teniendo la forma siguiente para un sistema rápido.

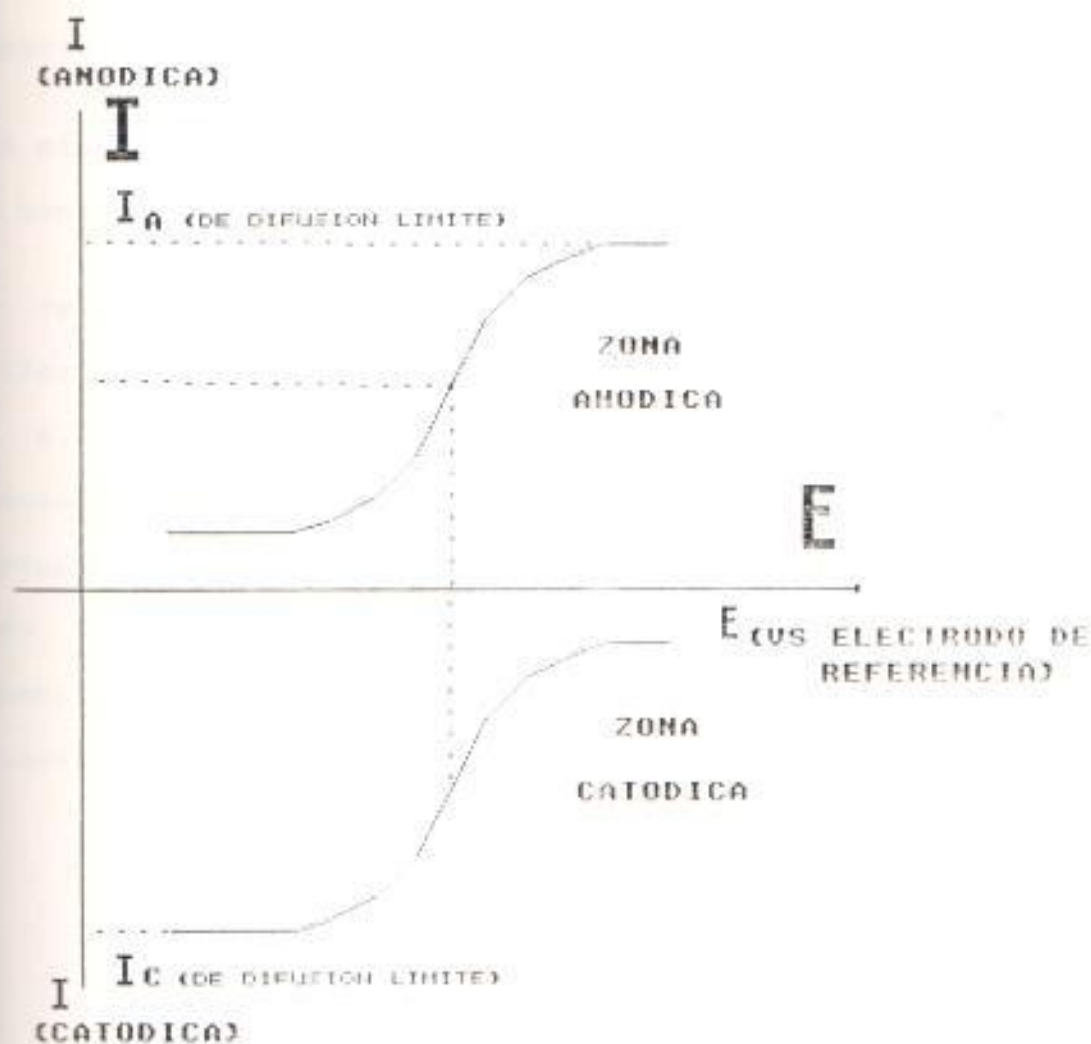


FIGURA # 7

En estas curvas se puede observar que un incremento en el potencial anódico significa un incremento en la intensidad hasta que alcanza un valor constante fijado por la velocidad de intercambios de los electrones de la especie reducida, y que depende también de su concentración en las cercanías del electrodo . A esta intensidad límite que alcanza cada especie se la conoce como corriente de difusión límite.

Del mismo modo se puede estudiar la zona catódica sucediendo lo contrario de la zona anódica.

El valor más significativo de estas curvas en casos sencillos (soluciones simples) es el potencial de semionda que es el mismo para el proceso de oxidación como para el de reducción, y tiene un valor similar al potencial normal del sistema " $E_0$ ". Como el fenómeno es aditivo se lo puede tratar como una simple suma de funciones, obteniéndose una curva intensidad-potencial total para un sistema de este tipo, que se muestra en la siguiente figura.

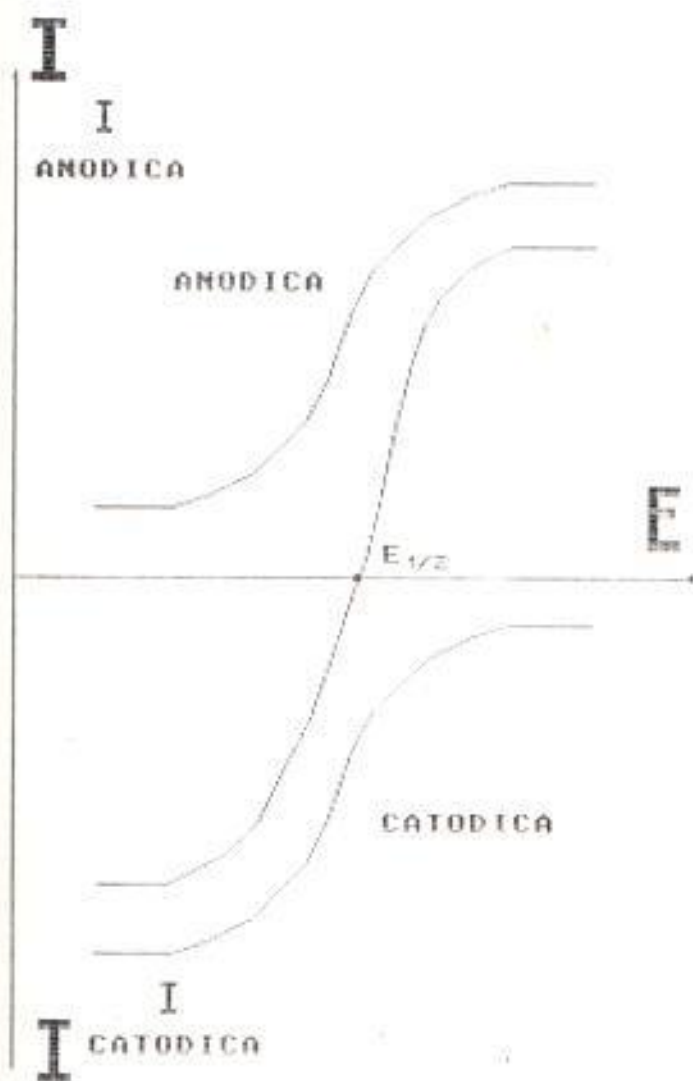


FIGURA # 8

La curva representada en la gráfica anterior es característica de un proceso rápido, pero muchos sistemas electroquímicos se comportan de tal modo que sus velocidades de oxidación y reducción son muy lentas cercanas al potencial de equilibrio como se muestra en el siguiente esquema.

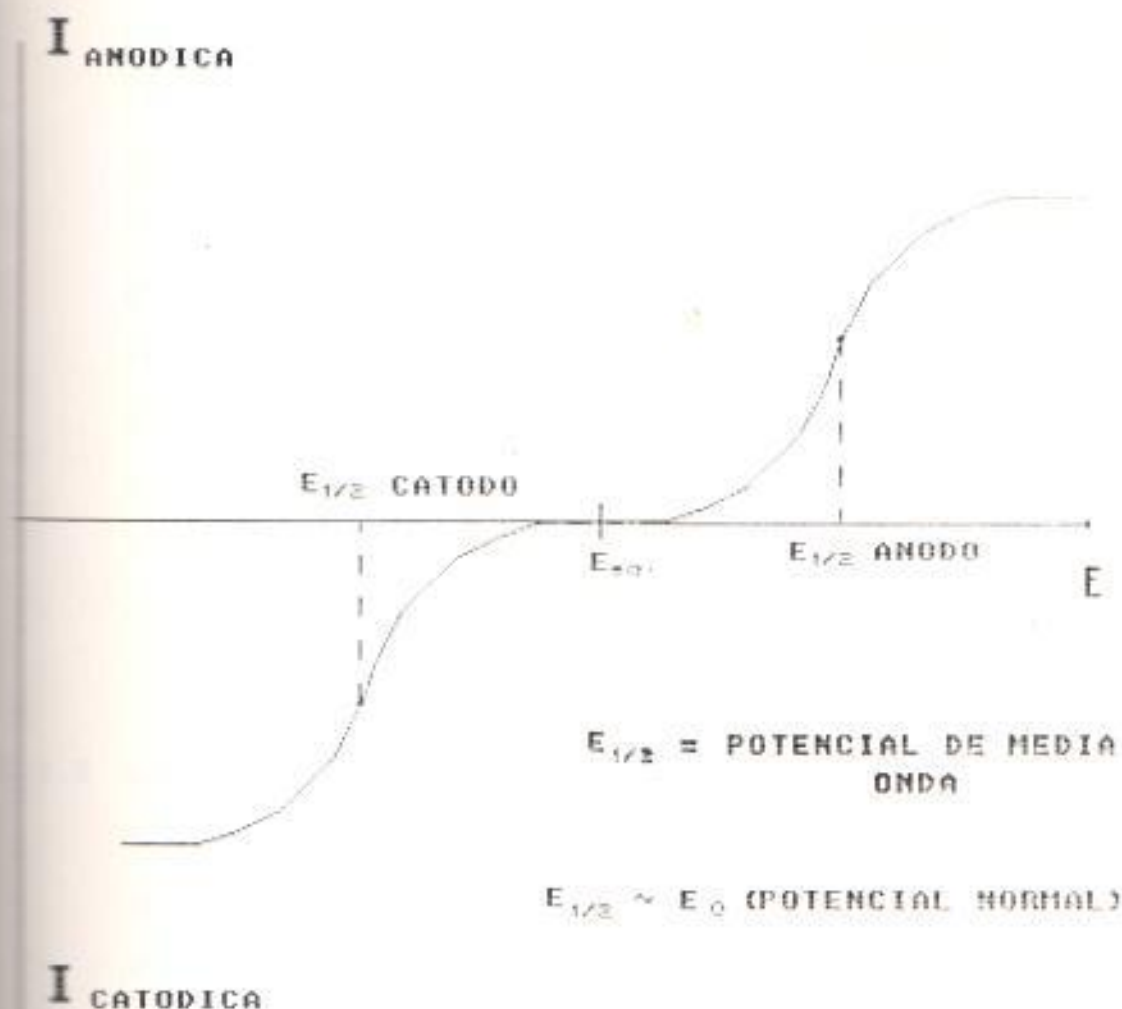


FIGURA # 9

Donde  $E_{1/2} =$  Potencial de media onda  
 y donde  $E_{1/2} \sim E_0$  (potencial normal)

### 2.3.1 FACTORES QUE AFECTAN A LA CURVA INTENSIDAD- POTENCIAL

Hay multiples factores que influyen tanto en la forma como en la posición de las curvas potencial-intensidad de un determinado sistema redox.

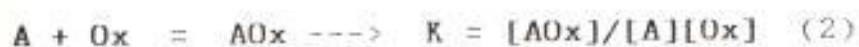
Entre los factores que afectan estas curvas esta la introducción de una sustancia capaz de reaccionar con algunas de las especies que forman parte del mismo. Esta es sin duda la cualidad más explotada desde el punto de vista analítico y la base de todas las valoraciones, aunque en ciertos casos puede ser una desventaja. Por el contrario, otros factores como la naturaleza del electrodo, del disolvente, la temperatura, y la fuerza iónica se intentan conservar constantes pues también afectan las curvas intensidad-potencial y podrían inducir a errores.

### 2.3.2 HAZ DE CURVAS INTENSIDAD-POTENCIAL EN LAS VALORACIONES

A un sistema redox  $Ox + ne^- = Re$  caracterizado en disolución por un potencial :

$$E = E_0 + RT/nF * \ln [Ox]/[Re] \quad (1)$$

se le añade lentamente una sustancia "A" que reacciona químicamente con la especie oxidada de manera rápida y total.



y suponiendo que "A" no sea electroactiva, aparece en disolución un nuevo sistema redox.



caracterizado por:



$$E = E_o' + RT/nF * \text{Ln} [AO_x]/[A][Re] \quad (4)$$

de donde por 1,2,3 y 4 se obtiene

$$E_o' = E_o + RT/nF * \text{Ln} 1/K$$

Que nos relaciona el potencial normal del sistema cuando esta presente la sustancia "A", y cuando no lo esta.

Las curvas intensidad-potencial en estas valoraciones tienen el aspecto de la figura subsiguiente.

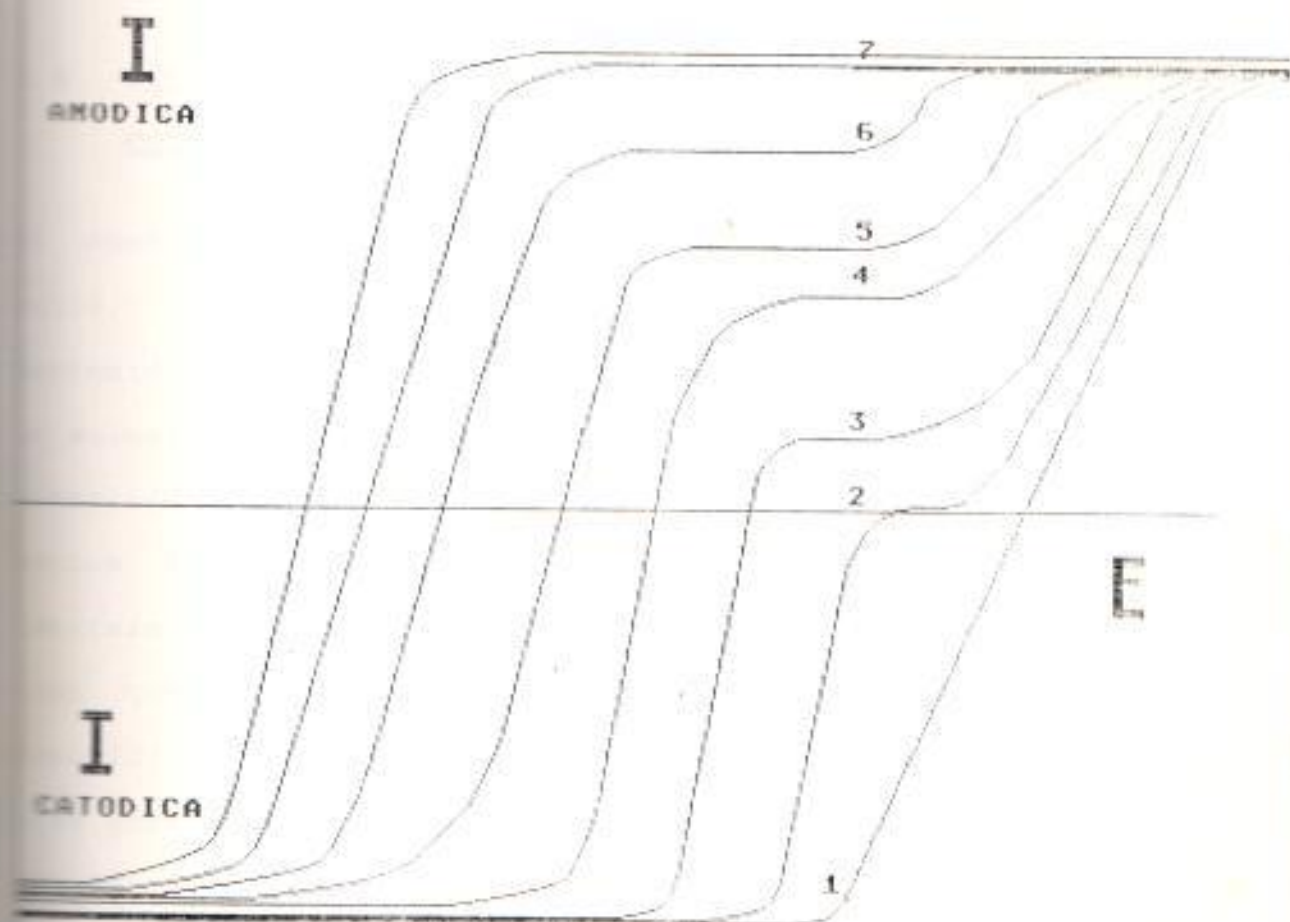


FIGURA # 10

La familia de curvas intensidad-potencial corresponde a distintos grados en la valorización de la especie "Ox" con "A".

La curva 1 de la figura representa la del sistema sin presencia de la especie "A".

La curva 4 corresponde a una disolución con una cantidad equivalente de "A" Y "Ox".

La curva 7 es cuando se ha duplicado la cantidad de la especie "A" con respecto a la especie "Ox".

#### 2.4 NECESIDAD DEL CONTROL DEL CONTENIDO DE ORO , PLATA, COBRE Y HIERRO EN LAS SOLUCIONES A ELECTROLIZARSE

El contenido inicial (previo) de "Au" es un dato indispensable, para el control del tiempo de deposición. Este contenido es dado por la concentración de oro existente en la solución encontrado en base a un análisis químicos o por adsorción atómica. La concentración de algunos otros elementos tales como plata (Ag), cobre (Cu), hierro (Fe) e impurezas son necesarios para encontrar el grado de influencias que tienen ellos sobre el voltaje reversible de deposición y su polarización, además de la marcada influencias sobre la corriente de la celda y su consumo de energía; además de generar cierta incertidumbre en cuanto al tiempo de finalización de la electrólisis.

En los siguientes párrafos se muestra la teoría que estudia la influencia de ciertos elementos extraños para la deposición de metales en una solución típica

#### 2.5 EFECTOS Y RANGOS PERMISIBLES DE VOLTAJE Y DENSIDAD DE CORRIENTE EN EL PROCESO ELECTROLITICO PARA LA ELECTRODEPOSICION DE ORO.

Para poder conocer los rangos y efectos de la corriente y del voltaje en una celda electrolítica debemos estudiar todas sus características.

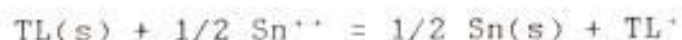
## 2.5.1 POTENCIAL APLICADO EN LA ELECTROLISIS

Para comprender lo que sucede en una pila de electro-deposición (bulk electrolysis) analizaremos la pila electroquímica de:



En la cual la reacción es espontánea (pila electroquímica) generada por sí sola, debido a que existe una diferencia natural de potencial entre sus electrodos tal que fluye electrones entre ellos al conectar un conductor entre ambos.

La reacción espontánea es :



Donde se genera un potencial de 0.155 voltios a 25°C, y donde los electrones fluyen del electrodo de talio "TL" de mayor potencial al de "Sn" de menor potencial. Para invertir la reacción y hacerla no espontánea se aplica un potencial externo a la celda de magnitud suficiente para sobrepasar la F.E.M (fuerza electromotriz) de la celda misma. Si este potencial aplicado es menor a 0.155 los electrones fluyen del electrodo de TL hacia el de Sn, y cuando se llega la potencial de 0.155 voltios hay un balance entre las fuerzas electromotrices sin flujo de corriente. Finalmente si este potencial es mayor de 0.155 los electrones



fluyen desde el electrodo Sn hacia el electrodo de TL. Como la corriente es opuesta la reacción también lo es y se convierte en no espontánea. De esta descripción resulta evidente que no toda la "F.E.M" aplicada es para producir corriente de paso en la celda, parte de ella en este caso 0.155 voltios se emplea para sobrepasar la F.E.M de la celda en sí. Si en general designamos "E" por el potencial aplicado y "E<sub>o</sub>" al potencial ejercido por la celda, el voltaje efectivo en el paso de corriente es de "E - E<sub>o</sub>". Con este voltaje neto la corriente que atraviesa la celda es:

$$I = ( E - E_o ) / R$$

En donde "E<sub>o</sub>" se conoce como fuerza contraelectromotriz, que bajo condiciones de reversibilidad (procesos espontáneos) no es otra cosa que la F.E.M de la celda. Sin embargo cuando hay polarización por el grado de irreversibilidad, "E<sub>o</sub>" es mayor que la F.E.M reversible y se necesita un potencial mayor para proporcionar una corriente, este es el caso de la electrodeposición

Ordinariamente las celdas utilizadas en la electrodeposición involucran un electrolito en el cual se sumergen un par de electrodos. Como estas celdas electrolíticas son irreversibles, no se puede hablar de F.E.M de la celda por no ser espontánea y se



podría creer que no existe F.C.E.M que se oponga la paso de la corriente, pero no es así ya que los productos de la electrólisis (al inicio todavía no es continua la electrólisis) convierten incluso a los electrodos inertes en activos produciéndose una fuerza contra electromotriz. Así tan pronto como se deposita oro u otro mineral en el electrodo este último se transforma en activo.

### 2.5.2 POTENCIAL DE DESCOMPOSICION

Como incluso los electrodos inertes se convierten en activos originando una f.c.e.m se hace necesario determinar el voltaje mínimo requerido para producir una electrólisis continua de un electrólito. Este voltaje mínimo llamado potencial de descomposición se determina mediante el siguiente esquema.

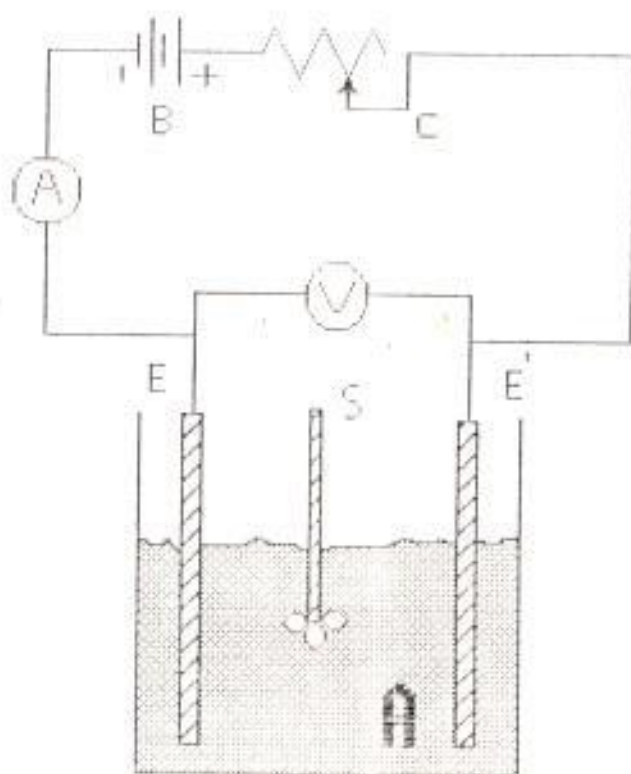


FIGURA # 11

En el diagrama, "A" es la celda electrolítica que contiene el electrolito objeto de estudio, los electrodos E y E' y el agitador "S". Conectados a estos electrodos se encuentra una resistencia variable y una fuente de poder para suministrar la energía necesaria a la celda, además se conecta un amperímetro para medir el paso de la corriente por el circuito, y un voltímetro para medir el voltaje variable aplicado en la electrólisis. Este voltímetro debe ser un instrumento de alta resistencia para que la lectura del amperímetro sea la real.

Para encontrar el voltaje de descomposición se toma

una serie de lecturas de intensidad versus voltaje, por encima y por debajo del potencial de descomposición.

Al inicio se coloca un pequeño valor de voltaje, luego de leer el amperímetro y el voltímetro se realiza otra lectura aumentando lentamente el voltaje y así sucesivamente. Las mediciones se efectúan hasta que pase una apreciable cantidad de corriente por el circuito, y la electrólisis se efectúa libremente.

Si graficamos lecturas de voltaje versus corriente obtenemos la gráfica:

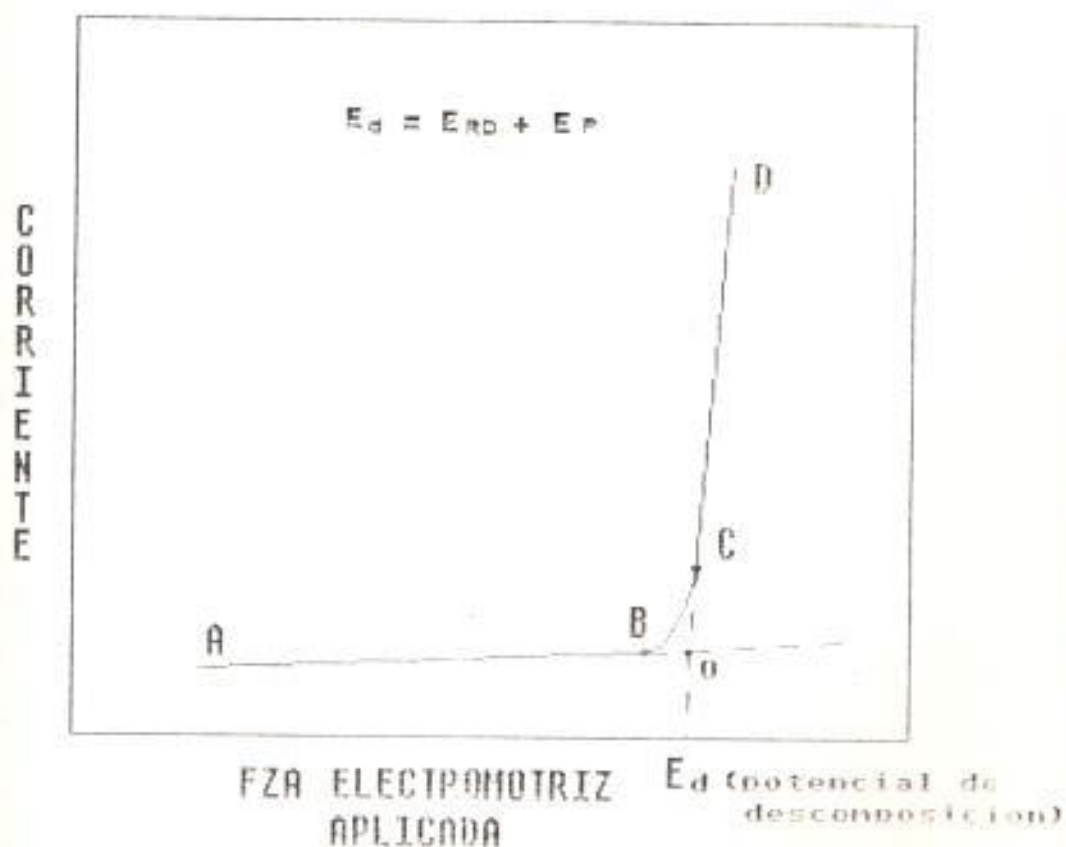


FIGURA # 12

A lo largo de la rama "AB" que queda debajo del potencial de descomposición la corriente que circula es pequeña. Pasando "B" sin embargo la curva asciende rápidamente y pronto se observa a la electrólisis en forma continua.

Como la curva "AB" queda debajo del potencial de descomposición y la curva "DC" por encima, el voltaje de descomposición se encuentra por la intersección de las dos curvas. En la práctica la intersección de las prolongaciones de "AB" y "CE" dan el punto "D" y el voltaje "E."

La aparición de corriente debajo del potencial de descomposición surge del hecho, que los productos de la electrólisis depositados sobre los electrodos tienden a difundirse lentamente en la solución. Para compensar esta pérdida debe pasar una pequeña corriente por la celda a fin de regenerar el material perdido .

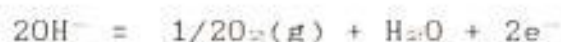
$$E_d = E_{rev} + E_p$$

El potencial de descomposición es la suma del potencial reversible de la celda, valor que se encuentra teóricamente, más el potencial de polarización que es un sobre potencial debido a las condiciones irreversibles de la misma.

### 2.5.3 CALCULOS TEORICOS DE LOS POTENCIALES REVERSIBLES DE LA CELDA EN ESTUDIO

El potencial reversible de descomposición de un electrólito es la suma de los potenciales (f.e.m) reversibles establecidos en los electrodos como productos de la electrólisis. En consecuencia tan pronto como se conoce los productos de la electrólisis, la concentración del electrólito, y la dirección de las reacciones electródicas tanto de oxidación como de reducción, se puede calcular el potencial de descomposición por procedimientos teóricos.

A fin de calcular los potenciales reversibles en los electrólitos en donde se desprenden oxígeno, que corresponde a nuestro caso en estudio según la reacción de la electrólisis de oro, se precisa conocer el valor de "E°" (potencial normal) del electrodo ión oxidrilo- oxígeno. Como el oxígeno es muy irreversible esta cantidad no se obtiene directamente de las mediciones de f.e.m, sino que debe calcularse de los datos de energía libre de otras fuentes.



Donde  $\Delta F^\circ = 18600$  calorías

$$\text{Y } \Delta F^\circ = -nFE^\circ$$



- $\Delta F$  = variación de energía libre
- $n$  = equivalente estequiométrico
- $W$  = trabajo realizado con la f.e.m

$E_{\text{oxi}} = -2(96500)E^{\circ}_{\text{oxi}}$  en donde se requieren 2 moles para realizar la reacción

$E_{\text{oxi}} = -0.403$  voltios

Potencial reversible del oxígeno

El oxígeno es el elemento que se oxida en el ánodo y su potencial es:

$$E_{\text{oxi}} = \frac{RT}{nF} \ln \frac{\text{(actividades de los productos)}}{\text{(actividades de los reactivos)}}$$

$$E_{\text{oxi}} = \frac{2.306RT}{nF} \log \frac{\text{(actividades de los productos)}}{\text{(actividades de los reactivos)}}$$

A 25°C  $\frac{2.306RT}{nF} \approx 0.059156$

$$E_{\text{oxi}} = \frac{0.059156}{n} \log \frac{\text{(actividades de los productos)}}{\text{(actividades de los reactivos)}}$$

Como los productos en este electrodo (ánodo) son agua y gas (oxígeno) sus actividades son la unidad, la ecuación de Nerst resultante queda:

$$E_{\text{oxi}} = E^{\circ}_{\text{oxi}} - \frac{0.059156}{n} \log \frac{1}{[\text{OH}]^{-2}}$$

donde  $[\text{OH}]^{-2}$  = A la concentración de iones "OH" en la

solución elevado a la "- 2"

Como el pH en la solución se trata de mantener alrededor de 10, tenemos que:

$$\text{pH} + \text{pOH} = 14$$

$$\text{pOH} = 14 - 10$$

$$\text{pOH} = 4$$

Por lo tanto la concentración de iones  $[\text{OH}]^- = 10^{-4}$  quedando la ecuación en :

$$E_{\text{oxi}} = E^{\circ}_{\text{oxi}} - \frac{0.059156}{2} \text{LOG} \frac{1}{[10^{-4}]^{-2}}$$

$$E_{\text{oxi}} = -0.403 - 0.059156*(4)$$

$$E_{\text{oxi}} = -0.403 - 0.236624$$

$$E_{\text{oxi}} = -0.639624 \sim -0.640$$

#### Potencial reversible del "Au"

El elemento que se reduce en el cátodo es el oro y lo hace siguiendo la reacción siguiente:



Esta ecuación se origina de reacciones más complejas constituidas por el cianato doble de oro que se disuelve así:





donde  $n = 1$  (equivalente estequiométrico)

El potencial reversible del cátodo se calcula:

$$E_{\text{cátodo}} = E^{\circ}_{\text{Au}^+/\text{Au}} - \frac{0.059156}{n} \text{ LOG} \frac{(\text{actividades de los productos})}{(\text{actividades de los reactivos})}$$

Como el producto de la reacción es oro precipitado su actividad es 1 entonces:

$$E_{\text{cátodo}} = E^{\circ}_{\text{Au}^+/\text{Au}} - \frac{0.059156}{n} \text{ LOG} \frac{1}{[\text{a}_{\text{Au}^+}]}$$

La actividad de la especie reducida (producto) es unitaria cuando hay más de una capa de depósito sobre un electrodo inerte o sobre un electrodo hecho del mismo elemento que se deposita. La actividad del reactivo se la puede descomponer como el resultado de dos factores, los cuales son:

$$[\text{a}_{\text{Au}^+}] = \gamma_{\text{Au}^+} * C_{\text{Au}^+}$$

donde :

$\gamma_{\text{Au}^+}$  = coeficiente de actividad del ión  $[\text{Au}]^+$

$C_{\text{Au}^+}$  = concentración del ión  $[\text{Au}]^+$

Resultando la ecuación de Nerst de la siguiente manera.

$$E_{\text{cátodo}} = E^{\circ}_{\text{Au}^+/\text{Au}} + \frac{0.059156}{n} \text{ LOG}[\gamma_{\text{Au}^+} * C_{\text{Au}^+}]$$

Si consideramos a "C<sub>i</sub>" como la concentración inicial del ión [Au]<sup>+</sup>, y a "X" como la parte de esta concentración que se ha convertido en "Au(s)" después de un tiempo "t", entonces "(1-X)" es parte de la concentración inicial de iones [Au]<sup>+</sup> que aún no se han depositado. Si reemplazamos estos datos en la ecuación anterior tendremos:

$$E_{Au} = E^{\circ}_{Au} + \frac{0.059156}{n} \text{ LOG}[Y_{Au} * C_i(1-x)]$$

El coeficiente  $Y_{Au} \sim Y_{Au} = 1$ , cuando hay cierta cantidad de oro depositado en el cátodo, entonces:

$$E_{Au} = E^{\circ}_{Au} + \frac{0.059156}{n} \text{ LOG}[C_i * (1-X)]$$

Al inicio de toda electrólisis "X" = 0, ya que aún no hay depósito existente, convirtiéndose la ecuación de Nernst en:

$$E_{Au} = E^{\circ}_{Au} + \frac{0.059156}{n} \text{ LOG}[C_i]$$

De esta ecuación podemos darnos cuenta que el potencial del electrodo (cátodo) depende de la concentración de oro existente en la solución en cualquier instante de tiempo, y del potencial normal del electrodo ( $E^{\circ}_{Au}$ ) que es a su vez dependiente del material que es construido el electrodo, y de las características del electrolito.

Si consideramos una solución con una concentración inicial "C<sub>1</sub>" de 100mg[Au]<sup>+</sup>/lts, lo que equivale a 0.000100 mol/lts y que en moles resulta:

$$\frac{100 \text{ gr Au}^+}{1 \text{ lts}} \times \frac{1 \text{ mol Au}^+}{196.97 \text{ gr Au}^+} = 5.0769 \times 10^{-4} \text{ mol Au}^+/\text{lts}$$

es decir C<sub>1</sub> = 5.0769 × 10<sup>-4</sup> mol Au<sup>+</sup>/lts

emplazando este valor en la ecuación de Nerst tenemos:

$$E_{\text{Au}} = E^{\circ}_{\text{Au}} + \frac{0.059156}{1} \text{ LOG}(5.0769 \times 10^{-4})$$

donde n = 1

Resultando que la ecuación de voltaje en el cátodo para la concentración inicial dada anteriormente, y en el instante inicial es:

$$E_{\text{Au}} = E^{\circ}_{\text{Au}} - 0.1948$$

Como el potencial normal del electrodo de oro (cátodo) debe ser negativo se concluye que el potencial reversible de dicho electrodo lo es aún más, y que la medida que se va depositando oro en el electrodo y perdiendo la concentración de iones [Au]<sup>+</sup> libres en la solución dicho potencial aumenta más su negatividad, si lo medimos frente a un electrodo de referencia.



## \* POTENCIAL REVERSIBLE DE LA CELDA

El potencial reversible de una celda es la suma del potencial reversible de cada electrodo, en este caso el potencial reversible del ánodo más el del cátodo.

$$E_{\text{celda}} = E_{\text{an}} + E_{\text{ca}}$$

$$E_{\text{celda}} = -0.639 + (E^{\circ}_{\text{ca}} - 0.1948)$$

$$E_{\text{celda}} = -0.8338 + E^{\circ}_{\text{ca}}$$

## 2.5.4 POLARIZACION : TIPOS DE POLARIZACION

Cuando se alimenta una celda electrolítica con una fuente de poder se necesita que este voltaje sea superior al voltaje opuesto por los electrodos al convertirse en activos que se conoce como voltaje reversible de la celda, más el voltaje conocido como de polarización que se generan por varias razones que a continuación las detallaremos. En consecuencia el voltaje total aplicado debe ser igual a:

$$E_{\text{a}} = E_{\text{celda}} + E_{\text{p}} + IR$$

Donde:

$E_{\text{a}}$  = Voltaje aplicado a la celda para una electrólisis Libre

$E_{\text{celda}}$  = Voltaje reversible de la celda o ( potencial electródicos teóricos)

$E_{\text{p}}$  = Voltaje de polarización

$\eta$  = Caída de voltaje debido a cierta resistividad de la solución

### TIPOS DE POLARIZACION

Es necesario destacar que cualquier polarización observada es de dos tipos:

De concentración (por el electrolito)

De sobrevoltaje (por la naturaleza del electrodo)

$$E_p = P_c + P_{ov}$$

El primer tipo de polarización surge por los cambios de concentración alrededor de los electrodos durante la electrólisis. Esta polarización se la puede reducir mucho, y casi eliminarla con una buena agitación de la solución durante la electrólisis.

Por otra parte la polarización por sobrevoltaje queda determinada por algún proceso irreversible que se lleva a cabo en el electrodo, y es un fenómeno intrínsecamente ligado con la naturaleza del electrodo y de los procesos que tienen lugar en su superficie. Bajo estas condiciones la polarización total es la suma de ambas. La polarización (sobrevoltaje) tanto en el cátodo como en el ánodo son funciones de las siguientes variables:

De la naturaleza y estado físico del metal empleado en los electrodos.

del estado físico de la sustancia depositada. Si es un metal el sobrevoltaje generalmente es pequeño; sin embargo si es un gas como oxígeno o hidrógeno, el sobrevoltaje es relativamente alto.

de la densidad de corriente empleada. Para densidades de hasta  $0.01 \text{ A/Cm}^2$  el sobrevoltaje aumenta muy rápidamente con la densidad de corriente, por encima de este valor aumenta pero más lentamente.

Como regla general el sobrevoltaje para los metales es muy pequeño. Al oxígeno le corresponde un sobrevoltaje de  $0,45\text{V}$  en una solución ácida y de aproximadamente de  $1.0 \text{ Voltio}$  en una solución alcalina con electrodos de platino.

Usualmente el sobrevoltaje de los metales aumenta cuando estos se depositan a partir de soluciones en las cuales el metal existe en forma compleja, como es el caso de el oro en una solución de cianuro.

El potencial de descomposición de una solución tipo de oro se lo encuentra como se lo indica en la Fig. 1. Dicha curva se obtuvo experimentalmente con una celda electrolítica con un  $\text{pH} \sim 10$ , con una temperatura ambiente aproximadamente de  $30^\circ\text{C}$ , y sin agitación.

El potencial encontrado entre varias pruebas, (varias muestras de solución a una misma concentración) resultó encontrarse los valores siguientes

$$E_0 = 2.10 \sim 2.20 \text{ Voltios}$$

estas pruebas se muestran las curvas de descomposición  
en las figuras subsiguientes.

Así con estas características, como la celda con  
de cisuro de oro (bulk electrólisis) no tiene una  
electromotriz (potencial reversible) que se oponga al  
la corriente y se supone que todo el voltaje  
un paso de corriente, pero no es así ya que al  
a circular una pequeñísima corriente continua se  
una fuerza contra electromotriz que impide el paso de  
esperada, hasta que se alcance un voltaje  
eficiente para una electrólisis continua, a este  
necesario se lo conoce como voltaje de descomposi-

esto se deduce que:

$$E - E_0 = IR$$

Potencial aplicado

Fuerza contra electromotriz

Resistencia de la solución

El  $E_0$  se genera solo en pilas electrolíticas (procesos  
reversibles) y no en pilas electroquímicas en donde el  
mismas lo generan.

que  $E_0$  es la suma del potencial reversible de  
de la celda (que es el potencial que adquiere



como si se comportara como una pila electroquímica)  
El potencial de polarización, esto es:

$$E_p = E_{caída} + E_p$$

El voltaje aplicado necesario debe ser igual a :

$$E = E_{caída} + E_p + IR$$

El "E + IR" es el sobre voltaje total de la celda.

Se considera el inicio de la electrólisis cuando la  
caída es prácticamente nula y comienza las primeras  
reacciones de material en el cátodo, el potencial electró-  
químico del cátodo como el del ánodo afloran al conver-  
tirse dichos electrodos en activos produciéndose una fuerza  
electromotriz, de igual manera que la polarización por  
causas irreversibles y por variaciones en la concentración  
de los electrodos. Por tanto la caída de voltaje  
puede ser considerada nula, y el voltaje aplicado debe  
responder a:

$$E - E_p = 0$$

$$E = E_{caída} + E_p$$

Las gráficas obtenidas experimentalmente del voltaje de  
composición de una solución tipo se encuentra que el  
valor mínimo de dicha fuerza contra electromotriz oscila  
entre los valores de "1.5 - 1.7" voltios, pasado de este  
valor de voltaje la corriente de la celda comienza a  
aumentar, y por ende a convertirse en considerable.  
Como el valor de 1.6 voltios como valor promedio tenemos



que:

$$E_{descom} + E_D = 1.6 \text{ voltios}$$

y donde:

$$E_{descom} = E_{EC} + E_{PA} \text{ (Potenciales electródicos).}$$

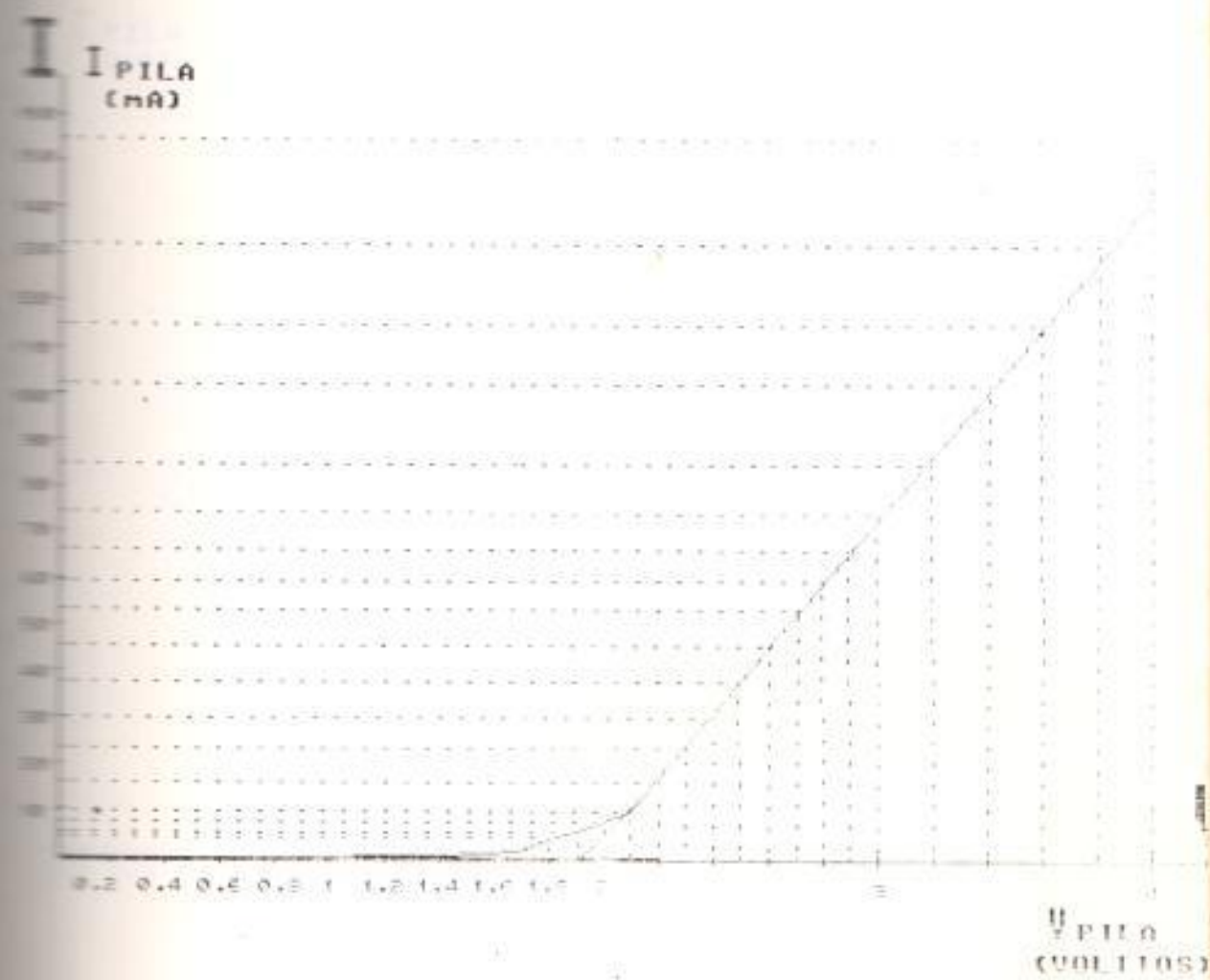
$$E_D = E_{PC} + E_{PA} \text{ (potenciales de polarización de cada electrodo)}$$

Por consiguiente reemplazando tenemos que:

$$(E_{EC} + E_{PA}) + (E_{PC} + E_{PA}) = 1.6$$

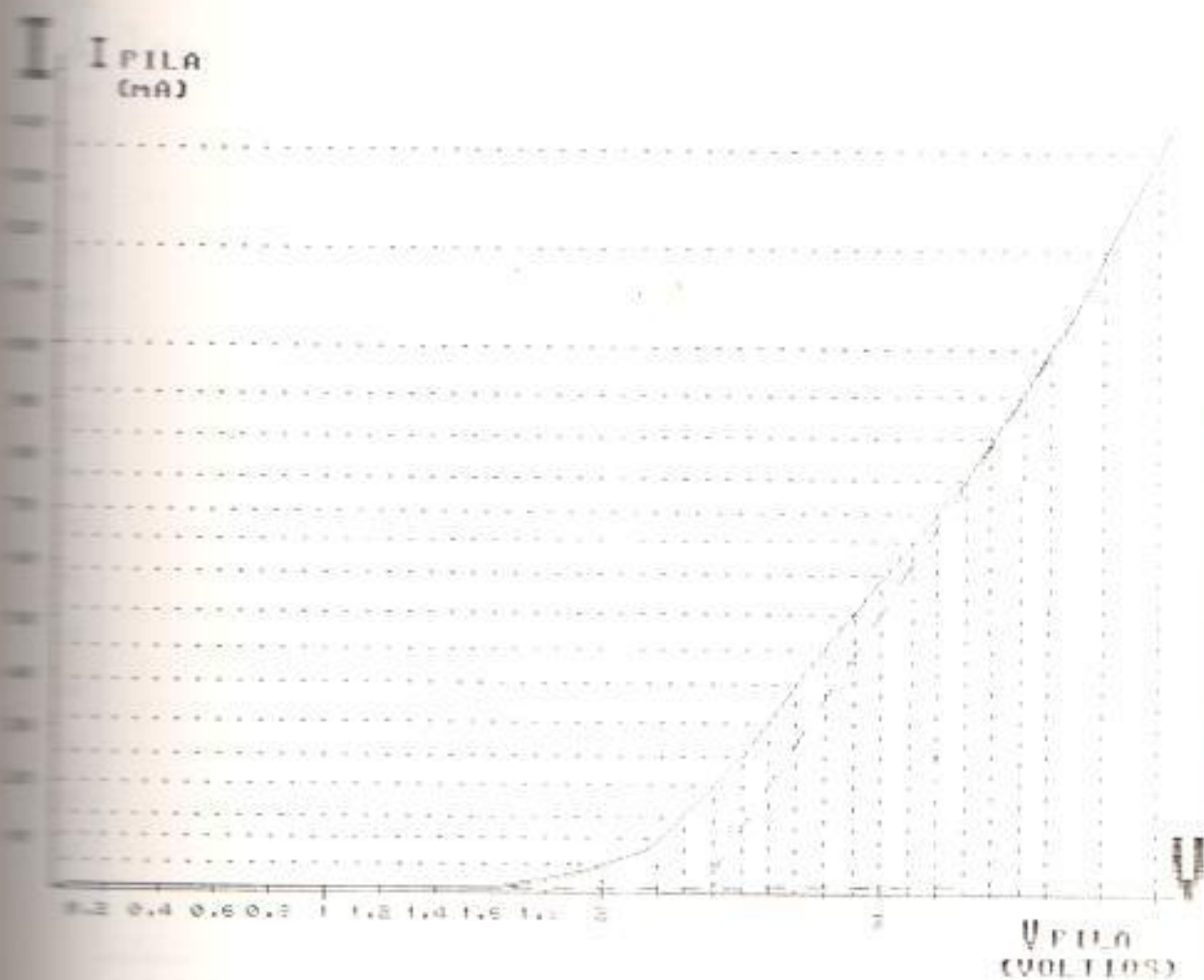
Una vez alcanzado el voltaje de descomposición que origina una electrólisis libre, la caída de voltaje debido a la resistencia de la celda es mucho menor, pues la corriente crece vertiginosamente a medida que aumentamos el voltaje aplicado a la celda. El aumento del voltaje muy arriba del voltaje de descomposición no es recomendable por cuanto hay mucha pérdida de energía, y se comienza a liberar mucho oxígeno en el ánodo y a desprender hidrógeno en el cátodo que podrían dificultar la deposición normal del oro según nuestro experimento. Con respecto a la densidad de corriente, esta varía de acuerdo a la concentración de iones presente en solución sean estos iones de: oro, plata, cobre, hierro etc.

## 2.5 CURVAS EXPERIMENTALES DE SOLUCIONES DE ORO EN ELECTRODEPOSICION



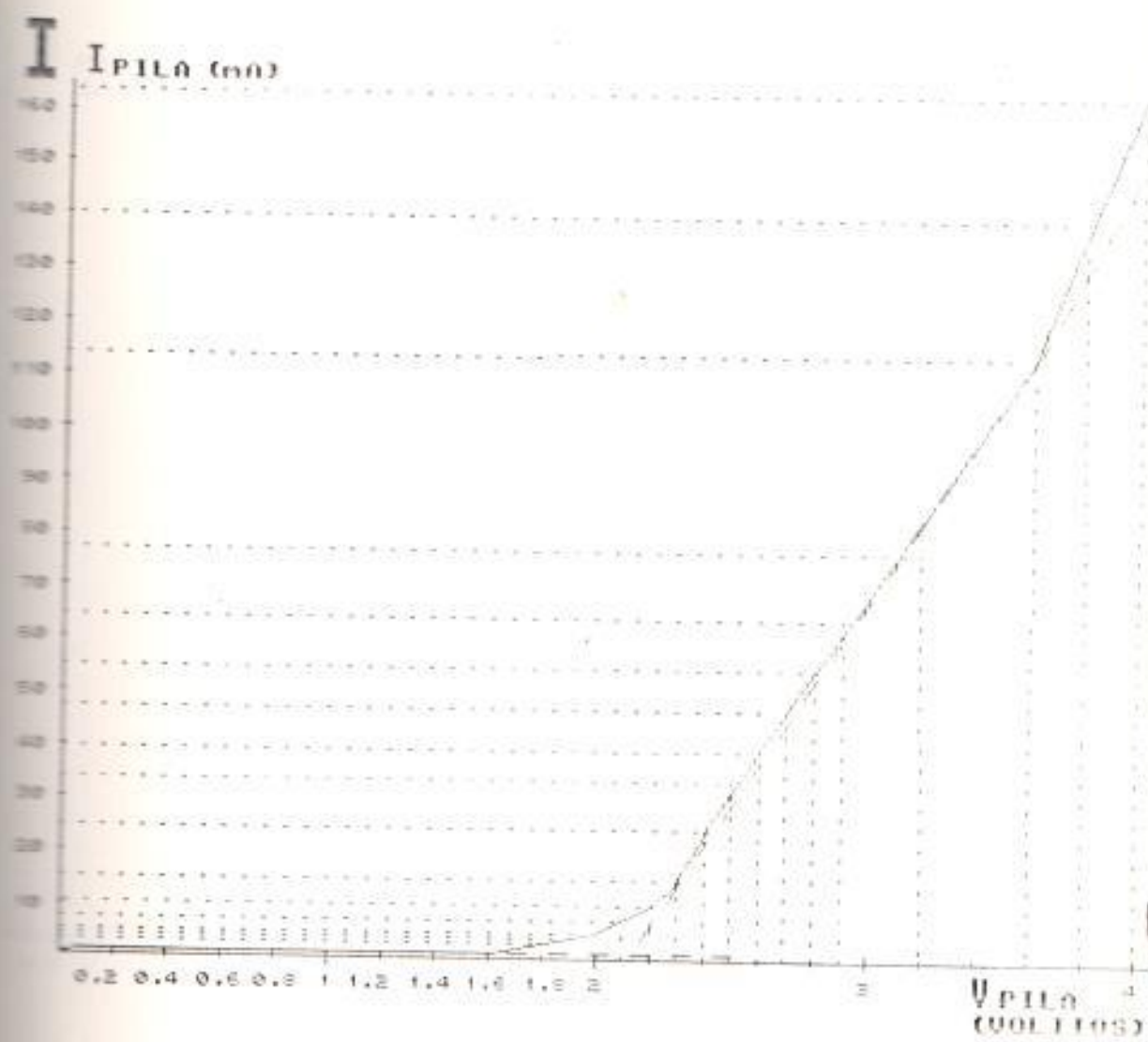
CURVA 1

FIGURA # 13



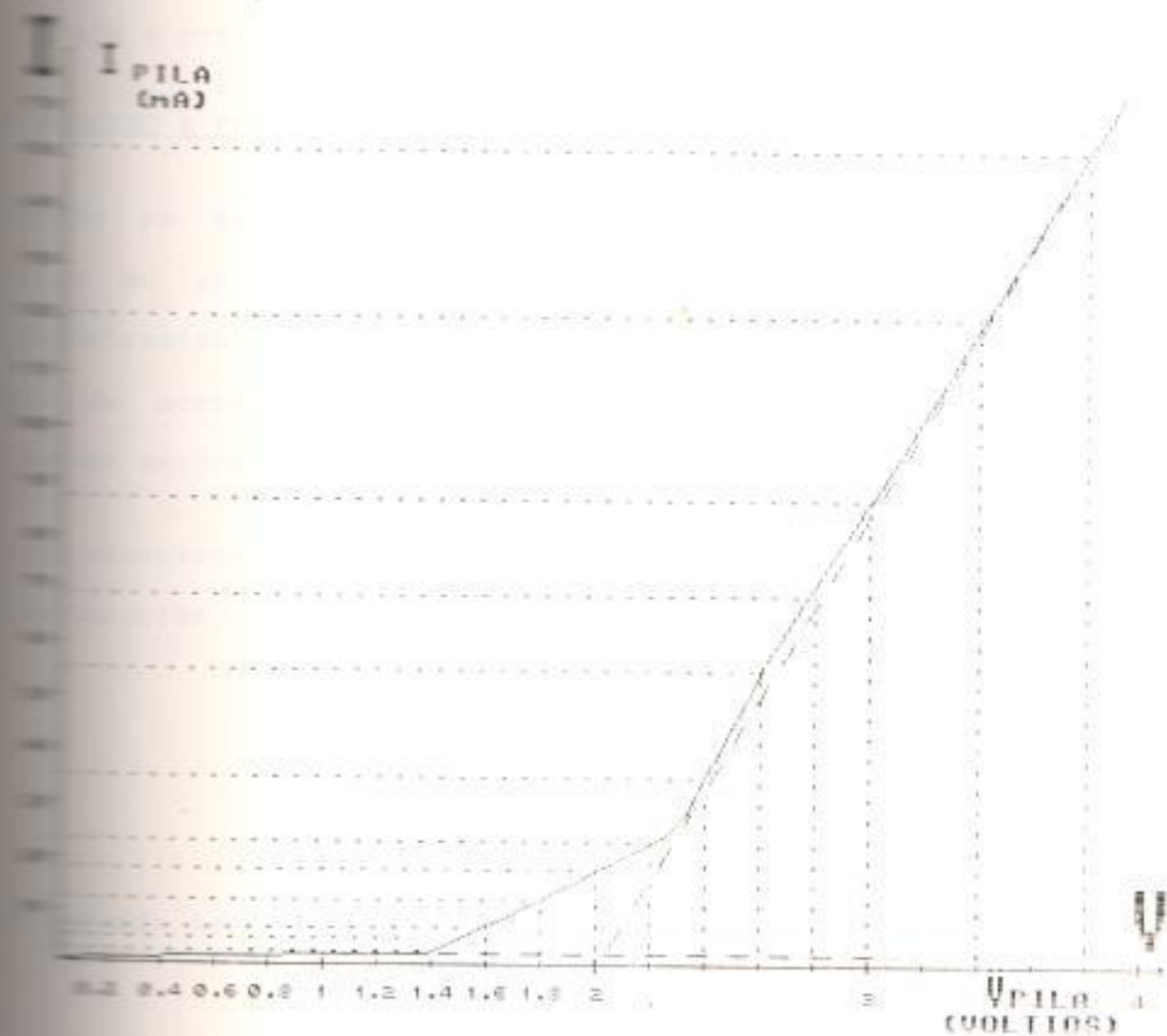
CURVA 2

FIGURA # 14



CURVA 3

FIGURA # 15



CURVA 4

FIGURA # 16

MÉTODOS UTILIZADOS EN LA ELECTRODEPOSICIÓN DE METALES: MÉTODO A POTENCIAL CONSTANTE

Existen 2 métodos:

1) Proceso a intensidad de corriente constante

2) Proceso a potencial constante.

El proceso recomendado para la bulk electrólisis es el que



trabaja a potencial constante.

### PROCESO A POTENCIAL CONSTANTE

Cuando se mantiene constante el potencial catódico en un valor en el que se pueda efectuar la deposición, la concentración será una variable del tiempo. Como la intensidad de corriente es una función de la concentración está también será una función del tiempo.

Las ecuaciones que describen esta variación se muestran a continuación.

$$\frac{dc}{dt} = - Kc$$

$$\frac{dI}{dt} = - kI$$

Integrando tenemos:

$$\ln \left( \frac{C_t}{C_0} \right) = - Kt$$

$$\ln \left( \frac{I_t}{I_0} \right) = - k \cdot t$$

Cuando estas ecuaciones a base 10 tenemos:

$$C_t = C_0 \cdot 10^{-Kt/2.303}$$

$$I_t = I_0 \cdot 10^{-kt/2.303}$$

$C_t$  = Concentración de "A." en la solución en un tiempo "t"

$C_0$  = Concentración inicial de "A." en la solución

$t$  = Tiempo en segundos

$i_t$  = Intensidad de corriente en la electrólisis en un tiempo "t"

$i_0$  = Intensidad de corriente inicial

$$i_0 = 0.434 \frac{D \cdot A}{V \cdot d}$$

simbolos :

$D$  = Velocidad de difusión del ión hacia la superficie del electrodo en  $\text{Cm}^2/\text{seg}$ . En general este valor es del orden de  $10^{-5} \text{Cm}^2/\text{seg}$ .

$d$  = Espesor de la capa de difusión en "Cm". En general este valor oscila alrededor de  $10^{-2} \text{Cm}$  para soluciones sin agitar, y disminuye a  $10^{-3} \text{Cm}$  para soluciones agitadas.

$u$  = Constante de transporte de masas o movilidad =  $D/d$

$A$  = Area del electrodo en  $\text{Cm}^2$

$V$  = Volumen de la solución de "A." (electrolito) en ml.

$2.303$  = Constante para pasar de "Ln" a "LOG"

### CAPITULO # 3

#### DETERMINACION DEL VOLTAJE DE LA CELDA ELECTROLITICA PARA LA ELECTRODEPOSICION DE ORO

El voltaje catódico necesario, se determina mediante el voltaje de descomposición, ya que solo con este voltaje se logra una electrólisis continua. La lectura del voltaje necesario se logra frente a un electrodo de referencia de calomel cuando se mantiene fijo el voltaje aplicado a la celda a un valor igual al voltaje de descomposición ; con la aplicación de este voltaje catódico necesario para el electrodo electroanalítico, se procurará mantener dicho voltaje constante con una sistema de realimentación elec-

trónica. En nuestra experiencia de laboratorio, se obtuvo dicho voltaje necesario, pero en nuestro caso se lo hizo manteniendo constante el voltaje aplicado a la celda ya que no contábamos con la circuitería de realimentación necesaria. De estos resultados encontrados podemos obtener un promedio, el cual se usará en la continuación.

$$V_{REF} = 2.15 \text{ V} \rightarrow V_{REF} = \frac{1 + 0.990 + 1.1 + 1.1}{4} = 1.04$$

$$V_{REF} - V_{C} = 1.04 \text{ Voltios}$$

El voltaje del electrodo de referencia de calomel  $V_{C} = 0.3338$  tenemos que:

$$V_c = - 0.7162 \text{ Voltios}$$

El voltaje catódico encontrado debe mantenerse constante durante el proceso de electrodeposición, una vez fijado el voltaje se procede a encontrar el tiempo de finalización de la electrodeposición, siempre que sean conocidos los datos físicos tanto de los electrodos como de la solución.

Como la solución ha estado todo ese tiempo en reposo se supone que la solución es casi estacionaria que no existe oro en ella.

Como el voltaje catódico encontrado experimentalmente también se halló el voltaje anódico a pesar de no ser necesario en el estudio de esta celda. El valor de este voltaje sirve para tratar de encontrar el valor de  $E_0$  como se hizo con anterioridad, además de ser un valor de referencia y control.

Como promedio de cuatro gráficas obtenidas experimentalmente tenemos que:

$$\text{Por lo tanto tenemos } \rightarrow V_{A-REF} = \frac{1.1 + 1.15 + 1.03 + 1.02}{4}$$

$$V_{A-REF} = 1.07 \text{ Voltios}$$

$$V_A - V_{REF} = 1.07 \text{ V}$$

$$V_A = 1.07 + 0.3338$$

$$V_A = 1.4038 \text{ Voltios}$$

El voltaje anódico aplicado a la celda por una fuente de energía exterior para obtener una electrólisis reversible. El voltaje reversible generado por la celda se mide con anterioridad y tiene un valor de  $E_{rO} = -0.640$ , el valor negativo indica que es un voltaje de oposición a la circulación de corriente, que se genera por procesos irreversibles en la celda, y por características de los reactivos que tienen que ver con la solución y con los electrodos utilizados.

El voltaje reversible ANODICO de la celda depende del "PH" de la solución, y si dicho "PH" se mantiene constante durante todo el proceso electrolítico, el voltaje anódico no sufre una variación muy apreciable exceptuando que exista una variación en la temperatura ambiental considerable. Por lo tanto podemos concluir que la diferencia existente entre el voltaje aplicado al ánodo y su voltaje reversible se debe a la polarización del ánodo, y a la caída de voltaje por resistencia de la solución en la superficie interelectrodo ánodo-solución.

$$V_a - E_{rO} = E_{rO} + IR$$

$$E_{rO} + IR = 1.4038 - 0.639$$

$$E_{rO} + IR = 0.7648$$

En consecuencia del voltaje ANODICO reversible, el voltaje reversible CATODICO sufre variación durante todo el proceso electrolítico ya que el depende de la concentración de oro



El voltaje anódico aplicado a la celda por una fuente de energía exterior para obtener una electrólisis reversible. El voltaje reversible generado por la celda se mide con anterioridad y tiene un valor de  $E_{\text{rev}} = -0.640$ , el valor negativo indica que es un voltaje de polarización a la circulación de corriente, que se genera por procesos irreversibles en la celda, y por características de los reactivos que tienen que ver con la solución y con los electrodos utilizados.

El voltaje reversible ANODICO de la celda depende del "PH" de la solución, y si dicho "PH" se mantiene constante durante el proceso electrolítico, el voltaje anódico no sufre una variación muy apreciable exceptuando que exista una variación en la temperatura ambiental considerable. Por lo tanto podemos concluir que la diferencia existente entre el voltaje aplicado al ánodo y su voltaje reversible se debe a la polarización del ánodo, y a la caída de voltaje por resistencia de la solución en la superficie interelectrodo ánodo-solución.

$$V_a - E_{\text{rev}} = E_{\text{ca}} + IR$$

$$E_{\text{ca}} + IR = 1.4038 - 0.639$$

$$E_{\text{ca}} + IR = 0.7648$$

Por lo tanto del voltaje ANODICO reversible, el voltaje CÁTODICO sufre variación durante todo el proceso electrolítico ya que el depende de la concentración de oro

concentración, y esta concentración varía a medida que se deposita el oro en el cátodo. El voltaje aplicado al cátodo por una fuente de energía exterior debe ser suficiente para superar dicho voltaje reversible, a más del voltaje de activación y de la caída de voltaje en toda la celda.

Voltaje reversible catódico al inicio de la electrólisis en una concentración inicial de 100ppm de oro tiene el

$$E_{c-INIT} = E_{oc} - \frac{0.059156}{1} \log \left( \frac{1}{Y_o C_i} \right)$$

$$E_{c-INIT} = E_{oc} + \frac{0.059156}{1} \log \left( \frac{Y_o C_i}{1} \right)$$

$$E_{c-INIT} = E_{oc} + \frac{0.059156}{1} \log (5.0769 * 10^{-4})$$

$$E_{c-INIT} = E_{oc} - 0.1948$$

Se considera que casi todo el oro está depositado es decir  $X = 0.99\%$ , donde "X" es la fracción de oro depositado en el cátodo, el voltaje reversible del CATODO tendrá el valor de:

$$E_{c-INIT} = E_{oc} - \frac{0.059156}{1} \log \left( \frac{1}{Y_o C_i (1-X)} \right)$$

$$E_{c-INIT} = E_{oc} + \frac{0.059156}{1} \log (C_i (1-X))$$

$$E_{c-INIT} = E_{oc} + \frac{0.059156}{1} \log (5.0769 * 10^{-4} (1-0.99))$$

## CIRCUITO TRANSDUCTOR SENSOR DE VOLTAJE

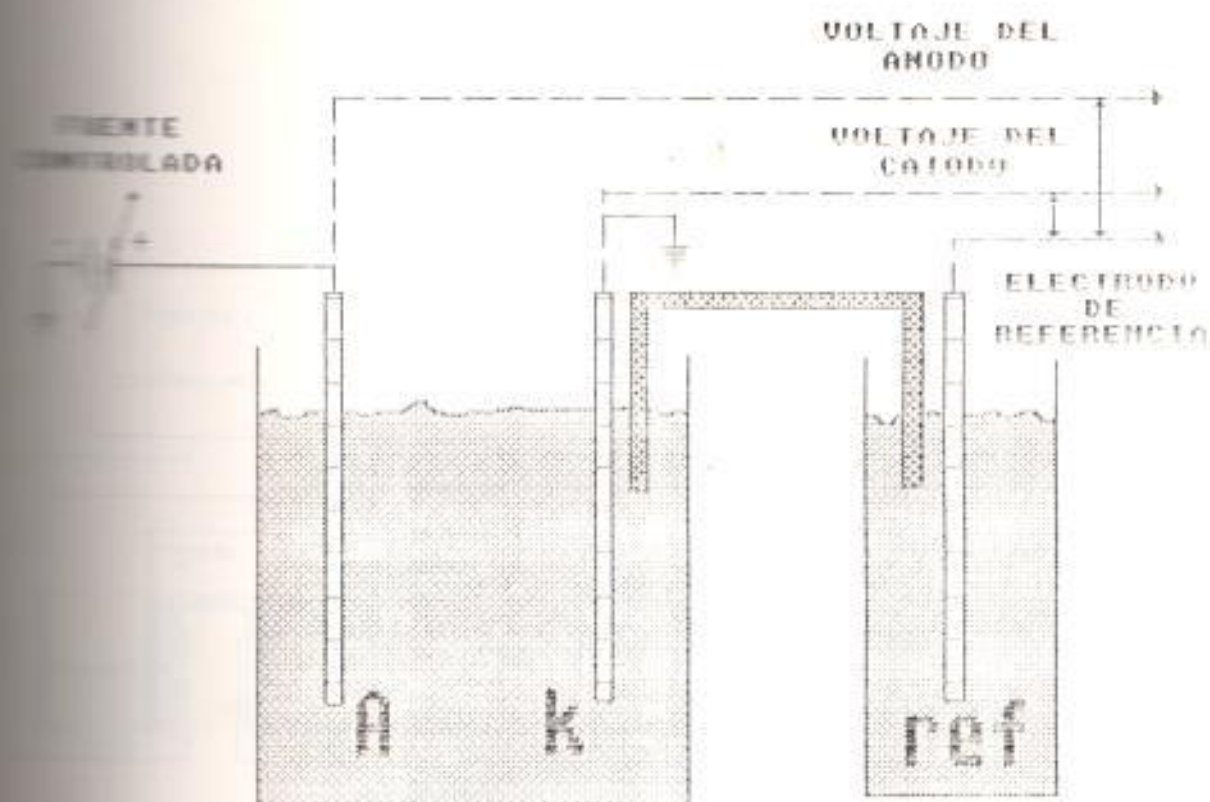


FIGURA # 17

Este circuito sensor consta de la celda electrolítica en cuestión, más una semipila formada entre cada electrodo anodo y cátodo frente al electrodo de referencia de calomel saturado. Esta semipila es la encargada de medir el voltaje de cada electrodo frente al de referencia, la unión entre la pila electrolítica y esta semipila se la realiza mediante un puente salino que puede ser de cloruro de sodio (clNa) o cloruro de potasio (clK).

2.1.2 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CIRCUITO ELECTRONICO SENSOR DE VOLTAJE

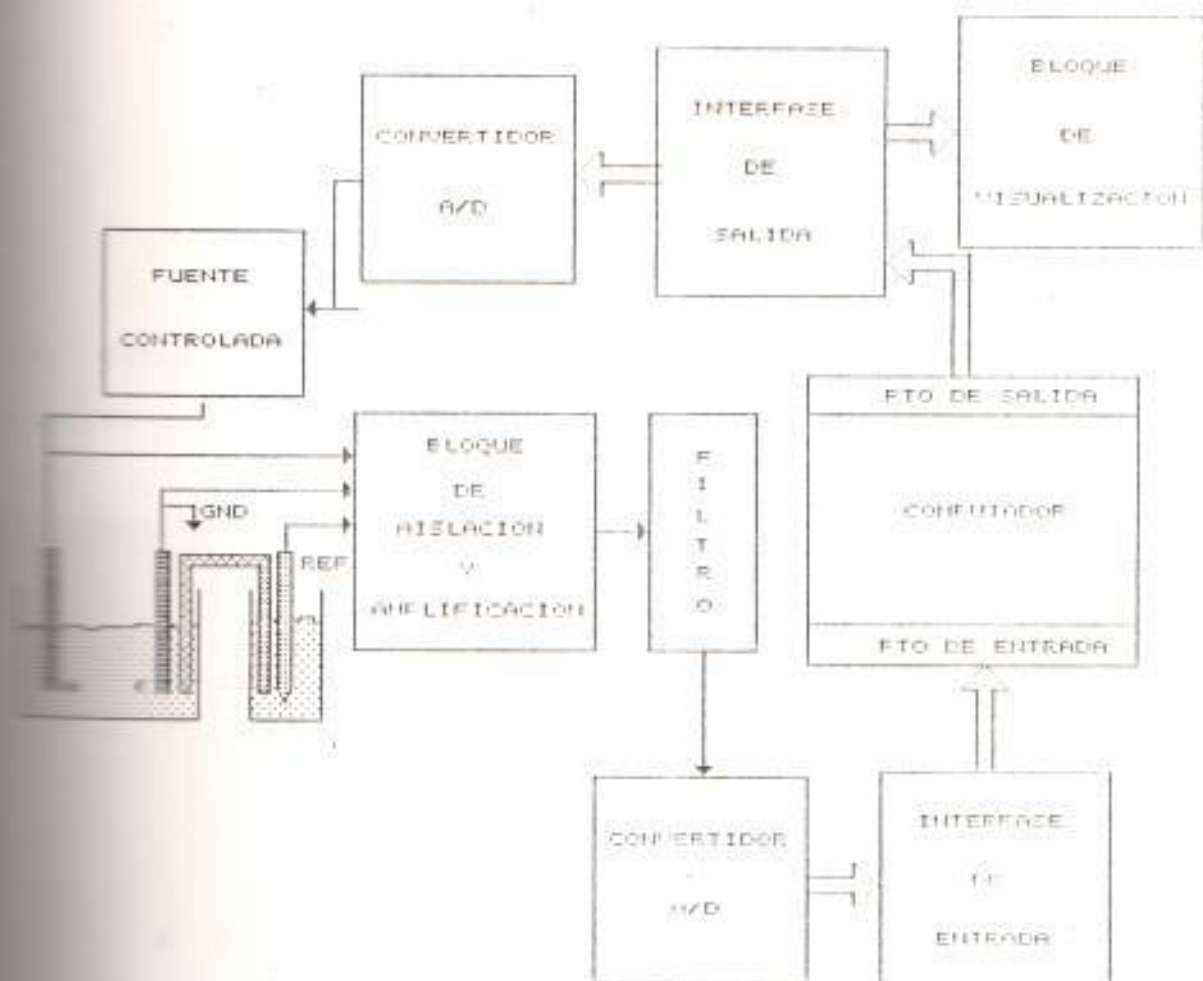


FIGURA # 18

Este sistema sensor consta de 2 grandes divisiones:

Circuitos analógicos

Circuitos digitales

Centro de los circuitos  
analógicos  
constan

\*Bloque de aislación  
y amplificación

\*Bloque de filtrado

\*Bloque control de  
de fuente

El circuito analógico se extiende desde el circuito trans-  
ductor de voltaje hasta las entradas del convertidor

Centro de los circuitos digitales  
constan

\* Interfaces E/S

\* computador

\* Bloque de visua-  
lización

A continuación procedemos a describir cada bloque  
presentado en los párrafos anteriores.

**El elemento transductor:** Es aquella parte del cir-  
cuito analógico que se encarga de sensar el voltaje  
del electrodo cátodo para luego ser dirigido al  
circuito de aislación y amplificación. Este circuito  
transductor es una semipila formada por el cátodo y  
el electrodo de referencia.

**Bloque de aislación y amplificación:** Este bloque basa



El funcionamiento de aislación en la alta impedancia de entrada que presentan la configuración de sus amplificadores, para evitar la filtración de ruidos, y las salidas de modo común. Este bloque además debe presentar una relativa baja impedancia de salida.

Este sistema se construirá con amplificadores de alta impedancia en configuración de instrumentación. Esta etapa se puede hacer necesaria por cuanto la señal proveniente del transductor en este caso del electrodo puede ser pequeña en voltaje o en corriente y además propensa al ruido, aunque en nuestro estudio esta señal de voltaje era del orden de las décimas de voltios.

**Bloque de filtrado:** Esta etapa es parte del sistema de acondicionamiento de señal, y es usado para asegurar aún más la señal proveniente del transductor y del bloque de aislación, de esta manera contrarrestar definitivamente cualquier tipo de ruido ya sea de alta frecuencia o de línea.

**Bloque control de fuente:** Es una etapa analógica de salida que puede ser de potencia de acuerdo a las características de la fuente de poder que controla la celda, y a la celda en sí.

Este circuito es controlado desde el computador de

acuerdo a las lecturas tomadas por el voltaje del estado (voltaje controlado) y su variación.

#### \* BLQUES DIGITALES:

**Convertidor A/D:** Como su nombre lo indica este bloque se encarga de tomar la señal analógica previamente tomada por los circuitos anteriores, y la convierte en digital (palabra de 8 bits). Para que esta conversión sea la más adecuada la señal debe ser acondicionada con un adecuado CMRR (relación de rechazo de modo común).

**Interface:** Este bloque como su nombre lo indica, sirve para realizar un puente de comunicación entre los datos recogidos por el convertidor A/D e introducirlos en el computador. Esta interface varía de acuerdo al computador que se utilice para controlar el proceso y consta de los siguientes circuitos:

- \* Puertas de comunicación
- \* Buffer
- \* Lógica digital

**Computador:** Este es el controlador de todo el proceso de adquisición de datos. El recoge los datos, los procesa y controla ciertas variables del proceso electrolítico.

**Bloque de visualización:** Sirve para poder controlar las variables más importantes del proceso electrolí-

de manera visual, mientras el computador está procesando la información llegada por dichas variaciones. Esta visualización se la realiza por displays de 7 segmentos manejados por el microprocesador.

### SENSOR DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE EN LA CELDA ELECTROLITICA PARA LA ELECTRODEPOSICION DE ORO.

Controlar la variación de la corriente circulante en la celda se usa un transductor al igual que en el circuito de voltaje, pero con características muy diferentes. En este caso se trata de una resistencia shunt que mide la corriente en un voltaje proporcional de acuerdo a la ley de ohm.

$$V = I \cdot R$$

Diferencia entre este sensor con respecto al del voltaje es que la resistencia shunt es menos sensible a ruidos de frecuencia provenientes del medio ambiente, y a los ruidos de línea, pero más sensible al ruido térmico. Además la resistencia shunt puede requerir ser de potencia adecuada de el consumo de corriente que exija la celda de acuerdo a sus dimensiones físicas.

### ESQUEMAS DE BLOQUES DEL CIRCUITO SENSOR DE LA CORRIENTE DE LA CELDA

El circuito sensor de corriente de la celda, sensa la corriente de la celda la cual tiene una variación armónica de caída por ser dicha celda controlada a

potencial constante, para luego linealizarla y sacar los parámetros más importantes como  $I(0)$  y  $K$  para el cálculo del tiempo de deposición del oro. El diagrama de bloques de este circuito es:

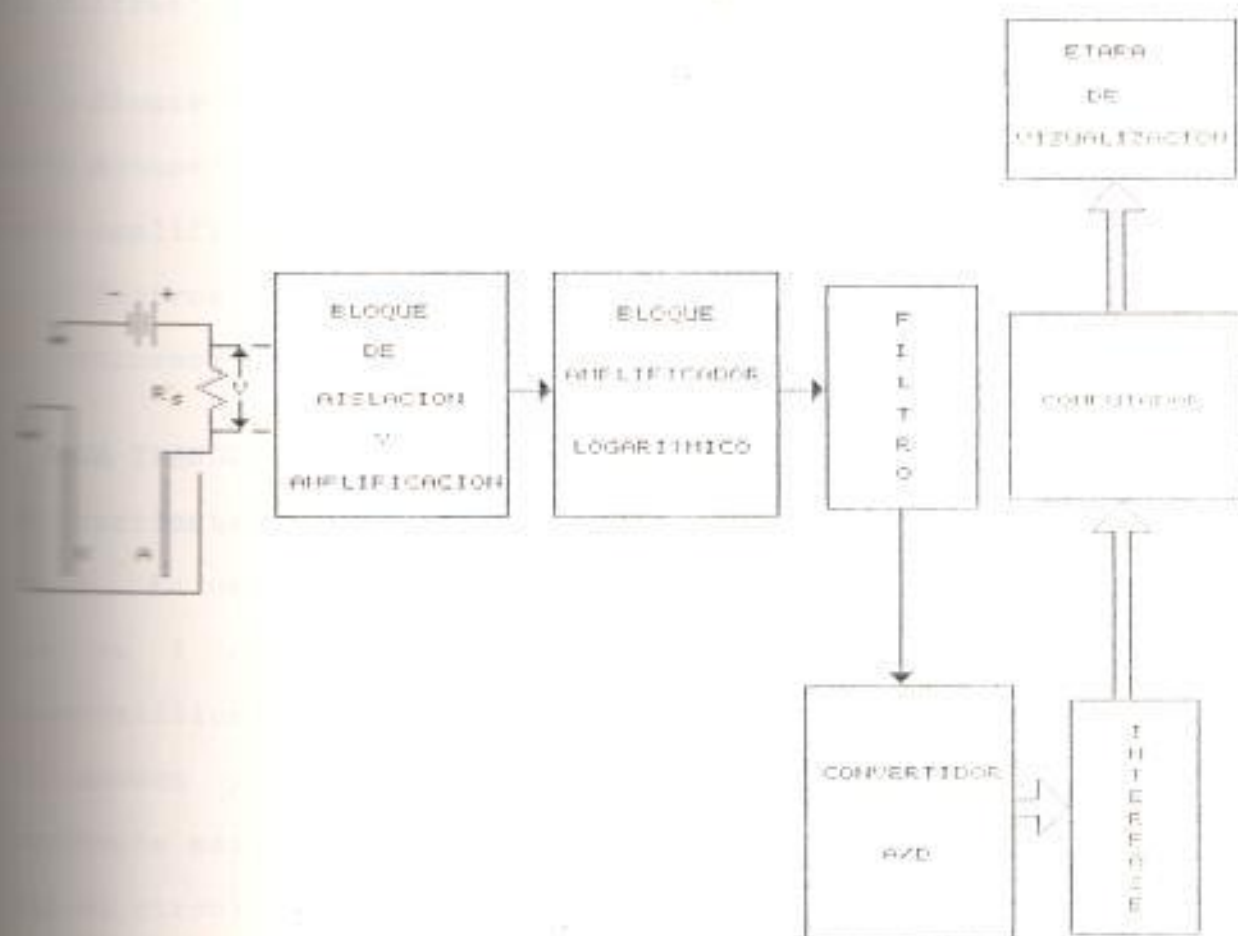


FIGURA # 19



En este diagrama se observa, que lo único que lo hace diferente al de voltaje, es la circuitería correspondiente a la parte analógica; Ya que la parte digital es exactamente la misma, por ser multiplexado el canal de adquisición de corriente con el de voltaje. El sistema analógico consta de:

1.- Bloque transductor

2.- Bloque de aislación y amplificación

3.- Amplificador logarítmico

4.- Filtros

Continuación procedemos a describir cada bloque:

**BLOQUE TRANSDUCTOR:** Este bloque se encarga de sensar la corriente de la pila a través de una resistencia. En nuestro caso se utilizaron 2 resistencias una de 1 ohm a 1/2 watt cuando se usa una celda electroquímica experimental de 3 litros y 4 electrodos (2 ánodos y 2 cátodos), por la que circula una corriente máxima de 500 miliamperios, pero cuando se usa el circuito en una planta prototipo donde no solo se utiliza una celda sino varias, la corriente es mucho mayor y por lo tanto la resistencia debe ser de mayor potencia y de menor ohmeaje. En consecuencia la resistencia sensora debe ajustarse a la características de la carga, la cual tiene que ver con el volumen de la solución y la concentración de la misma.



**BLOQUE DE AISLACION Y AMPLIFICACION:** Este bloque esta conformado por amplificadores de alta impedancia en configuración de instrumentación los cuales realizan la aislación así como también una cierta amplificación de la señal de entrada.

**AMPLIFICADOR LOGARITMICO:** Este circuito realiza la linealización de la corriente de la celda que tiene una forma exponencial decreciente, y al mismo tiempo puede realizar una pequeña amplificación y aislación de la señal.

**ETAPA DE FILTRADO:** Este circuito se encarga del acondicionamiento de la señal de entrada para su ingreso al convertidor A/D.

### REGULACION DEL TIEMPO DE DEPOSICION PARA UN PROCESO ELECTROLITICO A POTENCIAL CONSTANTE

Se planteó en el capítulo anterior el proceso electroquímico. La planta prototipo es a voltaje constante, por lo que la intensidad de corriente decae por pérdida de la concentración de oro y otros minerales que se depositan en el cátodo. En consecuencia la corriente sigue un comportamiento exponencial decreciente determinado por:

$$I_t = I_0 * 10^{-k \cdot t}$$

donde  $I_0$  es la corriente inicial de la celda que se fija de acuerdo al número de celdas conectadas en serie, y a su

estructura y características físicas. Estas celdas se las  
conecta en serie para una mayor captación de oro ya que la  
solución fluye por ellas a una cierta velocidad, y mientras  
avanza el tiempo que la solución este bajo la acción de  
los electrodos, mejor será la captación. La sección trans-  
versal de los electrodos (cátodos) influye mucho en el poder  
de captación y tiempo de deposición.

Para conocer la variación de la corriente en cualquier  
momento hay que proceder a linealizar la función de  
decaimiento de la corriente que tiene forma exponencial por  
tomar el logaritmo de dicha función, de tal manera que  
se pueda conocer el parámetro  $K'$  que es muy difícil obte-  
ner a partir de datos físicos de la solución y celda.

Por lo tanto:

$$\frac{I_t}{I_0} = 10^{-K't}$$

$$\text{LOG} \left( \frac{I_t}{I_0} \right) = -K't$$

$$\text{LOG}(I_t) = \text{LOG}(I_0) - K't$$

Esta ecuación es la ecuación de una recta donde:

$$F(t) = F(0) - m*t$$

de donde se deduce que:

$$\text{LOG}(I_0) = F(0) = \text{Intercepto de la recta}$$

$$K' = m = \text{Pendiente de la recta}$$

de datos para la construcción de la gráfica se  
realizar en el período comprendido desde el inicio  
de la electrólisis cuando la corriente es " $I_0$ ", hasta cuando  
la corriente decae a un valor " $I_0/2$ ", tomando muestras de  
la corriente en ese intervalo. Como ya se mencionó la  
corriente decae exponencialmente con las deposiciones a  
una constante y resulta un problema saber cuando la  
deposición es completa. Una regla más bien práctica indica  
que cuando la corriente de la electrólisis ha disminuido al  
valor inicial la deposición es completada,  
pero a veces este punto es inalcanzable a causa de la  
presencia de otros iones, y del oxígeno que producen pequeñas

una más realista es de continuar el análisis por 10  
veces de tiempo, lo que se determina fácilmente  
el tiempo necesario para que la corriente se reduzca  
a la mitad, y luego continuando el proceso por 9 tantos más  
de tiempo. Esto es equivalente matemáticamente al 0.1%  
del valor original; aunque ordinariamente es necesario  
por más de 10 semiperíodos para que todo el oro  
de la solución sea depositado en el cátodo.

La medición de la corriente de la celda se la realiza  
con un amplificador logarítmico, del cual se obtiene una  
serie de valores muestreados, originan una recta cuya  
pendiente es de valor igual a " $K'$ ". Esta recta se obtendrá

cuando el voltaje catódico se mantenga constante, la variación logarítmica de la corriente se produce trabajando a voltaje catódico constante.

El cálculo de este tiempo existen básicamente 2 maneras, la primera de ellos ya fue explicando anteriormente, se basa en el cálculo del tiempo en que la corriente decrece a su valor medio, una vez encontrado dicho tiempo se lo multiplica por 10 o más. Este método es más sencillo y utilizado en plantas prototipo, el cálculo del tiempo se lo realiza de la siguiente manera:

$$I_t = I_0 * 10^{-K' * t}$$
$$I_0/2 = I_0 * 10^{-K' * t_{1/2}}$$
$$1/2 = 10^{-K' * t_{1/2}}$$
$$\text{LOG}(1/2) = -K' * t_{1/2}$$
$$0.301 = K' * t_{1/2}$$
$$t_{1/2} = \frac{0.301}{K'}$$

El tiempo de electrodeposición es igual a:

$$t_r = (10 \sim 15) * \frac{0.301}{K'}$$

$$K' = 0.434 \frac{m_0 * A}{V}$$

El tiempo de deposición no depende de la concentración de la solución, sino más bien de la naturaleza física de la especie y de la naturaleza del electrolito ya que "K'" depende de estos parámetros físicos.

del cátodo

de la solución

de la solución

podemos jugar con el tiempo de deposición  
la relación A/V.

del tiempo de deposición, el voltaje catódico  
de la concentración, ya que este varía en forma

$$C_r = C_o * e^{-k*t}$$

método de obtención del tiempo de deposición es  
y se calcula de la siguiente manera:

$$C_r = C_o * e^{-k*t}$$

$$\ln \frac{C_r}{C_o} = \ln e^{-k*t}$$

de logaritmo neperiano al bulgar tenemos:

$$\text{LOG} \frac{C_r}{C_o} = \text{LOG} 10^{-k*t}$$

tenemos que:

$$\text{LOG} \frac{C_r}{C_o} = -k*t$$

$$\text{LOG} \frac{C_r}{C_o} = - \frac{k * t}{2.3}$$

ecuación es la que nos da el tiempo de  
dependiendo únicamente del parámetro "k". Por lo  
consideramos que existe un 99% de deposición



tenemos que  $C_r/C_o$  es igual 0.01 entonces:

$$-2 = - \frac{k * t}{2.3}$$

despejando "t" tenemos que:

$$t = \frac{4.6}{K}$$

El tiempo depende unicamente de "K", ahora si consideremos que la deposición se ha completado en un 99.9% tenemos que:

$$t = \frac{6.9}{K}$$

sucesivamente.

### 3.3.1 CALCULO DEL TIEMPO DE DEPOSICION PARA UNA SOLUCION PRACTICA DE 100PPM DE ORO POR LITRO.

En nuestro experimento se trabajó con soluciones de 2 lts y de 2.5 lts considerando este caso tenemos que:

para un 99% de deposición  $t = \frac{4.6}{p}$

para un 99.9% de deposición  $t = \frac{6.9}{p}$

donde  $p = k = \frac{m \cdot \Delta}{V}$

A continuación se presenta una tabla de la velocidad de difusión de una solución de cianuro de oro a diferentes temperaturas.

<u>T (°C)</u>	<u>D (Cm<sup>2</sup>/seg)</u>
25	$3.19 * 10^{-10}$

$$40 \qquad 4.14 * 10^{-3}$$

$$55 \qquad 5.30 * 10^{-3}$$

Como  $m_{\infty} = D/d$ , donde "d" es el espesor de la capa de difusión, y para soluciones sin agitar tiene un valor de  $10^{-2}$ . En consecuencia la movilidad de una solución de cianuro de oro a 25°C tiene un valor de:

$$m_{\infty} = \frac{3.19 * 10^{-3}}{10^{-2}} = 3.19 * 10^{-5} \text{ Cm/seg}$$

$$\text{donde } p = 3.19 * 10^{-5} \frac{A (\text{area})}{V (\text{volumen})}$$

Para el caso experimental  $A = 170 \text{ Cm}^2$

en una solución de 2 lts  $V = 2000 \text{ Cm}^3$

Con estos parámetros tenemos que:

$$p = 3.19 * 10^{-5} \frac{170 \text{ Cm}^2}{2000 \text{ Cm}^3}$$

$$p = 2.694 * 10^{-6} \text{ seg}^{-1}$$

$$\text{Para 99\% de deposición } t = \frac{4.6}{2.694 * 10^{-6}} = 1.7 * 10^6 \text{ seg}$$

$$t = 4 \text{ horas y } 45 \text{ minutos}$$

$$\text{Para 99.9\% de deposición } t = \frac{6.9}{2.694 * 10^{-6}} = 2.56 * 10^6 \text{ seg}$$

$$t = 7 \text{ horas y } 10 \text{ minutos}$$

Para una solución de 2.5 lts tenemos:

$$v = 2500 \text{ Cm}^3 \text{ por lo tanto } p = 3.19 * 10^{-5} \left( \frac{170}{2500} \right)$$

$$p = 2.17 * 10^{-4} \text{seg}^{-1}$$

$$\text{Para una deposición del 99\% } t = \frac{4.6}{2.694 * 10^{-4}} = 2.18 * 10^4 \text{seg}$$

$$t = 6 \text{ hora}$$

$$\text{Para una deposición del 99.9\% } t = \frac{6.9}{2.694 * 10^{-4}} =$$

$$3.18 * 10^4 \text{seg}$$

$$t = 8 \text{ horas y } 50 \text{ minutos}$$

### 3.2 CALCULO DE LA CORRIENTE INICIAL ( MAXIMA) DE IONES Au<sup>+</sup> EN UNA SOLUCION DE CIANURO DE ORO A 100 PPM.

La corriente inicial de un proceso electrolítico a potencial constante se calcula mediante la fórmula siguiente:

$$I_0 = n * F * A * C(0) * m_0$$

donde :

n = Equivalente estequiométrico

F = Constante de faraday por mol

A = Area del Cátodo

C(0) = Concentración inicial de oro en la solución

m<sub>0</sub> = Movilidad de la solución

Reemplazando los valores obtenidos de datos teóricos, y de las características físicas propias de la celda utilizada tenemos que:

$$I_0 = 1(96500) \left( \frac{5.0769 * 10^{-4}}{1000} \right) (A * m_0)$$

$$I_0 = \frac{1(96500)(5.0769 \times 10^{-4})(170 \times 3.19 \times 10^{-3})}{1000}$$

$$I_0 = 26.54 \text{ mA}$$

Este valor de corriente se obtiene con un rendimiento del 100% de dicha corriente, esta intensidad se fija justo en el voltaje de descomposición. Puesto que para valores de voltaje superiores al de descomposición surgen corrientes debido a la presencia de otros iones que se depositan a partir de estos voltajes o por lograr descomponerse el agua (electrólisis del agua) de la solución en estudio.

En la práctica también se puede obtener valores de corrientes superiores a las esperadas antes de la electrólisis de oro, por la presencia de otros iones que por el contrario se depositan a valores de voltaje inferior al del oro. Por consiguiente los valores de corriente de un proceso electrolítico de cianuro de oro pueden ser modificados por la presencia de otros iones que no sean oro. Tales como hierro, plata, cobre, ciertos sulfatos y otras impurezas.

#### 2.4 RANGO EN EL CONTROL DE FLUJO DE LA SOLUCION PARA EL PROCESO ELECTROLITICO

El control del flujo de una solución rica en oro, a través de las pilas electrolíticas colocadas en serie en una planta prototipo, se hace necesario por cuanto dicha planta debe



procesar una considerable cantidad de solución (volumen), para que su rendimiento y rentabilidad sea mayor; frente al tiempo necesario para la electrodeposición y a los costos que esto significa en energía. La manera de procesar mayor cantidad de solución, es colocando varias pilas en serie con respecto al flujo de la solución; y hacer fluir dicha solución por las respectivas celdas con una velocidad constante fijada por el operador dependiendo del tiempo de electrodeposición del oro en todo este volumen.

El estudio realizado anteriormente se refiere a celdas con flujos estacionarios o estáticos ( sin movimiento). Pero debido al mayor rendimiento y a una mayor capacidad de volumen de solución tratada, se ve la necesidad de recoger el procedimiento de pilas en series con solución circulante. Por ende vamos a relacionar el tiempo de deposición necesario para que no exista oro, con el flujo de la solución y su volumen.

Segundo a la relación  $\phi = \frac{V}{t}$

Donde el tiempo (t) es un parámetro fijado por el tiempo de deposición, y conociendo el volumen de la solución a tratar como el que las pilas electrolíticas pueden albergar. Debemos fijar el flujo necesario para una electrodeposición completa, y obtener una solución estéril al final.

La velocidad del flujo debe ser controlada con alguna válvula de flujo y una bomba para obtener una cierta



Esta válvula también puede ser controlada desde el  
de acuerdo a los cálculos previos alimentados

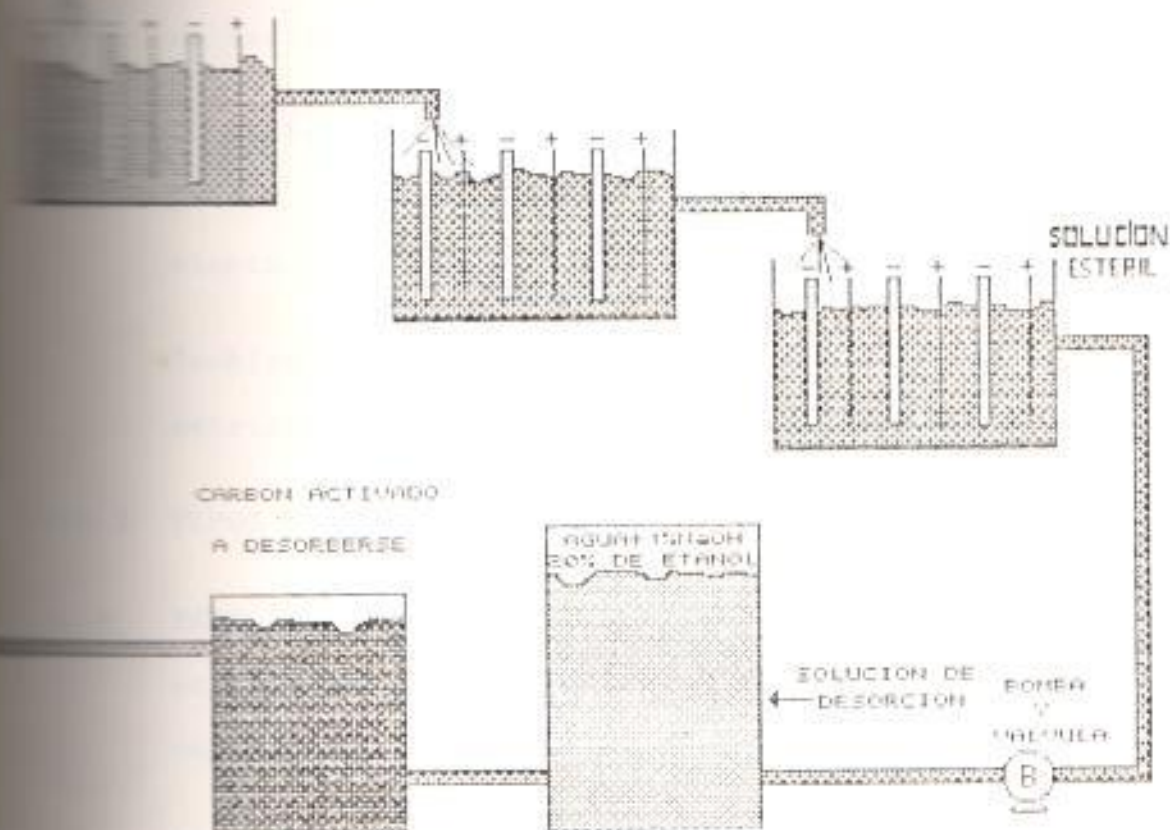


FIGURA # 20

## CAPITULO # 4

### CALCULOS Y DISEÑO DE LOS APARATOS DE MEDICION Y CONTROL

#### 4.1 TRANSDUCTORES: CONCEPTOS GENERALES, TIPOS DE TRANSDUCTORES, TRANSDUCCIONES USADOS EN EL PROCESO ELECTROLITICO, TIPOS DE ELECTRODOS

4.1.1 CONCEPTOS GENERALES: El transductor es el punto de partida de un sistema de adquisición de datos, para un sistema de control de tiempo real.

Estos transductores se los emplean para sensar temperatura, presión, flujo y además para medir desplazamiento, posición, y hasta concentración.

También existen dispositivos fotométricos y radiométricos que se utilizan mucho como sensores de luz.

#### 4.1.2 TIPOS DE TRANSDUCTORES

a-) **SENSORES DE TEMPERATURA:** Son de los más utilizados especialmente a nivel industrial, y ellos son: termocúplas, RTD, sensores semiconductivos y pyrómetros.

La termocúpla es la más utilizada por su robustez.

b-) **SENSORES DE PRESION Y FLUJO:** Ellos eran primeramente de carácter potenciométricos por su bajo costo y elevada salida, pero eran muy sensibles a las vibraciones dándoles un carácter no lineal.

Luego surgió el strain gage con mucho menos sensibilidad y error, pero muy delicado y con salida de orden de los milivoltios, por lo que necesita un preamplificador.

Luego surgieron nuevos diseños y nació un piezo resistor integrado en un circuito híbrido para eliminar las fuentes de error.

Los medidores de flujo son implementados por uno de 2 métodos:

- 1-) Sensores por diferencia de presión y
- 2-) Sensores de contactos mecánicos como los de turbinas.
- 3-) **SENSORES Y ACTIVADORES DE DESPLAZAMIENTO:**

Los sensores de desplazamiento lineal son posibles con el transformador de desplazamiento variable lineal (LVDT).

Con este dispositivo una excitación "AC" introducida a través de un circuito de reluctancia variable es inducida a la salida por un núcleo movible con una determinada cantidad de desplazamiento.

Un circuito básico del "LVDT" con salida "AC" y "DC" se muestra en la figura siguiente.

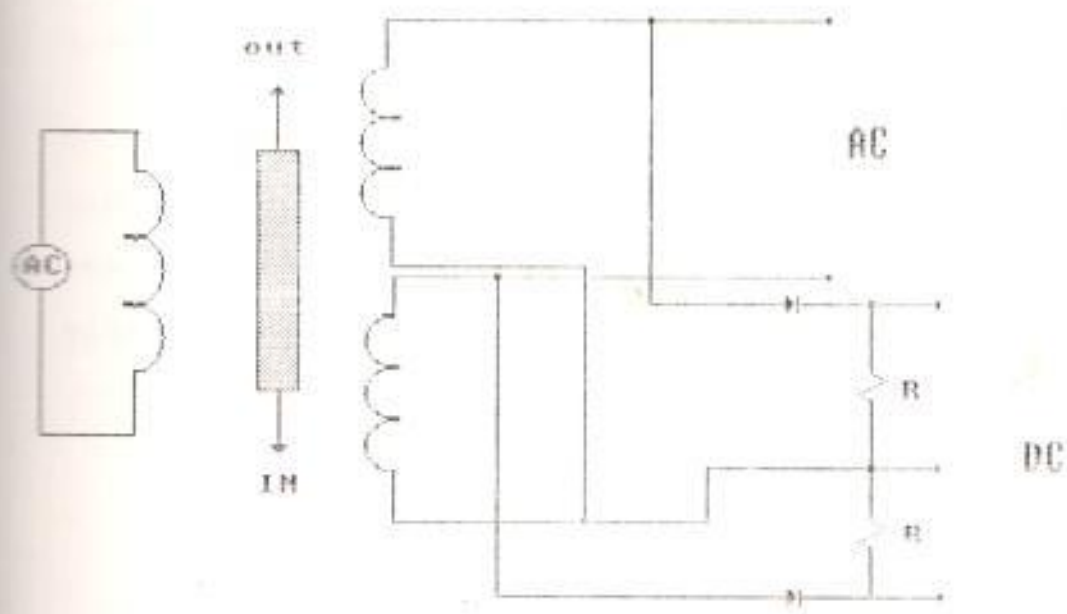


FIGURA # 21

Los medidores de aceleración son de principal interés en aplicaciones industriales para sensores de colisión y vibración.

Los transductores capacitivos han sido ampliamente suplantados por los dispositivos piezo-eléctricos. Su circuito equivalente es una fuente de voltaje en serie con un capacitor, producto del cual el capacitor se carga. Una salida alterna es generada como resultado de una aceleración vibratoria típica de una pequeña amplitud, es por esto que se utilizan varios cristales.

Para pequeñas cantidades de carga se utiliza un amplificador de baja corriente de polarización.



seguido del transductor que convierte la salida del transductor en señal de velocidad.

Un adicional integrador y un rectificador de precisión pueden suministrar un desplazamiento de salida que puede ser calibrado en milipulg/volt. A continuación se muestra un esquema del circuito.

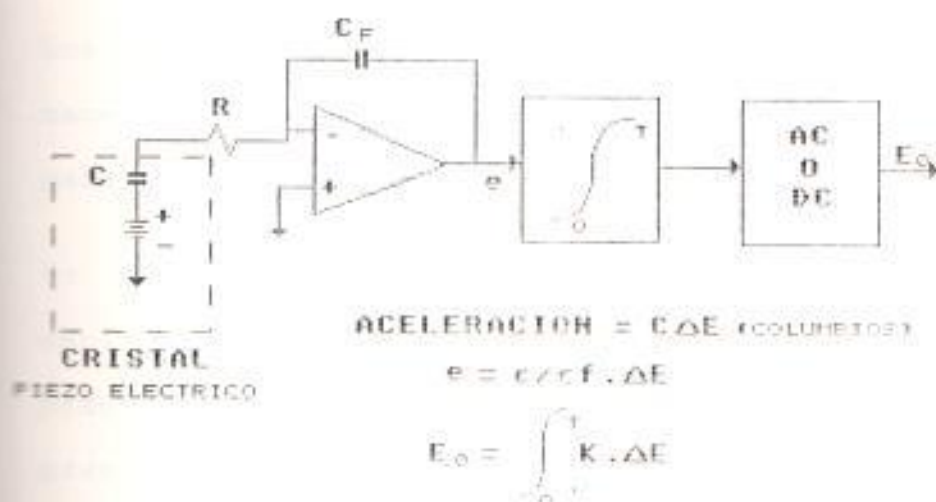


FIGURA # 22

**SENSORES DE NIVELES:** Para niveles de líquidos y quasilíquidos (sólido granular), que son procesos medidos frecuentemente en tanques, tubos y otros recipientes se necesita conocer la geometría del tanque o recipiente. Además si la densidad de la sustancia es conocida se puede medir el volumen del líquido y su masa.



Varios dispositivos son utilizados para sensar y medir las alturas incrementales de los niveles de líquidos, ellos son:

- 1-) Dispositivos flotantes
- 2-) Diferenciales de presión
- 3-) Transductores ultrasónicos y
- 4-) De radiación.

Los dispositivos flotantes ofrecen sencillas y varias maneras de traslación, pero son menos satisfactorios para fluidos viscosos.

Un transductor de presión diferencial puede ser empleado para medir la altura del líquido cuando su peso específico "W" es conocido, y el transductor de presión diferencial es conectado entre la superficie del tanque y el fondo. La altura esta dada por la razón:

$$H = \hat{p}/w$$

Los sensores ultrasónicos de nivel son implementados con sistemas de eco, los cuales son especialmente muy usados en tanques altos, y sensores de altura discreta por medio de emisores y receptores horizontalmente dispuestos.

#### 5-) **SENSORES PARA FOTOMETRIA Y RADIOMETRIA:**

Las asunciones básicas de PLANCK'S fue que la luz no

era un fenómeno continuo, sino consistente en cuantos de luz discreta, cuya energía era función de la frecuencia. Por esta razón la energía que cae sobre un arbitrario material fotosensible, exhibe una respuesta espectral pico. Esta asunción se fórmula como:

$$E = h \cdot f = (6.626 \cdot 10^{-34} \text{ j/seg}) \cdot f \text{ (hz)}$$

Es necesario que exista una unión espectral entre la fuente y el sensor para una transferencia óptima, esto se realiza por lentes que atrapan los rayos paralelos y luego enfocan estos sobre el área del sensor. (ver figura )

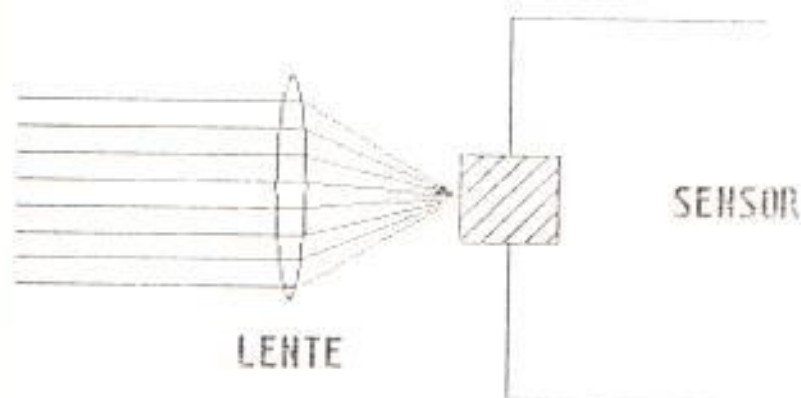


FIGURA # 23

La ganancia es :  $0.9 \frac{(\text{radio del lente})}{(\text{radio del sensor})}$

Las importantes fuentes de radiación hechas por el

hombre son lámparas, lasers, y diodos emisores de luz (led).

Dentro de los diodos emisores de luz existen 2 tipos:

- 1-) diodos emisores y
- 2-) diodos láser

Los sensores de luz caen en tres categorías:

- 1-) fotoemisores
- 2-) fotodiodos y
- 3-) fotoconductores

Dentro de los fotoemisores tenemos los fotomultiplicadores, los fototubos, y las celdas fotovoltaicas como las celdas solares, que suministran una F.E.M ó 0.5 voltios para el silicio y de 0.1 voltio para el germanio.

Los fotodiodos son dispositivos sensibles a la luz, que pueden ser tanto de union "p-n" o fototransistores "pnp" o "nnp", estos son los dispositivos más ampliamente empleados en sensores electroópticos.

Los fototransistores en conexión darlington son aplicados para aumentar la sensibilidad, sin embargo los fotodiodos son más lineales que los fototransistores.

La velocidad, potencia y ganancia de los sensores fotodiodos, y fototransistores son suministrados en

la tabla.

<u>DISPOSITIVOS</u>	<u>VELOCIDAD</u>	<u>SALIDA</u>	<u>GANANCIA</u>
Darlington	1 KHZ	1 W	1000
Transistor	100KHZ	100mW	1
Diodo	10 MHZ	1 mW	0.001

Para aplicaciones de transmisión lineal se emplea el fotodiodo, mientras que como sensores de posición y aislante óptico se emplea el fototransistor. Este último es bastante usado en aplicaciones industriales para propósito de aislar voltaje.

Las celdas fotoconductoras y fotoresistivas son dispositivos que exhiben un decrecimiento en la resistencia, con el incremento del nivel de luz. También exhiben un comportamiento de histéresis y coeficiente de temperatura que es función del nivel de luz.

### 4.1.3 TRANSDUCTORES UTILIZADOS EN EL PROCESO ELECTROLITICO

En nuestro estudio sobre el comportamiento de la celda electrolitica conteniendo una solución rica en oro, se utilizaron 2 transductores, de los cuales el primero de ellos se trata de una resistencia shunt, y el segundo es una semipila conformada por un electrodo de referencia de calomel y un cátodo de la celda.



La resistencia **shunt** es la encargada de sensar corriente por la conversión de corriente a voltaje dada por la ley de **ohm**, esto es:

$$V = I \cdot R$$

El valor de esta resistencia se fijará de acuerdo a la corriente que circule por la celda. Para una celda experimental con 2 ánodos y 2 cátodos y con corrientes que pueden fluctuar desde (100 ~ 800 mA), la resistencia puede tener valores desde (1~10) ohmios a una potencia desde (1/4 ~ 1) Watt. En una planta en producción con varias celdas conectadas en serie entre sí, la corriente puede alcanzar valores desde (5 ~ 50) amperios, y por lo tanto la resistencia debe ser del orden de 0.01 ohmio y entre (10~20) Watt. El valor de la resistencia debe ser pequeña para no producir una caída de voltaje significativa, que afecte al voltaje aplicado a la celda.

La semipila conformada por el electrodo de referencia y un cátodo de la celda son los encargados de sensar el voltaje catódico, el cuál es una función de la concentración de la solución o del potencial reversible catódico.

#### 4.1.4 TIPOS DE ELECTRODOS:

Electrodos metálicos tales como el de plata, oro, platino y mercurio etc. Son usados con profusión



en el estudio de los potenciales REDOX en soluciones, porque su comportamiento en contacto con la solución es de depósito de electrones. Es por eso que no se pueden utilizar en lecturas directas relacionadas con la concentración del ión, sino que en general se utilizan como seguidores de valorización. (ver figura)

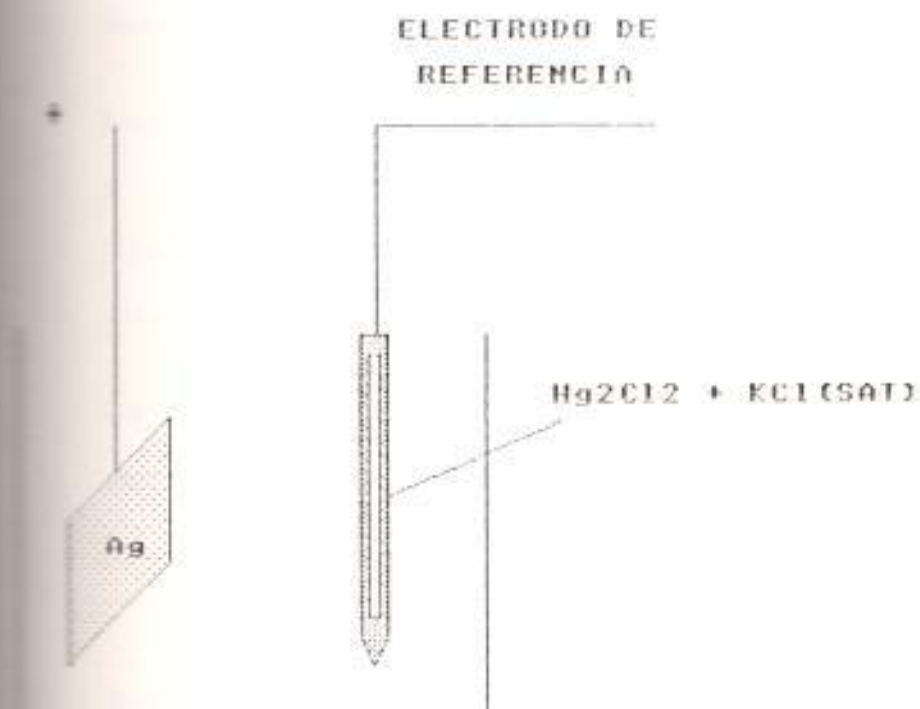


FIGURA # 24

A parte de los electrodos metálicos se utilizan con una frecuencia en potenciometria los electrodos ión selectivos, estos son sondas sensibles a uno o varios iones de la disolución, pero en todo caso a un número limitado de estas especies.

Los electrodos ión selectivos desarrollados hasta la actualidad abren una gran cantidad de aplicaciones de acuerdo con su construcción, y pueden ser de membrana o de película. Entre los de membrana cabe la distinción los de membrana de vidrio especialmente utilizados, y por ser uno de ellos el empleado para medir el "PH". Los electrodos de membrana pueden ser de monocristal, policristal, y de membrana porosa "pvc".

Los electrodos de película se construyen de sílicona y teflón grafito formandose sobre el cuerpo de una fina película de cristal que contenga el ión bajo investigación.

La ecuación que rige a estos electrodos ión selectivo es:

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln ( x + Kx_1 I^{n_1/n_2} )$$

Donde "x" representa la actividad o concentración del ión estudiado, mientras "I" sería el ión interferente y  $n_1/n_2$  es el número de electrones intercambiados en cada uno de los procesos redox de uno y de otro, teniendo además a "Kx<sub>1</sub>" como una constante de selectividad.

Volviendo a los electrodos para medir el "PH" se utilizan de varios tipos: el de hidrógeno, de vidrio, metálicos y de quinhidrina. Desde el punto de vista

práctico y en disoluciones acuosas se emplean por su comodidad, por su respuesta lineal con el "PH" , y por su insolubilidad a interferencias los electrodos de vidrio.

Los electrodos de vidrio consisten en una membrana de vidrio sensible al "PH", relleno de un líquido interno en el que esta inmerso un electrodo de referencia de plata-cloruro de plata (Ag.AgCl). El potencial que alcanza la membrana sensible es proporcional a la diferencia de "PH" entre su pared interna y externa, esta última en contacto con la disolución a medir.

El potencial que genera un electrodo de vidrio se puede descomponer en 3 factores:

- 1.-) El debido al electrodo interno de referencia.
- 2.-) El producido en la membrana, por diferencia de "PH" de las soluciones internas y externas.
- 3.-) Por el potencial asimétrico de las superficies internas y externas de las membranas.

Los electrodos de referencia más usados son los de plata/cloruro de plata y los de calomel. Aunque con fines prácticos los de calomel son los más utilizados, el de plata/cloruro de plata se emplea como referencia interna del electrodo de vidrio, y se basa en el potencial creado por el sistema:



Que se puede representar como:

$$E = E_0 - \frac{RT}{nF} \ln (\text{Cl}^{-})$$

Ta que tanto la plata como el cloruro de plata son sólidos.

El electrodo de calomel consiste en un hilo de platino inmerso en un depósito de mercurio en contacto con una pasta de mezcla de mercurio/cloruro de mercurio, una sal del cloruro (en general KCl) y agua. Esta semipila se completa con un puente salino de disolución saturada de cloruro de potasio.

El electrodo responde al potencial del sistema:



Que se represente como:

$$E = E_0 - \frac{RT}{nF} \ln (\text{Cl}^{-}) + E_{\text{cal}}$$

Al igual que en el caso anterior no figura en la expresión ni el mercurio, ni el cloruro de mercurio por ser sólidos.

POTENCIAL DE UN ELECTRODO DE VIDRIO DEBIDO A 2 POTENCIALES DE REFERENCIA USADOS DISTINTAMENTE.

Electrodo de vidrio /disolución problema /Electrodo  
de referencia

$$E = E_0 - \frac{RT}{nF} \ln(C_1)$$

Tampón interno/ membrana de vidrio/ disolución prob/  
Elect de ref



4.2.1 CIRCUITOS DE AMPLIFICACION : DEFINICION, CIRCUITOS DE CONTROL NORMALMENTE UTILIZADOS EN LA ELECTRODEPOSICION, AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACION, CIRCUITOS BOOSTER, CIRCUITOS UTILIZADOS, CRITERIOS DE DISEÑO.

Como su nombre lo indica los circuitos de amplificación se utilizan para amplificar alguna señal de entrada si su nivel es bajo o de valor no deseado. Estos amplificadores pueden ser de distintos tipos:

- 4.2.1.1 Amplificadores a Transistores
- 4.2.1.2 Con amplificadores operacionales
- 4.2.1.3 con combinación de ambos

También se los puede clasificar como de alta calidad o baja calidad según sea el nivel de amplificación y de fidelidad, es reproducir una señal de entrada a la salida, y se los clasifica en "AC" o "DC".

Para nuestro estudio se ha escogido el amplificador de instrumentación como sensor de corriente y voltaje, por tener características óptimas de aislación (alta impedancia de entrada) y por ser de sencilla construcción.

Para el control de fuente se emplean amplificadores operacionales y circuitos comparadores para la regulación del voltaje catódico.

4.2.1 CIRCUITOS DE CONTROL NORMALMENTE UTILIZADOS EN LA ELECTRODEPOSICION

El circuito básico para el control del potencial de una celda electrolítica es el amplificador adicional. Este tipo de circuito es el de la figura siguiente.

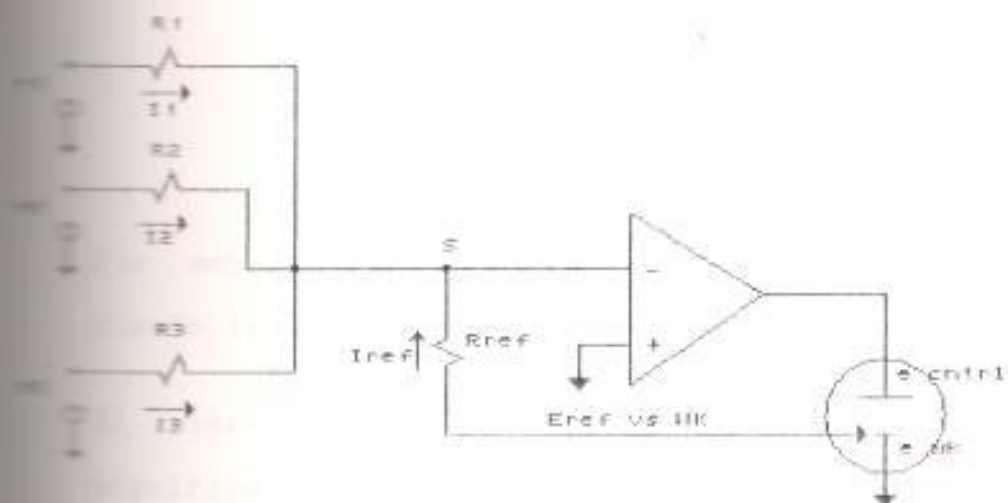


FIGURA # 25

Donde  $e_1$ ,  $e_2$ ,  $e_3$  son fuentes generadoras de voltajes para introducir a la celda cualquier tipo de señal de voltaje, y donde "control" es el voltaje que va a ser aplicado al ánodo de la celda, y donde "wk" es el voltaje aplicado al cátodo, que en este caso es el voltaje de referencia (tierra) del sistema. Además podemos observar " $e_{ref}$ " el cual corresponde al voltaje del cátodo con respecto al electrodo de referencia, que va a ser controlado durante el proceso electrolítico.

Como "s" es una tierra virtual, tenemos por la ley de

nodos que:

$$\frac{e_1}{r_1} + \frac{e_2}{r_2} + \frac{e_3}{r_3} = - \frac{e_{ref}}{r_{ref}}$$

si  $r_1 = r_2 = r_3 = r_{ref}$  tenemos que:

$$e_1 + e_2 + e_3 = - e_{ref}$$

$$e_1 + e_2 + e_3 = e_{out} \text{ (vs ref)}$$

Sin embargo hay 3 importantes deficiencias en este diseño las cuales se enumeran a continuación:

- 1- El electrodo de referencia debe suministrar una significativa corriente "I<sub>ref</sub>" al punto de suma, además de no estar acoplada su impedancia.
- 2- No existe facilidad en la lectura de la corriente de la celda.
- 3- La potencia suministrada a la celda es solo suministrada por la salida del amplificador operacional.

En seguida se muestra en la siguiente figura un diagrama que remedia estas deficiencias.

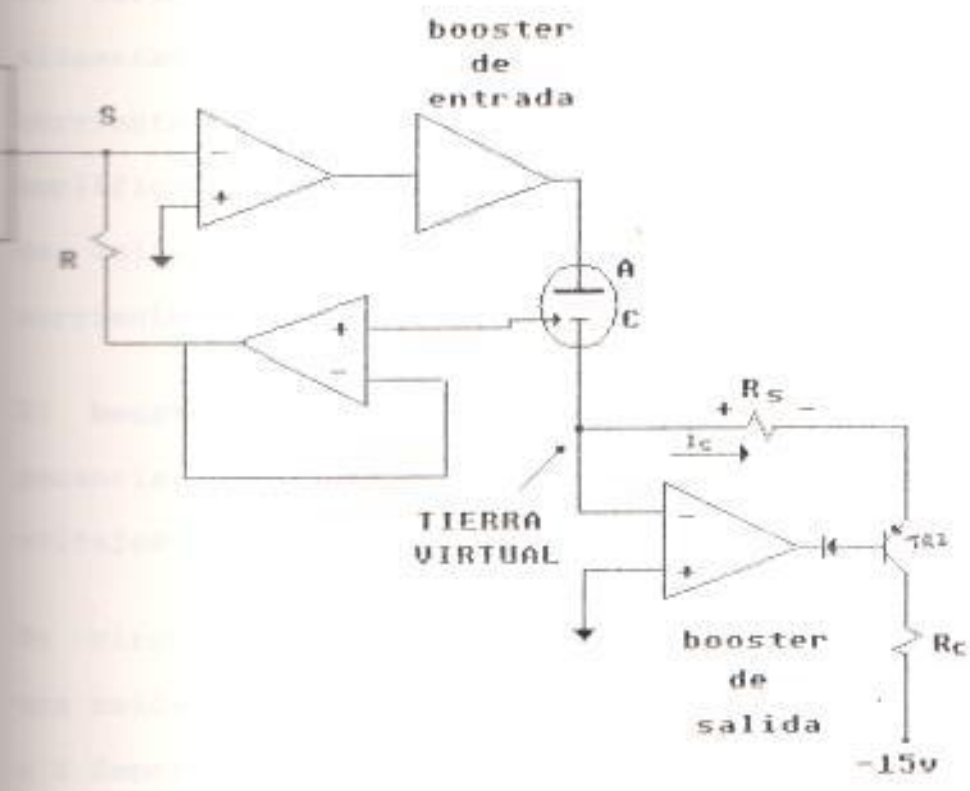


FIGURA # 26

Para solucionar el primer inconveniente se inserta un resistor de emisor en el lazo de realimentación, de tal manera que el electrodo de referencia no se vea obligado a manejar corrientes que no puede soportar.

El segundo inconveniente se lo sobrepasa con un resistor de corriente, cuyo voltaje de salida sea proporcional a la corriente de la celda. Note que el resistor de corriente permite poner al electrodo de referencia (cátodo) a tierra virtual, que es esencial

para la operación del sistema.

El tercer problema que realmente surge tanto en la alimentación de entrada como en el sensor de corriente de la celda, se lo soluciona con amplificadores booster tanto en la entrada de control de voltaje, como en la salida de control de corriente.

El booster es usualmente un amplificador de baja ganancia, capaz de liberar altas corrientes o altos voltajes todo como un amplificador operacional.

Un circuito usado con propósito experimental, para una celda por donde circula una corriente no superior a 1 Amperio se muestra a continuación:

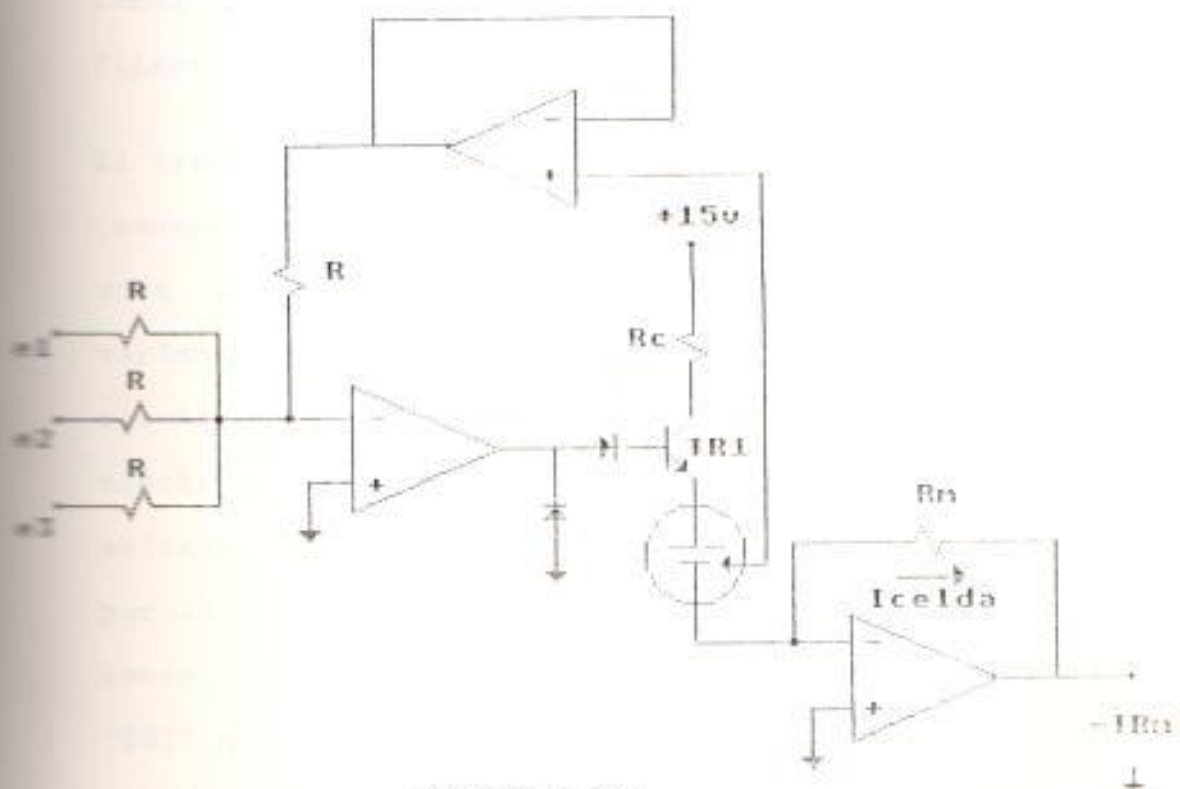


FIGURA # 27



En este circuito el transistor "TR1" es el encargado de controlar el voltaje de la celda a través del circuito amplificador sumador. El transistor "TR1" debe trabajar en la zona lineal para asegurar que el voltaje aplicado a la celda sea el adecuado, el punto de operación de este transistor debe fijarse a la mitad de la recta de carga para que su fluctuación cumpla con los requerimientos de control. En cuanto a la corriente que circula por él, se escoge como máximo 1 amperio por lo que la celda no puede consumir más de ese valor. Como este amplificador tiene una alta resistencia de entrada, es posible que el operacional no sea capaz de suministrarle toda la corriente de base, por lo que se hace necesario un ramal de compensación de corriente de base la cual se fijará de acuerdo a las necesidades de la carga.

El transistor "TR2" que conforma el booster de salida (sensor de corriente) debe trabajar también en la zona lineal, pero más por la necesidad de la variabilidad de la corriente que demanda la celda electrolítica durante el proceso de electrodeposición. En cuanto a la variación de voltaje " $V_{ce}$ ", debe ser mucho menor que la corriente por lo que la recta de carga en este transistor debe tener una mayor inclinación que la del transistor "TR1" que sensaba voltaje. El punto de operación del transistor "TR2" debe estar más cerca de la zona de

corte y no en el centro de la recta de carga como en el caso anterior.

En este diseño se debe tratar que las resistencias de polarización  $R_{e1}$ , y  $R_{e2}$  deban ser  $\ll R_1$  conjuntamente con la resistencia sensora  $R_s$ , de tal manera que no afecten a la corriente de la carga que es la de la celda electrolítica.

En cuanto a la potencia que este circuito puede proporcionar, puede ser variada simplemente utilizando un par darlington tanto en el amplificador controlador de voltaje como en el de corriente. Ambos amplificadores trabajarán como boosters con una mayor potencia de entrega, por lo tanto los transistores deberán ser de mayor capacidad (darlington) siempre y cuando se trabaje con una celda de mayor consumo de corriente que la prevista.

### 4.2.3 AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACION

El amplificador de instrumentación es uno de los más usados, precisos y versátiles de los amplificadores de hoy en día.

Esta hecho de 3 operacionales y 7 resistores como se muestra en la figura siguiente. Este amplificador no es más que la conexión de un buffered amplificador diferencial, conectado a un amplificador diferencial de ganancia "1" por tener 4 resistencias iguales, el

resultado se muestra en la siguiente figura.

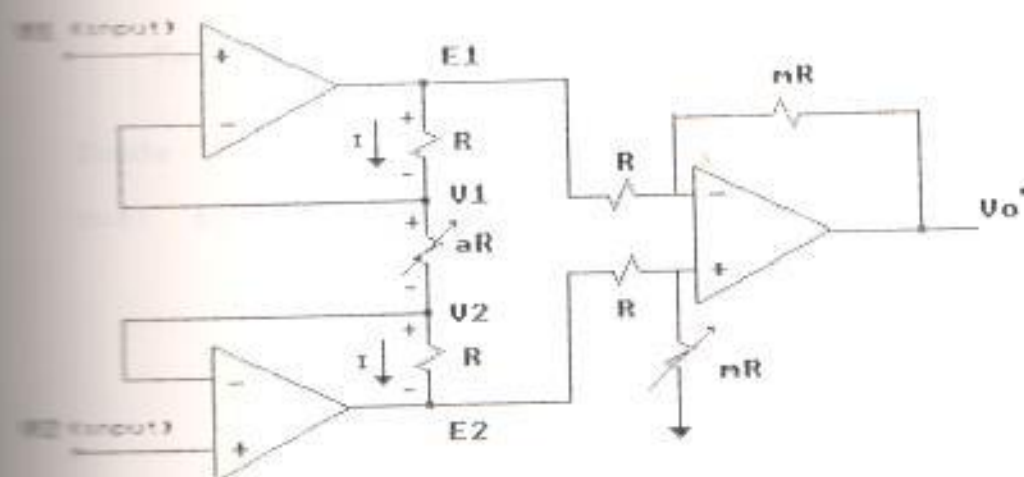


FIGURA # 28

El resistato "mR" es preferible que sea un trimmer, y se variado para balancear en la salida algún voltaje de modo común.

Solo el resistor o trimmer "aR" es ajustable para variar la ganancia de acuerdo a:

$$I = \frac{V_1 - V_2}{aR} \quad (\text{por ser un seguidor de emisor})$$

$$\text{obtenemos } E_1 = V_1 + IR$$

$$E_1 = V_1 + \frac{V_1 - V_2}{aR} * R$$

$$*E_1 = V_1 + \frac{V_1 - V_2}{a}$$

$$E_2 = V_2 - IR$$

La corriente en el ramal es la misma, ya que no entra por el pin "-" de los amplificadores por la alta impedancia de entrada.

$$E_2 = V_2 - \frac{V_1 - V_2}{aR} * R$$

$$*E_2 = V_2 - \frac{V_1 - V_2}{a}$$

$$V_o = E_2 - E_1$$

Donde "V<sub>o</sub>" es la salida del amplificador buffered, la cual se establece como a continuación.

$$V_o = V_2 - \frac{V_1 - V_2}{a} - V_1 - \frac{V_1 - V_2}{a}$$

$$V_o = V_2 - V_1 - 2\left(\frac{V_1 - V_2}{a}\right)$$

$$V_o = V_2 - V_1 + 2\left(\frac{V_2 - V_1}{a}\right)$$

Por lo tanto tenemos:

$$V_o = (V_2 - V_1) * (1 + 2/a)$$

La salida del amplificador de instrumentación es igual a:

$$V_o' = V_o * m$$

Donde "m" es la ganancia del amplificador diferencial, que si consideramos que las resistencias son iguales dicha ganancia es igual a "1", por lo tanto tenemos que:

$$V_o' = V_o$$

### CARACTERISTICAS DEL AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACION

La ganancia de voltaje de las entradas diferenciales (E<sub>1</sub> - E<sub>2</sub>) puede ser fijada igual a "1" por los



resistores "R", las cuales deben de tratarse que sean de precisión.

- 2-) La resistencia de entrada, de las entradas diferenciales ( $E_1 - E_2$ ) son muy altas y no cambian al variar la temperatura y corriente.
- 3-)  $V_o$  no depende del voltaje de modo común de  $V_1$  y  $V_2$ , sino solo de su diferencia.

### 4.2.3 CIRCUITO BOOSTER

Este circuito es el encargado de convertir la salida de un amplificador cualquiera, en una salida de mayor potencia si la carga así lo amerita. Si en el circuito booster no existiera el transistor de salida, el amplificador no podría suministrar más de 5- 10 mA en su salida lo que no es suficiente para manejar una carga, que en nuestro caso se trata de una celda de electrodeposición.

Si adicionamos un transistor a la salida del amplificador, la corriente de carga es manejada por una fuente exterior y por el transistor de salida, de esta manera el amplificador es solo requerido para proporcionar la corriente de base al transistor, que pueden andar en los rangos de 1/100 de la corriente de la carga, siempre y cuando el "beta" del transistor sea  $\approx 100$ . Con esto concluimos que si el operacional suministra 5 mA, la corriente de carga



que maneja el transistor es de " $I_c = 0.5 \text{ A}$ ".

Este circuito es adecuado para manejar corrientes de 1 ~ 2 amperios, si se utilizan transistores de un alto " $\beta$ " o amplificadores tipos darlington.

## CIRCUITOS UTILIZADOS PARA EL CONTROL DE LA ELECTRO- DEPOSICION

### CIRCUITO SENSOR DE LA CORRIENTE DE LA CELDA

El circuito sensor de corriente consta de un amplificador diferencial, encargado de sensar la caída (diferencia) de voltaje a través de los terminales de la resistencia "shunt", la amplifica si fuera necesario y la introduce a un segundo amplificador, en este caso un amplificador logarítmico cuya función es amplificar y linealizar la corriente de la celda que tiene una forma exponencial decreciente durante el proceso de electrodeposición.

Los amplificadores utilizados, tanto en el amplificador diferencial como en el amplificador logarítmico, son amplificadores de alta calidad (JFETS).

#### 1) AMPLIFICADOR DIFERENCIAL (CON 3 AMPLIFICADORES)

que maneja el transistor es de " $I_c = 0.5 \text{ A}$ ".

Este circuito es adecuado para manejar corrientes de 1 ~ 2 amperios, si se utilizan transistores de un alto " $\beta$ " o amplificadores tipos darlington.

## 2.4 CIRCUITOS UTILIZADOS PARA EL CONTROL DE LA ELECTRO- DEPOSICION

### 2.4.1 CIRCUITO SENSOR DE LA CORRIENTE DE LA CELDA

El circuito sensor de corriente consta de un amplificador diferencial, encargado de sensar la caída (diferencia) de voltaje a través de los terminales de la resistencia "shunt", la amplifica si fuera necesario y la introduce a un segundo amplificador, en este caso un amplificador logarítmico cuya función es amplificar y linealizar la corriente de la celda que tiene una forma exponencial decreciente durante el proceso de electrodeposición.

Los amplificadores utilizados, tanto en el amplificador diferencial como en el amplificador logarítmico, son amplificadores de alta calidad (JFETS).

#### 1) AMPLIFICADOR DIFERENCIAL (CON 3 AMPLIFICADORES)

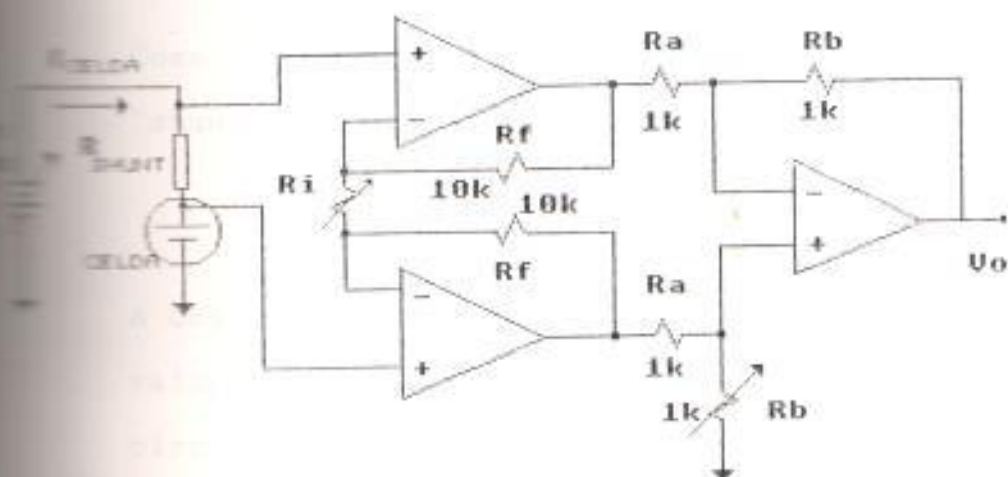


FIGURA # 29

En este circuito " $R_i$ " se utiliza para variar la ganancia del amplificador la cual se fija en valores entre 1 y 10 dependiendo de las características de la corriente y de la resistencia "shunt" utilizada. " $R_a$ " se utiliza para controlar el offset del amplificador de salida, y dar una señal de salida más confiable.

En este circuito la ganancia diferencial se calcula

$$D.M.G = (1 + 2 \cdot R_f / R_i) (R_a / R_b)$$

La ganancia de modo común como:

D.M.C = depende de la tolerancia  $R_a$  Y  $R_b$

Si  $R_0 = R_0$ , la salida se convierte en:

$$V_o = (V_2 - V_1) (1 + 2R_f/R_1)$$

Como  $V_2 - V_1 = IR$  (caída de voltaje en la resistencia "shunt")

$$V_o = IR(1 + 2R_f/R_1)$$

A continuación presentamos un cálculo teórico de los valores de las resistencias utilizadas para un circuito que maneja una corriente de 30 amperios de una planta prototipo, con varias celdas de electrodeposición conectadas en serie.

Si la resistencia "shunt" es de 0.01 ohmio y de 10 watt tenemos:

$$V_o = I(0.01)(1 + 2R_f/R_1)$$

Entonces:

$$V_o = 30(0.01)(1 + 2R_f/R_1)$$

Si asumimos que a esta corriente el operacional se satura tenemos que:

$$V_o = 13 \text{ VOLTIOS}$$

$$13 = 0.3(1 + 2R_f/R_1)$$

$$43.3 = (1 + 2R_f/R_1)$$

$$42.3 = 2R_f/R_1$$

$$R_f/R_1 = 21.18$$

Lo que significa que este circuito sensa una corriente de 30 amperios, y los valores adecuados de

con este valor obtenemos la saturación del operacional la ecuación de salida se transforma en:

$$13 = 0.3(R_F/R_I)$$

$$R_F/R_I = 43.4$$

De cualquiera de estas 2 maneras se puede realizar el amplificador diferencial para el sensado de la corriente de la celda electrolítica.

### a.1-) CIRCUITO AMPLIFICADOR LOGARITMICO

La figura que se muestra a continuación es el diagrama de un amplificador logaritmico, el cual consta de 2 entradas de señal que son:

"V<sub>1</sub>" es la entrada de la señal proveniente del amplificador diferencial, por lo tanto V<sub>1</sub> = V<sub>o</sub>.

"V<sub>2</sub>" es un valor de voltaje de referencia, fijado de acuerdo a los parámetros del circuito .

Si asumimos que R<sub>1</sub>=R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub>=R<sub>4</sub>, R<sub>5</sub>=R<sub>6</sub>, R<sub>7</sub>=R<sub>10</sub>, R<sub>11</sub>=R<sub>12</sub>, y R<sub>13</sub>=R<sub>14</sub> la función de transferencia del circuito es:

$$V_o = \frac{KTR_{13}R_{14}}{q(R_{16} + R_7)R_{11}} \ln \left( \frac{V_1/R_7}{V_2/R_5} \right)$$

Si R<sub>7</sub>=R<sub>5</sub> tenemos:

$$V_o = \frac{KTR_{13}R_{14}}{q(R_{16} + R_7)R_{11}} \ln (V_1/V_2)$$

En donde :

K = La constante de Boltzmann = 1.380 \* 10<sup>-23</sup> J/K<sup>o</sup>



$q$  = Es la carga del electrón =  $1.60 * 10^{-19} \text{C}$

$T$  = Temperaturas en grados Kelvin ,

Y donde  $R_T$  es una resistencia de coeficiente lineal positivo de temperatura (Resistor de silicio), la cual es usada para cancelar el efecto de la temperatura " $T$ " sobre la salida " $V_o$ ".

#### DESCRIPCION DEL CIRCUITO

El circuito consta de 2 entradas de voltaje " $V_1$ " , " $V_2$ ", además de las resistencias  $R_1$ - $R_4$  que sirven para cancelar las resistencias de abultamiento de los transistores " $Q_1$ ", Y " $Q_2$ ". Los resistores  $R_7$  Y  $R_8$  determinan la ganancia del amplificador logarítmico, al mismo tiempo que:

Los resistores  $R_9$  Y  $R_{10}$  sirven para compensación de realimentación.

Los resistores del  $R_{11}$ - $R_{14}$  determinan la ganancia del amplificador sumador diferencial.

Los resistores  $R_{15}$  Y  $R_{16}$  determinan la ganancia del amplificador compensador de temperatura. Y los resistores del  $R_{17}$  -  $R_{20}$ , son para ajustar el offset de " $A_1$ ", Y " $A_2$ " y llevar  $V_o = 0$  voltios cuando no existen voltajes a la entrada del amplificador.

$R_T$  --> Resistor de coeficiente de temperatura positivo.

"Q<sub>1</sub>" Y "Q<sub>2</sub>" -->Transistores que proveen las características logarítmicas del circuito.

"A<sub>1</sub>" Y "A<sub>2</sub>" -->Son porciones bien definidas del amplificador diferencial logarítmico.

"A<sub>3</sub>" -->Amplificador sumador diferencial.

"C<sub>1</sub>" Y "C<sub>2</sub>" -->Son capacitores para obtener una realimentación estabilizadora.

"A<sub>4</sub>" -->Amplificador compensador de temperatura.

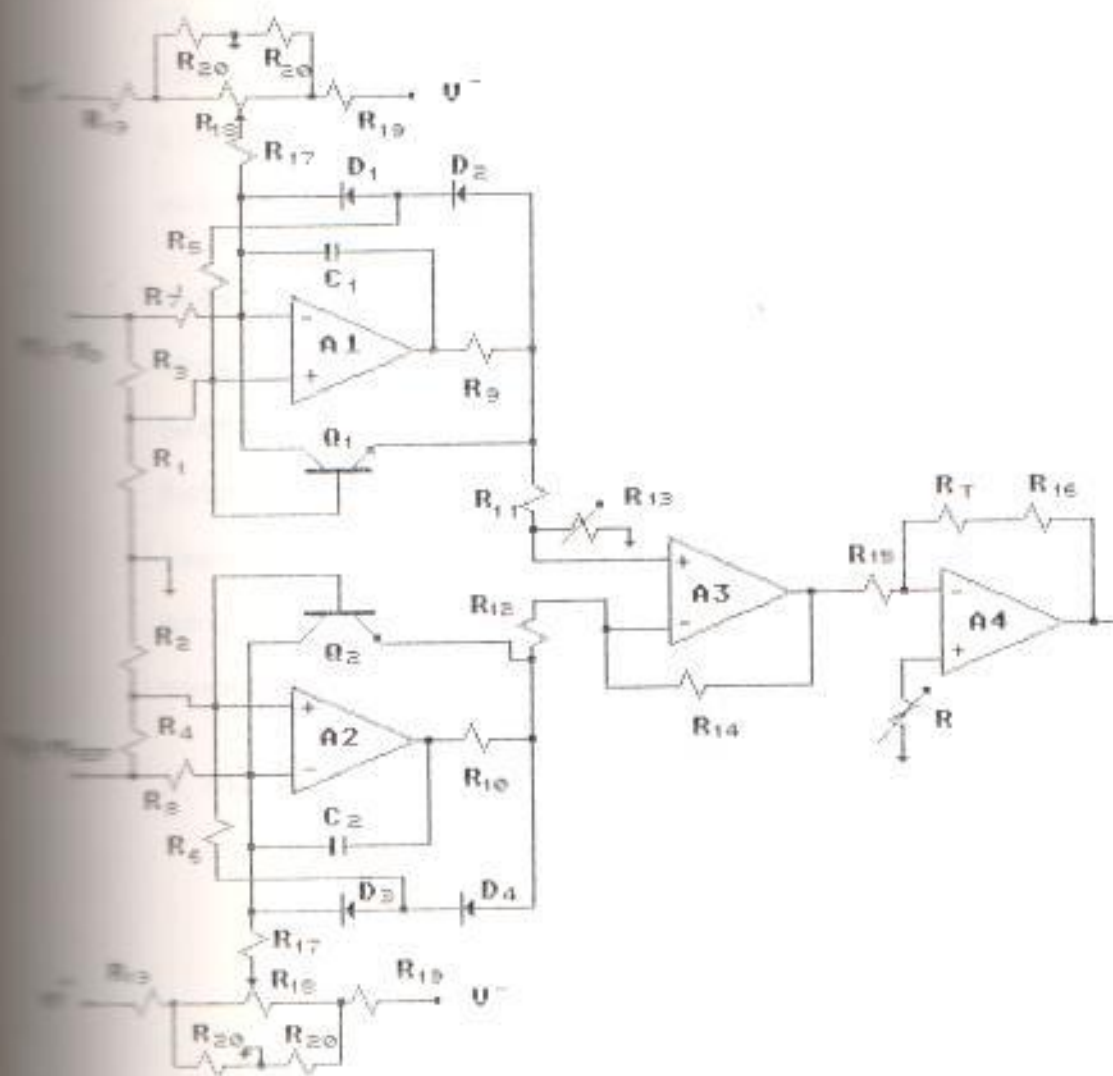


FIGURA # 31

CIRCUITO SENSOR DE VOLTAJE ANODICO Y CATODICO

El circuito utilizado para sensor voltaje anódico y catódico, se compone de amplificadores en configuración de instrumentación; y de amplificadores como seguidores de emisor.

La diferencia de potencial entre el cátodo, ánodo y el electrodo de referencia de calomel es introducido a

un amplificador de instrumentación, conformado con los amplificadores "La 324", y con el "TL084ACN". El último de estos contiene una gran impedancia de entrada.

Para que la impedancia entre los electrodos y el amplificador diferencial sea acoplada; se coloca unos **buffer** a cada entrada del amplificador diferencial. Estos seguidores de emisor (**buffer**) elevan la impedancia de entrada del circuito, para que se acoplen principalmente con la alta impedancia que presenta el electrodo de referencia de calomel.

A continuación se muestra el esquema de este circuito:

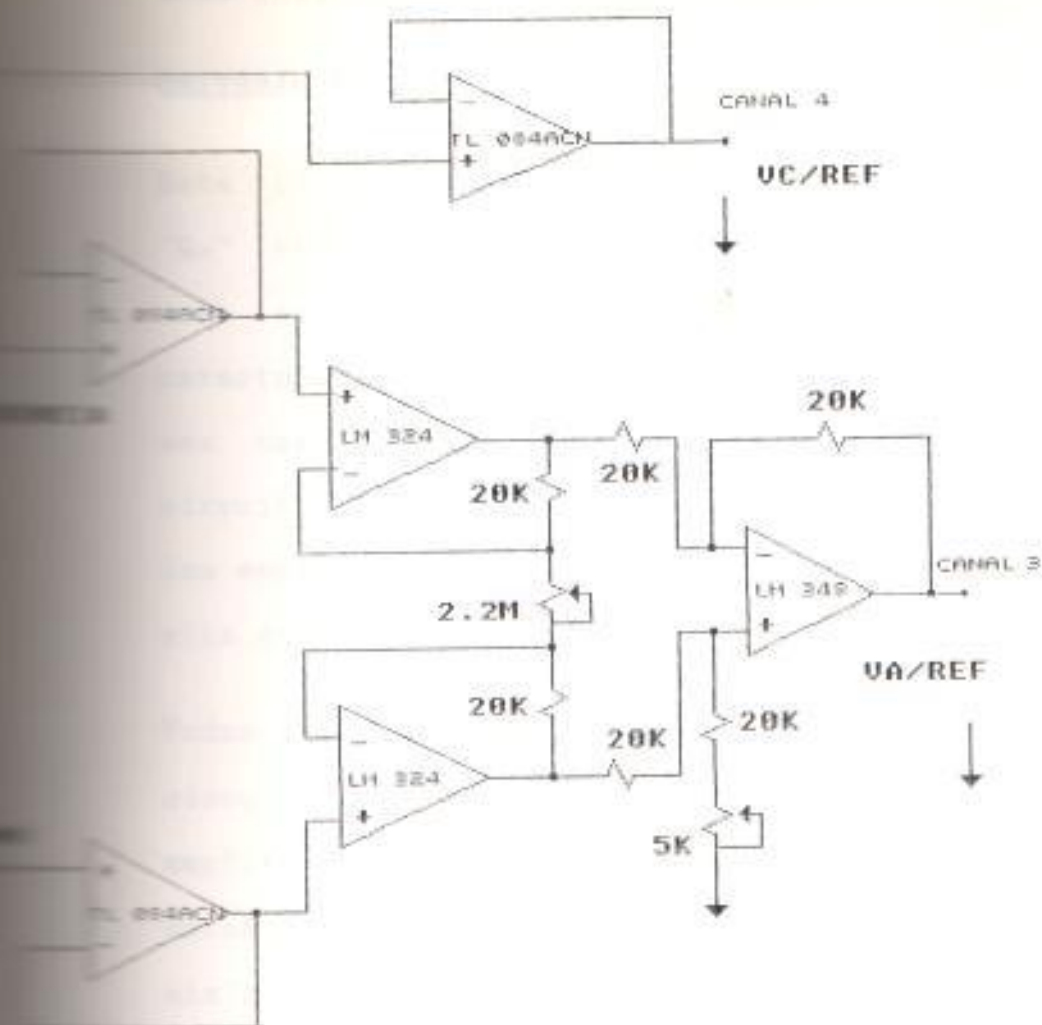


FIGURA # 32

CRITERIOS DE DISEÑO (DE LOS AMPLIFICADORES)

Para el diseño de los amplificadores diferenciales dentro del sensor de corriente, se calcula primero los parámetros (resistencias) como en los dos ejemplos anteriores; por consiguiente el primer bloque amplificador de dicho sensor fue ya analizado, y nos dedicaremos al criterio de diseño del segundo bloque amplificador (amplificador logarítmico), el



cual analizaremos a renglón siguiente.

### CRITERIO DE DISEÑO PARA EL AMPLIFICADOR LOGARITMICO.

Este circuito requiere que los transistores "Q<sub>1</sub>" y "Q<sub>2</sub>" estén empaquetados en un circuito integrado y sean apareados, es decir que posean las mismas características. Los amplificadores "A<sub>1</sub>" y "A<sub>2</sub>" deben ser también apareados y encapsulado en un mismo circuito integrado; además es posible requerir que los amplificadores "A<sub>1</sub>" y "A<sub>2</sub>" sean operacionales de alta calidad.

Todas estas consideraciones se llevarán a cabo con el circuito operacional "TL084ACN", que es un cuádruple amplificador de alta calidad y alta impedancia de entrada; y es por sí solo un gran bloque de aislación.

Los siguientes datos expuestos para el diseño, son obtenidos en base de la experimentación en el campo del amplificador logarítmico por muchas personas.

#### \* ECUACIONES DE DISEÑO

##### I -) Voltaje de salida

asumiendo  $R_1 = R_2$ ,  $R_3 = R_4$

$$R_5 = R_6, \quad R_7 = R_8, \quad R_9 = R_{10}, \quad \text{--->} \quad V_o = \frac{KTR_{11}R_{12}}{(R_{13} + R_r)R_{14}} \ln(V_1/V_2)$$

$$R_{11} = R_{12}, \quad R_{13} = R_{14}$$

##### II -) Error en la medida de V<sub>1</sub>

debido a un error en la  $\rightarrow \hat{V}_1 = \hat{V}_{101} + R_1 I_{01}$   
 entrada de "A<sub>1</sub>" (importante a niveles bajos)

2.2) Error en la medida de V<sub>2</sub>

debido a un error en la  $\rightarrow \hat{V}_2 = \hat{V}_{102} + R_2 I_{02}$   
 entrada de "A<sub>2</sub>" (importante a niveles bajos)

En donde  $\hat{V}_{101}$  y  $\hat{V}_{102}$ , son los cambios de voltaje en las entradas por offset en "A<sub>1</sub>" y "A<sub>2</sub>"; y donde  $I_{01}$ ,  $I_{02}$  son las corrientes de polarización de los operacionales "A<sub>1</sub>" y "A<sub>2</sub>". Ambos errores pueden ser cancelados por el potenciómetro "R<sub>10</sub>", si "A<sub>1</sub>" y "A<sub>2</sub>" tienen idénticos parámetros

2.3) Requerimiento entre R<sub>1</sub>, R<sub>3</sub> Y

R<sub>2</sub>, para cancelar el efecto  $\rightarrow RQ_1 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$   
 de abultamiento de "Q<sub>1</sub>"

2.4) Requerimiento entre R<sub>3</sub>, R<sub>4</sub> Y

R<sub>5</sub>, para cancelar el efecto  $\rightarrow RQ_2 = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}$   
 de abultamiento de "Q<sub>2</sub>"

2.5) Valores de los resistores

R<sub>1</sub> Y R<sub>2</sub>  $\rightarrow R_1 = R_2 \sim 10 \text{ OHMIOS}$

2.6) R<sub>3</sub>  $\rightarrow R_3 = \frac{R_1 R_2}{RQ_1(\text{MIN})} - R_1$

2.7) R<sub>4</sub>  $\rightarrow R_4 = \frac{R_3 R_5}{RQ_2(\text{MIN})} - R_3$

2.8) R<sub>5</sub>, R<sub>6</sub>  $\rightarrow R_5 = R_6 = 10K \text{ (OHMIOS)}$

10-1)  $R_7, R_8 \quad \text{-----} \rightarrow R_7 = R_8 = \frac{V_{I01}/\beta T}{I_{01}/T}$

10-2)  $R_9, R_{10} \text{-----} \rightarrow R_9 = R_{10} = \frac{(KT/q) \ln(V_1/V_2)_{MAX}}{(V_{1MAX}/RT) - [KT \ln(V_1/V_2)_{MAX}/qR_{11}]}$

10-3)  $R_{11}, R_{12} \quad \text{-----} \rightarrow R_{11} = R_{12} = 10K \text{ (OHMIOS)}$

10-4)  $R_{13} = R_{14} \text{-----} \rightarrow R_{13} = R_{14} = R_{11} * \left[ \frac{qV_{01MAX}}{KT \ln(V_1/V_2)_{MAX}} \right]^{1/2}$

10-5)  $R_{15} \quad \text{-----} \rightarrow R_{15} = \beta T * \left[ \frac{qV_{01MAX}}{KT \ln(V_1/V_2)_{MAX}} \right]^{1/2}$

Donde "β" es la pendiente de la característica de "E<sub>r</sub>" como función de la temperatura.

10-6)  $R_{16} = +A$

Donde "A" es la resistencia aparente de "R<sub>r</sub>" a 0° Kelvin.

10-7)  $R_{17} \geq 10R_7$

10-8)  $R_{18} \geq R_{17}/10$

10-9)  $R_{19} \quad \text{-----} \rightarrow R_{19} = \left[ \frac{V^{(+)} R_{20}}{100 * V_{I01MAX}} \right]$

10-10)  $R_{20} \leq R_{19}/100$

10-11) Resistencia con coeficiente de temperatura positivo.

$R_r = A + \beta T$

"R<sub>r</sub>"

10-12) Valores de los capacitores

"C<sub>1</sub>" y "C<sub>2</sub>"  $C_1 = C_2 = \frac{1}{3.141 * f_u * R_7}$

Donde "f<sub>u</sub>" es la frecuencia de lazo abierto, y ganancia unitaria de "A<sub>1</sub>" y "A<sub>2</sub>"

Resistencia de abultamiento

de "Q<sub>1</sub>"

$$R_{G1} = \frac{KTR_Z}{qV_1\beta}$$

Resistencia de abultamiento

de "Q<sub>2</sub>"

$$R_{G2} = \frac{KTR_M}{qV_2\beta}$$

A continuación se muestra el esquema completo del circuito sensor de corriente para las celdas electrolíticas de una planta prototipo.

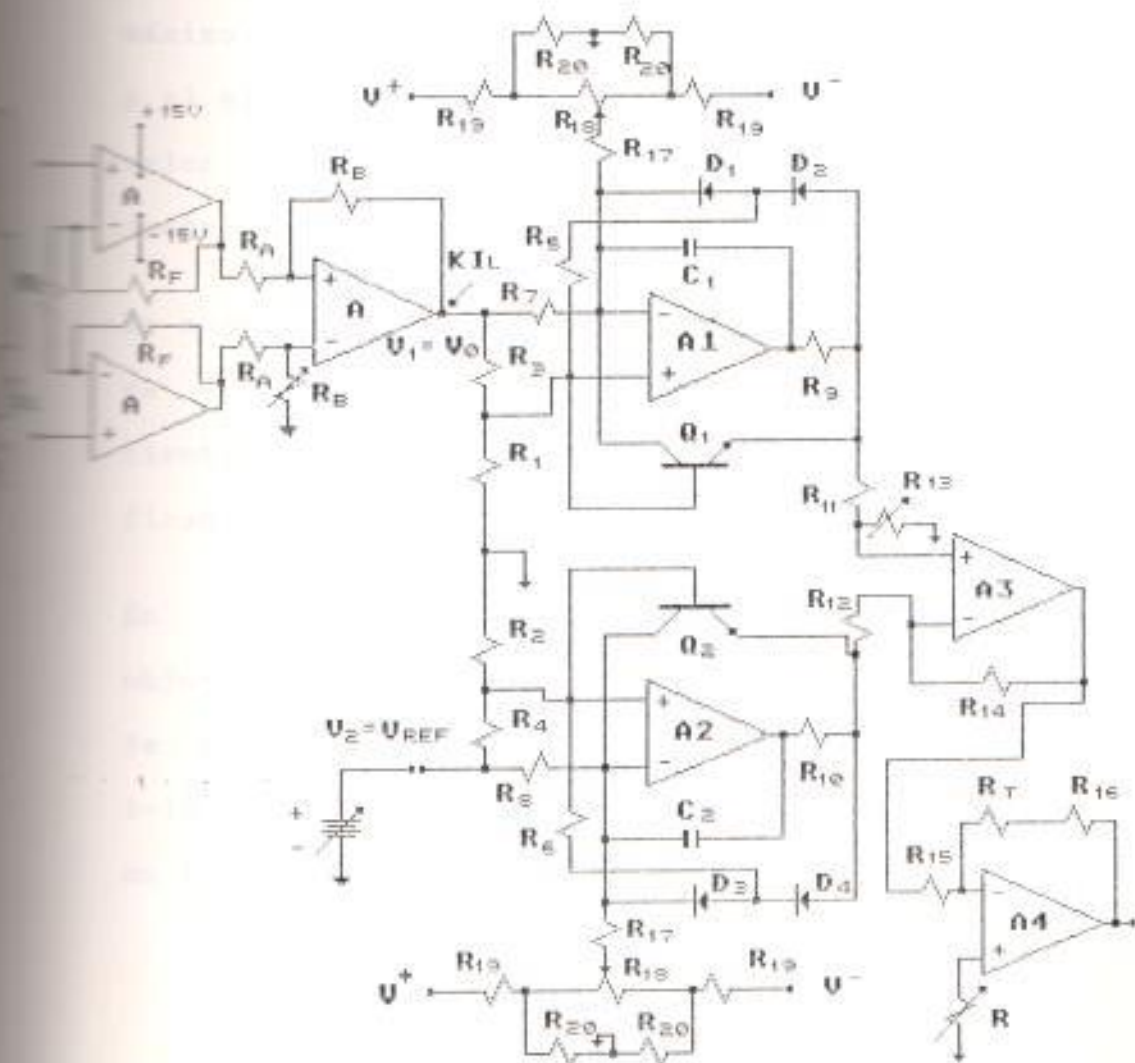


FIGURA # 33

## CRITERIO DE DISEÑO DEL SENSOR DE VOLTAJE DE LA

### CELDA

El sensor de voltaje consta de un amplificador de instrumentación para obtener la diferencia de voltaje, además de acopladores de impedancia constituidos por buffers a las entradas del amplificador de instrumentación. El diseño de este circuito se basa; en el criterio de fijar la ganancia de acuerdo al máximo voltaje obtenido entre el electrodo examinado y el electrodo de referencia; asumiendo que en este valor máximo se satura la salida del amplificador de instrumentación.

En nuestro caso práctico, debido a que la diferencia de voltaje entre los electrodos de medida era suficientemente grande, se escogió la ganancia del amplificador como unitaria.

En la figura # 32 se muestra el amplificador en objeto; en el puede observarse dos trimmers; uno para la ganancia del amplificador la cual puede variar de 1-10, y el otro trimmer para disminuir el offset en su salida.



CIRCUITOS DE CONTROL DIGITAL: SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS (DIAGRAMA DE BLOQUES), CONVERTIDOR ANALOGICO-DIGITAL, INTERFASE DE ENTRADA DE DATOS, INTERFASE DE SALIDA DE DATOS, ETAPA VISUALIZADORA DE DATOS.

#### SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS:

Este sistema como su nombre lo indica se utiliza para transmitir, recibir, y procesar los datos provenientes de distintos tipos de sensores; hacia un computador central que controla los distintos procesos. Según el computador escogido, y del modo para transmisión de los datos; se realiza las interfases de entrada y salida de dicho sistema.

El computador utilizado en nuestro estudio para la adquisición y control de los datos es el TRS - 80 "color computer", el cual se escogió debido a que se tenía a la mano una mayor información en su configuración, de su microprocesador "6809", y de los integrados de E/S de datos que se utilizan para la realización de las interfases. El sistema de adquisición de datos, está configurado en el siguiente diagrama de bloques:

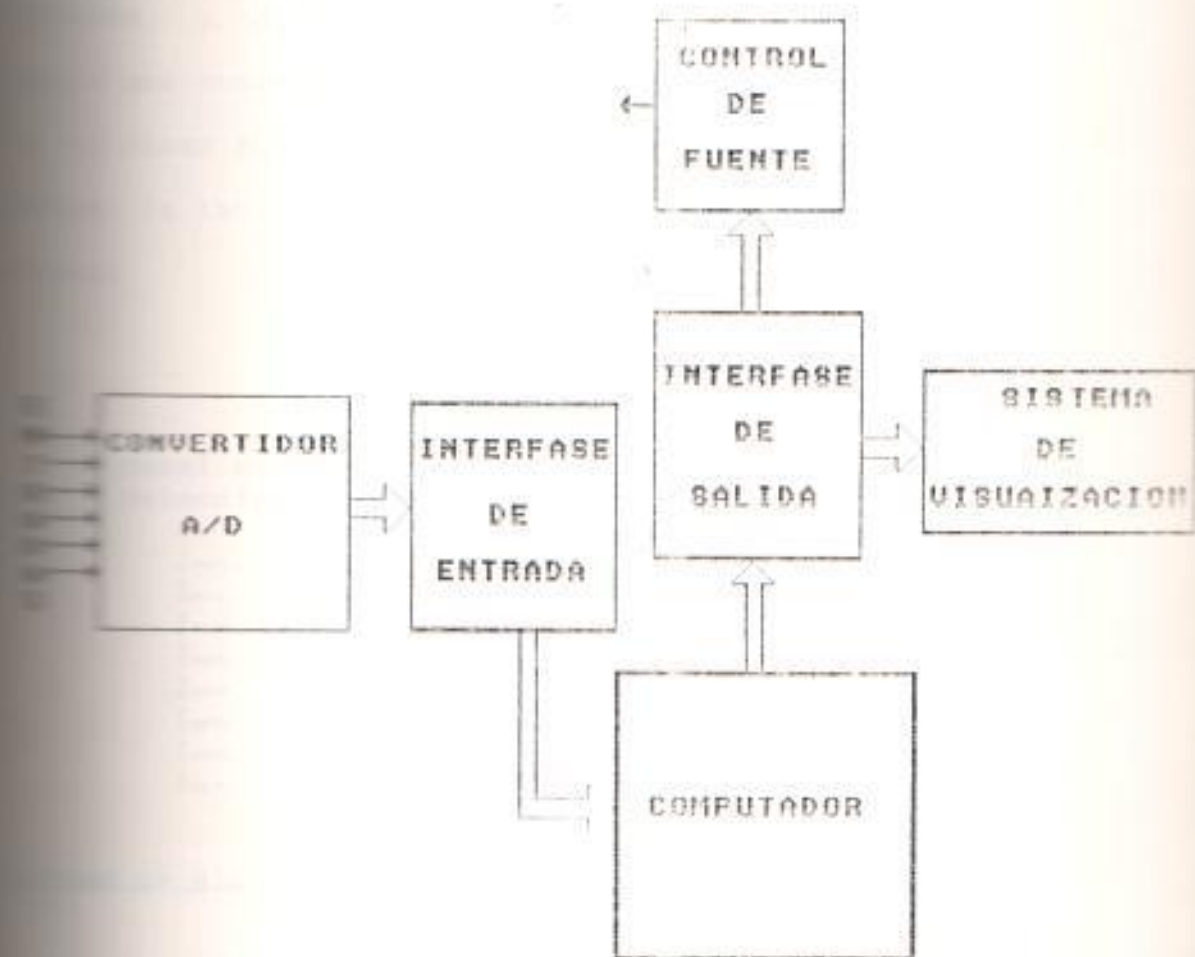


FIGURA # 34

### 4.2.2 CONVERTIDOR ANALOGICO-DIGITAL

Este integrado se encarga de convertir la señales analógicas provenientes de los amplificadores, en digitales para luego ser introducidas y procesadas por el computador. El convertidor utilizado en nuestro sistema es el "ADC0808", el cual es un convertidor de 8 bits, y de 8 canales. Dicho convertidor consta de 8 entradas de datos para ser convertidas en

digitales, y de un multiplexor que selecciona la señal a ser convertida de acuerdo al código escogido por el mismo multiplexor. A continuación se muestra la tabla que indica la forma de seleccionar canal.

TABLA # 2

canal analógico seleccionado	dirección		
	C	B	A
IN0	L	L	L
IN1	L	L	H
IN2	L	H	L
IN3	L	H	H
IN4	H	L	L
IN5	H	L	H
IN6	H	H	L
IN7	H	H	H

Diagrama de pines del integrado "ADC 0808"

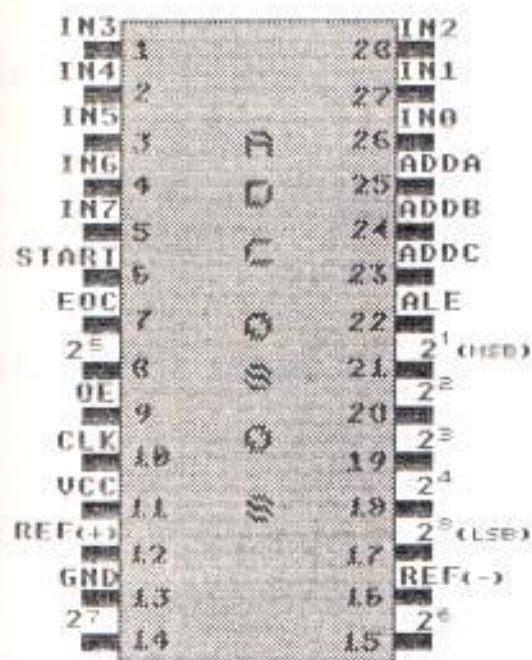


FIGURA # 35

### Descripción de los pines del "ADC 0808".

<u>Nombre del pin</u>	<u>Descripcion</u>	<u>Tipo</u>
$I_{IN0} - I_{IN7}$	Entradas analógicas	Entradas
$ADD_A, ADD_B, ADD_C$	Señales de selección del canal	Entradas
$Ref^+, GND, Ref^-$	Voltajes de referencia con los que se compara las entradas	Entradas
$V_{CC}$	Voltaje de polarización	Entrada
$GND$	Tierra	Entrada
CLK	Reloj del convertidor	Entrada
OE	Entrada de habilitación del buffer de salidas	Entrada
START	Señal de inicio de conversión	Entrada
EOC	Señal de fin de conversión	Salida
$2^7 - 2^0$	Palabra digital de 8 bits	Salida

### DIAGRAMA DE TIEMPO DEL CONVERTIDOR.

El tiempo de conversión toma alrededor de 8 ciclos de reloj, luego de haberse efectuado el pulso de inicio de conversión (START). El reloj con el que trabaja el convertidor proviene del microprocesador y es de aproximadamente 890 KHZ, por lo que el tiempo de

conversión oscila entre 100 - 110 useg.  
 El convertidor ADC 0808 se resetea con el flanco de subida del start of conversion, y comienza la conversión con el flanco de caída.

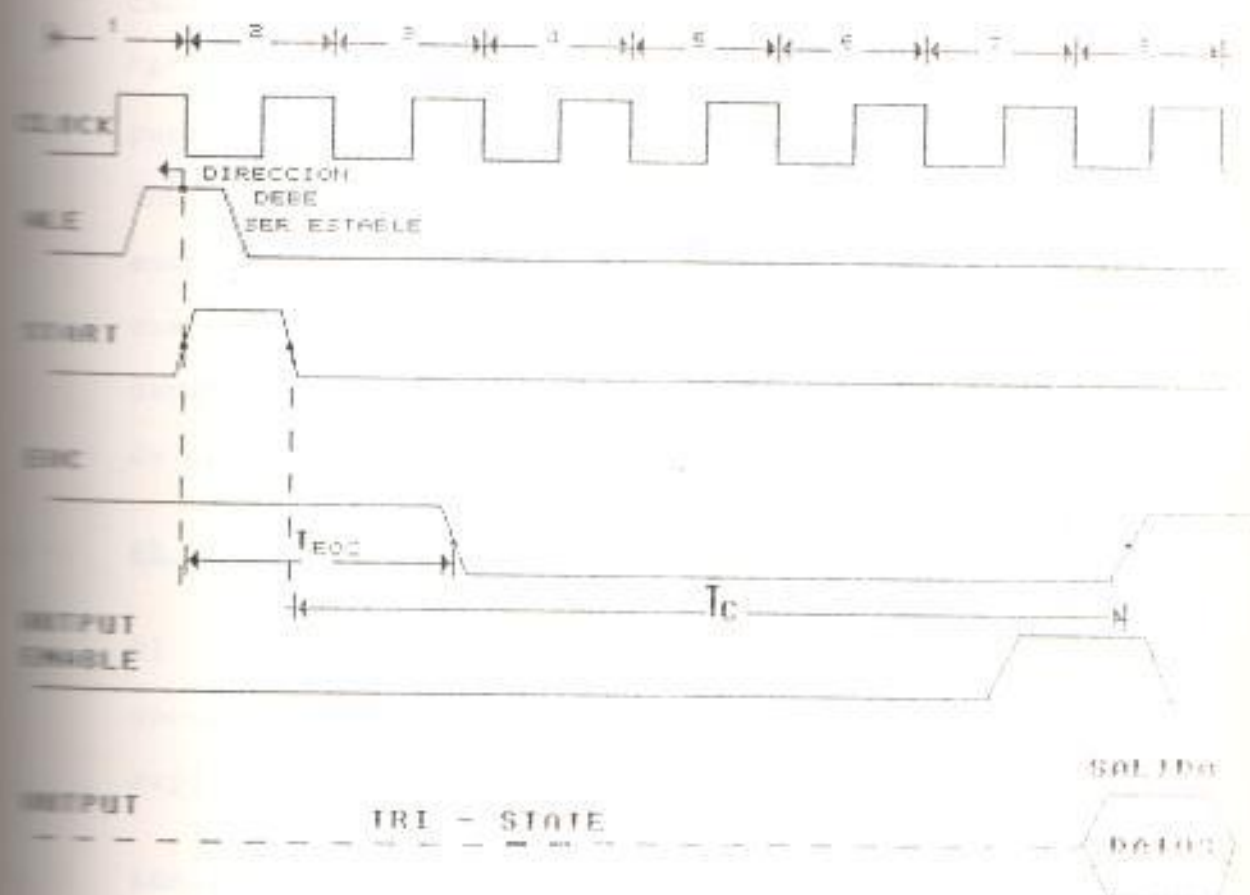


FIGURA # 36

### 4.3.3 INTERFASE DE ENTRADA DE DATOS: CIRCUITOS: DESCRIPCION

La interfase de entrada de datos consta de un "PIA" "6821", la cual sirve para conectar o comunicar el sistema exterior en este caso el convertidor A/D con



el computador TRS 80 ; esta comunicación se logra con la ayuda buffer unidireccionales, bidireccionales , chips de selección y de temporización.

El "6821" es un dispositivo de E/S que provee 16 pines para E/S configurado en 2 puertas de 8 bits cada una. Estas puertas son conocidas como puertas "A" y "B"; Y cada uno de los bits que conforman estas puertas pueden ser programados como entrada o salida individualmente. Junto con este par de puertas están asociadas un par de señales de control, una de las cuales funciona solo como entrada y la otra como E/S; dependiendo de la programación del "pia" y del modo de operación al introducir los datos.

### EL MC 6821 "(PIA)"

El 6821 consta de un bus de datos bidireccional denominados  $D_0-D_7$  y de registros internos que los explicaremos en el siguiente párrafo.

### registros de control( $CR_A$ O $CR_B$ )

El registro  $CR_A$  en el puerto "A", y el  $CR_B$  en el puerto "B", permiten al microprocesador controlar las señales  $CA_1$  Y  $CA_0$  en el puerto "A", y  $CB_1$ ,  $CB_0$  en el puerto "B"; además de permitir al microprocesador habilitar las líneas de interrupción y monitorear el estado de las banderas de interrupción.

### Registro de dirección de datos (DDRA Y DDRB)

Estos registros son direccionados a través del bit # 7 de los registros de control, y nos sirve para programar cada bit del puerto como entrada o como salida indistintamente. Estos registros constan de una palabra de 8 bits en la cual un "1" en uno de sus bits lo configura como salida, y un "0" como entrada; los registros de dirección de datos solo pueden ser escritos.

A continuación mostramos un ejemplo en la escritura de un registro de dirección de datos.

La palabra 01100101 se configura así:

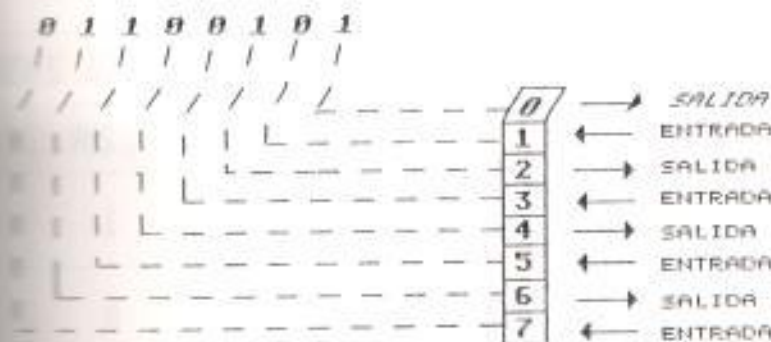


FIGURA # 37

### Buffer de E/S de datos

Este buffer de buffer latch o registros que mantiene los datos, ya sean leídos o escritos por el microprocesador. En caso que se lean datos del buffer de E/S desde el microprocesador, se está introduciendo los

datos desde el puerto de I/O hacia el microprocesador; y al escribirse hacia el buffer de E/S se sacan los datos desde el "CPU" hacia el puerto I/O.

Existen 8 localizaciones direccionables dentro de un "PTA". Las cuales pueden ser direccionadas solo a partir de 2 señales "RS<sub>0</sub>" y "RS<sub>1</sub>" desde el microprocesador; por lo tanto solo 4 direcciones pueden ser seleccionadas desde el "CPU".

La tabla siguiente muestra la manera en que el "MC6821" usa 4 direcciones para acceder 8 localizaciones.

TABLA # 3

LINEAS DE SELECCION			LOCALIZACION DIRECCIONADA																
RS <sub>1</sub>	RS <sub>0</sub>	X																	
0	1	↓	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>7</td><td>6</td><td>5</td><td>4</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td>0</td> </tr> <tr> <td>...</td><td>...</td><td>...</td><td>...</td><td>...</td><td>...</td><td>X</td><td>...</td> </tr> </table> REGISTRO DE CONTROL "PTO A"	7	6	5	4	3	2	1	0	...	...	...	...	...	...	X	...
7	6	5	4	3	2	1	0												
...	...	...	...	...	...	X	...												
0	0	0	REGISTRO DE DIRECCION DE DATOS "PTO A" I/O																
0	0	1	I/O PUERTO "A" BUFFER DE DATOS																
1	1	↓	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>7</td><td>6</td><td>5</td><td>4</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td>0</td> </tr> <tr> <td>...</td><td>...</td><td>...</td><td>...</td><td>...</td><td>...</td><td>X</td><td>...</td> </tr> </table> REGISTRO DE CONTROL "PTO B"	7	6	5	4	3	2	1	0	...	...	...	...	...	...	X	...
7	6	5	4	3	2	1	0												
...	...	...	...	...	...	X	...												
1	0	0	REGISTRO DE DIRECCION DE DATOS "PTO B" I/O																
1	0	1	I/O PUERTO "B" BUFFER DE DATOS																

2-2) Modos de operación de entrada de datos

El proceso de introducción de datos desde el "pia" se realiza de 2 maneras:

2-2) Por interrupt handshaking ( o chequeo por interrupción)

2-2) Por programmed handshaking ( o chequeo programado).

Escoger uno de los 2 modos, depende de la programación de los bits 5,4,y 3 del registro de control. Así el registro de control del "PIA" consta de :

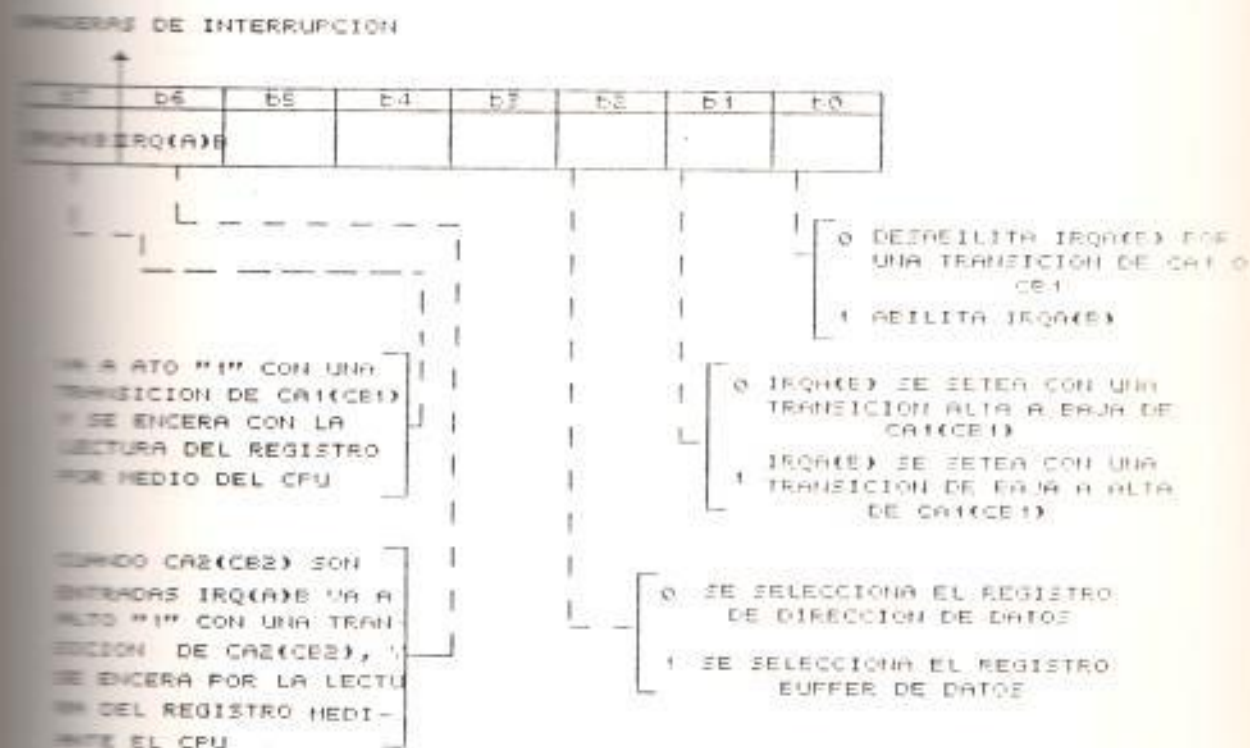


FIGURA # 38



Para el interrupt handshaking los bits  $b_7, b_4, b_3$  son correspondientemente 1,0,0.

Para el programable handshaking los bits  $b_7, b_4, b_3$  son correspondientemente 1,0,1.

En ambos casos utilizando el puerto "A" DE E/S. Para nuestro estudio se utilizó el modo interrupt handshaking para la entrada de datos al "CPU", por lo tanto la palabra colocada en el registro de control del puerto "A" debe ser:

$b_7$	$b_6$	$b_5$	$b_4$	$b_3$	$b_2$	$b_1$	$b_0$
X	X	1	0	0	0	1	1

SOLO LEIDOS	PUERTO DE ENTRADA O SALIDA

FIGURA # 39

Este modo de operación para la entrada datos se muestra a continuación.

Entrada por interrupt handshaking

$b_7$	$b_4$	$b_3$
1	0	0



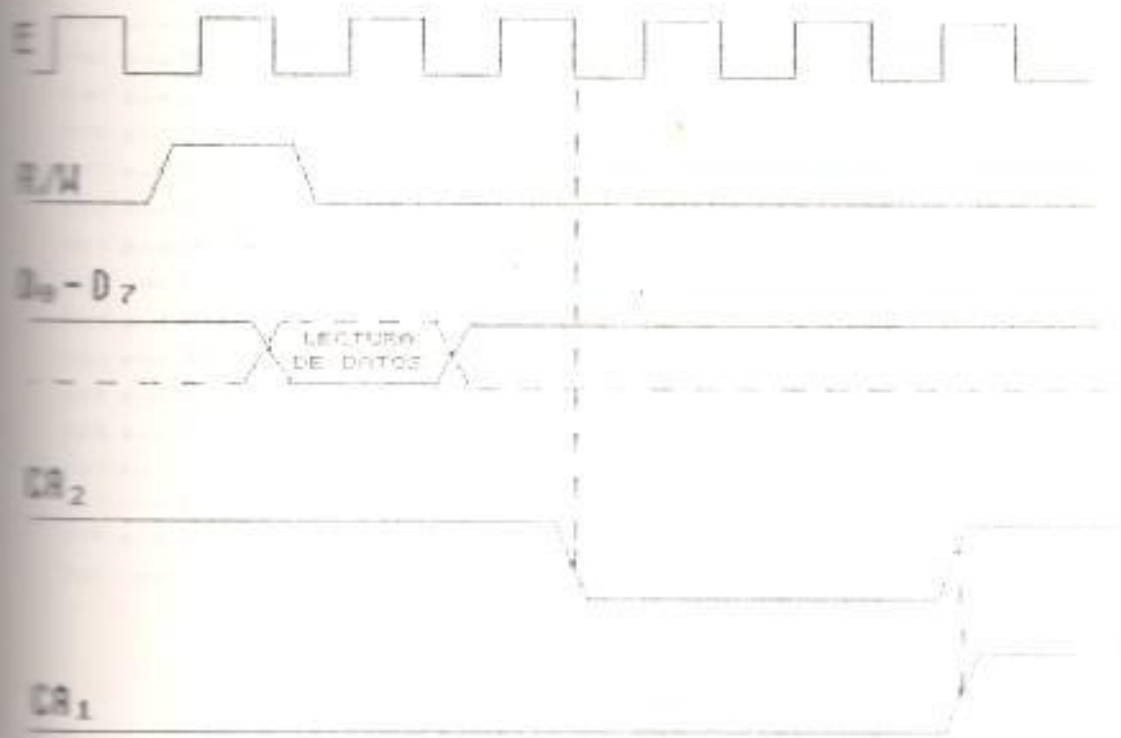


FIGURA # 40

20-9 Diagrama de pines del integrado "MC6821"

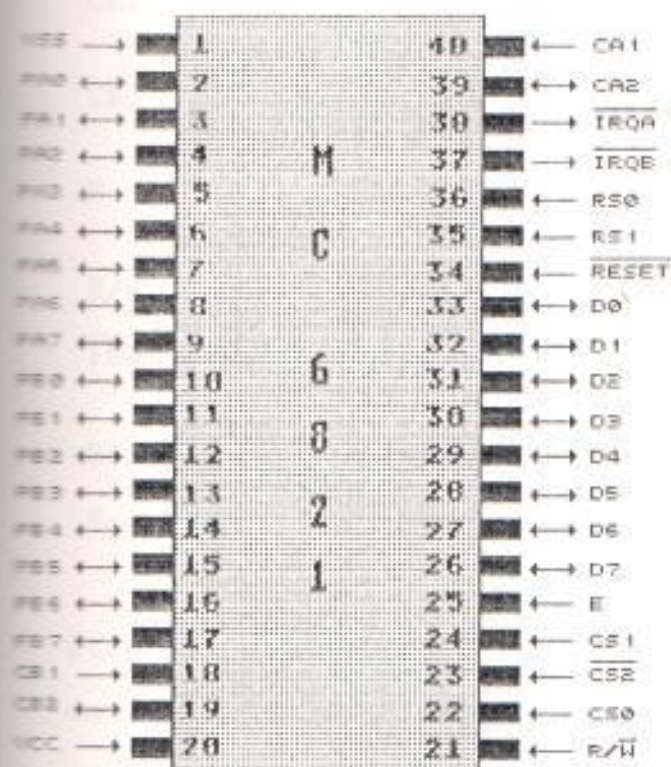


FIGURA # 41

Asignación de pines del "MC6821"

Nombre del pin	Descripción	Tipo
D0-D7	bus de datos para "CPU"	bidireccional tri-state
PA0-PA7	periférico bus de datos "pto A"	entrada-salida
PB0-PB7	periférico bus de datos "pto B"	entrada-salida tri-state
CS0, CS1, CS2	chip select	entrada
RS0, RS1	registro de selección	entrada
IRQA	interrupción del pto "A"	entrada
IRQB	control periférico del pto "A"	entrada-salida

CB <sub>1</sub>	interrupción del pto "B"	entrada
CB <sub>2</sub>	control periférico del pto "B"	entrada-salida
E	reloj de sincronismo	entrada
R/ $\bar{W}$	control de lect/escrt	entrada
$\overline{IRQ_A}, \overline{IRQ_B}$	requerimiento de interrupción	salida
RESET	reseteo, reiniciación	entrada
V <sub>cc</sub> , V <sub>ee</sub>	power y ground	

Otro dispositivo que compone la interfase de entrada de datos es el timer, el cual nos da el tiempo de muestreo entre una señal de entrada y otra; según los requerimientos del procesamiento de datos y su control.

### 5-) El timer "MC6840"

El "MC6840" es un integrado con 3 distintos contadores/timers, consistente cada uno de ellos con un latch de datos de 16 bits y un contador también de 16 bits ; además posee una interrupción de alerta al procesador o dispositivos exteriores para indicar que una función particular ha concluido.

En una aplicación típica el "timer" debe ser cargado por el almacenamiento de 2 bytes de datos dentro del counter latch, luego del cual este dato es transferido al contador para iniciar el ciclo de conteo

siempre y cuando el contador sea abilitado.

El registro de control de estos timers/contadores se compone de la siguiente manera:

Donde X = 1,2,3 son los timers respectivos que componen del 8840

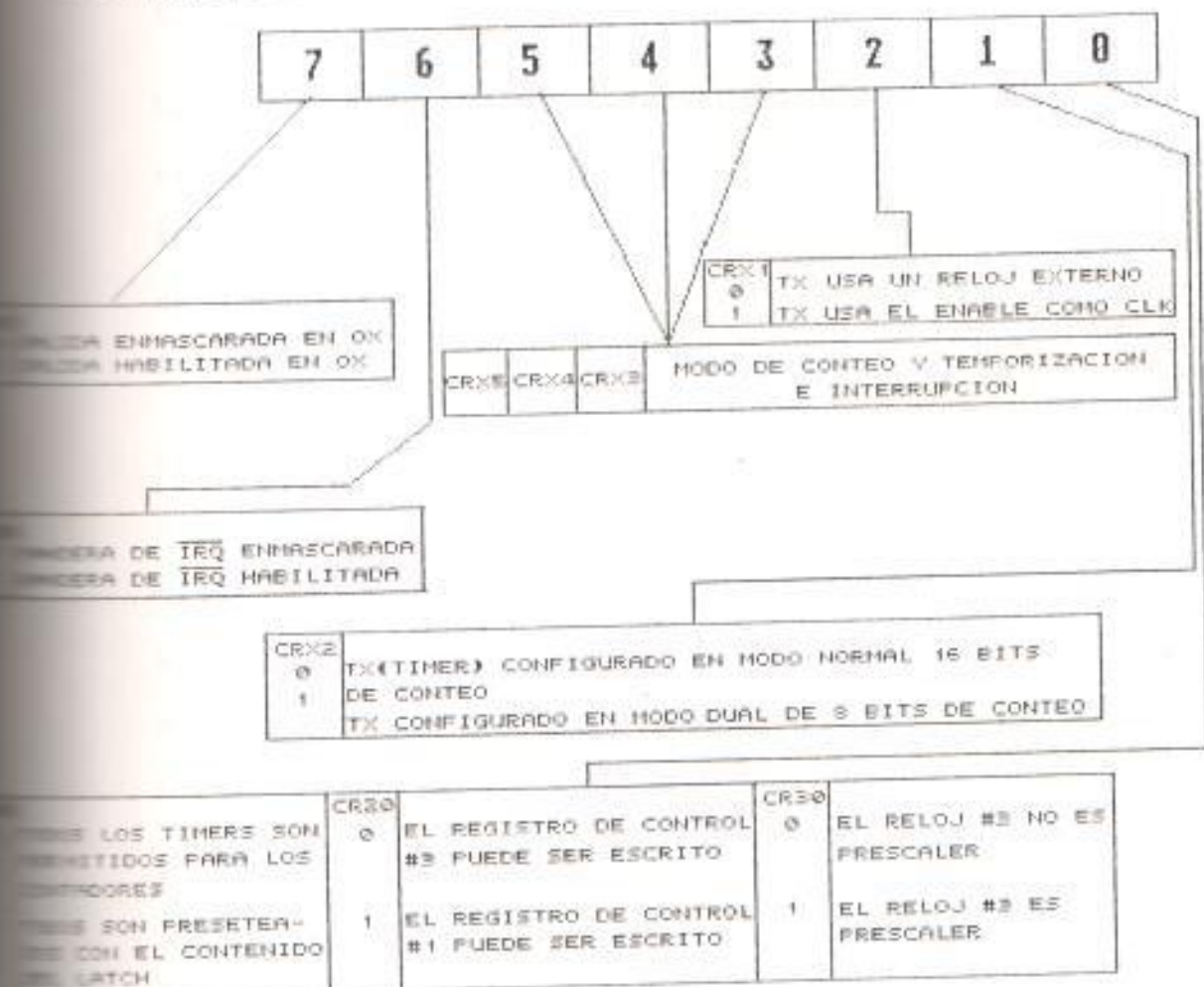


FIGURA # 42

Es el bit menos significativo del registro de control

#1, y es usado como un bit de reseteo interno.

Es el bit menos significativo del registro de control



#2, y es usado como un bit adicional de direccionamiento para los registros de control #1, y #3.

- Es el bit menos significativo del registro de control #3, y es usado como un bit selector para el modo de operación -8 prescaler, que es disponible solo en el timer #3.

Los tres últimos bits descritos anteriormente de cada registro de control, son los únicos que realizan funciones diferentes, los bits restantes 1-7 de cada uno de los registros de control realizan las mismas funciones como se mostró en la figura anterior.

Para la inicialización del ciclo de conteo, si el contador es abilitado el contador decrementa su cuenta con cada subsiguiente período de reloj que puede ser un reloj externo, o el enable (E) del microprocesador; hasta que alguna causa predefinida para la cuenta o la reinicia.

El timer es accesado por el "MPU" con las instrucciones "LOAD" y "STORE", de la misma manera que lo hace con un dispositivo de memoria. Además posee la línea  $R/\bar{W}$  como una línea adicional para seleccionar una entrada, y un bus de datos bidireccional ( $D_0-D_7$ ) que permite la comunicación o transferencia de datos entre "MPU" y el timer "PTM".

Conjuntamente con todo lo anterior este timer consta



de varios registros que los explicaremos a continuación:

### Registro de control

Cada timer dentro del "8840" consta de un registro de control, el cual es solo de escritura; de los 3 registros de control que posee el integrado solo el registro de control #2 tiene un espacio de dirección con ( $RS_0=1, RS_1=0, RS_2=0$ ), los otros 2 registros de control #1, y #3 comparten un mismo espacio direccionable seleccionados por ( $RS_0=0, RS_1=0, RS_2=0$ ).

En la siguiente tabla se muestra la selección de todos los registros existentes en el timer.

TABLA # 4

ENTRADAS DE SELECCIÓN DE REGISTROS			OPERACION	
$RS_2$	$RS_1$	$RS_0$	$R/\bar{W} = 0$	$R/\bar{W} = 1$
0	0	0	CR20=0 ESCRIBIR REGISTRO DE CONTROL #3 CR20=1 ESCRIBIR REGISTRO DE CONTROL #1	SIN OPERACION
0	0	1	ESCRIBIR REGISTRO DE CONTROL #2	LECTURA DEL REGISTRO DE ESTADO
0	1	0	ESCRIBIR EL MSB DEL REGISTRO BUFFER	LECTURA DEL CONTADOR DEL TIMER #1
0	1	1	ESCRIBIR EN EL LATCHES DEL TIMER #1	LECTURA DEL LSB DE EL REGISTRO BUFFER
1	0	0	ESCRIBIR EL MSB DEL REGISTRO BUFFER	LECTURA DEL CONTADOR DEL TIMER #2
1	0	1	ESCRIBIR EN EL LATCHES DEL TIMER #2	LECTURA DEL LSB DE EL REGISTRO BUFFER
1	1	0	ESCRIBIR EL MSB DEL REGISTRO BUFFER	LECTURA DEL CONTADOR DEL TIMER #3
1	1	1	ESCRIBIR EN EL LATCHES DEL TIMER #3	LECTURA DEL LSB DE EL REGISTRO BUFFER

## 2-) Registro de estado/bandera de interrupción.

El "MC6840" contiene un único registro de estado que contiene 4 banderas de interrupción, los otros 4 bits de este registro no son usados y tienen una lógica "0" cuando son leídos. Los bits "0", "1", "2" son asignados a los timers 1,2,3 respectivamente como un bit para la bandera de interrupción, mientras el bit "7" es una bandera de interrupción compuesta. Esta bandera es acertada a "1" si alguno de los bits individuales de las banderas de interrupción son acertadas, siempre y cuando el bit "6" de cada registro de control también lo esté, en consecuencia tendremos:

INT : Bandera de interrupción compuesta (bit 7)

I<sub>1</sub> : Bandera de interrupción timer #1

I<sub>2</sub> : Bandera de interrupción timer #2

I<sub>3</sub> : Bandera de interrupción timer #3

$$INT = I_1 * (CR_{1,c}) + I_2 * (CR_{2,c}) + I_3 * (CR_{3,c})$$

Una bandera de interrupción es encendida por el reseteo del timer; esto puede ser por un externo Reset = 0, o por el bit de reseteo interno (CR<sub>1,r</sub>) = 1 o también por la lectura del timer counter.

La secuencia READ STATUS y luego READ TIMER previene la pérdida de una interrupción; ya que con la lectura del registro de estado se verifica la exis-

tencia de una interrupción, y con la lectura del timer counter se la encera para una próxima vez.

En los siguientes párrafos presentamos la manera de inicialización y modos de operación del timer "MC6840"

### 2-1) Inicialización del counter latch

Cada timer consta de un contador de 16 bit direccionable, y de un latch del contador también de 16 bits. Los contadores son preseteados con el contenido de los latches y la inicialización de cada contador resulta de la transferencia del contenido de el latch hacia el contador.

El MC6840 posee un bus de datos de 8 bits y contadores de 16 bits, por lo tanto necesita de un registro temporal (MSB buffer registro). Este registro es sólo de escritura y atrapa el byte más significativo del dato; además este registro es direccionado por 3 direcciones diferentes, las cuales llegan al mismo buffer.

El dato del "MSB buffer" puede ser automáticamente transferido dentro del MSB (byte) del timer #"X" cuando se escribe (write) dentro del timer latch #"X". Esto puede ser visto como que el "MC6840" es diseñado para permitir la transferencia de 2 bytes de datos dentro del counter latch ,realizando primero la



transferencia del MSB; por lo tanto el orden de almacenamiento debe ser observado para asegurar una propia operación de atrape.

Con la familia de microprocesadores MC6800 se puede transferir los 16 bits requeridos por el "MC6840".

Una instrucción de almacenamiento con el registro "x" (index), resulta que el MSB del registro "X" sea transferido a la dirección seleccionada, para que luego el LSB del registro "X" sea escrito en la subsiguiente más alta dirección. Así tanto los registros índices como el puntero de pila pueden transferir el dato al counter latch mediante una simple instrucción.

#### 4-) Inicialización del contador.

La inicialización del contador es definido como la transferencia de datos desde el latch hacia el contador con el subsecuente enceramiento de las banderas individuales de interrupción asociada con cada contador.

La inicialización del contador ocurre cuando una condición reset es reconocida ya sea por (reset = 0, o  $CR_{10}$ ), como también ocurre dependiendo del modo que opere el timer con un comando de escritura (write) en el timer latch, o reconociendo una transición negativa en la entrada del gate.

### 3-2) Modos de operación del timer

Estos modos de operación se realizan por medio de los bits  $CR_{x3}$ ,  $CR_{x4}$ ,  $CR_{x5}$  de cada registro de control. Dichos modos de operación se dividen en:

#### a-) Síntesis de onda

#### b-) Medida de onda

En seguida mostraremos los modos de operación escogidos de acuerdo a los bits  $CR_{x3}$ ,  $CR_{x4}$ ,  $CR_{x5}$  en la tabla siguiente:

TABLA # 5

REGISTRO DE CONTROL			MODO DE OPERACION DEL TIMER	
CRX3	CRX4	CRX5		
0	X	0	CONTINUO	SÍNTESIS DE ONDA
0	X	1	SINGLE - SHOT	
1	0	X	COMPARACION DE FRECUENCIA	MEDIDA
1	1	X	COMPARACION POR ANCHO DE PULSO	

Unos de los modos de operación dentro del modo de síntesis de onda, es el modo continuo; dicha forma de operación del timer es muy usada para la producción de ondas cíclicas, tanto simétricas como de variable duty cycle.



Otro modo dentro del síntesis de onda es el single shot (pulso simple), que es de uso similar al continuo; sin embargo en este modo solo un pulso es generado, el cual puede ser programado en su ancho a satisfacción.

En el modo de operación de medida de onda se incluyen los modos de comparación por frecuencia, y comparación de ancho de pulso, los cuales son usados para medir anchos de pulsos cíclicos o simples respectivamente. El modo continuo es utilizado en nuestro estudio.

#### 3.1.-) Operación en modo continuo.

El modo continuo puede sintetizar una onda de forma continua con período proporcional al valor preseteado en el latch particular; los timers de este chips (PTM) pueden ser programados para operar en modo continuo escribiendo un "0" en los bits "3" y "5" del correspondiente registro de control. Si la salida es abilitada es decir el bit "7" = 1, una onda cuadrada o de variable duty cycle es generada de acuerdo al bit "2" del registro de control.

A continuación se muestra la tabla de operación de este modo.

TABLA # 6

MODO CONTINUO CRX3=0 ; CRX5=0			INICIALIZACION/FORMA DE ONDA DE SALIDA
REGISTRO DE CONTROL		INICIALIZACION DEL CONTADOR	SALIDA DE TIMER(OX) CRX7=1
CRX2	CRX4		
0	0	$\overline{G} \downarrow + W + R$	
0	1	$\overline{G} \downarrow + R$	
1	0	$\overline{G} \downarrow + W + R$	
1	1	$\overline{G} \downarrow + R$	

El modo de operación utilizado en nuestro estudio como se mencionó con anterioridad es el modo continuo con variable duty cycle como muestreador de eventos; este modo opera como sigue:

En el modo dual de 8 bits  $CR_{x2}=1$ , el "MSB" se decrementa una vez cada vez que la cuenta del "LSB+1" pasa a cero, luego que este valor se encera el "MSB" se cambia hasta que el "LSB" atrapa un nuevo contenido del latch, a continuación de esto el "MSB" se decrementa en "1". Si la salida es habilitada esta permanece en bajo durante y después que el "MSB" = "0" luego en el siguiente pulso de reloj la salida es alta y permanece alta hasta que tanto el "MSB" y

"LSB" se enceren ,ya que el nivel alto dura mientras el último bit del "LSB" no se encere. Al comenzar el siguiente pulso de reloj el timer out "T<sub>o</sub>" puede ocurrir , y la salida cae a nivel bajo.

A continuación daremos un ejemplo de como es la salida en base al dato programado en el latch del contador , en el modo continuo de variable duty cycle. Si almacenamos:

MSB = 2

LSB = 3

La expresión algebraica para el número de pulsos de reloj necesarios para que ocurra una salida es:

$$(MSB + 1)(LSB + 1) = \# \text{ de pulsos necesarios}$$

$$(2 + 1)(3 + 1) = 12 \text{ pulsos de reloj}$$

en nivel alto = LSB ---> 3 pulsos

en nivel bajo = MSB(LSB + 1) + 1 --> 2(3 + 1) + 1 = 9 pulsos

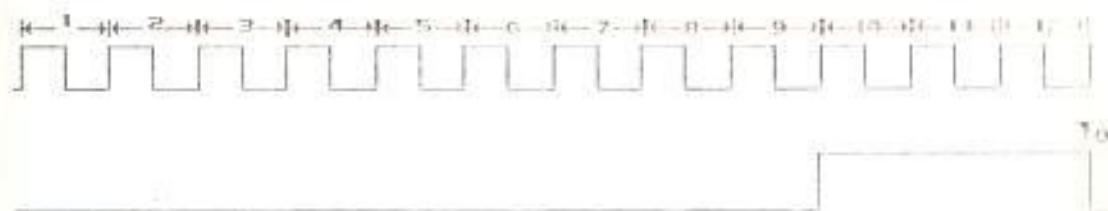


FIGURA # 43

Cuando el time out ocurre la bandera de interrupción

se setea.

5.-) Diagrama de pines del integrado "MC 6840"

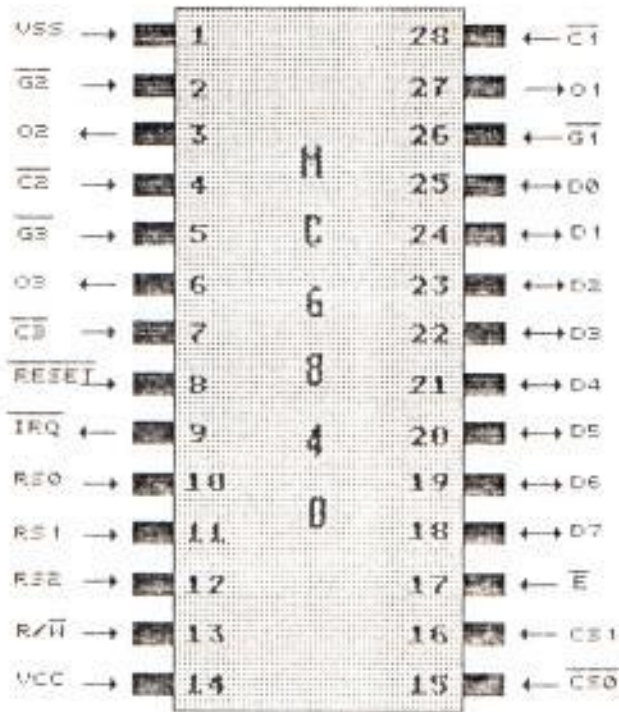


FIGURA # 44

6.-) Descripción de pines del "MC 6840"

Nombre del pin	Descripción	Tipo
D <sub>0</sub> - D <sub>7</sub>	bus de datos para el "cpu"	bidireccional tristate
CS <sub>0</sub> -CS <sub>1</sub>	líneas de activación del bus de datos	entrada
RS <sub>0</sub> -RS <sub>1</sub> -RS <sub>2</sub>	líneas de selección de registros	entrada
E	reloj de sincronización	entrada



$R/\overline{W}$	línea de control de lect/escrt	entrada
$\overline{IRQ}$	requerimiento de interrupción	salida
$\overline{RESET}$	reseteo de los timers	entrada
$\overline{G}_1-\overline{G}_2-\overline{G}_3$	señales de disparo de los timers	entrada
$O_1-O_2-O_3$	señales de salida de los timers	salida
$\overline{C}_1-\overline{C}_2-\overline{C}_3$	señales de reloj externas para C/u timers	entrada
$V_{cc} - V_{ss}$	power - ground	

#### 2-) DECODIFICADOR OCTAL- BINARIO (74LS148)

Este decodificador transforma 8 líneas de datos a 3 líneas en código binario; las cuales nos sirve para direccionar las entradas analógicas a ser convertidas en digitales por el convertidor A/D. En otras palabras este decodificador nos da la selección de la entrada analógica, en base al requerimiento del timer que da la orden de direccionamiento haciendo alta su salida y originando dicho código en un tiempo de muestreo prefijado.

A continuación mostramos la tabla de verdad del integrado.



TABLA # 7

INPUTS									OUTPUTS				
	0	1	2	3	4	5	6	7	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>0</sub>	G <sub>EN</sub>	E <sub>0</sub>
0	x	x	x	x	x	x	x	x	H	H	H	H	H
1	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L
2	x	x	x	x	x	x	x	L	L	L	L	L	H
3	x	x	x	x	x	L	H	H	L	L	H	L	H
4	x	x	x	x	L	H	H	H	L	H	L	L	H
5	x	x	x	L	H	H	H	H	H	L	L	L	H
6	x	x	L	H	H	H	H	H	H	L	H	L	H
7	x	L	H	H	H	H	H	H	H	H	L	L	H
8	L	H	H	H	H	H	H	H	H	H	H	L	H

Diagramas de pines del integrado (74LS148)

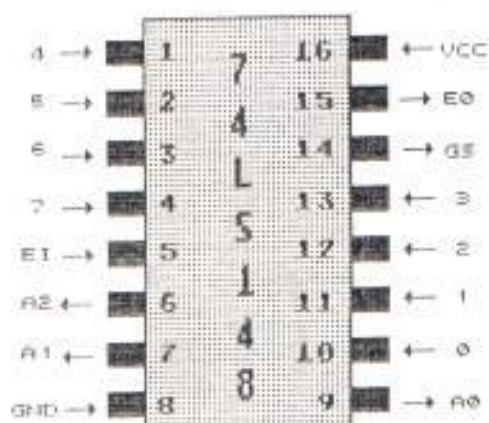


FIGURA # 45

2.-) Descripcion de pines del (74LS148)

<u>Nombre del pin</u>	<u>Descripcion</u>	<u>Tipo</u>
0-1-2-3-4-5-6-7	entradas de datos (décimales)	entrada
A <sub>0</sub> - A <sub>1</sub> - A <sub>2</sub>	salida binaria	salida
E <sub>1</sub>	enable input	entrada
E <sub>0</sub>	enable output	salida
G <sub>B</sub>	transporte	salida
Vcc - Vss	power - ground	

Además de los dispositivos antes mencionados existen los buffers, los cuales nos sirven para ayudarnos en el manejo de la corriente, reconocer niveles , atrapar y mantener los datos de algún dispositivo en uso.

Los buffers utilizados en nuestro estudio son de 2 tipos:

- 1.-) Unidireccional (los datos en una sola dirección)  
74LS241
- 2.-) Bidireccional (los datos viajan en 2 sentidos)  
74LS245

3.-) Diagrama de tiempo de la interfase de entrada de datos

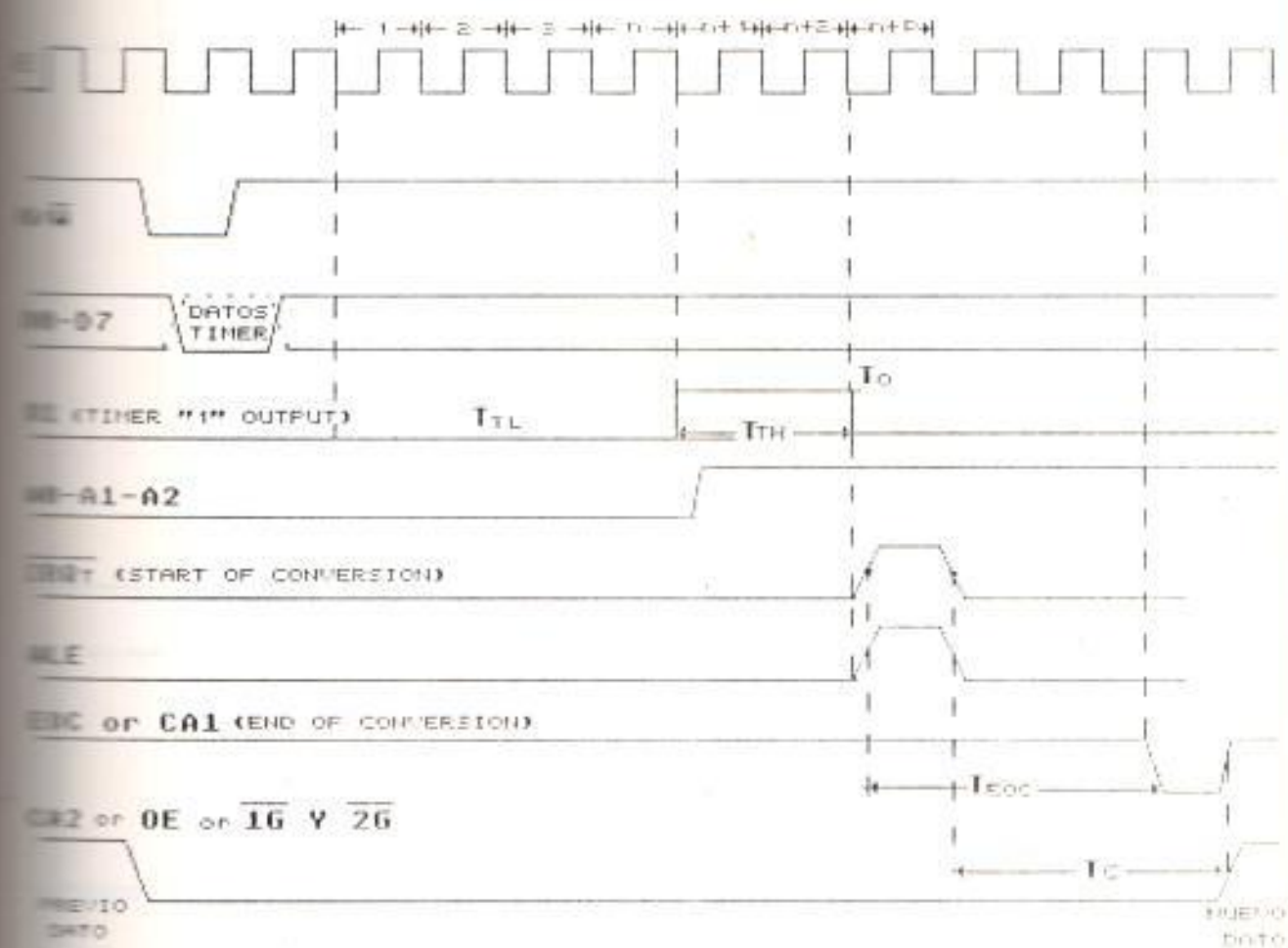


FIGURA # 46

### 4.3.3.1 DIAGRAMA DE LA INTERFASE DE ENTRADA DE DATOS

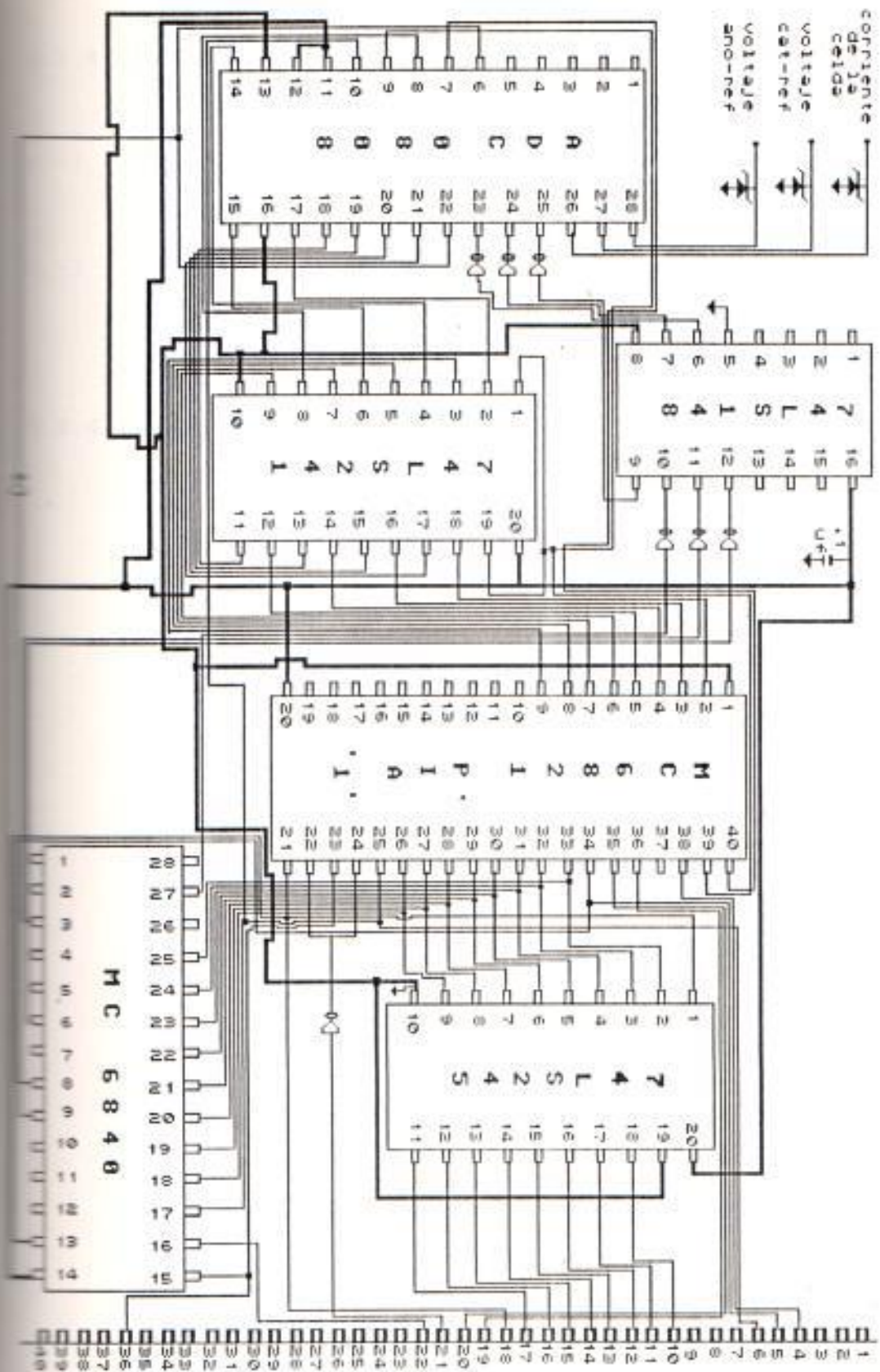


FIGURA # 47

#### 4.3.4 INTERFASE DE SALIDA DE DATOS.

Esta interfase consta de 2 secciones:

- 1.-) Interfase visualizadora de datos por displays, tanto de voltaje como de corriente de la celda.
- 2.-) Interfase de salida para el control de voltaje de alimentación de la celda (voltaje catódico)

##### 4.3.4.1 INTERFASE VISUALIZADORA DE DATOS DE "I" Y "V"

Esta interfase esta conformada por el pia "PIA #2", que es utilizado como puerto de salida de datos para manejar los displays visualizadores de dichos datos. En este caso ambos puertos del "PIA" deben ser configurados como salidas, y en el modo de operación (programable handshaking set/reset).

Con este modo de operación, las salidas de control CB<sub>2</sub> y CA<sub>2</sub> son utilizadas como pulsos de bajada "strobe" para la lógica externa, de tal manera que dicha lógica no tiene que enviar un requerimiento de interrupción para decirle al CPU que envíe los datos, si no que tan pronto el CPU requiere sacar los datos, la lógica exterior recibe el CB<sub>2</sub>/CA<sub>2</sub> en bajo y habilita los chips de salida; que en nuestro caso son buffers unidireccionales "74LS241", y los latch "8308".

Además del "pia#2" existen en esta interfase, los buffers antes mencionados, los latches, drivers de



displays, y los displays de 7 segmentos que nos visualizan los datos enviados por el "cpu". Con esta interfase podemos tener una resolución de milivoltios y miliamperios, gracias a la utilización de ambos puertos del "pia". Otra ventaja de esta interfase es que el usuario puede observar el comportamiento de la corriente y el voltaje de la celda, durante el proceso de electrodeposición; lo cual es de gran ayuda para el ajuste del voltaje de descomposición al inicio de la prueba.

a.-) DIAGRAMA DE TIEMPO DE LA INTERFASE VISUALIZADORA DE DATOS

salida por programable handshaking set/reset:

bs	ba	bs
1	1	0

CA./CB.: van a nivel bajo cuando el "cpu" escribe "bs=0" en el registro de control.

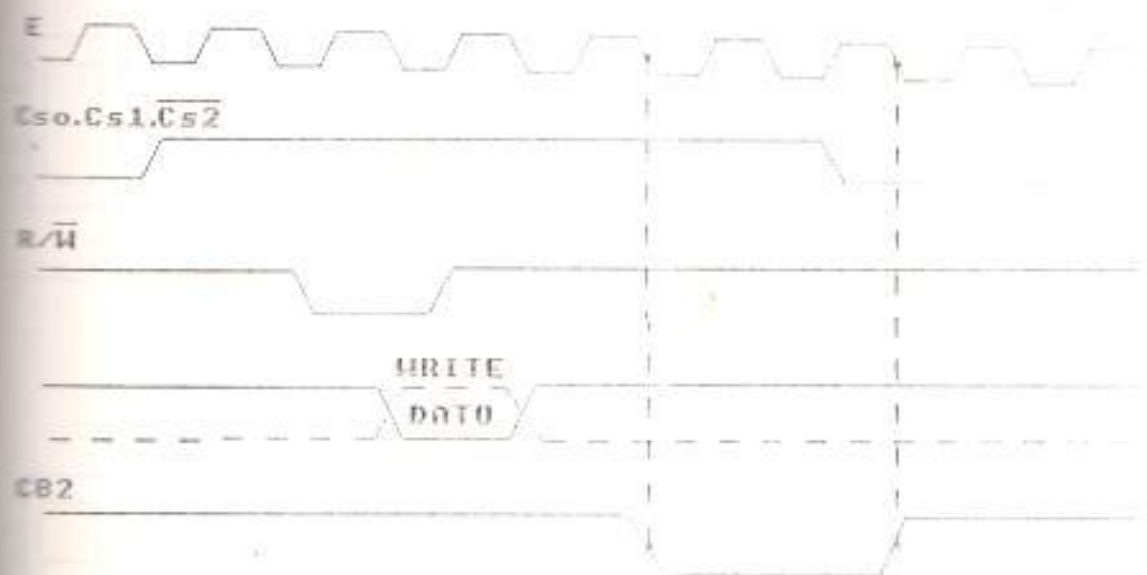


FIGURA # 48

4.3.4.2 DIAGRAMA DE LA INTERFASE VISUALIZADORA DE DATOS

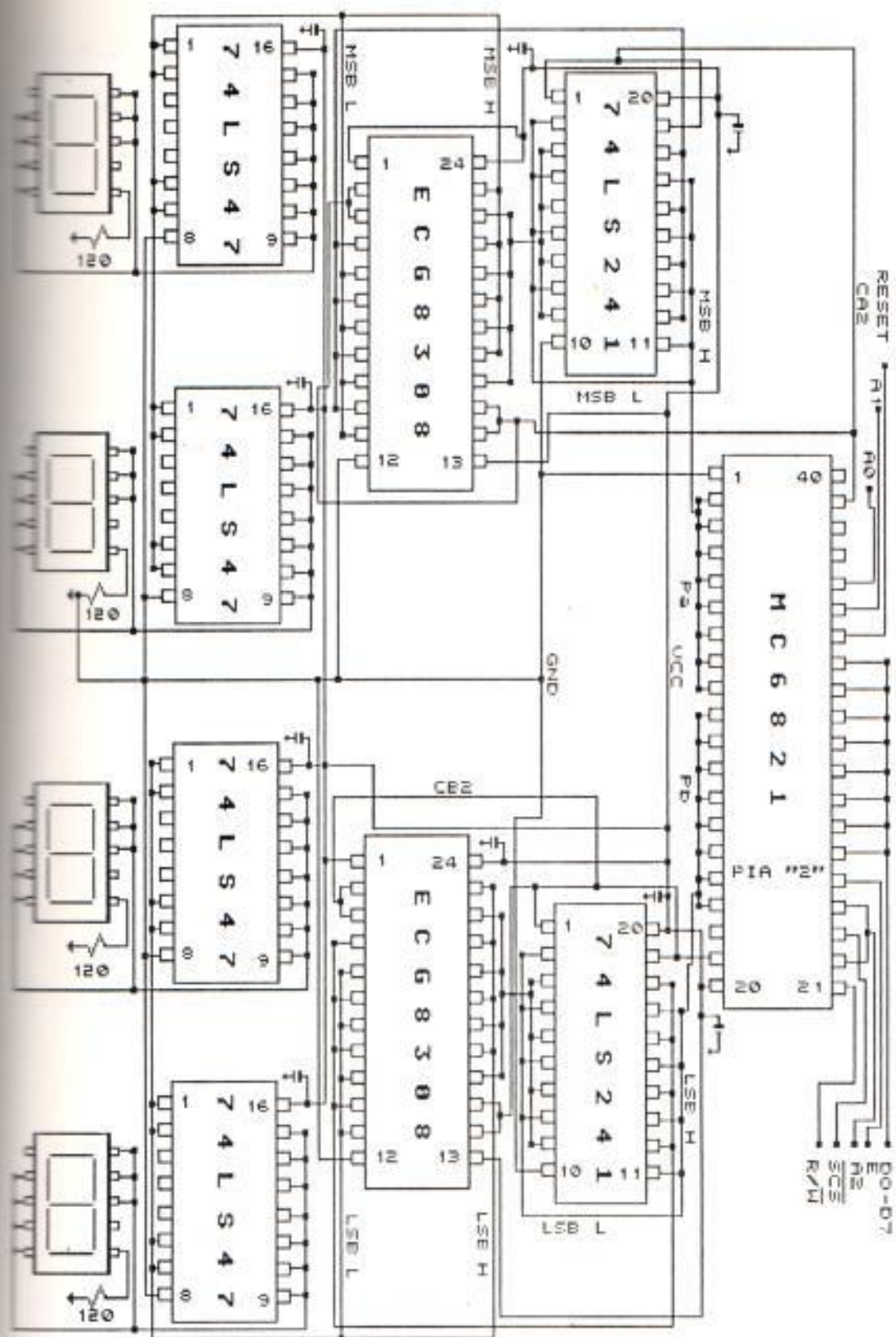


FIGURA # 49

### 3.4.3 INTERFASE DE SALIDA PARA EL CONTROL DEL VOLTAJE DE LA CELDA (VOLTAJE CATODICO):DESCRIPCION:FUENTE DE PODER

Para poder controlar el voltaje catódico, y por ende todo el voltaje de la celda se hace necesario diseñar una interfase controladora, que ajuste los valores de voltaje de la celda cuando se esta realizando el proceso de electrodeposición; de tal manera que el voltaje catódico sea el necesario para una electrodeposición continua de oro en el cátodo. Además de este control que podríamos llamarlo puntual durante todo el tiempo que dura el proceso de electrodeposición (estado estacionario), es necesario variar el voltaje de la celda al inicio de la electrólisis para encontrar el voltaje de descomposición de la solución a tratarse, y fijar los parámetros de voltaje catódico y corriente inicial necesarios para el cálculo del tiempo que dura la electrodeposición de oro en celda (estado transiente ). Estos valores iniciales deben ser encontrados de manera rápida para que no afecten las características iniciales de la solución.

El modo de operación de la salida de los datos para el control de fuente se realiza por el método (programable handshaking), y utilizando el puerto "B" del "PIA#1". Esta interfase de salida consta de un "PIA" (pto "b" del pia "1" utilizado antes en la entrada de datos) de un buffer unidireccional el

"8308", el latch atrapador de datos "ECG 8308", un convertidor D/A "DAC0808", y una lógica lineal de corrección de error para la comparación del voltaje aplicado a la celda, con respecto al valor potencial necesario para la electrodeposición con precisión de oro. Como es de suponer esta lógica debe estar directamente al voltaje aplicado a la celda para la corrección del voltaje catódico.

Continuación se muestra el diagrama del convertidor D/A y sus conexiones para conversión de los datos provenientes del "cpu".

Como el Vref (+)

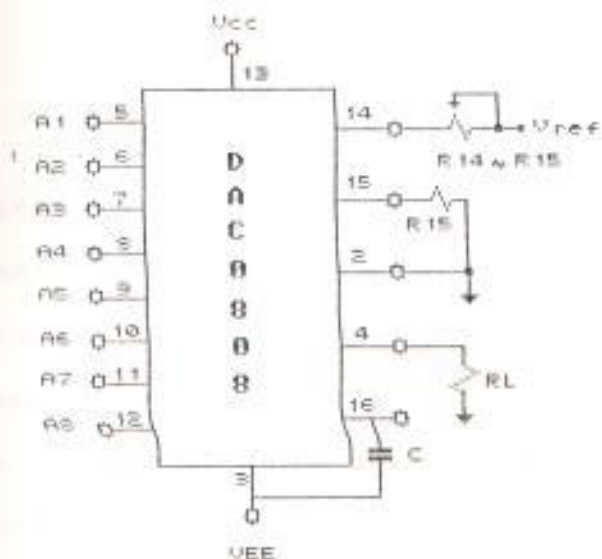
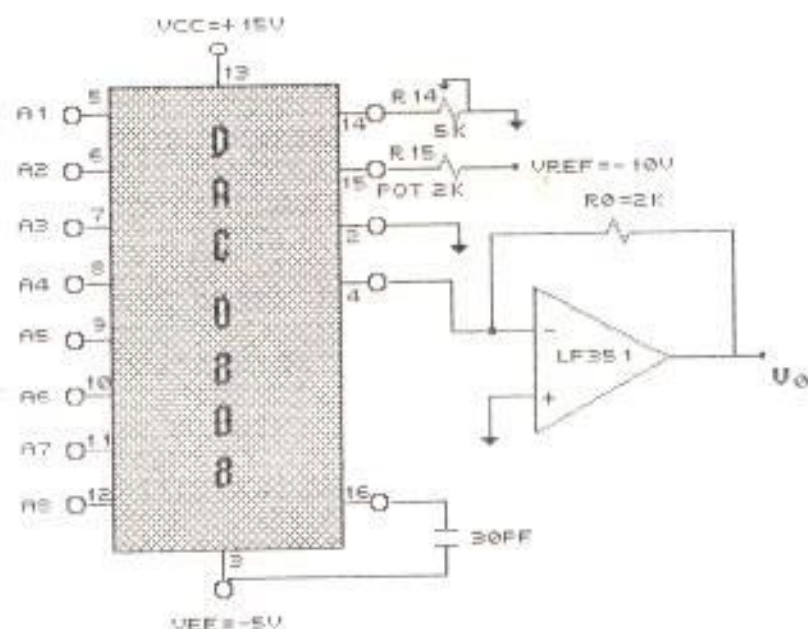


FIGURA # 50



Cuando el VREF (-)



$$V_0 = \frac{V_{REF}(R_0)}{R_{15}} \left( \frac{R_1}{2} + \frac{R_2}{4} + \frac{R_3}{8} + \frac{R_4}{16} + \frac{R_5}{32} + \frac{R_6}{64} + \frac{R_7}{128} + \frac{R_8}{256} \right)$$

FIGURA # 51

Para nuestro estudio se necesita que el voltaje proveniente del convertidor D/A tenga un valor (-), ya que este valor es el que se va sumar del voltaje ref-cátodo, y de esta manera obtener el error entre el voltaje requerido por la solución para una electrólisis continua (del convertidor A/D) con respecto al leído constantemente por el electrodo de referencia.

#### FUENTE DE ALIMENTACION SU CONTROL Y DISEÑO

La fuente de poder está constituida por un puente

rectificador de onda completa , seguido de un filtro tipo " $\pi$ " para eliminar al máximo el valor "RMS" o componente "AC" existente a la salida del puente rectificador,teniendo así un voltaje "DC" más puro para el mejor control y exactitud del voltaje aplicado a la celda y por ende del cátodo.

Luego de esta etapa inicial, tenemos el regulador de voltaje constituido por transistores en paralelos para manejar mayor corriente, y controlados a través de un amplificador en realimentación que fija el voltaje de referencia o de salida de la fuente de poder.El voltaje de referencia es prefijado a través de un conjunto de circuitos lineales los cuales determinan el error entre el voltaje medido por el transductor (electrodo de colomel) versus el cátodo, con respecto al valor nominal requerido para que se produzca una electrólisis continua determinada por el computador.

Estos circuitos lineales constan de un amplificador sumador, de un amplificador o controlador proporcional- integral, y de un amplificador de ganancia unitaria que hace el papel de inversor.

b.) CALCULOS PARA EL DISEÑO DE LA FUENTE DE ALIMENTACION.

La fuente de alimentación para un grupo de celdas electrolíticas que componen el bloque de deposición

de una planta prototipo, necesita por lo general de una fuente de alta corriente debido a la cantidad de volumen que se procesa, y a la concentración del electrolito.

Consideraremos para nuestro diseño una fuente que maneje alrededor de 25 Amperios ( $I_c = 25A$ ), voltaje de alimentación alterno alrededor ( $VAC = 10V$ ), y el tipo de rectificación de onda completa con puente de diodos. Además debe tener un bajo porcentaje de rizado para evitar la deposición de otros metales que no sean oro, o los ceresmos a su potencial de electro-deposición.

Para una fuente de alimentación en la que existe un filtro solo capacitivo, se conoce las siguientes referencias:

El voltaje de rizado(RMS) es igual a:

$$V_r(RMS) = \frac{I_{dc} * V_{dc}}{473fc C_f V_m}$$

reemplazando los datos anteriores tenemos:

$$V_r(RMS) = \frac{25}{473(60)C_f} * \frac{V_{dc}}{10}$$

$$V_r(RMS) = \frac{V_{dc}}{9673C_f}$$

Además se conoce que el voltaje "DC" se calcula:

$$V_{dc} = V_m - \frac{V_r(p-p)}{2}$$

y conociendo que

$$V_r(\text{RMS}) = \frac{V_r(\text{p-p})}{2\sqrt{3}}$$

tenemos:

$$V_r(\text{p-p}) = \frac{V_{dc}}{48C_1}$$

Para calcular el porcentaje de rizado se usa la fórmula:

$$\%r = \frac{V_r(\text{RMS})}{V_{dc}} * 100$$

Ya que se desea que el porcentaje de rizado sea bajo, se elige un valor del 5% para este parámetro. Reemplazando este valor en la fórmula anterior se obtiene:

$$5 = \frac{\frac{V_{dc}}{96\sqrt{3}C_1}}{V_{dc}/1} * 100$$

$$5 = \frac{100}{96\sqrt{3}C_1}$$

Despejando  $C_1$  tenemos:

$$C_1 = 120281.3 \mu\text{F}$$

Lo que resulta lógicamente en un capacitor bien alto para este porcentaje de rizado, y alta corriente. Con este capacitor procedemos a calcular el voltaje "DC", y el voltaje de rizado pico a pico obteniéndose los siguientes valores.

$$V_{dc} = 9.203 \text{ voltios}$$

$$V_{r(p-p)} = 1.594 \text{ voltios}$$

Si se desea obtener un capacitor de filtrado de menor valor, por razones de costos y por que aumentan la corriente de pico de los diodos que conforman el puente rectificador; se escoge un porcentaje de rizado de mayor valor digamos de alrededor del 10%, por lo tanto obtenemos:

$$10 = \frac{100}{96\sqrt{3}C_1}$$

Despejando  $C_1$  tenemos:

$$C_1 = 60140.65 \mu \text{ FARADIOS}$$

con este nuevo valor para el capacitor de filtrado, tenemos los siguientes valores para el voltaje "DC" y "Vr(p-p)".

$$V_{dc} = 8.4406 \text{ voltios}$$

$$V_{r(p-p)} = 2.924 \text{ voltios}$$

Con estos valores para el capacitor de filtrado podemos calcular el porcentaje de regulación que obtendríamos de la fuente, y las características que los diodos deben tener para conformar dicha fuente.



Caso a.-)  $C_1 = 120281.3 \mu F$

$$\text{el \% de regulaci3n} = \frac{V_{out} - V_{r.c.}}{V_{r.c.}} * 100$$

$$\% R = \frac{10 - 9.203}{9.203} * 100 = 8.66\%$$

El c3lculo de la corriente de pico que circula a trav3s de los diodos del puente rectificador, se calcula de la siguiente manera:

$$I_{pico} = \frac{T}{T_1} I_{dc}$$

Donde  $T_1$  = Per3odo de conducci3n

$T$  = Per3odo de la onda de 60 Hz

El per3odo de conducci3n se calcula mediante la siguiente f3rmula:

$$T_1 = \frac{V_r(p-p)T/4}{V_m}$$

Reemplazando esta ecuaci3n en la anterior tenemos

$$I_{pico} = \frac{4V_m}{V_r(p-p)} I_{dc}$$

procediendo a reemplazar los valores para este caso tenemos:

$$I_{pico} = \frac{4(10)}{1.594} * 25$$

$$I_{pico} = 627.352 \text{ Amperios}$$

$$\text{Caso b. -) } C_1 = 60140.65 \mu\text{F}$$

$$\% R = \frac{10 - 8.4406}{8.4406} * 100 = 18.47\%$$

$$I_{pico} = \frac{4(10)}{2.924} * 25$$

$$I_{pico} = 341.99 \text{ Amperios}$$

Con estos cálculos podemos concluir que a menor porcentaje de rizado se obtiene una menor variación en torno al nivel "DC" (Rizado menor), pero a costas de un capacitor de mayor capacitancia además de diodos de más alto voltaje inverso pico, lo que encarece el costo de la fuente de poder.

En lo correspondiente al porcentaje de regulación, este valor es menor en cuanto más pequeño es el porcentaje de rizado antes del filtro "π".

Debido a estas consideraciones debemos escoger un % de Rizado de valor apropiado, de tal manera que el voltaje de rizado no sea tan grande y el valor del capacitor no se eleve demasiado. Escogeremos por lo tanto como valor adecuado un % de rizado =10%, que corresponde al segundo caso de nuestro estudio.

Si se desea bajar aún más el voltaje de rizado de la

fuerza de alimentación como se requiere en nuestro estudio, se escoge un filtro tipo "π" por ser el más adecuado cuando se trabaja con altas corrientes. Los valores que determinan el diseño de este filtro son el % de rizado antes y después de pasar por el filtro, así como el % de regulación antes y después del mismo. A continuación proseguimos a realizar los cálculos de este filtro considerando que vamos a reducir el porcentaje de rizado a un 6% y el voltaje de regulación que se desea es de alrededor de un 30%.

Si el VR= 30% tenemos:

$$0.30 = \frac{V_m - V_{dc}'}{V_{dc}'}$$

$$V_{dc}' = \frac{V_m}{1.3} = \frac{10}{1.3}$$

$$V_{dc}' = 7.6925 \text{ voltios}$$

Con este valor de voltaje "DC" a la salida del filtro podemos calcular la resistencia de la bobina de choque que conforma parte del filtro "π", la cual se obtiene de la siguiente manera.

$$R_s = \frac{V_{dc} - V_{dc}'}{I_s}$$

$$R_s = \frac{8.4406 - 7.6925}{25} = 0.02993 \Omega$$

Para el cálculo de la inductancia y capacitancia de

salida del filtro se considera las siguientes relaciones:

$$X_L \gg R_1$$

$$X_C \ll R_1$$

Si  $X_L = 100 R_1$  tenemos

$$2\pi fL = 100(0.02993)$$

$$L = \frac{2.993}{240\pi} = 3.97 \text{ mH}$$

Si el porcentaje de rizado se trata de llevar al 6% tenemos:

$$\delta = \frac{V_{r'}(\text{RMS})}{V_{dc}} * 100$$

y Como 
$$V_{dc}' = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{dc}$$

$$V_{r'}(\text{RMS}) = \frac{X_{C2}}{X_L - X_{C2}} V_r(\text{RMS})$$

Reemplazando estas 2 relaciones en la fórmula anterior se llega a obtener:

$$\delta = \frac{X_{C2}/(X_L - X_{C2}) V_r(\text{RMS})}{R_2/(R_1 + R_2) V_{dc}} * 100$$

Para nuestro caso se cumple que:  $R_2/(R_1 + R_2) \approx 1$  y  $X_L = 100 R_1$ , por lo tanto tenemos que:

$$\delta = \frac{X_{C2}/(100R_1 - X_{C2}) V_r(\text{RMS})}{V_{dc}} * 100$$

Despejando

$$6/100 = \frac{X_{c2}}{100R_1 - X_{c2}} \frac{V_r(\text{RMS})}{V_{dc}}$$

$$6/100 = \frac{X_{c2}}{100R_1 - X_{c2}} * 10$$

$$6(100R_1 - X_{c2}) = 1000X_{c2}$$

Donde

$$X_{c2} = \frac{600R_1}{1006}$$

$$\frac{1}{2\pi FC_2} = \frac{600R_1}{1006}$$

$$C_2 = \frac{1006}{1200\pi F(0.02993)}$$

$$C_2 = 74298.3 \mu F$$

Con estos valores calculados para el filtro "π", debemos obtener el verdadero valor de la corriente de pico de los diodos que conforman el puente rectificador, ya que los parámetros que determinan este valor han variado su condición inicial; y por lo tanto tenemos:

$$I_p = \frac{4(10)}{1.5988} * 25$$

$$I_p = 625.447 \text{ Amperios}$$

Una vez realizado los cálculos del puente rectificador y del filtro, procedemos a analizar el tipo de transistores necesarios para diseñar el regulador



serie de la fuente de poder; conjuntamente con el tipo de disipadores que dichos transistores requieren para poder disipar la potencia que ellos generan en forma de calor al medio ambiente. Este diseño es basado en 2 transistores configurados entre ellos como en paralelo, para lograr un mayor manejo de corriente y disminuir su disipación de potencia. A continuación realizaremos los cálculos en base a 2 tipos de transistores posiblemente utilizados para esta fuente de acuerdo a sus características.

Considerando el transistor ECG 245 cuyas características son las siguientes, tenemos:

$$P_{D_{MAX}} = 150 \text{ Watt cuando } T_c = 25^\circ\text{C}$$

$$T_{J_{MAX}} = 200^\circ\text{C}$$

$$I_c = 10\text{A}$$

$$h_{FE} = 4000 \text{ TÍPICO}$$

Con estos valores propios del transistor, podemos calcular la resistencia térmica juntura-casco; la cual es un parámetro bien importante para los cálculos posteriores, y se calcula así:

$$R_{JC} = \frac{T_{J_{MAX}} - T_c}{P_{D_{MAX}}}$$

$$R_{JC} = \frac{200 - 25}{150} = 1.16^\circ\text{C/W}$$

Dado a que los transistores difícilmente pueden disipar toda la potencia que en sus características

indican, tomaremos como valor de disipación máxima en el peor de los casos " $P_d = 76.9 \text{ Watt}$ " que resulta de los siguientes cálculos:

Conociendo que el voltaje "DC" de nuestra fuente de poder es de 7.692 voltios, y que además la corriente que circula por cada transistor es de 10 Amperios, para así obtener aproximadamente una fuente de 25 Amperios tenemos.

$$P_d = 10 \times 7.692 = 76.9 \text{ Watt}$$

La segunda resistencia térmica casco-disipador " $R_{cd}$ " provocada por el contacto de esas 2 partes tiene en cuenta diversos factores que afectan a este contacto, tales como: arandela de la mica, presión del contacto, estado de la superficie etc.

Si el montaje del transistor se realiza directamente sobre el radiador se considerará una diferencia de temperatura entre ambos de alrededor de  $2^\circ\text{C}$ . En el caso de intercalar una lámina de mica, con el objeto de lograr un cierto aislamiento eléctrico, se tomará una resistencia térmica de esta de  $122/e \text{ }^\circ\text{C/W}$ , siendo "e" el espesor de la mica en centímetros.

si consideramos que montamos los transistores sobre mica y los apretamos bien de tal manera que el espesor es de alrededor de 0.005cm tenemos que dicha resistencia térmica toma el valor de :

$$R_{CD} = 122 * 0.005 = 0.61^{\circ}\text{C/W}$$

La tercera y última resistencia térmica la cual afecta directamente al radiador se encuentra de la siguiente manera:

$$T_{JMAX} - T_{\alpha} = R_{JA} * (P_D)$$

Donde  $R_{JA}$  = resistencia térmica desde la juntura al ambiente, la cual se puede descomponer en las 3 resistencias térmicas antes mencionadas, teniendo que:

$$R_{JA} = R_{JC} + R_{CD} + R_{DA}$$

Por lo tanto

$$T_{JMAX} - T_{\alpha} = P_D * (R_{JC} + R_{CD} + R_{DA})$$

Reemplazando tenemos

$$200 - 30 = 78.9 * (1.16 + 0.61 + R_{DA})$$

$$170/78.9 = 1.77 + R_{DA}$$

$$R_{DA} = 0.4406^{\circ}\text{C/W}$$

Escogeremos el radiador ECG446A

Si trabajamos ahora con el transistor 2N5629 cuyas características son las siguientes, tenemos

$P_{dmax} = 200 \text{ Watt}$  a una  $T_c = 25^\circ\text{C}$

$T_{dmax} = 200^\circ\text{C}$

$I_c = 20 \text{ AMP}$

$h_{FE} = 25-100$

La resistencia juntura casco es igual a:

$$R_{jc} = \frac{200 - 25}{200} = 0.875^\circ\text{C/W}$$

La resistencia casco-disipador se obtiene de igual forma que anteriormente, y su valor no cambia por lo tanto tenemos:

$$R_{cd} = 0.61^\circ\text{C/W}$$

Con estos 2 valores procedemos a calcular la resistencia disipador-ambiente, la cual es un parámetro importante para la elección del tipo de disipador a emplearse para este efecto, teniendo que:

$$T_{dmax} - T_a = (0.875 + 0.61 + R_{da}) * 76.9$$

$$170/76.9 = 1.485 + R_{da}$$

$$R_{da} = 0.7256^\circ\text{C/W}$$

Con estos valores de la resistencia térmica del disipador necesario se acudiré a cualquier catálogo de disipadores para seleccionar el más adecuado. Para este último caso se podrá escoger el radiador ECG441B.

Lo único que no queda aún resuelto es como y quién maneja a los transistores reguladores, y la manera de compensar cualquier tipo de desbalance en la corriente que ellos entregan a la carga debido a la variación pequeña en sus características propias de la fabricación de estos elementos semiconductores.

Debido que en el primer caso tenemos transistores darlington en paralelo, y en el segundo simples transistores; ambas opciones necesitan de un transistor driver que maneje las corrientes de base que estos elementos requieren dado que el amplificador operacional de salida, no puede manejar directamente la magnitud de estas corrientes.

Considerando para el primer caso de los amplificadores DARLINGTON que la corriente máxima de base que ellos requieren es del orden de 200 mA, y conociendo que son 2 los transistores manejados, la corriente necesaria debe estar en el orden de los 300 mA para estar en un rango medio de trabajo; Además se conoce que el voltaje emisor-colector que este transistor debe soportar está alrededor de 0.7-1 voltio por debajo de lo que soportan los transistores reguladores. Por lo tanto la potencia necesaria que este transistor maneje es:

$$P_o = 7 \cdot (0,3) = 2.1 \text{ WATT}$$

Lo que nos da la pauta para escoger un transistor del



tipo NPN capaz de manejar corrientes superiores a 300mA, y cuya potencia sea del orden de 3- 10WATT. Para esta circunstancia escogeremos el transistor driver ECG 268, o también ECG 188 los cuales necesitan la adición de su disipador respectivo para una mejor operación.

Otro diseño para una fuente de estas características se lo puede llevar a cabo con el transistor ampliamente usado en nuestro medio como es, el 2N3055. El cual es usado en la misma configuración anterior, paralelo y manejado a través del amplificador regulador de precisión el LM723C.

Nos queda por resolver la compensación de la pequeña variación en la característica de entrada de los transistores reguladores, la cuál afecta directamente a la cantidad de corriente que maneja cada transistor, haciendo que esta corriente sea asimétrica; y por lo tanto afectando la potencia que cada uno disipa al medio ambiente. Si esta diferencia en la disipación de potencia es muy apreciable, puede causar que uno de los transistores se quemara, por sobrepasar sus límites de disipación.

La manera de compensar esta variación, es colocando una pequeña resistencia en el circuito de emisor de cada transistor para igualar la tensión en el punto de unión de estos transistores. Esta resistencia de

estabilización, debe cumplir la condición de ser mucho mayor que resistencia dinámica que presenta la unión base emisor de cada transistor.

Por consiguiente tenemos que:

$$R_{in} \gg r_{in}$$

donde 
$$r_{in} = \frac{26(\text{mV})}{I_{in}}$$

Además conociendo que la corriente  $I_{in} = 10$  amperios, y reemplazando este valor en la ecuación anterior tenemos:

$$R_{in} \gg 0.0026 \Omega$$

Escogeremos por lo tanto una resistencia de  $R_{in} = 20 * r_{in}$ , lo que nos da un resultado de:

$$R_{in} = 0.052 \Omega$$

Esta resistencia debe ser capaz de disipar una potencia calculada por la siguiente ecuación:

$$P_{diss} = (10)^2 * 0.052 = 5.2 \text{ Watt}$$

#### 4.3.4.4 DIAGRAMA DE LA INTERFASE DE SALIDA PARA EL CONTROL DE LA FUENTE DE ALIMENTACION DE LAS CELDAS ELECTROLITICAS.



## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1.-) Con respecto a los circuitos sensores, se debe tener un especial cuidado en las mediciones que se realicen con los electrodos de referencia; por esta razón debe mantenerse bien regulado el **offset** de los amplificadores ,y de igual manera proceder a compensar cualquier desviación de la lectura medida por estos sensores. Las desviaciones obtenidas pueden ser producto de las resistencias parásitas existente en el bloque transductor, así como también posibles variaciones debidas al ruido.
- 2.-) La temporización de la mayoría de los eventos (variables) controladas en los distintos procesos, que corresponden al proyecto de investigación de esta tesis, no son críticas, pudiendose realizar un sondeo de las variables en un rango de cada 30-60 seg dependiendo del parámetro a ser medido, sin temor a equivocarnos.
- 3.-) Los circuitos que conforman el sistema de adquisición de datos, pueden ser analizados y realizados con otro criterio de diseño; por ejemplo podría ser una tenta-



tiva realizar una interfase inteligente que reciba las señales de los sensores (un número dado) y luego se comunique con el computador central. Pero lejos de toda estas diferencias de opiniones y diseños se debe mantener el criterio de compatibilidad y expandibilidad para sensar la mayoría de los parámetros necesarios para el control de la planta prototipo.

- 4.-) Debe ondarse en estudios posteriores a esta tesis, en el circuito equivalente eléctrico de la celda electro-lítica sobre todo en sus efectos capacitivos, para determinar su comportamiento transiente y estable durante el proceso de electrodeposición. Esta determinación debe efectuarse para diferentes tipos de soluciones standares.
- 5.-) El programa que se desarrolle para el control y adquisición de los datos debe ponerse a pruebas en etapas, primero con un programa en lenguaje ensamblador, para luego pasar a desarrollar el programa en lenguaje pascal. Pasado el tiempo de toda esta experiencia se podría realizar el programa en un basic estructurado de acuerdo al computador utilizado, y de esta manera hacerlo más manejable para un usuario normal.
- 6.-) Un punto importante que queda tangible, es la acción conjunta de la facultad de INGENIERIA EN MINAS con la facultad de INGENIERIA ELECTRICA; en la elaboración de



proyectos misibles, tendientes a dar un paso adelante en el desarrollo del PAIS en esta área.

7.-) Este tema de tesis para el control de una PLANTA PROTOTIPO DE EXTRACCION DE ORO fue enfocado para ser aplicado y mejorado en plantas que operen en las distintas regiones mineras del País con todas sus variantes.

## BIBLIOGRAFIA

- 1.-) Congreso Internacional Geológico de Minería, Guayaquil  
Octubre de 1987.
- 2.-) El Colegio de Geólogos del Ecuador.
- 3.-) Química Analítica de Maron
- 4.-) Transductores y Medidores Electrónicos serie:Mundo  
Electrónico de editorial Marcombo.
- 5.-) Amplificadores y Circuitos Integrados Lineales de  
Robert F. Coughlin/ Frederick Driscoll.
- 6.-) Tesis de Grado de la ING Eleana Guevara de Urquiza
- 7.-) Electrónica de Alley-Astwod

