

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UNA MÁQUINA ELECTROLÍTICA RECUPERADORA DE PLATA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
ELECTRÓNICA Y CONTROL**

**PAUL ALBERTO JARRÍN TAMAYO**

**“pjarrin@igepn.edu.ec”**

**DIRECTOR: NELSON SOTOMAYOR OROZCO, MSc.**

**“nelsons@mailfie.epn.edu.ec”**

**Quito, Mayo 2010**

## DECLARACIÓN

Yo, Paúl Alberto Jarrín Tamayo, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

Paúl A. Jarrín Tamayo

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Paúl Jarrín Tamayo, bajo mi supervisión.

---

Nelson Sotomayor, Msc.  
DIRECTOR DEL PROYECTO

## CONTENIDO

<b>RESUMEN.....</b>	<b>II</b>
<b>PRESENTACIÓN .....</b>	<b>IV</b>
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>GENERALIDADES.....</b>	<b>1</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	1
1.2 LA PELÍCULA Y EL PAPEL FOTOGRÁFICO.....	2
1.3 PROCESOS DE REVELADO E IMPRESIÓN FOTOGRÁFICA.....	2
1.3.1 PROCESO DE PELÍCULA .....	2
1.3.2 PROCESO QUÍMICO DE REVELADO C-41 .....	3
1.3.3 PROCESO QUÍMICO DE IMPRESIÓN DE FOTOGRAFÍAS.....	4
1.4 ACCIÓN DE LOS QUÍMICOS UTILIZADOS EN EL REVELADO.....	4
1.4.1 REVELADOR (DEV) .....	4
1.4.2 BLANQUEADOR (BL).....	4
1.4.3 FIJADOR (FIX).....	4
1.4.4 ESTABILIZADOR (STB).....	5
1.4.5 BLANQUEADOR – FIJADOR (BL) .....	5
1.5 ELEMENTOS INDISPENSABLES PARA UN BUEN PROCESO.....	5
1.6 GENERACIÓN DE RESIDUOS .....	6
1.7 MÉTODOS DE RECUPERACIÓN DE LA PLATA EN PLANTAS DE PROCESAMIENTO FOTOGRÁFICO.....	8
1.7.1 LA ELECTRÓLISIS .....	8
1.7.2 SUBSTITUCIÓN METÁLICA.....	12
1.7.3 PRECIPITACIÓN .....	14
1.8 COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE RECUPERACIÓN DE LA PLATA [2].....	16
1.9 SELECCIÓN DE LOS ACTUADORES.....	16
1.9.1 SELECCIÓN DE LAS BOMBAS PARA EL PROTOTIPO .....	16
1.9.2 SELECCIÓN DEL MOTOR PARA EL CÁTODO .....	20
1.9.3 SELECCIÓN DE LA ELECTRO-VALVULA.....	22
1.10 SELECCIÓN DEL TIPO DE INSTRUMENTACIÓN.....	24
1.10.1 SELECCIÓN DEL SENSOR DE NIVEL PARA LA CUBA ELECTROLÍTICA .....	24
1.10.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR DE NIVEL DE UNIÓN MAGNÉTICA.....	26

<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>27</b>
<b>DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.....</b>	<b>27</b>
2.1 DISEÑO DEL PROTOTIPO .....	27
2.1.1 DISEÑO DE LA CUBA ELECTROLÍTICA.....	27
2.1.2 DISEÑO DE LA UNIDAD DE PROCESO ELECTROLÍTICO PARA LA RECUPERACIÓN DE PLATA (ESR).....	28
2.2 DISEÑO DE ELEMENTOS NECESARIOS PARA LA ROTACIÓN DEL CÁTODO .	36
2.3 DISEÑO DE ELEMENTOS NECESARIOS PARA TRANSMITIR ENERGÍA AL CÁTODO .....	38
2.3.1 DIMENSIONES DE LA ESCOBILLA .....	40
2.4 DISEÑO DE LA BASE DE SUJECION DEL PROTOTIPO.....	42
2.5 DISEÑO DE LA FUENTE DE CORRIENTE .....	43
2.5.1 DETERMINACION DE LA CARGA PARA LA FUENTE DE CORRIENTE.....	43
2.5.2 DISEÑO DEL TRANSFORMADOR .....	46
2.5.3 CONSTRUCCIÓN DEL TRANSFORMADOR.....	55
2.5.4 DISEÑO DE PUENTE RECTIFICADOR.....	57
2.5.5 DISEÑO DEL CIRCUITO DE CONTROL DEL CONVERTOR AC/DC.....	63
2.5.6 DISEÑO DEL SISTEMA MICROPROCESADO.....	67
2.6 LOCALIZACIÓN DE BOMBAS Y SENSORES EN EL PROTOTIPO .....	71
2.7 DISEÑO DE ENGRANAJES PARA AJUSTAR LA VELOCIDAD DEL MOTOR	78
2.7.1 CIRCUNFERENCIAS DE UN ENGRANAJE .....	78
2.7.2 NOMENCLATURA DE UN ENGRANAJE RECTO .....	79
2.7.3 DATOS INICIALES PARA EL DISEÑO .....	82
<b>CAPITULO 3 .....</b>	<b>90</b>
<b>DESARROLLO DEL PROGRAMA DE CONTROL .....</b>	<b>90</b>
3.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL.....	90
3.2 VISION MACRO DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE LA PLATA .....	91
3.2.1 SUBETAPA DEL PROCESO ELECTROLÍTICO.....	91
3.2.2 DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN DEL PROCESO.....	92
3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO.....	92
3.3.1 SUBRUTINA DE INGRESO DE CLAVE.....	94
3.3.2 SUBRUTINA LLENADO.....	95
3.3.3 SUBRUTINA CONTROL CUBA .....	95

3.3.4 SUBROUTINA VACIADO.....	96
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>98</b>
<b>PRUEBAS Y RESULTADOS .....</b>	<b>98</b>
4.1 CONSIDERACIONES GENERALES.....	98
4.2 PUESTA EN MARCHA .....	98
4.3 DETERMINACION DE LA PLATA COMO CLORURO .....	99
4.3.1 FRANJAS DE PRUEBA CUALITATIVA.....	99
4.3.2 COLORIMETRÍA.....	100
4.3.3 LABORATORIOS ANALÍTICOS.....	100
4.4 OBTENCION DE LA PLATA .....	100
4.4.1 LA HOJUELA DE PLATA .....	100
4.4.2 COMO REMOVER LA PLATA DEL CÁTODO.....	101
4.4.3 COMO REFINAR MATERIALES QUE CONTIENEN PLATA.....	101
4.4.4 SOLUCIONES Y CONSEJOS PARA UN MEJOR FUNCIONAMIENTO DE LA UNIDAD ELECTROLITICA .....	101
4.4.5 ELECTROLISIS .....	103
4.4.6 MEDIDA DEL pH.....	103
4.5 PRUEBAS Y RESULTADOS.....	103
4.5.1 PRIMERA PRUEBA .....	104
4.5.2 SEGUNDA PRUEBA.....	107
4.5.3 TERCERA PRUEBA .....	110
4.5.4 CUARTA PRUEBA.....	112
4.5.5 QUINTA PRUEBA.....	114
4.5.6 SEXTA PRUEBA.....	116
4.5.7 SEPTIMA PRUEBA.....	117
4.6 ANALISIS FINAL DE TODAS LAS PRUEBAS .....	119
4.7 LISTA DE MATERIALES DEL PROTOTIPO .....	120
<b>CAPITULO 5 .....</b>	<b>124</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>124</b>
5.1 CONCLUSIONES.....	124
5.2 RECOMENDACIONES .....	126
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>128</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>

## RESUMEN

La plata es el componente de la película y papel fotográfico que posibilita la formación de una imagen, y es aquel que se traspasa a las soluciones durante el proceso de revelado e impresión fotográfica.

El diseño y construcción de una máquina electrolítica recuperadora de plata proveniente del desecho de los químicos de revelado fotográfico, no es más que una máquina que extrae la plata que se encuentra suspendida en ciertos químicos de revelado fotográfico, para poder reutilizar dicho metal en otras aplicaciones.

La investigación que conlleva implementar la máquina recuperadora de plata se basa en conocer el proceso de revelado fotográfico, y en base a este entender el proceso primario que sufre el Blanqueador-fijador RA4, posteriormente conociendo los diferentes métodos de recuperación y habiendo elegido el método electrolítico entender como poder diseñar y construir el prototipo.

Para la selección de los actuadores e instrumentación más adecuados para el prototipo se debe considerar que estos puedan trabajar con químicos corrosivos, y que la circulación de una densidad de corriente en el medio conductor (químico) al que van estar expuestos no los afecte, por lo que el material del que estén contruidos y su principio de funcionamiento debe ser inmune a estos requerimientos.

El control del prototipo será diseñado en base a un microcontrolador que será el encargado de activar los circuitos de potencia que manejarán a los actuadores en las diferentes fases del proceso. Los circuitos de potencia deben ser dimensionados en base al actuador que van a manejar. Para identificar las fases del proceso se va a implementar un HMI en el prototipo.

Cuando el prototipo esté listo se debe iniciar con las pruebas de funcionamiento para eliminar inestabilidades y corregir los errores que se pueden producir en la parte electrónica, mecánica y química.

El punto más crítico del proceso es ajustar el tiempo del proceso electrolítico y la densidad de corriente que se le aplique al mismo, para llegar a obtener un grado de pureza mayor o igual al 80%. Con cada prueba que se realice se puede ir jugando con dichos valores, hasta obtener el mejor resultado.

Se debe considerar que el prototipo va a tener un límite en la calibración de la densidad de corriente y el tiempo del proceso, ya que el estado inicial del químico es una variable que no se puede controlar, y que siempre se depende de su estado inicial para obtener un buen resultado.



## PRESENTACIÓN

En el presente documento se realiza el análisis y la justificación para el diseño y construcción de un prototipo de una máquina electrolítica recuperadora de plata. El documento está estructurado de la siguiente manera:

En el primer capítulo se muestra la introducción a los conocimientos básicos y necesarios para entender el proceso de revelado fotográfico, así como los diferentes métodos existentes para realizar la recuperación de la plata. Además se define las razones para la identificación y selección del tipo de instrumentación, así como el tipo de actuadores utilizados en el prototipo.

En el segundo capítulo se presenta el diseño de la parte eléctrica – electrónica y mecánica del prototipo, así como la respectiva construcción e implementación del mismo.

La descripción del diseño y la implementación del sistema microprocesado del prototipo, incluyendo la lógica de funcionamiento, se presenta en el tercer capítulo

En el cuarto capítulo se presenta la puesta en marcha del prototipo, así como los resultados de las diferentes pruebas realizadas para el ajuste de la máquina y la eliminación de errores recurrentes.

Las conclusiones y recomendaciones que se obtuvieron en la implementación del prototipo, se presentan en el quinto capítulo.

Al final en los anexos se encuentran los diseños de la parte mecánica con sus respectivas medidas, los esquemáticos de las tarjetas electrónicas implementadas, así como los elementos utilizados en dichas tarjetas con sus respectivas especificaciones, además se incluye los circuitos de control y fuerza implementados en el prototipo.

# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1 INTRODUCCIÓN

El efluente proveniente del fotoprocésamiento (químico de desecho), es un producto derivado del procesamiento de películas y papel fotográfico, luego de recuperarse la plata, este efluente generalmente es vertido al desagüe. La plata es el componente de la película y del papel fotográfico que posibilita la formación de una imagen, y es aquel que se traspasa a las soluciones durante el proceso de revelado de película e impresión fotográfica.

Los efluentes ricos en plata son el fijador C-41 de negativos y el blanqueador/fijador RA4 de papel, y pobre en plata el estabilizador de película y el de papel. No tienen plata el blanqueador de película y los reveladores.

La plata de las soluciones de procesamiento fotográfico debería recuperarse antes de ser vertidas al desagüe por las siguientes razones [1]:

- Es un recurso no renovable.
- Algunas ciudades restringen la cantidad de plata que puede ser vertida.
- Tiene un valor económico.

El método usado, la técnica para la recuperación eficaz de la plata y el equipo adecuado al tamaño de la actividad fotográfica que se escoja depende de algunos factores [2]:

- Si se está recuperando la plata por razones económicas o por acatar los estrictos códigos de descarga.
- El volumen de la solución a tratar.
- El presupuesto del que se dispone.

## 1.2 LA PELÍCULA Y EL PAPEL FOTOGRÁFICO

La película y papel usados en la fotografía a color están formados de tres capas de una emulsión fotosensible separadas por capas intermedias. Cada capa recubre una **base** de película transparente o papel. La **base** es un compuesto de acetato, material en la cual se asienta la emulsión. Cada capa de **emulsión** es sensitiva a la luz roja, verde o azul debido a la presencia de colorantes selectivos en la misma [3].

Las capas intermedias filtran la luz de acuerdo a su longitud de onda de manera tal que las sales de haluro de plata en cada capa fotosensible son sólo expuestas a la luz de un color específico. Al ser procesada en una solución reveladora de color, una imagen de “plata revelada” se forma en cada capa. (USEPA, 1991) [3].

El ISO es la nomenclatura que se les da a las películas fotográficas de acuerdo a la cantidad de haluros de plata que puedan contener. Existen en el mercado una gran cantidad de ISO que pueden ir desde 25 hasta 1600. Los valores de ISO bajos son aconsejables especialmente para ampliaciones y condiciones de luz normal, y los valores de ISO altas son aconsejables para fotos en movimiento o con baja cantidad de luz [36].

## 1.3 PROCESOS DE REVELADO E IMPRESIÓN FOTOGRÁFICA

### 1.3.1 PROCESO DE PELÍCULA

Existen varios tipos de proceso químico para las películas fotográficas, entre los más conocidos en nuestro mercado se tiene [3]:

- Proceso Blanco y Negro (Black & White process).

- Proceso C-41.
- Proceso E-6 (Ektacrome process).

El *proceso de revelado en blanco y negro* ya casi no se usa en la actualidad, ya que el proceso C-41 lo ha desplazado en su totalidad, sin embargo los estudiantes de fotografía lo usan, ya que se puede montar un propio laboratorio en casa. Cabe mencionar que en la actualidad debido al avance tecnológico de la era digital, también el proceso C-41 esta perdiendo fuerza por lo que la tendencia de este es a desaparecer.

El proceso E-6 es un proceso que obtiene imágenes impregnadas en la película en positivo, es decir, transparencias. De este tipo de películas normalmente no se sacan fotografías, sino más bien son utilizadas para ser proyectadas como diapositivas comúnmente. De igual forma este proceso casi a desaparecido en su totalidad por la tecnología digital.

### **1.3.2 PROCESO QUÍMICO DE REVELADO C-41**

Es un proceso que obtiene imágenes impregnadas en la película en negativo para fotografías a color. Este proceso de revelado tiene cuatro etapas, en cada etapa existe un químico diferente, estos químicos son:

1. Revelador C-41 (Development)
2. Blanqueador C-41 (Bleach)
3. Fijador C-41 (Fixer)
4. Estabilizador C-41 (Stablisher)

Este tipo de proceso se subdivide en: Proceso C-41 y Proceso C-41 RA (RA: rapidation), la diferencia entre estos dos, es que el proceso C-41 le toma un tiempo de 15 minutos para revelar una película, y el Proceso C-41 RA le toma un tiempo de 7 minutos [36].

### **1.3.3 PROCESO QUÍMICO DE IMPRESIÓN DE FOTOGRAFÍAS**

El proceso químico RA4 permite a través de la acción de ciertos químicos imprimir imágenes sobre el papel fotográfico, y utiliza 3 etapas, en cada una existe un químico diferente; estos químicos son:

1. Revelador RA4 (Development)
2. Blanqueador – Fijador RA4 (Bleach)
3. Estabilizador RA4 (Stablisher)

## **1.4 ACCIÓN DE LOS QUÍMICOS UTILIZADOS EN EL REVELADO**

### **1.4.1 REVELADOR (DEV)**

Este químico tiene como función convertir los haluros de plata expuestos en la película o en el papel, en plata metálica; además, también se encarga de dar los tintes (color) a la película. Esta es la primera y más crítica etapa del proceso y debe realizarse en total oscuridad [3].

### **1.4.2 BLANQUEADOR (BL)**

Su función principal es la de retener la acción del revelador y convertir nuevamente la plata metálica en cristales de haluro de plata. Esta es la segunda etapa del proceso y debe realizarse en la oscuridad, pero si la película o el papel en esta etapa recibe luz del exterior, no sufre alteraciones [3].

### **1.4.3 FIJADOR (FIX)**

Su función principal es la de retener la plata de la película que no fue expuesta a la luz, convirtiéndola en complejos de plata soluble. Esta es la tercera etapa del

proceso y debe realizarse en la oscuridad, pero si la película en esta etapa recibe luz del exterior, la película no sufre alteraciones [3].

#### **1.4.4 ESTABILIZADOR (STB)**

Su función es la de detener la acción del fijador, además proporciona un enjuague (lavado) a la película o al papel fotográfico y lo prepara para un secado uniforme, evitando manchas o deterioro de la misma. Esta es la última etapa del proceso y no es necesario realizara en la oscuridad [3].

#### **1.4.5 BLANQUEADOR – FIJADOR (BL)**

Su función principal es la de retener la acción del revelador y convertir nuevamente la plata metálica en cristales de haluro de plata para ser retenidos en este mismo paso, típicamente utilizada en el proceso de papel. Esta es la segunda etapa del proceso RA4 y debe realizarse en la oscuridad, pero si el papel esta en esta etapa y recibe luz del exterior, no sufre alteraciones [3].

### **1.5 ELEMENTOS INDISPENSABLES PARA UN BUEN PROCESO**

Existen cuatro elementos básicos para que el proceso tanto de papel como de película garantice la calidad necesaria del producto final, estos son [36]:

1. **Temperatura:** Es el valor específico al cual debe encontrarse cada uno de los químicos del proceso. En el caso del revelador de película, si la temperatura es menor al adecuado se producirá un daño irreversible en la película llamado **sub-revelado**, En el caso de que sea mayor la temperatura se producirá un **sobre-revelado** que no se podrá arreglar de ninguna manera.

2. **Tiempo:** Al igual que la temperatura, tanto la película como el papel fotográfico tienen que permanecer el tiempo necesario en cada químico para un correcto proceso de revelado e impresión fotográfica. Si una película se demora más del tiempo necesario en los químicos se producirá un sobre-revelado, en cambio si el tiempo es menor al necesario será evidente un sub-revelado.
  
3. **Recirculación (Agitación):** La función de este es hacer recircular los químicos en sus respectivos tanques mediante bombas y filtros, para conseguir:
  - Retener las gelatinas y subproductos soltados por las emulsiones en las soluciones de los tanques de trabajo.
  - Mantener un flujo constante de la química, permitiendo que el procesado de papel y negativos sea uniforme.
  - Mantener uniforme la temperatura en cada uno de los tanques de trabajo.
  
4. **Taza de Refuerzo:** Su función es mantener la acción de los químicos existentes en los tanques de trabajo. Cada cierto tiempo la máquina desecha el químico que reaccionó (químico desgastado) con las películas o el papel y lo regenera con químico nuevo de los tanques de refuerzo, este refuerzo es por mililitros/metro de cada película.

## 1.6 GENERACIÓN DE RESIDUOS

Los residuos generados por las máquinas de revelado fotográficos son fundamentalmente líquidos y sólidos. Los efluentes líquidos, pueden categorizarse como residuos de baños de proceso, residuos de revelado de color y residuos de blanqueado/fijación. La siguiente tabla muestra los tipos de residuos más probables a encontrar en esta actividad [3].

Tabla 1.1 Listado típico de residuos de procesos fotográficos, tomado de [3]

<b>Etapa asociada a generación del residuo</b>	<b>Tipo de residuo</b>	<b>Peligrosidad</b>	<b>Componente y/o característica principal</b>
Revelador	Sólido/Líquido	Peligroso	Hidroquinona
Fijador, fijador–blanqueador	Sólido/Líquido	Peligroso	Alto contenido de plata
Blanqueador C–41, RA	Líquido	No peligroso	Alto contenido de plata
Estabilizador	Sólido/Líquido	Peligroso	Bajo contenido de plata

En general las descargas peligrosas potencialmente generadas por esta actividad son soluciones sobrantes del reciclaje y/o regeneración de químicos y efluentes de limpiezas de tanques y otros contenedores. Los efectos ambientales principales de los parámetros recién listados son la toxicidad acuática, la demanda de oxígeno y la biodegradabilidad. Es por ello que en varios países Europeos la descarga al sistema alcantarillado está totalmente prohibida [3].

Todos los residuos acuosos contienen plata, aunque en distintas formas y compuestos químicos [3].

Tabla 1.2 Residuos líquidos de proceso fotográfico, tomado de [3]

<b>SOLUCIÓN</b>	<b>TIPO COMPONENTE</b>
Reveladores	Compuestos orgánicos
Baños de paro o detención	Compuestos orgánicos
Blanqueadores en base a ferrocianuros	Ferrocianuros
Blanqueadores en base a dicromato	Compuestos orgánicos Compuestos de cromo
Baños de fijación	Compuestos orgánicos Plata Tiocinato Compuestos de amonio Compuestos de azufre
Neutralizadores	Compuestos orgánicos
Estabilizadores	Fosfatos



## **1.7 MÉTODOS DE RECUPERACIÓN DE LA PLATA EN PLANTAS DE PROCESAMIENTO FOTOGRÁFICO**

Existen varias técnicas disponibles para recuperar la plata, de las soluciones ricas en plata, usadas en el procesamiento fotográfico. De estas, tres son usadas en casi todos los métodos prácticos de la recuperación. Estos son [4]:

- Electrólisis
- Substitución metálica
- Precipitación

Además, la tecnología de intercambio de iones puede ser usada para tratar las aguas de limpieza con el fin de remover la plata. Esta tecnología es típicamente usada cuando se debe satisfacer severos requerimientos de desagües, y el costo de la operación y capital invertido son intereses secundarios. Otras tecnologías, tales como, osmosis invertida, destilación y evaporación pueden producir un lodo de plata; sin embargo, estas tecnologías solamente alteran la concentración de la plata y no remueven la plata de la solución. Métodos usados con éxito en otras industrias para recuperar la plata tal como, extracción electrolítica, no pueden ser aplicados a las soluciones del procesamiento fotográfico ya que tienden a causar una descomposición significativa de la solución [4].

### **1.7.1 LA ELECTRÓLISIS**

En el proceso electrolítico de recuperación de plata, una corriente directa pasa a través de una solución rica en plata entre un electrodo positivo (el ánodo) y un electrodo negativo (el cátodo).

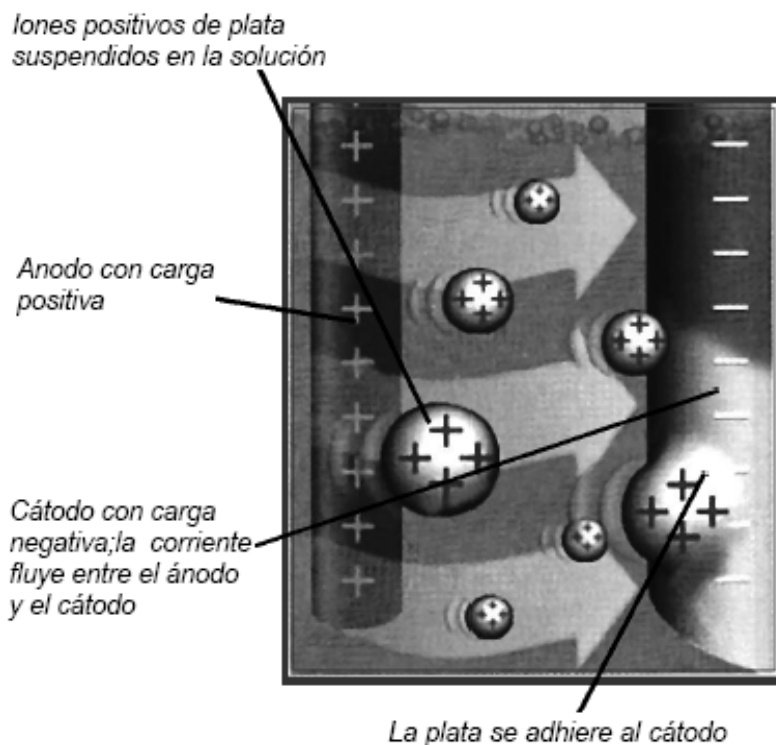


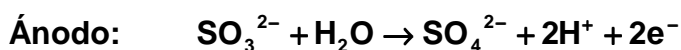
Figura 1.1 Gráfica del Proceso electrolítico, tomado de [38]

Durante el proceso un electrón es transferido del cátodo hacia el ión plata cargado positivamente, convirtiéndolo a su estado metálico, el cual se adhiere al cátodo. En una reacción simultánea en el ánodo, un electrón es removido de algunas especies en solución. En la mayoría de las soluciones ricas en plata, este electrón proviene del sulfito [4].

La densidad de corriente y la duración del proceso determinarán la cantidad y calidad de la plata depositada. Las reacciones que ocurren son [4]:



Complejo de Tiosulfato de Plata + Electrón  $\rightarrow$  Plata Metálica + Tiosulfato



Sulfito + Agua  $\rightarrow$  Sulfato + Iones de Hidrógeno + Electrones

La electrólisis produce una plata metálica casi pura, contaminada solo ligeramente por algunas reacciones superficiales que también ocurren (pureza alrededor del 90%).

Hay tres clases básicas de células en el proceso de electrólisis [2]:

- **Cátodo fijo:** El líquido es rápidamente bombeado sobre el cátodo estacionario. Este diseño, a menudo, es menos eficiente que las células de cátodo rotativo; sin embargo, estas unidades usualmente requieren menos mantenimiento [2].
- **Cátodo rotativo:** Debido a la alta eficiencia de la transferencia de la masa de las células electrolíticas de este diseño, éstas pueden ser utilizadas con buen resultado, para tratar soluciones blanqueador-fijador ricas en hierro que tradicionalmente son difíciles de desplatar [2].
- **Recirculación en línea** (células de cátodo *fijo* o *rotativo*, cualquiera de los dos, con la instalación de controles electrónicos especiales) [2].

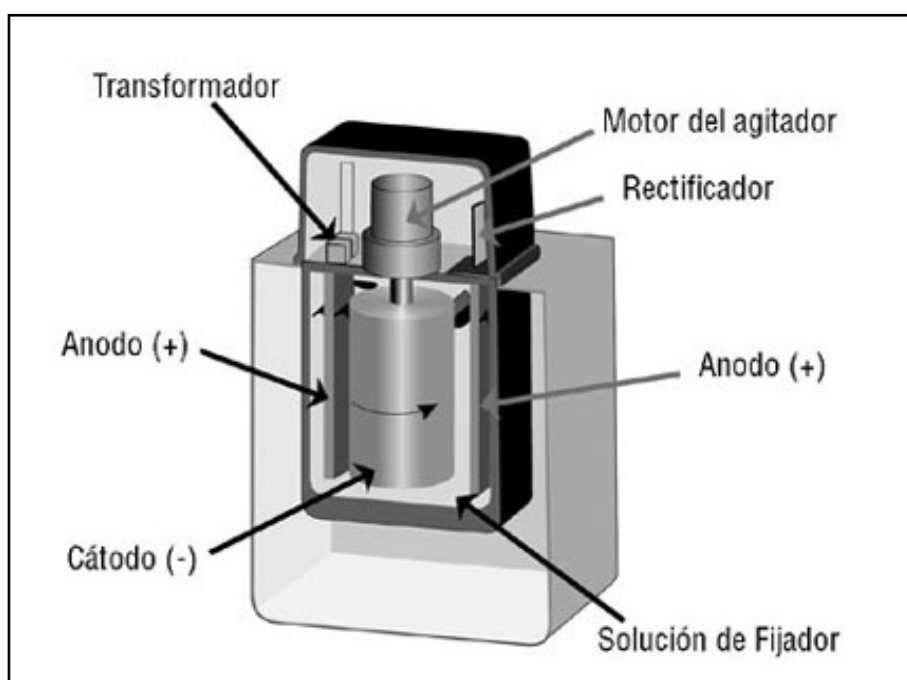


Figura 1.2 Partes de una Cuba electrolítica, tomado de [38]

En la recirculación en línea de fijador, por medio del proceso electrolítico el fijador es recirculado entre el tanque de procesamiento y una unidad electrolítica de recuperación de plata especialmente diseñada, por lo que el tanque de fijador es mantenido a un nivel más bajo de plata de lo normal. Lo que genera un ahorro en la cantidad de fijador usado (aproximadamente un 50%) [1].

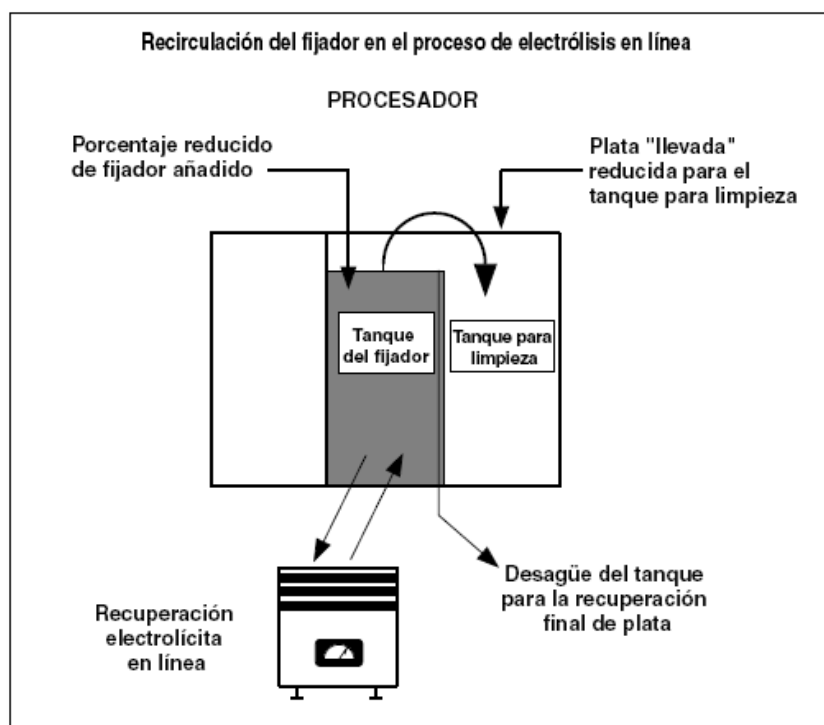


Figura 1.3 Recirculación en línea del fijador, tomado de [38]

Por lo general las unidades de cátodo fijo se usan para soluciones bajas en hierro tales como el Proceso C-41 o fijadores blanco y negro. Células de cátodo rotativo se usan comúnmente en soluciones que contienen un alto nivel de hierro tales como blanqueadores-fijadores de papel a color [2].

El hierro en estas soluciones produce una reacción electroquímica que compite con la reducción de plata en el cátodo; se necesita un aumento de movimiento de flujo a través del cátodo para producir una eficacia mayor de platinado y de esta forma proveer un porcentaje adecuado de separación de la plata. La desventaja de las unidades de cátodo rotativo es que contienen más partes, lo cual añade al costo y al mantenimiento [2].

En la recuperación electrolítica de la plata, los intentos de acelerar el proceso de recuperación o por remover plata hasta concentraciones menores que 200 mg/L, ya sea prolongando el tiempo de residencia en la celda o aumentando la densidad de corriente (amperaje/área de la superficie del cátodo) en el cátodo, reducirán dramáticamente la eficiencia de la celda. En las condiciones indicadas una capa negra de precipitado de sulfuro de plata recubrirá el cátodo inutilizándolo para continuar con el proceso de recuperación de plata [3].

Puede usarse la electrólisis únicamente como un tratamiento primario. Si se debe alcanzar un límite regulador bajo, se debe usar alguna otra clase de recuperación secundaria de plata tal como la sustitución metálica o la precipitación [3].

### **1.7.2 SUBSTITUCIÓN METÁLICA**

El reemplazo o sustitución metálica es un proceso que ocurre cuando una solución que contiene iones disueltos de un metal activo tal como la plata, entra en contacto con un metal sólido más activo tal como el Hierro. El equipo comercial que puede usarse en la recuperación es conocido como Cartuchos de Recuperación Metálica (MRCs) o Cartuchos de Recuperación Química (CRCs).

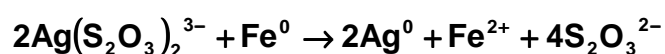
Un cartucho de recuperación metálica contiene hierro metálico (virutas de acero) de tal manera que las soluciones fotográficas puedan pasar a través de él, en una forma controlada, permitiendo que los complejos de plata en la solución reaccionen con el hierro. La plata es reducida a su forma metálica y se queda en el cartucho mientras que el hierro es oxidado y pasa a la solución [1].

Hay muchas clases de hierro que se pueden usar en MRC., tales como [2]:

- Virutas de acero.
- Limaduras de hierro.
- Alambre de alambrado de acero.
- Limaduras de hierro en un soporte rígido.

La fuente más común es la viruta fina de hierro, escogida por su área de superficie. La viruta de hierro es enrollada en un eje o cortada, y empacada dentro de un cartucho. Algunos fabricantes de cartuchos utilizan otras formas, tales como partículas de hierro pegadas a fibras de vidrio, material de malla de hierro enrollado, etc [4].

Como el proceso electrolítico, el reemplazo metálico produce oxido-reducción, por lo que la reacción que resulta es [4]:



Complejo de Tiosulfato de Plata + Hierro Metálico → Plata Metálica + Ión de Hierro + Tiosulfato

La concentración final de plata es afectada por el caudal a través del cartucho, el área superficial del hierro, el tiempo de contacto, pH, la concentración inicial de plata y la concentración de tiosulfato. Si el MRC está funcionando adecuadamente, la concentración de la plata puede ser reducida a menos de 5 mg/L [4].

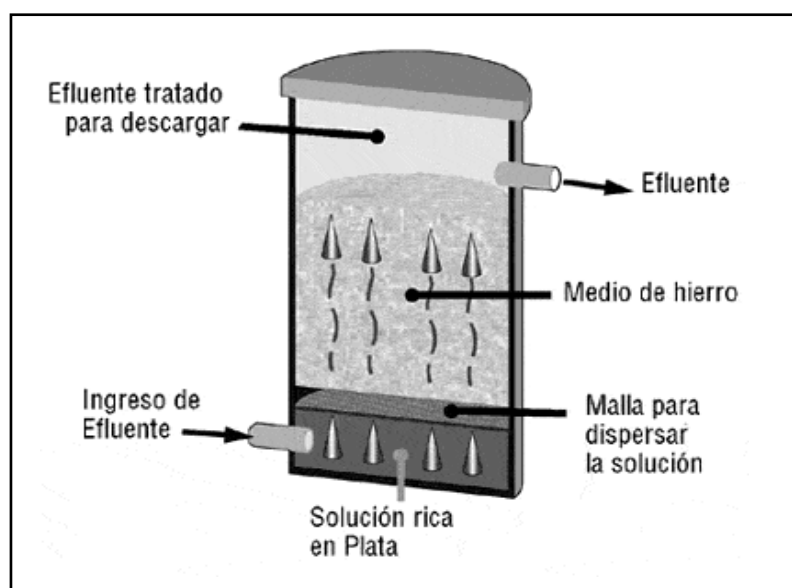


Figura 1.4 Esquema de un cartucho de recuperación, tomado de [38]

Para evitar la pérdida no deseada de plata, un sistema generalmente consiste de dos cartuchos en serie. Cuando el primer cartucho está agotado se retira, se coloca el cartucho del segundo en la posición de éste, y un cartucho nuevo es colocado en la segunda posición [4].

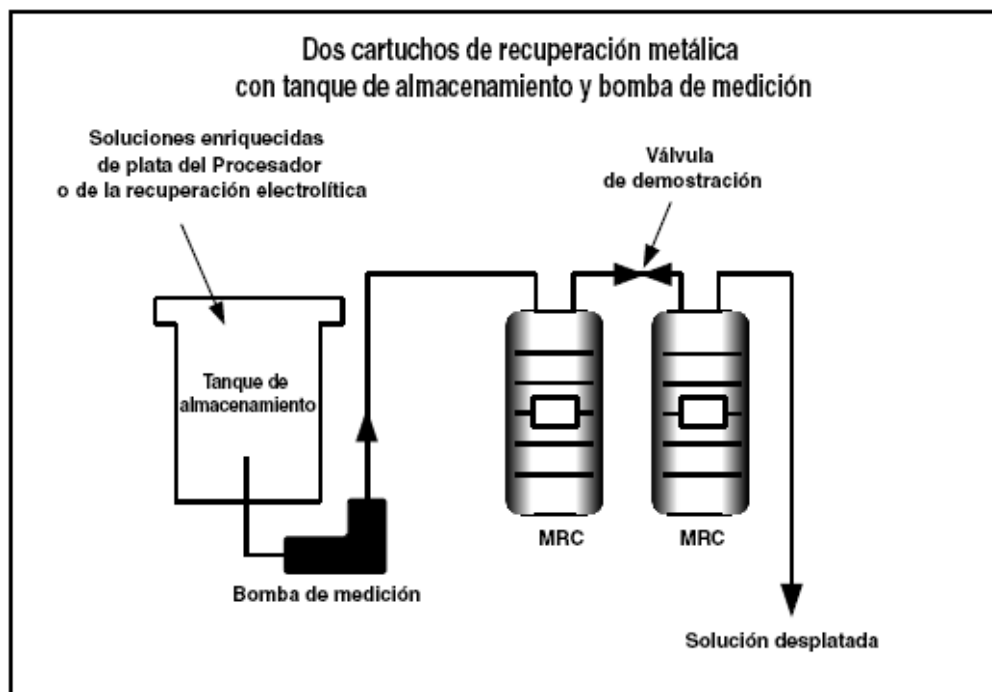


Figura 1.5 Sistema de dos Cartuchos en serie, tomado de [38]

Al igual que la electrólisis, el reemplazo metálico tiene sus desventajas. Sin un buen control de flujo y adecuada mantención del sistema, pueden producirse variaciones al azar de las concentraciones de plata en el efluente. El lodo de plata retirado de los cartuchos es relativamente caro de refinar [4].

### 1.7.3 PRECIPITACIÓN

La precipitación química (añadidura de un químico a la solución) puede remover la plata de las soluciones químicas, reduciéndolas a un nivel muy bajo (formación de una sal insoluble de plata) [4].

Los agentes de precipitación comúnmente usados han sido sulfuros de metales alcalinos (tales como sulfuro de sodio y sulfuro de potasio) los cuales formarán sulfuro de plata en la solución; el sulfuro de plata es removido por filtración [4].

La falta de aceptación del proceso de precipitación–filtración de sulfuro de plata puede ser atribuida principalmente a dos factores [4]:

- La concentración de plata en la solución debe ser medida en forma precisa antes de la adición de sulfuro, para evitar la sobre dosificación y eventual desprendimiento del gas tóxico del ácido sulfhídrico.
- El precipitado de sulfuro de plata es difícil de filtrar, obstruyendo el medio filtrante.

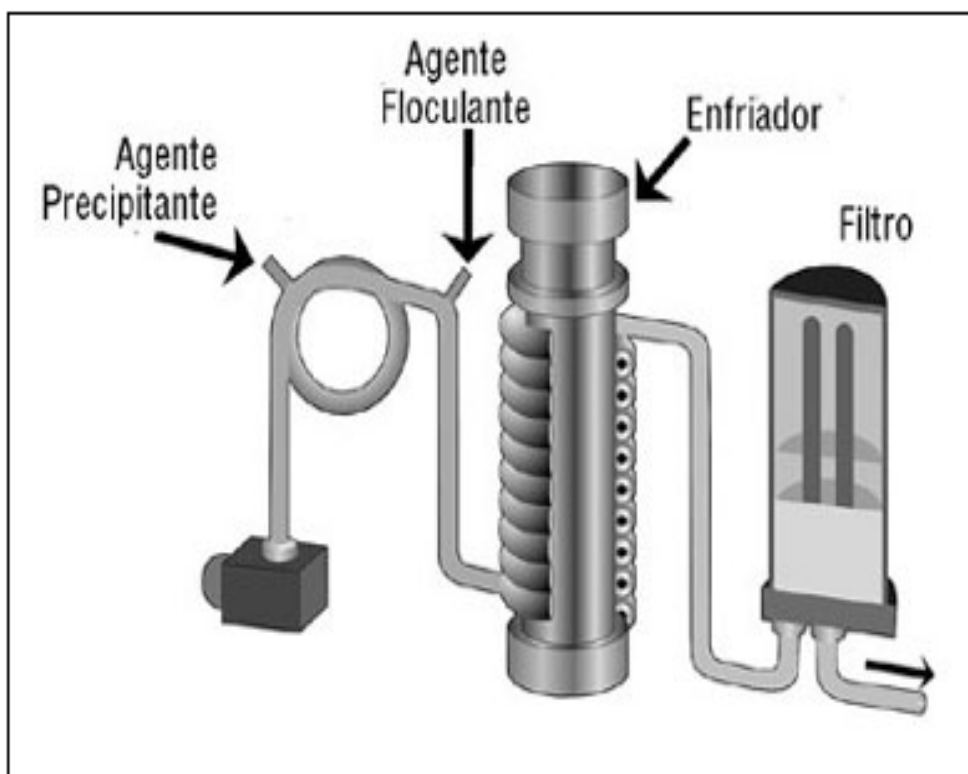


Figura 1.6 Esquema de un desplatizador por Precipitación, tomado de [38]



## 1.8 COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE RECUPERACIÓN DE LA PLATA [2]

Tabla 1.3 Ventajas y Desventajas de los métodos de recuperación de la plata

<b>TÉCNICA</b>	<b>VENTAJA</b>	<b>DESVENTAJA</b>
Recuperación Electrolítica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recupera plata como un metal puro.</li> <li>- Alta tasa de Recuperación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Potencial formación de Sulfuros</li> <li>- Alta concentración de plata en el efluente.</li> <li>- Puede requerir recuperación secundaria</li> </ul>
Sustitución Metálica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Baja Inversión.</li> <li>- Bajos Costos Operativos.</li> <li>- Operación Simple</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alto contenido de hierro en el efluente.</li> <li>- Plata es recuperada como un lodo.</li> <li>- Se necesita generalmente de dos unidades en serie.</li> </ul>
Precipitación con Sulfuro	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puede trabajar en concentraciones de 0,1mg de plata/L.</li> <li>- Baja inversión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Operación compleja</li> <li>- Plata es recuperada como un lodo.</li> <li>- La solución tratada no puede ser reutilizada.</li> <li>- Potencial emisión de H<sub>2</sub>S</li> </ul>

## 1.9 SELECCIÓN DE LOS ACTUADORES

### 1.9.1 SELECCIÓN DE LAS BOMBAS PARA EL PROTOTIPO

El prototipo consta de 3 bombas, la primera va a llevar el químico del tanque de almacenamiento a la cuba electrolítica, la segunda se encargará del vaciado de la solución desplatada (junto con la electro-válvula) hacia el desagüe, y la tercera se encarga de hacer recircular el químico que esta en la cuba electrolítica.

Para la selección de la bomba adecuada deben considerarse los siguientes aspectos:

- a) Solidez y calidad de los componentes de la bomba, lo que permitirá resistir una gran cantidad de horas de funcionamiento.

- b) Resistencia de la bomba a la *acción corrosiva* de los químicos a través del tiempo. Si la bomba no es resistente a la corrosión, la vida útil de ésta disminuirá rápidamente, por lo cual se deberán reponer frecuentemente los elementos deteriorados para mantener su operación.
- c) Caudal de operación en relación a la altura manométrica requerida. Dado que en general existe una pequeña diferencia de altura entre el tanque de almacenamiento de la solución y la cuba electrolítica, la bomba deberá ser capaz de impulsar eficientemente la solución.
- d) Compacta y de gran eficiencia.

En las procesadoras de revelado fotográfico se utilizan *bombas centrifugas de acople magnético (magnetic pump)* de tamaño pequeño y de gran rendimiento. Dichas bombas están diseñadas específicamente para manipular fluidos altamente corrosivos (alta resistencia a la corrosión), con una estructura libre de perdidas y alta duración. Además presentan la ventaja de que cuando están trabajando son muy silenciosas.



Figura 1.7 Bomba centrifuga de acople magnético serie MD, tomado de [5]

Como el prototipo va a trabajar con los mismos químicos del proceso fotográfico, se selecciona el mismo tipo de bombas, ya que cumplen con los requisitos anteriormente señalados y además presentan las siguientes características:

➤ **Libre de fugas**

El accionamiento magnético sin sellos de estas bombas previene la corrosión causada por las pérdidas a través de los ensambles de la bomba, eliminando la contaminación alrededor de las bombas [5].

➤ **Gran durabilidad.**

Diseño desarrollado para lograr una alta resistencia química ETFE y SIC son usados en las partes principales de las bombas, pudiendo manipular los productos químicos más corrosivos [5].

➤ **Variedad de modelos.**

Dentro de la serie MD existen modelos con caudales desde 5.5 Lpm hasta un máximo de 135 Lpm (litros por minuto) [5].

➤ **Ácidos con alta densidad**

Están diseñadas para bombear ácidos fuertes. Tres tamaños de turbina están disponibles de acuerdo al peso específico y la potencia [5].

➤ **Clase económica de alta eficiencia**

Los modelos de alta descarga y alta capacidad están disponibles para aplicaciones de bajo caudal y presión [5].

### **1.9.1.1 Principio de Operación de las Bombas**

En la bomba centrífuga el eje no está sujeto al impulsor directamente, sino está dirigida por un par de imanes incorporados en la turbina y en el eje del motor. De esta manera el líquido solo está en contacto con el impulsor y el cuerpo (cámara) de la bomba [6].

La estructura de la bomba de acople magnético suprime los sellos o los cierres mecánicos en el eje, ya que el cuerpo de la bomba está protegido por una

camisa y la turbina es operada por los imanes. El par de acople del imán conductor e imán turbina es suficiente para ser impulsado por el par de arranque del motor [7].

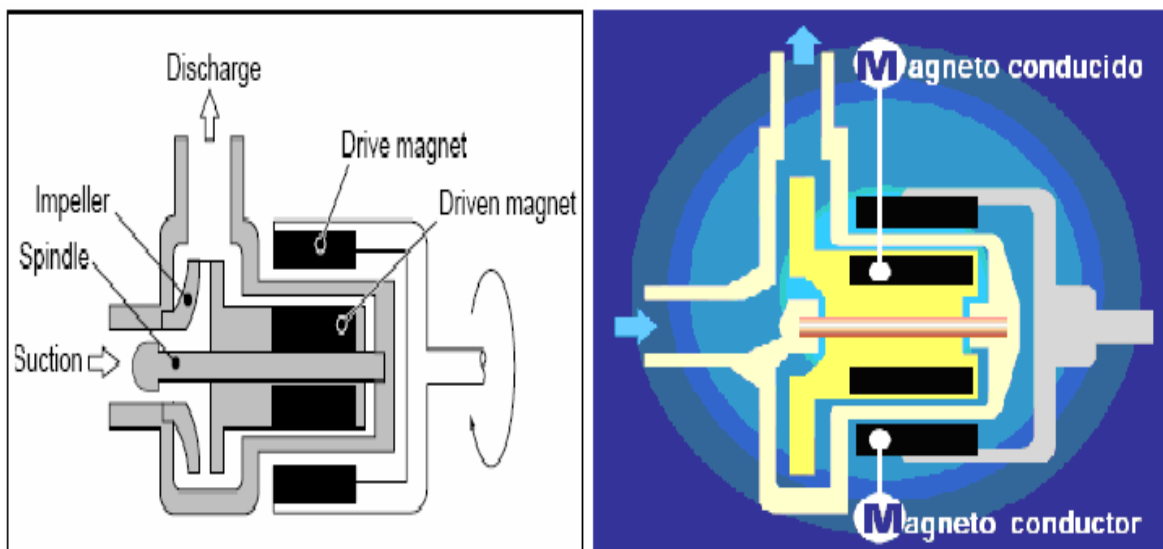


Figura 1.8 Estructura interna de una Bomba de Acople Magnético, tomado de [6]

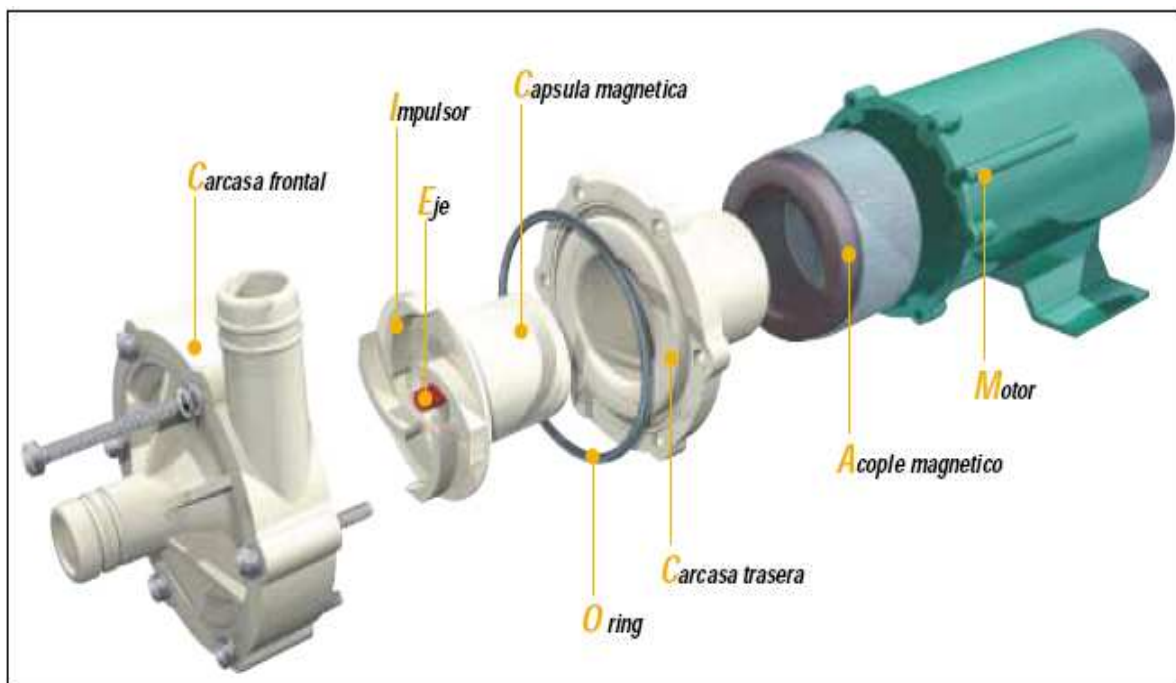


Figura 1.9 Estructura externa de la bomba, tomado de [7]

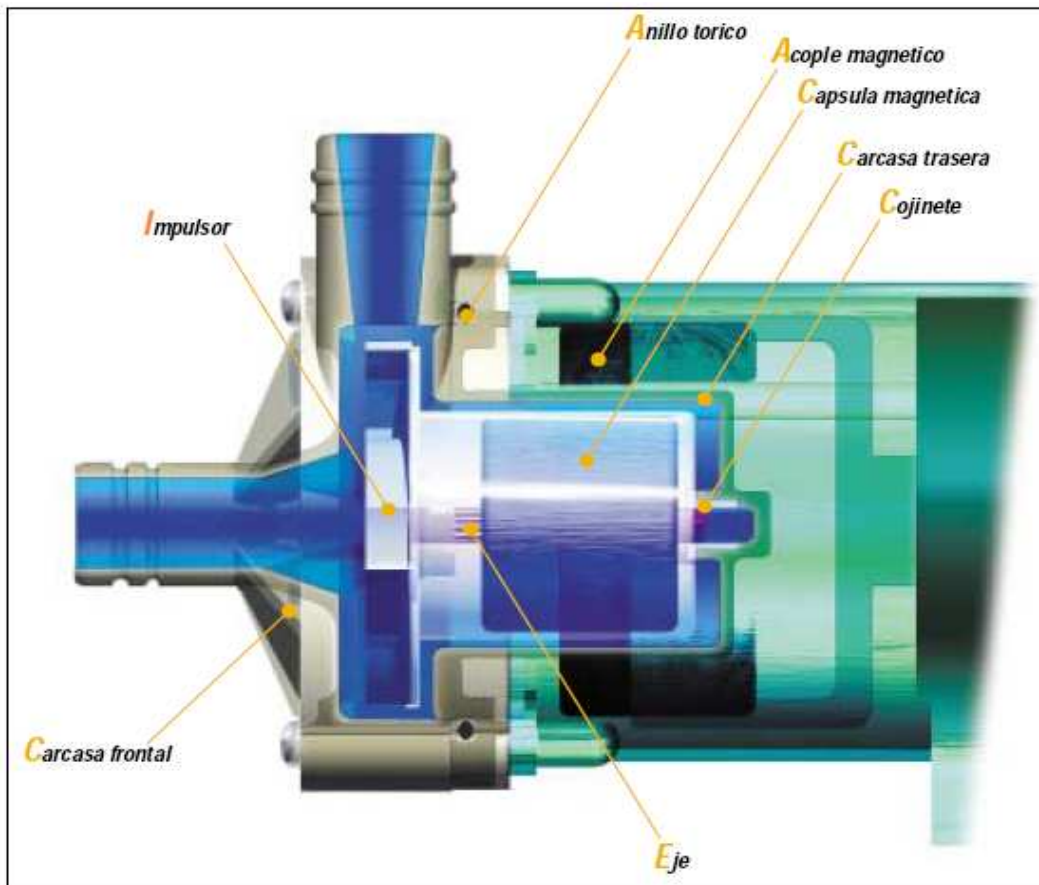


Figura 1.10 Vista interna de la bomba, tomado de [7]

## 1.9.2 SELECCIÓN DEL MOTOR PARA EL CÁTODO

Para realizar la rotación del cátodo del prototipo se ha utilizado un motor de inducción de corriente alterna, debido a que presenta las siguientes características:

- Confiabilidad del motor.
- Simpleza del motor.
- No necesita mantenimiento.
- Costo del motor es bajo comparado con uno de DC de las mismas características. (tamaño/peso).
- Ambientalmente insensible al ruido.

Los datos de placa del motor seleccionado son los siguientes:

**Marca:** HEIDOLPH 16/94

**Tipo:** 681.922

**Voltaje:** 220Vac                      60Hz                      160W

**Condensador:** 5 $\mu$ F/400V

**Velocidad:** 2600RPM                      **Ratio:** 9,95 to 60,5:1 [8]

**Torque:** Mayor a 4 [Nm ]

**Caja Reductora:** 6 :1



Figura 1.11: Motor con caja reductora marca Heidolph

Las razones principales para haber seleccionado este tipo de motor son:

- El motor incluye una caja reductora que se acerca mucho a la velocidad que necesita el prototipo.
- El motor se lo adquirió en el país al 50% del precio real.

### 1.9.3 SELECCIÓN DE LA ELECTRO-VALVULA

Para el vaciado de la cuba electrolítica, basta con dejar pasar el fluido y luego detenerlo, por lo que esta acción puede ser realizada por una electro-válvula.

Las electro-válvulas (válvulas de solenoide) son de acción todo o nada, es decir, posición abierta dejando totalmente libre el paso del fluido y posición cerrada cortando su paso [9].

La electro-válvula típica esta constitutita por una bobina solenoide encajada en un núcleo fijo en forma de tubo cilíndrico, en cuyo interior se desliza un núcleo móvil provisto en su extremo de un disco o tapón [9].

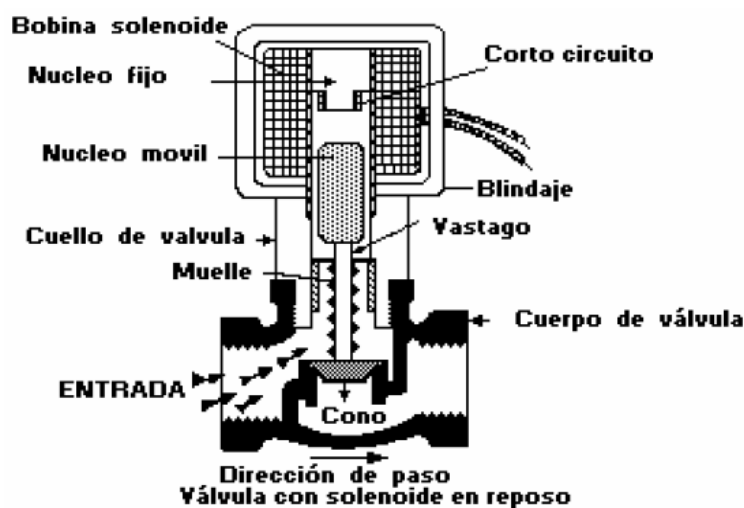


Figura 1.12 Partes de una electro-válvula, tomado de [9]

La bobina actúa como un electroimán, su excitación crea un campo magnético que atrae al núcleo móvil y vástago, mientras su des-excitación invierte la posición de este gracias a un resorte que empuja el disco contra el asiento, cerrando así la válvula [9].

Por seguridad en caso de avería o corte de corriente eléctrica, la válvula de solenoide se fabrica en dos modelos: Normalmente cerrada en falla de corriente y Normalmente abierta en falla de corriente [9].

La electro-válvula seleccionada es [10]:

**Marca:** EHCOTECH

**Tipo:** CCB-CS

**Especificaciones del Solenoide a 120 Vac**

**Modo de Operación:** Normalmente Cerrado

**Corriente de Retención (holding current):** 450mA

**Rango de Presión:** 3 – 140 psi

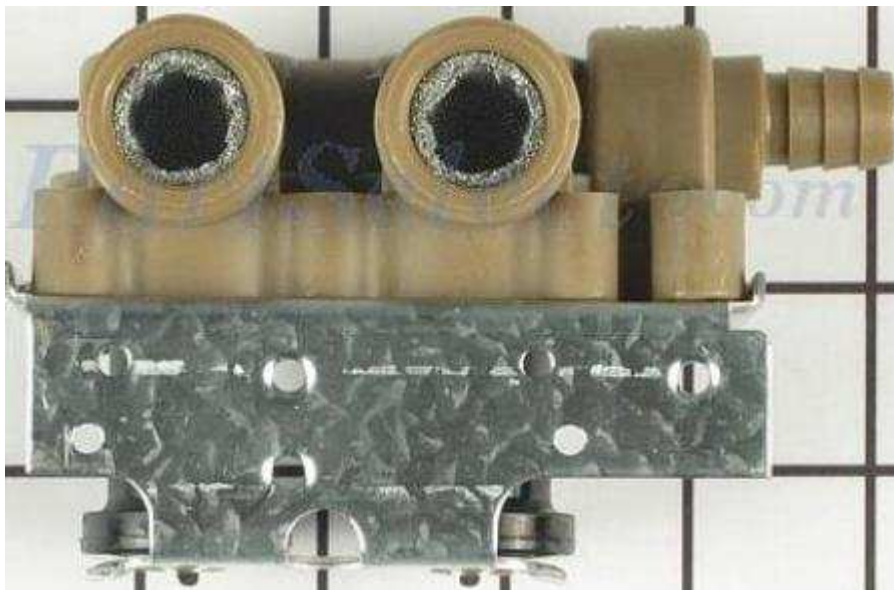


Figura 1.13 Electro-válvula EHCOTECH, tomado de [11]

La electro-válvula de la figura anterior es de acción directa, es decir el tapón permite el paso del fluido al excitarse el solenoide de la válvula.

Las razones principales para haber seleccionado este tipo de electro-válvula son [11]:

- No Corrosivo
- Hermética
- Elevador manual interno.
- Precio bajo.



## **1.10 SELECCIÓN DEL TIPO DE INSTRUMENTACIÓN**

En la cuba electrolítica se necesita controlar el llenado y vaciado de la misma, para lo cual la variable a controlar es el nivel.

### **1.10.1 SELECCIÓN DEL SENSOR DE NIVEL PARA LA CUBA ELECTROLÍTICA**

Para la selección del sensor adecuado se parte de los siguientes requerimientos:

- Determinación del nivel puntual (máximo y mínimo).
- La medición del nivel es de líquido
- Naturaleza del líquido (químicos corrosivos).
- Método de la medición directa.
- Grado de precisión deseada (medio).
- El sensor debe ser independiente de la presión, conductividad, temperatura.
- Disponibilidad de la fuente.

El requerimiento para sensar la variable nivel es muy simple, ya que la necesidad es estrictamente de saber cuando la cuba electrolítica esta llena y cuando esta vacía, no se necesita un grado de precisión extremo, por lo que el costo del sensor no debe ser alto.

Para determinar el nivel alto y bajo de la cuba, se utiliza sensores de nivel de flotador de unión magnética LVH200, debido a que estos cumplen con los requisitos anteriores.

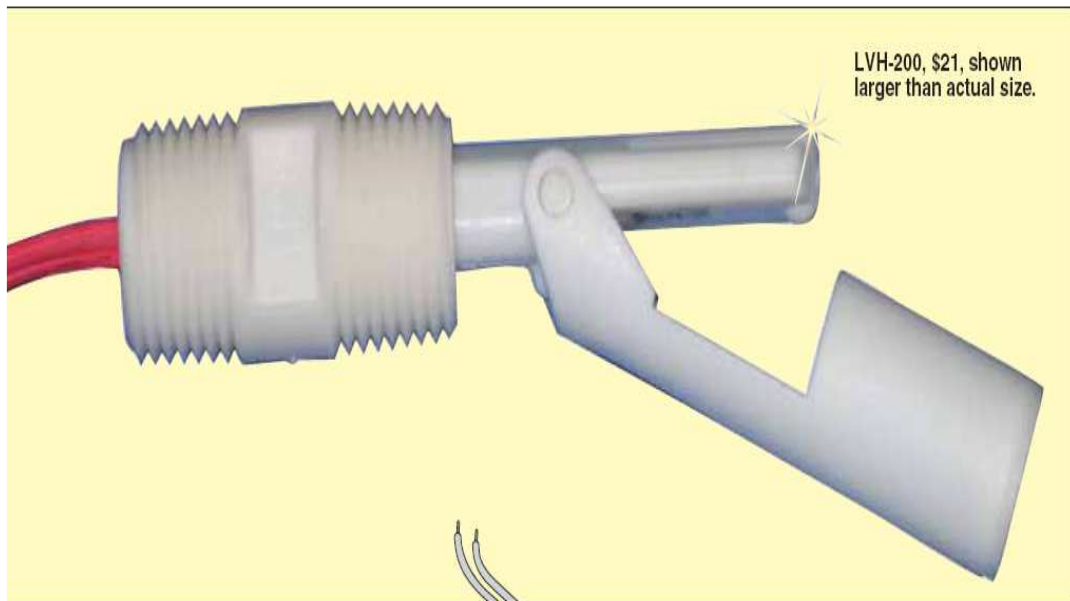


Figura 1.14 Sensor de nivel de flotador de unión magnética, tomado de [12]

En los interruptores de flotador de polipropileno, el flotador hueco lleva en su interior un imán que se desplaza a lo largo de un tubo guía vertical no magnético, este imán seguidor se encuentra suspendido. Estos sensores de nivel permiten monitorización continua sin ser influenciados por la conductividad, temperatura, presión y la viscosidad [12].

Si el nivel alcanza al flotador lo empuja en sentido ascendente, ascendiendo si la fuerza supera al peso del flotador, este movimiento es transmitido por la barra y el interruptor cambia de posición [12].

Como características adicionales se tiene que [13]:

- Son de montaje interior o exterior.
- Protección IP68 (NEMA6).
- Uso seleccionable, normalmente abierto-normalmente cerrado.

### 1.10.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL SENSOR DE NIVEL DE UNIÓN MAGNÉTICA

Comprende un tubo de medición en el cual un flotador, equipado con un imán, conmuta el contacto montado en el tubo en una manera no contactante. Como modificación a las conocidas técnicas para los interruptores de flotador de nivel, el tubo de medición en los sensores de nivel se equipa con un switch (contacto) sellado tipo reed [14].

El flotador activa el contacto sellado a través de la pared del tubo que mide de una manera no contactante. Esta técnica de detección es similar a la operación de un contacto deslizante en un potenciómetro resistivo [14].

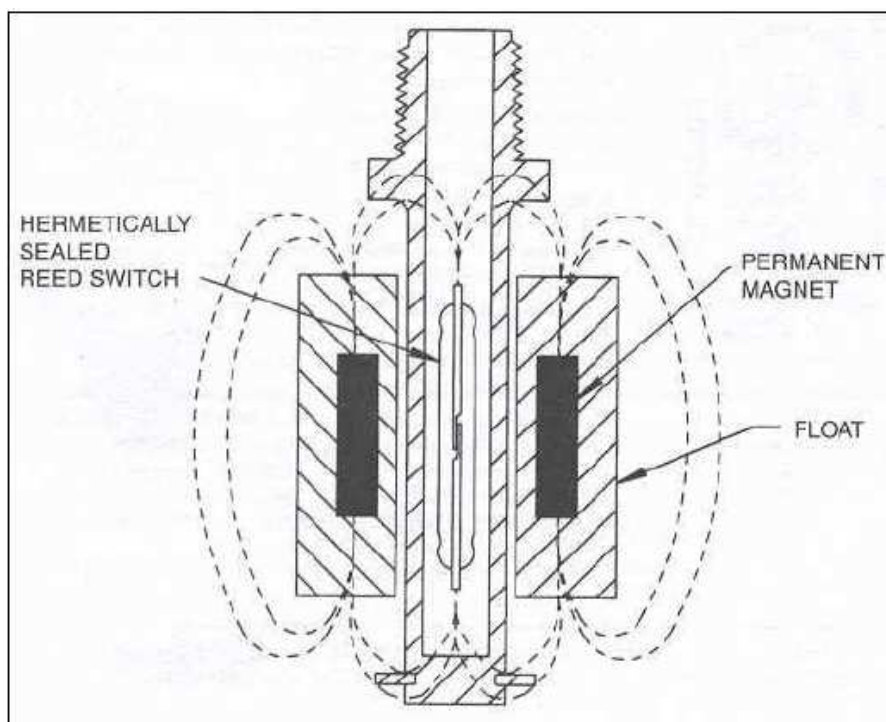


Figura 1.15 Vista interna del sensor de nivel de Flotador, tomado de [14]

## CAPÍTULO 2

### DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

#### 2.1 DISEÑO DEL PROTOTIPO

El proceso electrolítico se basa en los cambios químicos producidos por la corriente eléctrica, lo cual implica tener:

- Fuente generadora de corriente continua
- Cuba o reactor electrolítico
- Ánodo
- Cátodo
- Electrolito

##### 2.1.1 DISEÑO DE LA CUBA ELECTROLÍTICA

Los principales factores que determinan el tipo de unidad para el proceso electrolítico adecuado para una instalación de procesamiento fotográfico son [2]:

- La(s) clase(s) de solución(es) tratada(s).
- Volumen diario de la solución a tratar.

Si se va a tratar grandes cantidades de blanqueador-fijador RA4 se debe usar una unidad de cátodo rotativo o una unidad de "*bombear a través de*" especialmente diseñada para esta aplicación, en cambio si se va a tratar solamente soluciones bajas en hierro tales como fijador C-41, puede usarse una unidad de cátodo fijo más simple (y usualmente más barata) [2].

## **2.1.2 DISEÑO DE LA UNIDAD DE PROCESO ELECTROLÍTICO PARA LA RECUPERACIÓN DE PLATA (ESR)**

### **2.1.2.1 Diseño del Cátodo**

Para el diseño del Cátodo se debe tener en cuenta que la cantidad y calidad de plata que se encuentre presente en las soluciones del químico de reflujo (químico de desbordamiento) del proceso fotográfico dependen exclusivamente:

- Del tipo de solución que se va a tratar.
- Los químicos de revelado fotográfico tengan las concentraciones que especifica la KODAK.
- Hayan tenido un buen control de procesos, es decir, el nivel correcto de temperatura, recirculación, tasa de refuerzo, tiempo de proceso, etc.

Cabe indicar que el prototipo que se ha construido, va a trabajar solo con el químico de desecho proveniente del Blanqueador-Fijador RA4, ya que el químico de desecho que proviene del fijador C-41 tiene una concentración despreciable de plata debido a que la película fotográfica prácticamente a desaparecido del mercado.

El químico de desecho proveniente del Blanqueador-Fijador RA4 va a ser adquirido en la empresa Ecuacolor Laboratorios Fotográficos S.A.

La Tabla 2.1 indica las concentraciones de plata en los diferentes químicos del proceso de revelado e impresión fotográfica. Estos datos servirán como base y punto de partida para el diseño y dimensionamiento del cátodo.

Tabla 2.1 Concentraciones de Plata en algunas soluciones de Desbordamiento, tomado de [2]

Solución	Proceso KODAK	Concentración de Plata (mg/L)
<b>Blanqueadores (Proceso sin lavado)</b>	C-41 Mini-laboratorios	5 – 200
<b>Blanqueador-Fijador</b>	RA-4, NR	6,000 – 10,000
	RA-4, NT	3,000 – 4,000
<b>Fijador</b>	Blanco y negro	3,000 – 7,000
	E-6, Tanque 1	5,000 – 12,000
	E-6, Tanque 2	1,000 – 3,000
	C-41	5,000 – 12,000
	RA-4, blanqueador y fijador separado	2,000 – 10,000
<b>Lavados de bajo flujo</b>	RA-4, Tanque 1 Bajo Flujo	1,000 – 3,000
<b>Estabilizadores (Proceso sin lavado)</b>	C-41/RA-4 Mini-laboratorios	100 – 1,000

Los valores de concentración de la plata en la Tabla 2.1 son en *condiciones ideales*. Cabe resaltar que en los equipos de revelado con los que trabaja Ecuacolor, las concentraciones de los químicos de trabajo y las tasas de refuerzo de dichos químicos siempre han sido inferiores a los que recomienda la Kodak. **(50%)**

Diseño del Cátodo: [2]

$$\text{Amperaje Requerido} = \left( \frac{Ax3,785xC}{BxD} \right) [\text{Amp}]$$

$$\text{Área de Cátodo requerida} = \left( \frac{\text{AmpxB}}{40} \right) [\text{pies}^2]$$

**Donde:** **A** = Galones por día de solución a tratar

**B** = Naturaleza de la solución (efluente)

**C** = Contenido de plata (gramos/litro) en la solución

**D** = Tiempo disponible (diariamente, en horas) para funcionar el ESR.

Tabla 2.2 Valores asignados a los químicos para el diseño del cátodo, tomado de [2]

NATURALEZA DEL EFLUENTE	
Si el efluente es:	Entonces B=
- Fijador blanco y negro	4
- Fijador C-41 o E-6	3
- Blanqueador-Fijador + Lavado de bajo flujo, C-41, y/o E-6	2
- Solo blanqueador-fijador	1,5

### DATOS:

El peor caso para la concentración de plata en el Blanqueador-Fijador RA4 NR es tomando el 50% del valor mínimo.

#### Blanqueador-Fijador RA4:

Capacidad de la cuba = 5 galones (para cada baño).

Tiempo funcionamiento por baño = 6,5 horas

Concentración de plata aproximada = 3 gr/lit

$$\text{Amperaje Requerido} = \left( \frac{5 \times 3,785 \times 3}{1,5 \times 6,5} \right) \text{ [Amp]}$$

$$\text{Amperaje Requerido} = 5,83 \text{ [Amp]} \approx 6 \text{ [Amp]}$$

$$\text{Área de Cátodo requerida} = \left( \frac{6 \times 1,5}{40} \right) \text{ [pies}^2\text{]}$$

$$\text{Área de Cátodo requerida} = 0,225 \text{ [pies}^2\text{]} \rightarrow 209 \text{ cm}^2$$

Indistintamente de la forma que tenga la cuba electrolítica, la KODAK indica que la forma más adecuada para el cátodo es la de un cilindro circular recto (drum) [15].

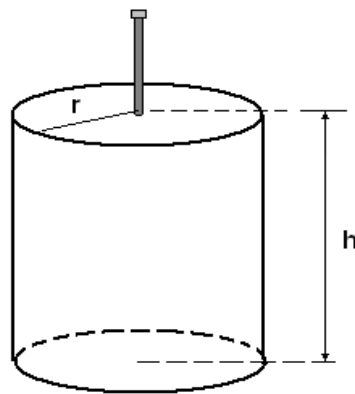


Figura 2.1 Forma del Cátodo.

$$S = 2 \pi r h$$

**Donde:**

**S** = Superficie del cilindro

**r** = Radio del cilindro

**h** = Altura del cilindro

**2 π** = Constante

Dimensiones físicas:

*Datos:*  $S = 209 \text{ cm}^2$

$r = 3,5 \text{ cm}$

$$S = 2 \pi r h \rightarrow 209 \text{ cm}^2 = 2\pi(3,5)h \rightarrow h = 9,5 \text{ cm}$$

Se construirá un Cátodo con las siguientes dimensiones:

**Altura  $h = 10 \text{ cm}$**

**Radio  $r = 3,5 \text{ cm}$**

El material utilizado para la fabricación del cátodo será **acero inoxidable** debido a que:



- Se trabajara con productos químicos, y debe tener alta resistencia a la corrosión.
- Permite una alta conductividad eléctrica.
- Material dúctil y maleable (existen láminas desde 0,12 a 0,5 milímetros de espesor).
- Presenta buenas propiedades mecánicas.
- No debe experimentar ninguna clase de reacción química.



Figura 2.2 Cátodo construido en acero de 1½ pulgadas de espesor

#### 2.1.1.2 Diseño de los Ánodos

La plata, oro y carbón, se utilizan debido a que son relativamente inertes, experimentan muy pocas reacciones químicas cuando se aplica como electrodo, su cometido es simplemente intercambiar electrones en un sentido u otro con las especies reactivas en la solución. Además los diferentes tipos de carbón con soluciones electrostáticas se usan como electrodos, puesto que la superficie del carbono y las velocidades de numerosas reacciones redox son muy altas. Los electrodos metálicos funcionan mejor cuando la superficie en contacto es grande y limpia [16].

Para el diseño de los ánodos, el material de construcción va hacer **carbón** (constituido por grafito de alta pureza) para aplicaciones eléctricas, del mismo tipo que se utiliza en las escobillas de los motores debido a que:

- Debe tener alta resistencia a la corrosión.
- Permite una alta conductividad eléctrica.
- Varias dimensiones (según la necesidad).
- Buena resistencia mecánica.
- Elevado potencial de ruptura.

El grafito presenta numerosas ventajas que lo hacen el material más ampliamente utilizado como electrodo. Es muy fácil de mecanizar, resiste bien los choques térmicos, tiene un coeficiente de dilatación térmico muy bajo (tres veces menor que el cobre). Además está disponible en bloques de grandes dimensiones, tiene una densidad 5 veces menor que el cobre lo cual permite tener electrodos más ligeros [17].

Para determinar el tamaño del electrodo de carbón (grafito) es indispensable conocer:

- El valor de la densidad de corriente que va a circular.
- Las condiciones mecánicas a las que va a estar expuesto.
- El ambiente de trabajo.

La forma geométrica de los ánodos es rectangular con caras planas, ya que es más fácil cortar electrodos con caras planas que con caras curvas.

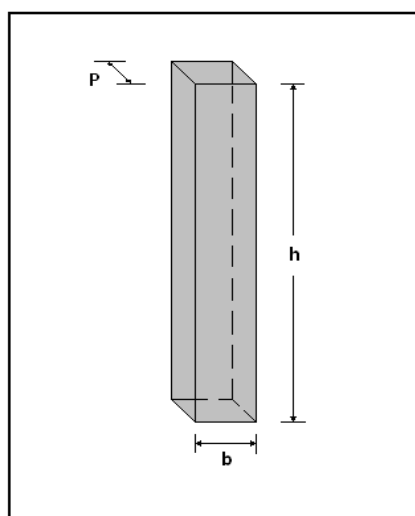


Figura 2.3: Forma del Ánodo

Este tipo de grafito esta constituido de polvos de carbono y coque; que son sometidos a otros tratamientos térmicos y en particular a un tratamiento a alta temperatura (superior a 2500°C) para transformar el carbono amorfo de base en grafito artificial [18].

Su principal propiedad, es que este tipo de grafito en escobillas presenta una caída media de tensión al contacto y frotamiento bajo o medio, es decir, con pérdidas reducidas por lo que se adaptan especialmente a las velocidades altas (50m/s). Sus principales aplicaciones son en todo tipo de máquinas estacionarias o de tracción, rápidas, con tensiones bajas, medias o altas y carga constante o variable [18].

**DATOS:** [18]

- Carbón grafito aglomerado con resina sintética FH-42.
- La altura del cilindro circular recto (cátodo) es 10cm.
- Densidad de corriente máxima aplicable 10A.

Debido a que debe existir una transferencia electrolítica entre el ánodo y el cátodo es imprescindible que la altura de los electrodos sea de al menos la misma altura del cátodo, por tanto la altura del ánodo también es de 10 cm.

Densidades de corriente en las escobillas [18]:

- De 8 a 12 A/cm<sup>2</sup> (máxima) en régimen estable.
- De 20 a 25 A/cm<sup>2</sup> (máxima) en régimen transitorio instantáneo.
- Velocidad periférica admisible: hasta 50 m/seg.

Tabla 2.3 Características del Grafito FH42, tomado de [33]

Calidad	Densidad en masa [g/cm <sup>3</sup> ]	Porosidad [%]	Resistencia a la flexión [N/mm <sup>2</sup> ]	Resistividad [μΩm]	Conductividad térmica [W/mK]	Conductividad térmica [W/mK] ⊥	Coefficiente de Expansión Térmica [10 <sup>-6</sup> /K]    α 25-1000°C	Coefficiente de Expansión Térmica [10 <sup>-6</sup> /K] ⊥ α 25-1000°C
CF260	1,35	8	80	50		5		
CF264	1,40	8	80	35		25		
CF222	1,55	8	200	22	40	10	0,8	7,0
CF270	1,74	10	60	22	45	10	1,2	7,1
					isótropo	isótropo	isótropo	isótropo
FE879	1,90	10	90	18	70		8,2	
FE779	1,95	6	90	19	65		7,4	
FE479	1,80	11	45	15	75		6,0	
FE579	1,81	13	65	19	55		5,6	
FE49	1,72	15	33	28	40		4,0	4,8
FH42	1,62	11	50	35	11		4,0	

En el anexo J se indican todas las características principales de los diferentes grupos de calidad de los grafitos.

Aplicando el requerimiento más importante del grafito (**8 a 12 A/cm<sup>2</sup>**), tomando el peor caso, en que el grafito soporta 10A/cm<sup>2</sup> y como se va a trabajar máximo con 10 A/cm<sup>2</sup>, la base del electrodo será de 2cm:

$$S = b \times h$$

**DONDE:**

**S** = Área

**b** = Base

**h** = Altura

$$S = 2\text{cm} \times 10\text{cm} \Rightarrow S = 20 \text{ cm}^2$$

Como los electrodos en el interior de la cuba electrolítica van a estar expuestos al movimiento del químico provocado por la recirculación del mismo y por el movimiento del cátodo, para que no se rompan es recomendable que la profundidad del electrodo sea de 1cm.

Se construirá dos ánodos electrográficos FH42 de las siguientes dimensiones:

**Altura  $h = 10$  cm**  
**Base  $b = 2$  cm**  
**Profundidad  $P = 1$  cm**



Figura 2.4 Electrodo de grafito fabricado en INDUCARBONES

## **2.2 DISEÑO DE ELEMENTOS NECESARIOS PARA LA ROTACIÓN DEL CÁTODO**

Un motor de AC es el encargado de producir la rotación al cátodo, para esto, a la célula rotatoria se le va a acoplar un eje de hierro, el cual estará sujeto a una base de sujeción metálica de hierro que rodea a la cuba por medio de una chumacera. Ya que el eje de rotación no tendrá ningún contacto con el químico de la cuba, se lo construirá de hierro. Además el diseño de la base de sujeción debe permitir transmitir la corriente hacia el electrolito por medio de un par de escobillas de carbón.

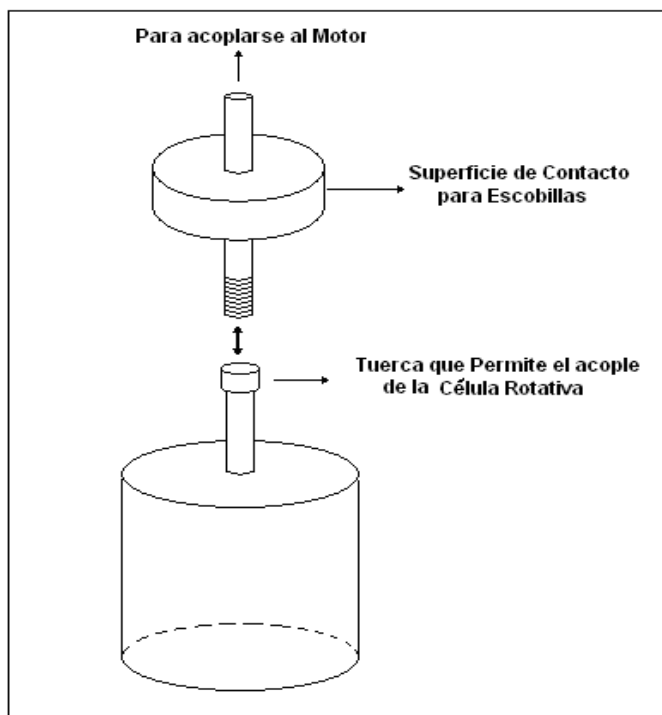


Figura 2.5 Eje de Acople para el cátodo de la cuba

Las gráficas del eje de hierro y cátodo con sus respectivas medidas se presentan en el anexo E.

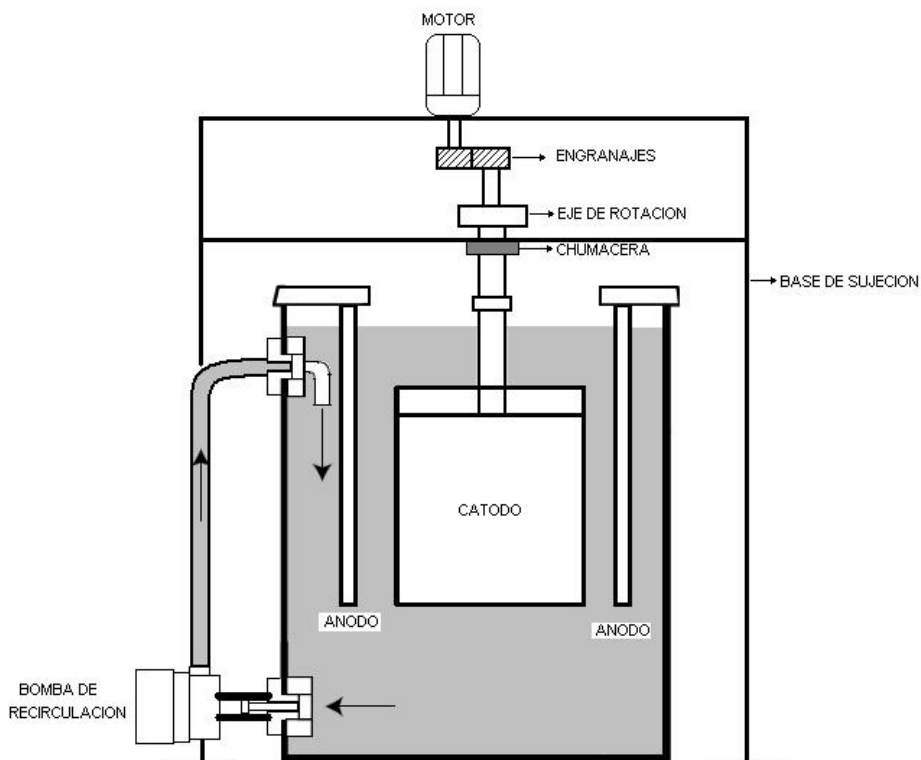


Figura 2.6 Motor acoplado al cátodo de la cuba electrolítica

La chumacera que se va a utilizar tiene las siguientes características:

**Marca:** SKF

**Tipo:** De pared

**Tamaño:** ½ pulgada.

**Material:** Hierro

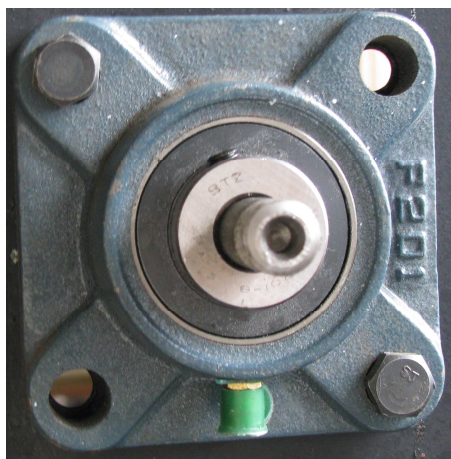


Figura2.7 Chumacera SKF de pared

### **2.3 DISEÑO DE ELEMENTOS NECESARIOS PARA TRASMITIR ENERGÍA AL CÁTODO**

Para transmitir la corriente eléctrica a la cuba, se conecta el terminal negativo de la fuente de corriente continua a la célula rotativa, para esto se utiliza un sistema parecido al colector de los motores; es decir, mediante el uso de escobillas. Estas escobillas deben ser capaces de soportar la corriente que va a manejar la cuba electrolítica y además presentar unas buenas propiedades mecánicas.

Las escobillas de carbón, como contacto deslizante, desempeñan un papel importante en la transmisión de corriente de infinidad de máquinas eléctricas. Su importancia reside en las características del carbono y del grafito en cuanto a deslizamiento, conductividad eléctrica, térmica, y su comportamiento frente a las elevadas temperaturas [21].

Antes de seleccionar una escobilla se debe tener en cuenta las siguientes características [20]:

- La resistencia de contacto.
- La acción pulidora.
- velocidad admisible.
- densidad de corriente.

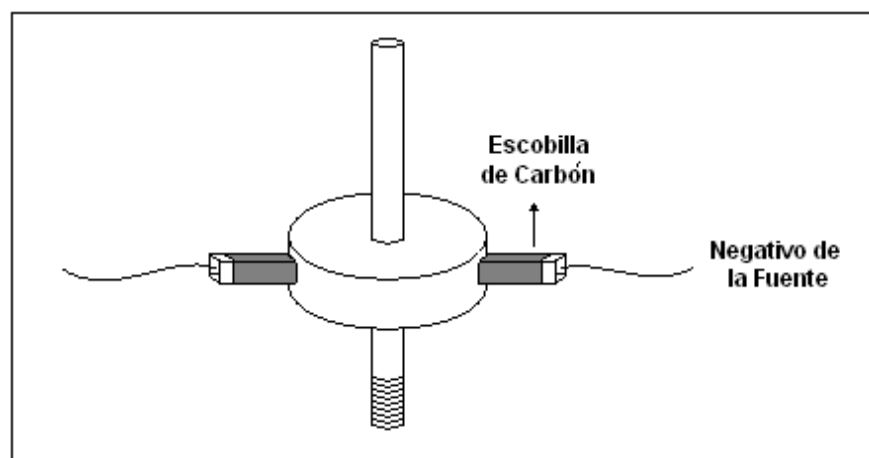


Figura 2.8 Posición de las escobillas respecto al eje de rotación.

Se debe tener en cuenta que la resistencia de contacto produce una caída de tensión entre la cara de contacto del carbón eléctrico y el colector [17].

Una correcta presión es fundamental, ya que la presión debe ser suficiente para asegurar un contacto bueno y permanente de la escobilla sobre el anillo o el colector. La caída de tensión por contacto en la escobilla disminuye cuando se incrementa la presión, y como consecuencia, las propiedades conmutantes de la escobilla decrecen ante presiones elevadas. Las presiones pueden variar según las calidades, pero usualmente para motores estáticos es recomendable una presión de 170 a 200 g/cm<sup>2</sup>, y en motores de tracción las presiones pueden variar de 250 a 400 g/cm<sup>2</sup> [17].



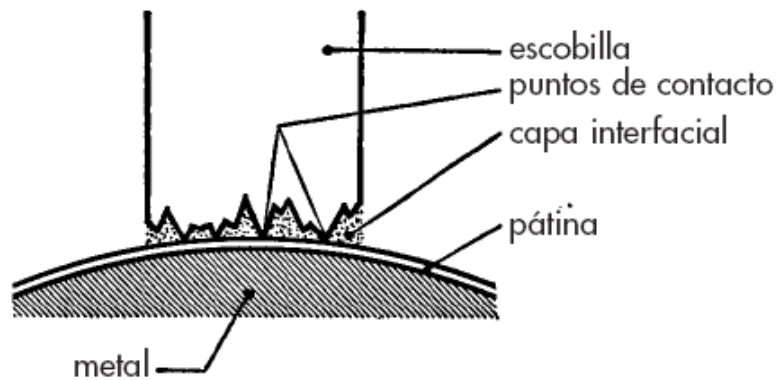


Figura 2.9 Contacto de la escobilla al eje de rotación, tomado de [18]

Cabe mencionar que la densidad de corriente se define como la carga máxima en amperios capaz de desplazarse por una determinada superficie de contacto del carbón, sin recalentamiento en condiciones normales.

Como Ventajas importantes del uso de escobillas se puede mencionar:

- Conexión eléctrica entre una parte fija y una parte rotatoria en un dispositivo.
- Optimización de tiempo.
- Mayor funcionalidad en el momento del giro del eje del prototipo por el sistema de escobillas implementado.

### 2.3.1 DIMENSIONES DE LA ESCOBILLA

Las dimensiones de las escobillas deben indicarse en el siguiente orden [19]:

$$\text{Dimensión de Escobilla} = t \times a \times r$$

Siendo: t = tangencial (en dirección de la circunferencia)

a = axial (en dirección del eje)

r = radial (en dirección del diámetro, incl. asiento de la cabeza)

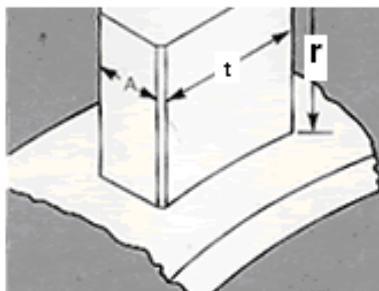


Figura 2.10 Dimensiones de una Escobilla, tomado de [19]

Aplicando los mismos criterios para el diseño de los electrodos se tiene que:

Los porta escobillas y los carbones utilizados son los de la licuadora OSTER, por tanto sus dimensiones son:

$$A = 0,5 \text{ cm.}$$

$$r = 2 \text{ cm.}$$

$$t = 0,5 \text{ cm.}$$

Como la forma geométrica de los carbones es la de un rectángulo, se aplica su fórmula de la superficie:

$$S = b \times h$$

$$S = 2 \text{ cm} \times 0,5 \text{ cm} \Rightarrow S = 1 \text{ cm}^2$$

El valor de  $1 \text{ cm}^2$  cumple con la condición más importante para la aplicación de la densidad de corriente por la escobilla (de 8 a  $12 \text{ A/cm}^2$ ).

Las escobillas seleccionadas tendrán las siguientes especificaciones:

**Tipo:** Monobloc con cable y resorte.

**Material:** Electrográfica FH42

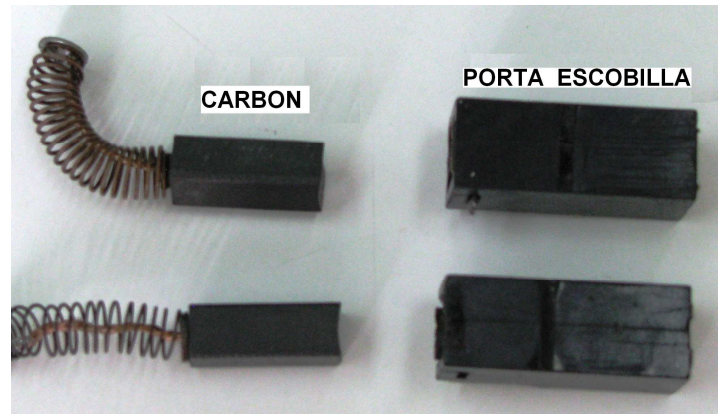


Figura 2.11 Sistema de porta escobilla + carbón.

Para fijar los porta escobillas a la estructura metálica de la cuba, se utiliza un soporte fabricado de hierro:

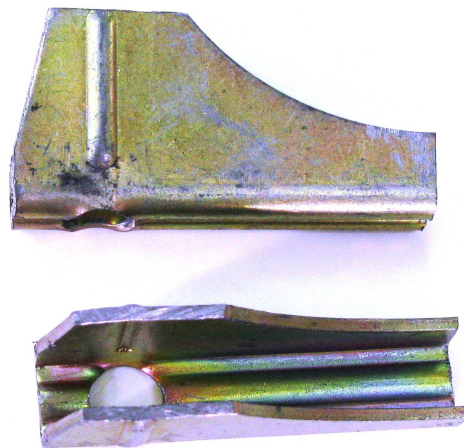


Figura 2.12 Soporte de Porta escobilla

## 2.4 DISEÑO DE LA BASE DE SUJECION DEL PROTOTIPO

La base de sujeción se va a construir de hierro, y será fijada a la mesa sobre la cual esta la cuba electrolítica y el tablero del control. Esta base va a ser capaz de alojar al motor que transmitirá el movimiento al cátodo del prototipo utilizando el eje de rotación anteriormente mencionado, la chumacera será la encargada de fijar y sujetar al eje de rotación, y permitir que el cátodo pueda girar libremente dentro de la cuba.

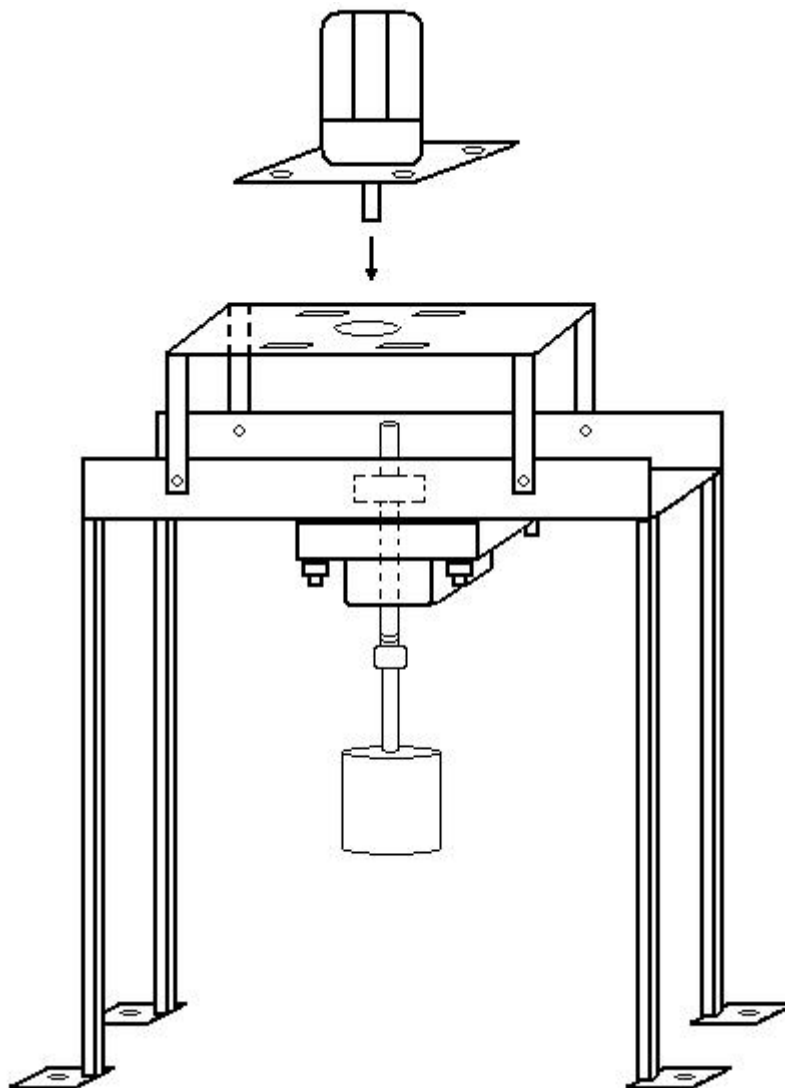


Figura2.13 Diseño de base de sujeción

Las gráficas de la base de sujeción metálica con sus respectivas medidas se presentan en el Anexo F.

## **2.5 DISEÑO DE LA FUENTE DE CORRIENTE**

### **2.5.1 DETERMINACION DE LA CARGA PARA LA FUENTE DE CORRIENTE**

#### **2.5.1.1 Primera Forma**

Para tener un estimado de la carga se procedió a medir con el multímetro su resistencia, se realizó varias mediciones y se sacó el promedio, de tal forma que:

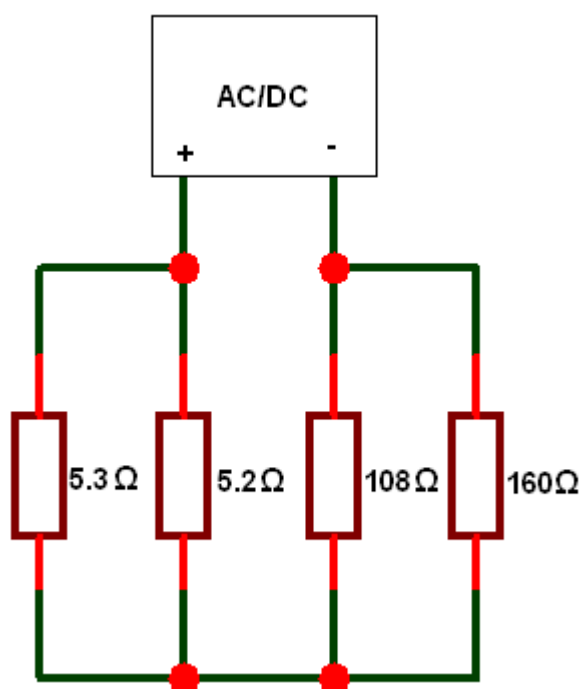
Resistencia Terminal positivo al primer electrodo =  $5,3\Omega$

Resistencia Terminal positivo al Segundo electrodo =  $5,2\Omega$

Resistencia Terminal Negativo al cátodo a través de la primera escobilla =  $108\Omega$

Resistencia Terminal Negativo al cátodo a través de la segunda escobilla =  $220\Omega$

Circuito Equivalente:



$$R = \frac{1}{5.3} + \frac{1}{5.2} + \frac{1}{108} + \frac{1}{160} \Rightarrow R = 2.52\Omega$$

### 2.5.1.2 Segunda Forma

Se energizó 10 veces la cuba electrolítica con una fuente de corriente continua, y se obtuvo los siguientes resultados:

Aplicando una fuente de 12V, 5A y conocido el valor de R1 se calcula Rx:

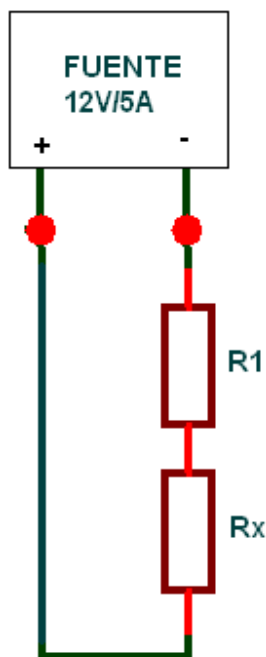


Tabla 2.4 Resultado de las mediciones con fuente de 12V/5A

MEDICION	R1	VOLTAJE	CORRIENTE	Rtotal	Rx
1	220Ω	12,46V	56,16mA	221.866 Ω	1,86 Ω
2	220Ω	12,42V	56,01mA	221.746 Ω	1,74 Ω
3	220Ω	12,61V	56,89mA	221,655 Ω	1,65 Ω
4	220Ω	12,40V	55,91mA	221,785 Ω	1,78 Ω
5	220Ω	12,5V	56,35mA	221,827 Ω	1,82 Ω

**R<sub>x</sub>** es la resistencia que presenta los ánodos y cátodo de la cuba electrolítica.

Aplicando una fuente de 12V, 10A directamente a la cuba, se mide R<sub>x</sub>:

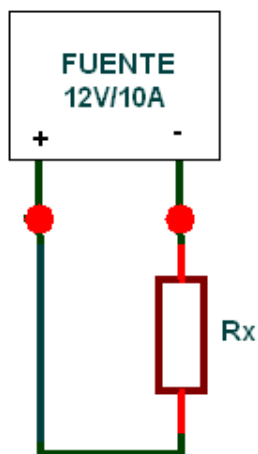


Tabla 2.5 Resultado de las mediciones con fuente de 12V/10A

MEDICION	VOLTAJE	CORRIENTE	R <sub>x</sub>
1	10,84V	6,68A	1,622 Ω
2	10,58V	6,33A	1,671Ω
3	10,62V	6,135A	1,731 Ω
4	10,34V	6,087A	1,698 Ω
5	10,712V	6,.079A	1,762 Ω

Como se puede observar el segundo método es más efectivo y real, ya que se le aplico a la cuba electrolítica las condiciones con las que va a trabajar, es decir, al medio conductor que es el químico de desecho, se le aplico corriente continua.

Además los resultados obtenidos en las mediciones son prácticamente iguales, por tanto sacando un promedio se tiene que la carga que debe manejar el transformador es:

$$R = 1,7\Omega$$

## 2.5.2 DISEÑO DEL TRANSFORMADOR

Como se va a usar un transformador reductor de voltaje y elevador de corriente, la frecuencia de operación del mismo es un parámetro que se mantendrá constante, por lo que el transformador a usar será uno de núcleo de hierro hecho de chapas laminadas de 0,5 mm de espesor (para 60Hz) por las ventajas que presenta el mismo.

Para el diseño, se parte de un núcleo de un transformador usado ligeramente mediano del cual se va a comprobar que suministre los parámetros que se necesite.

### 2.5.2.1 Parámetros de Núcleo

El transformador tiene un núcleo de hierro laminado tipo EI (acorazado), el cual tiene las siguientes dimensiones:

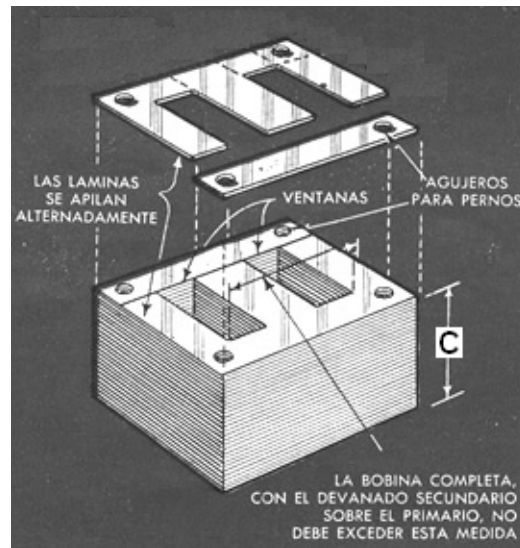


Figura 2.14 Núcleo de hierro tipo EI

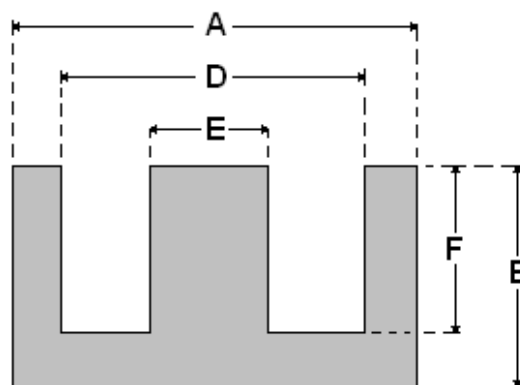


Figura 2.15 Dimensionamiento de la chapa, tomado de [22]

A = 86 mm.      B = 57 mm.      C = 59 mm.  
D = 57 mm.      E = 28,5 mm      F = 43 mm.

De [22]:

Ancho de la Ventana  $BA = \frac{1}{2} (D - E) = \frac{1}{2} (93 - 40) = 26,5 \text{ mm.}$



Alto de la Ventana  $HA = 2F = 2(69) = 138 \text{ mm}$ .

Área de la Ventana  $Aw = BA \times HA = 26,5 \times 138 = 3657 \text{ mm}^2$

Área Sección transversal  $S_N = C \times E = 42 \times 40 = 1680 \text{ mm}^2 \rightarrow 16,80 \text{ cm}^2$

Con esta área de la sección transversal, se calcula la potencia máxima que provee el núcleo:

Tabla 2.6 Constantes de acuerdo a la calidad de chapas, tomado de [23]

Calidad de las Chapas	k
Baja	1,1
Media	0,85
Alta	0,7

Tomando el peor caso para una calidad baja de chapas se tiene [23]:

$$S_N = 1,1\sqrt{P} \rightarrow P = \left(\frac{S_N}{1,1}\right)^2 = \left(\frac{16,8}{1,1}\right)^2 = 233,256 \text{ W} \quad (2.1)$$

### 2.5.2.2 Condiciones para el diseño

$V_{in} = 120V$

$I_o = 10A$

$R_o = 1,7\Omega$

Frecuencia operación = 60Hz.

Método de enfriamiento = Forzada

Rendimiento  $\eta = 90\%$

Ya que el voltaje de salida es bajo, es imprescindible saber la caída de tensión en el puente rectificador, para poder tener un buen control de la corriente.

Según la hoja de datos el diodo rectificador 6A2 tiene una caída de tensión en la juntura de  $1V_{\max}$  trabajando a 6A; mientras que el Tiristor TIC116D tiene una caída de  $1,7V_{\max}$ .

$$V_o = I_o R = 10A * 1,7\Omega \Rightarrow V_o = 17V$$

Considerando las caídas de tensión en el conversor y como el rectificador no va a trabajar con esos valores de corriente se tiene que:

$$V_o = 17 + 1 + 1,7 = 19,70 V \Rightarrow V_o = 20 V$$

La potencia que el circuito secundario suministra a sus cargas se establece por la ecuación:

$$P_o = V_S * I_S * \cos \varphi$$

Nótese que el ángulo de la fase de  $V_P$  es el mismo que el ángulo de  $V_S$  y la fase del ángulo  $I_P$  es la misma que la fase del ángulo de  $I_S$ . La relación de espiras del transformador ideal afecta las magnitudes de las tensiones e intensidades, pero no sus ángulos.

$$P_o = V_S * I_S \quad (2.2)$$

El **primer paso** para el cálculo es conocer el consumo del secundario [22]:

$$\text{Potencia de Salida: } P_o = 20V * 10A = \mathbf{200W}$$

Como se puede observar la potencia que se necesita es menor a la potencia máxima que suministra el núcleo, por lo que en ningún momento el transformador estará trabajando en la zona de flujo magnético de saturación.

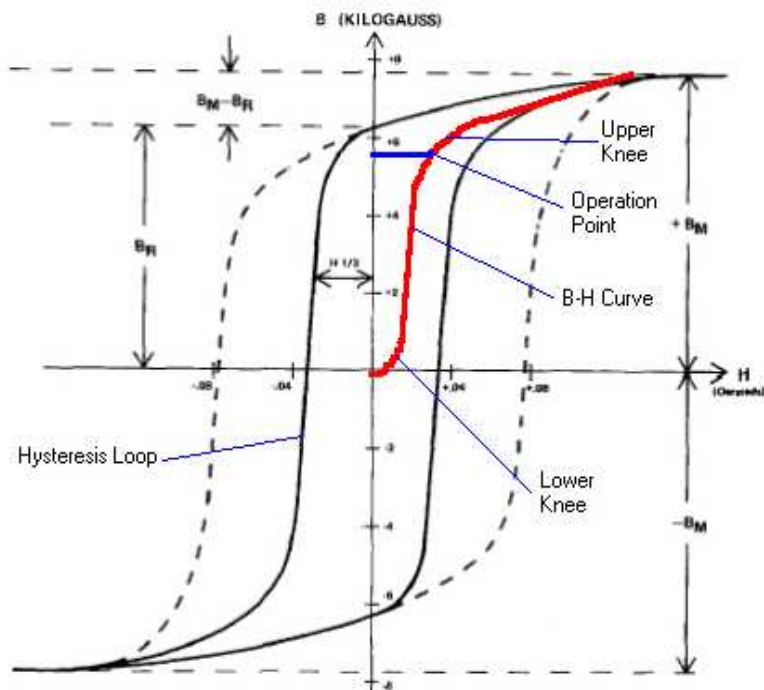


Figura 2.16 Curva de histéresis del transformador, tomado de [24]

Para conocer la potencia de entrada se sabe que:

$$\text{Potencia entrada } P_{in} = \frac{P_o}{\eta} = \frac{197,5}{0,90} = 219,4W \quad (2.3)$$

Considerando como ideal la corriente de entrada es:

$$P_{in} = V_{in} I_{in} \rightarrow I_{in} = \frac{219,4}{120} \Rightarrow I_{in} = 1,83A \quad (2.4)$$

El **Segundo paso** es calcular la sección de los conductores [22]:

$$S_{cc} = \frac{I}{\rho} \quad (2.5)$$

Donde:

$S_{cc}$  = es la sección del conductor en  $cm^2$

$\rho$  = Es la densidad de corriente en  $A/cm^2$

Utilizando conductor esmaltado con aislamiento, con una densidad de corriente de  $2,8 \text{ A/mm}^2$  se puede encontrar el calibre del conductor, en función del diámetro:

$$\pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 = \frac{I}{\rho}$$

Para el secundario:  $\pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 = \frac{(10\text{A})\text{mm}^2}{2,8\text{A}} \Rightarrow d = 2,1324\text{mm}$

Para el primario:  $\pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 = \frac{(1,83\text{A})\text{mm}^2}{2,8\text{A}} \Rightarrow d = 0,65357\text{mm}$

Utilizando la tabla de conductores que se indica en el Anexo I, se procede a seleccionar el conductor cuyo diámetro sea lo más cercano posible al diámetro encontrado (inmediato superior).

*El calibre de conductor es:*

**Primario: Conductor Esmaltado de cobre # 21 AWG**

**Secundario: Conductor Esmaltado de cobre # 11 AWG**

El **Tercer paso** es calcular el número de espiras:

En el transformador, el flujo magnético, periódicamente variable en el tiempo, originado por la corriente que pasa a través del arrollamiento de entrada induce en el arrollamiento de salida una tensión que varía con la misma frecuencia. Puesto que el flujo en el núcleo del transformador ha de ser una onda sinusoidal.

$$e = N \frac{d\phi}{dt}$$

Sabiendo que:  $\phi = \phi_{max} \text{Sen}(wt)$  y

$$\frac{d\Phi}{dt} = w \phi_{max} \text{Cos}(wt)$$

$$\therefore e = wN\phi_{max} \text{Cos}(wt)$$

La F.E.M. instantánea se encuentra en su valor máximo cuando:  $\text{Cos}(wt)=1$ , entonces:

$$E_{max} = wN\phi_{max} = 2\pi fNBS_{CC}$$

$$E_{RMS} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}}$$

$$E_{RMS} = \frac{2}{\sqrt{2}} \pi fNBS_{CC}$$

$$E_{RMS} = 4.44 fNBS_{CC}$$

De acuerdo a la ecuación anterior, la F.E.M inducida en el devanado de un transformador, es proporcional a tres factores: flujo, frecuencia y número de espiras. La ecuación completa de la F.E.M, suponiendo onda sinusoidal de flujo en unidades electromagnéticas del sistema CGS, es:

$$E = 4.44 * 10^{-8} fN\phi_{max} \quad [\text{Voltios}] \quad (2.6)$$

Donde:

$\phi_{max}$  = Es el flujo máximo expresado en maxwells.

$E$  = Tensión eficaz

$f$  = Frecuencia en Hz.

$N$  = Número de espiras

$10^{-8}$  = Factor de conversión en unidades.

El valor del  $\phi_{max}$  depende del tipo del núcleo utilizado, y puede calcularse por la formula:

$$\phi_{max} = BS_N \quad (2.7)$$

Donde:

$B$  = Densidad de flujo en Teslas, Webers/m<sup>2</sup>, Gauss/cm<sup>2</sup>, o líneas (Maxwell)/in<sup>2</sup>

$S_N$  = Sección del núcleo en cm<sup>2</sup>

Existen tablas para calcular el valor de la densidad de flujo de acuerdo al tipo de núcleo utilizado, pero por lo general para no trabajar en la zona de saturación de la densidad de flujo se recomienda trabajar en el inicio del codo de la curva (Upper knee), un valor promedio de la densidad de flujo es de: 12000 Gauss/cm<sup>2</sup> [24].

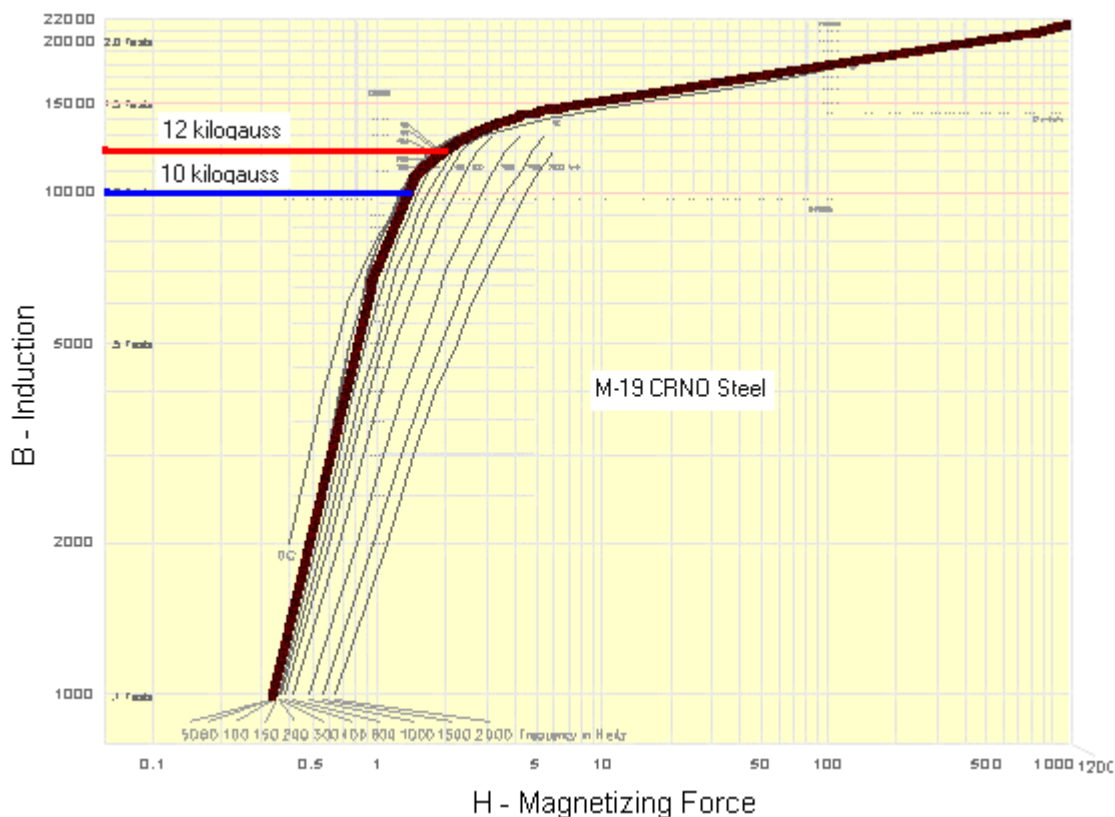


Figura 2.17 Codo de a curva de histéresis, tomado de [24]

Si se considera el valor de densidad máxima de flujo magnético de saturación  $B_s = 2.1T$  para un núcleo de hierro (1%) que indica Ned Mohan en su libro Power Electronics Converters, Applications and Design, y tomando un valor de 1,2 para asegurar de no saturar al núcleo se tiene [25]:

$$B = 1.2T \quad \text{pero} \quad 1T = 10000 \text{ Gauss/cm}^2 \Rightarrow B = 12000 \text{ Gauss/cm}^2$$

Por tanto el valor recomendado esta dentro de los parámetros que se necesita.

Para el Número de espiras del primario:

De ecuación (2.6) y (2.7) se tiene que:

$$\begin{aligned} E &= 4.44 * 10^{-8} f N B S_N \\ 120 &= 4.44 * 10^{-8} (60) N_p (12000)(16,8) \\ N_p &= 223,437 \text{ espiras} \end{aligned}$$

Para el Número de espiras del secundario:

$$\begin{aligned} E &= 4.44 * 10^{-8} f N B S_N \\ 19 &= 4.44 * 10^{-8} (60) N_p (12000)(16,8) \\ N_p &= 35,377 \text{ espiras} \end{aligned}$$

Como existen perdidas  $I^2R$  debido a la resistencia de los cables y pérdidas en el núcleo por histéresis debido a las corrientes de Eddy, se añade un 5% [22].

$$N_p = 235 \text{ espiras.}$$

$$N_s = 38 \text{ espiras.}$$

Como último se va a comprobar si el núcleo del transformador puede alojar los bobinados tanto del primario como del secundario que se calculó. La tabla del Anexo I tiene los valores del área de los conductores.

El área que ocupa cada bobinado se encuentra multiplicando el número de espiras por el área del conductor [22].

$$\text{Area1} = 235 \text{ espiras} * 0.6528 \text{ mm}^2 = 153.408 \text{ mm}^2$$

$$\text{Area2} = 38 \text{ espiras} * 4,1727 \text{ mm}^2 = 158,562 \text{ mm}^2$$

Por tanto el espacio total ocupado por los conductores es:

$$\text{Área total} = 1,534 \text{ cm}^2 + 1,5856 \text{ cm}^2 = 3,1197 \text{ cm}^2$$

Como se debe aislar los bobinados se aumenta un 40% [22]:

$$\text{Área total} = 4,367 \text{ cm}^2$$

El área del núcleo del transformador es  $16,8 \text{ cm}^2$  y el área que se necesita para los bobinados es de  $4,367 \text{ cm}^2$ . Por lo tanto se puede armar el transformador con total seguridad.

### 2.5.3 CONSTRUCCIÓN DEL TRANSFORMADOR

En cuanto a la distribución de las bobinas con respecto al núcleo, estas pueden ubicarse en dos formas [22]:

- *Distribuida*: Es aquella donde los devanados del primario y del secundario están en progresión radial con relación a un núcleo común.
- *Concéntrica*: Aquella en la que los devanados primario y secundario están subdivididos en discos e intercalados en el mismo núcleo.

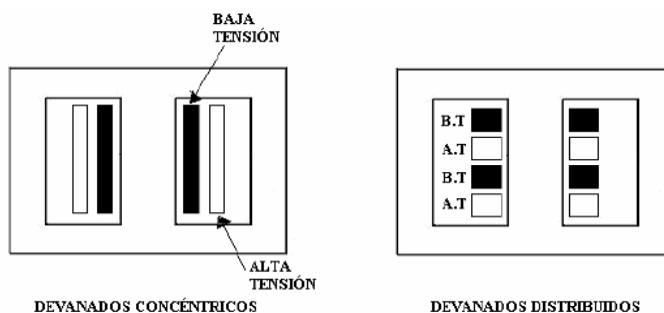


Figura 2.18 Devanado de un transformador.

Debido a los diferentes niveles de tensión que se presentan en la parte activa de los transformadores, se necesitan sistemas de aislamiento entre el devanado de baja tensión y alta tensión, y entre espiras de los devanados [22].



El aislamiento de los devanados del transformador tipo seco se realiza utilizando materiales sintéticos como papel o asbesto, y en el caso de las espiras de los devanados utilizando alambre de cobre barnizado (alambre con aislamiento) [22].

La forma de armado mediante chapas y no macizo reduce las pérdidas por calentamiento (perdidas por corrientes parásitas). Si la superficie de cada chapa esta asilada con barniz, oxido o papel, el beneficio aumenta.

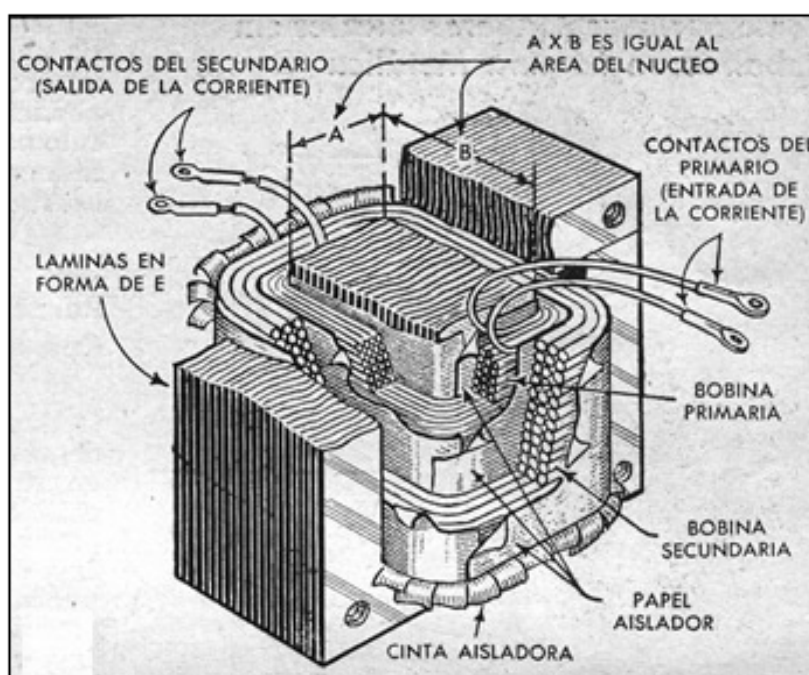


Figura 2.19 Construcción del Transformador

Procedimiento para la construcción:

- Al transformador inicialmente se le debe retirar los bobinados anteriores, para esto se debe extraer las chapas primero.
- Realizar los nuevos bobinados tanto el de alta como el de baja tensión con los datos que se calculo anteriormente, y aislándolos el uno respecto al otro.
- Armado e Intercalación de chapas del transformador.
- Dejar los terminales de cada bobinado con una longitud adecuada y colocar barniz en el transformador armado.

### 2.5.4 DISEÑO DE PUENTE RECTIFICADOR

Como se necesita transferir energía en un solo sentido, de la fuente hacia la carga, y lo más importante es controlar la intensidad de la corriente, el problema se reduce a trabajar en el primer cuadrante de operación, como la carga es puramente resistiva, se tiene que controlar el voltaje para controlar la corriente, por tal razón se va a utilizar un rectificador monofásico tipo puente semicontrolado.

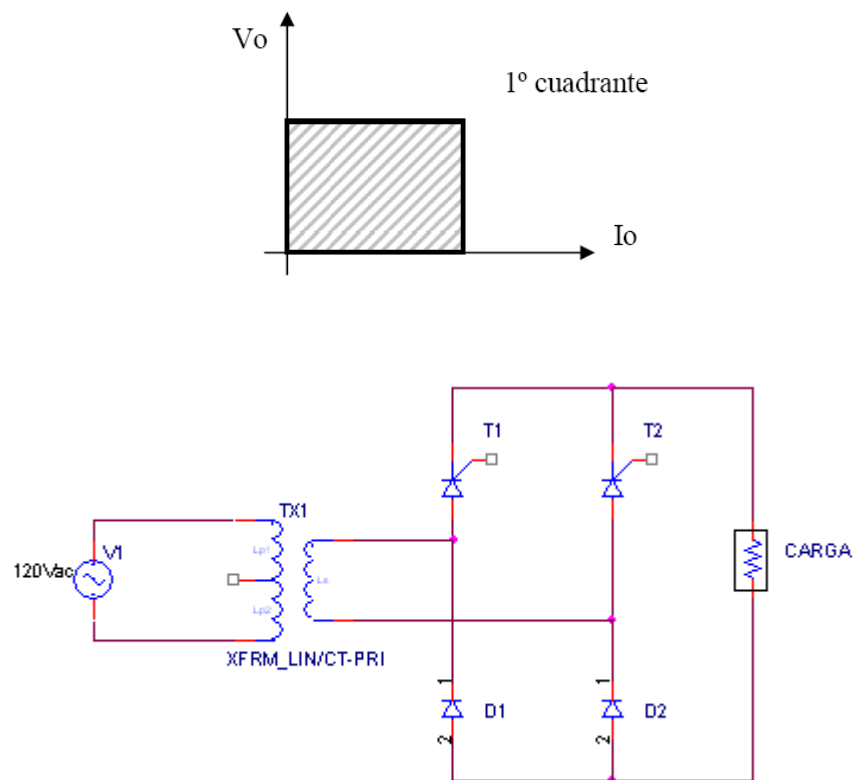


Figura 2.20 Esquema del Conversor AC/DC

Antes de dimensionar los elementos del convertidor, se debe recordar el funcionamiento del convertidor así como su comportamiento:

Durante el medio ciclo positivo, el tiristor T1 tiene polarización directa. Cuando éste se dispara en  $\omega t = \alpha$ , la carga se conecta a la alimentación a través de T1-D2 durante el intervalo  $\alpha < \omega t < \pi$ . Cuando  $\omega t = \pi$  T1 y D2 se abren por el cruce

natural por cero de corriente. Durante el medio ciclo de voltaje negativo de entrada, el tiristor T2 queda con polarización directa, entrando en conducción en el instante  $\omega t = \pi + \alpha$ , ahora la carga se conecta a la alimentación a través de T2-D1 durante el intervalo de  $\pi + \alpha < \omega t < 2\pi$ .

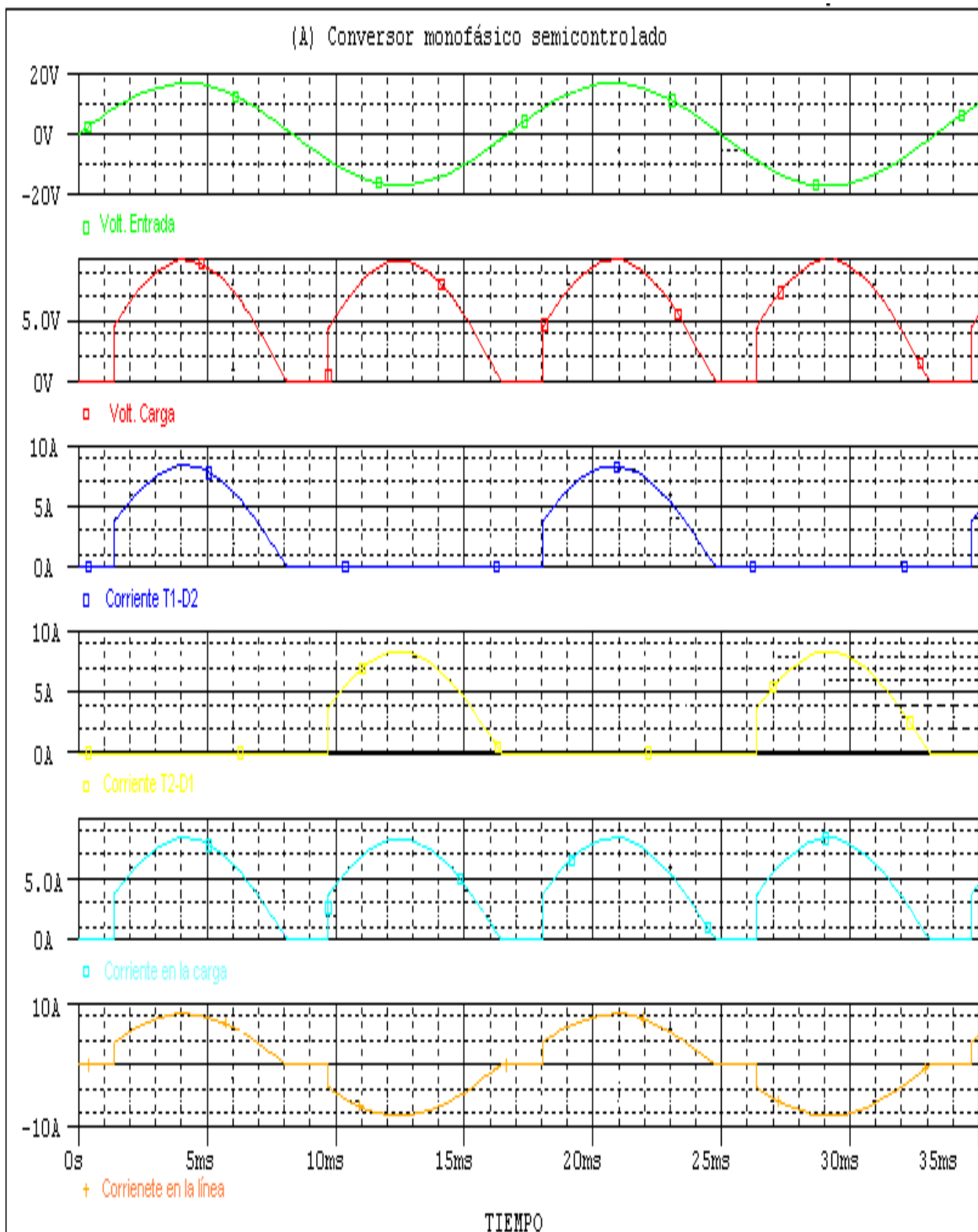


Figura 2.21 Simulación del conversor en PSPICE

### Análisis en la Carga

$$V_{DC} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad \text{por definición}$$

$$V_{DC} = \frac{1}{2\pi} (2) \int_{\alpha}^{\pi} \sqrt{2} V_f \text{Sen}(wt) dwt$$

$$V_{DC} = \frac{\sqrt{2} V_f}{\pi} \left( -\text{Cos}(wt) \right)_{\alpha}^{\pi}$$

$$V_{DC} = \frac{\sqrt{2} V_f}{\pi} [\text{Cos}(\alpha) + 1] \quad (2.8)$$

Por ser una carga resistiva la corriente es:

$$I_o = \frac{\sqrt{2} V_f}{\pi R} [\text{Cos}(\alpha) + 1] \quad (2.9)$$

El valor rms del voltaje es:

$$V_{RMS}^2 = \frac{1}{2\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2} V_f \text{Sen}(wt))^2 dwt + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} (-\sqrt{2} V_f \text{Sen}(wt))^2 dwt \right]$$

$$\text{Sabido que: } \text{Sen}^2(wt) = \frac{1 - \text{Cos}(2wt)}{2}$$

$$V_{RMS}^2 = \frac{V_f^2}{\pi} \left\{ \left[ \frac{1}{2} \left( wt - \frac{\text{Sen}(2wt)}{2} \right) \right]_{\alpha}^{\pi} + \left[ \frac{1}{2} \left( wt - \frac{\text{Sen}(2wt)}{2} \right) \right]_{\pi+\alpha}^{2\pi} \right\}$$

$$V_{RMS}^2 = \frac{V_f^2}{2\pi} \left[ \pi - \alpha + \frac{\text{Sen}(2\alpha)}{2} + 2\pi - \pi - \alpha + \frac{\text{Sen}(2\alpha)}{2} \right]$$

$$V_{RMS}^2 = \frac{V_f^2}{2\pi} (2\pi - 2\alpha + \text{Sen}(2\alpha))$$

$$V_{RMS} = V_f \left[ \frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\text{Sen}(2\alpha)}{2} \right) \right]^{1/2} \quad (2.10)$$

Por ser una carga resistiva la Corriente rms es:

$$I_{RMS} = \frac{V_f}{R} \left[ \frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\text{Sen}(2\alpha)}{2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.11)$$

La Potencia activa es:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v_{(t)} i_{(t)} dt \quad \text{por definición}$$

$$P = \frac{1}{2\pi} \left[ \int_{\alpha}^{\pi} (\sqrt{2}V_f \text{Sen}(wt)) \left( \frac{\sqrt{2}V_f}{R} \text{Sen}(wt) \right) dwt + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} (-\sqrt{2}V_f \text{Sen}(wt)) \left( -\frac{\sqrt{2}V_f}{R} \text{Sen}(wt) \right) dwt \right]$$

$$P = \frac{V_f^2}{\pi R} \left[ \int_{\alpha}^{\pi} \text{Sen}^2(wt) dwt + \int_{\pi+\alpha}^{2\pi} \text{Sen}^2(wt) dwt \right]$$

$$\text{Sabido que: } \text{Sen}^2(wt) = \frac{1 - \text{Cos}(2wt)}{2}$$

$$P = \frac{V_f^2}{2\pi R} \left[ \left( wt - \frac{\text{Sen}(2wt)}{2} \right) \Big|_{\alpha}^{\pi} + \left( wt - \frac{\text{Sen}(2wt)}{2} \right) \Big|_{\pi+\alpha}^{2\pi} \right]$$

$$P = \frac{V_f^2}{2\pi R} \left[ \pi - \alpha + \frac{\text{Sen}(2\alpha)}{2} + 2\pi - \pi - \alpha + \frac{\text{Sen}(2\pi + 2\alpha)}{2} \right]$$

$$P = \frac{V_f^2}{\pi R} \left( \pi - \alpha + \frac{\text{Sen}(2\alpha)}{2} \right)$$

$$P = \frac{V_f^2}{R} \left[ \frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\text{Sen}(2\alpha)}{2} \right) \right]$$

$$P = \frac{V_{RMS}^2}{R} \quad (2.12)$$

**Análisis en la línea:**

El valor rms del voltaje es:

$$V_{RMS} = V_f$$

El valor rms de la corriente es:

$$I_{RMS} = \frac{V_f}{R} \left[ \frac{1}{\pi} \left( \pi - \alpha + \frac{\text{Sen}(2\alpha)}{2} \right) \right]^{1/2}$$

Para el diseño del puente rectificador se toma el peor caso que sería cuando se tiene un ángulo de disparo de  $\alpha = 0^\circ$ .

De la ecuación (2.8) se tiene que:

$$V_{DC} = \frac{2\sqrt{2}V_f}{\pi} = 0.9V_f = 0.9(17) \quad \Rightarrow V_{D0} = 15,3V$$

De la ecuación (2.9) se tiene que:

$$I_o = \frac{0.9V_f}{R} = \frac{0.9(17)}{1,7} \quad \Rightarrow I_o = 9A$$

Se sabe que para  $0^\circ$  el voltaje eficaz es:

$$V_{RMS} = 20V$$

De la ecuación (2.11) se tiene que:

$$I_{RMS} = \frac{V_f}{R} = \frac{17}{1,7} \quad \Rightarrow I_{RMS} = 10A$$

De la ecuación (2.12) se tiene que:

$$P = \frac{(17)^2}{1.7} \quad \Rightarrow P = 170W$$

Durante el medio ciclo positivo de voltaje la corriente que circula por la carga pasa a través de T1-D2, por tanto el valor de corriente con  $\alpha = 0^\circ$  es:

$$I_o = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{\sqrt{2}V_f}{R} \text{Sen}(wt) dwt$$

$$I_o = \frac{\sqrt{2}V_f}{2\pi R} (1 + \text{Cos}(\alpha))$$

$$I_o = \frac{\sqrt{2}V_f}{\pi R} = \frac{\sqrt{2}(17)}{\pi(1.7)} \quad \Rightarrow I_o = 4,5A$$

Por tanto, los valores de voltajes y corrientes para seleccionar los elementos del conversor son:

Corriente media:	$I_o = 4,5 \text{ A}$
Corriente pico:	$I_P = \sqrt{2} I_{RMS} = 14,14 \text{ A}$
Corriente máxima:	$I_{max} = 10 \text{ A}$
Voltaje medio:	$V_{D0} = 17V$
Voltaje pico:	$V_P = 24V$
Frecuencia de operación:	$f = 60\text{Hz}$

Con los datos anteriores, y añadiendo un 20% a los valores de corrientes y voltajes por seguridad, se procede a seleccionar los tiristores y diodos del conversor.

**DIODO: 6A2** que es un diodo rectificador de propósito general de 6 A. / 140 V.

**TIRISTOR: TIC116D** es un tiristor controlado de silicio de 8A. / 400 V.

### 2.5.5 DISEÑO DEL CIRCUITO DE CONTROL DEL CONVERTOR AC/DC

Para el control de la corriente del convertor AC/DC se utilizó el siguiente circuito:

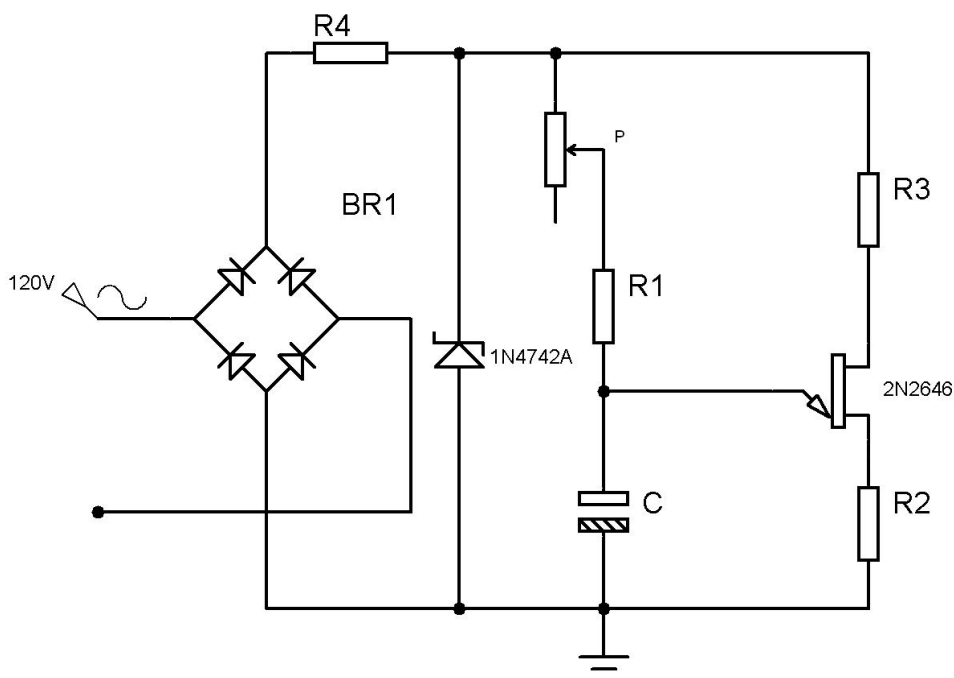


Figura 2.22 Sincronización del circuito de control con la red.

El Diodo zener a utilizar es el 1N4742A, las características más importantes según su hoja de datos son:

$$I_z = 21\text{mA.}$$

$$V_z = 12\text{ V}$$

$$P = 1\text{W}$$

El UJT seleccionado es el 2N2646, las características más importantes según su hoja de datos son:

$$I_v = 6\text{mA}$$

$$I_p = 5\text{uA}$$

$$V_v = 2\text{V}$$

$$\eta = 0.56 - 0.75 \Rightarrow \eta = 0.6$$

$$R_{BB} = 4,7 - 9,1\text{ K}\Omega$$



Utilizando la ecuación 2.8 se tiene que el Voltaje dc después del puente rectificador tiene un valor de (rectificador no controlado  $\alpha = 0^\circ$ ):

$$V_{DC} = \frac{2 \sqrt{2}(120)}{\pi} = 108,038V$$

La corriente que se necesita para que trabaje el Zener y el UJT es:

$$I = 21mA + 6mA \Rightarrow I = 27mA$$

Por lo tanto dando un margen de seguridad se dimensiona la resistencia de entrada con una corriente de 30mA:

$$R_4 = \frac{108,038V - 12V}{30mA} = 3201,27\Omega$$

La potencia de la resistencia es:

$$P = I^2 R = (30mA)^2 (3,2k\Omega) = 2,88W$$

Por tanto la  **$R_4 = 3,2k\Omega / 10W$**  debido a los periodos largos de tiempo que va a estar operando el circuito.

El *puente rectificador* seleccionado es el **RB154**, el cual soporta 400V / 1,5A.

### Diseño del Oscilador [32]:

Datos: Capacitor = 0,1uF/25v

$R_2 = 100\Omega / 0,25W$  (Criterio de diseño para asegurar la descarga del capacitor)

Ángulo de conducción  $10^\circ$  a  $160^\circ$

Por estabilidad térmica:  $R_3 = 10 R_2 = 1k \Omega / 0,25W$

Condición necesaria para calcular  $R_{eq}$ :  $\frac{V_{cc} - V_V}{I_V} \leq R_{eq} \leq \frac{V_{cc} - V_P}{I_P}$  (2.13)

$$V_{CC} = V_Z = 12V$$

El voltaje pico es:

$$V_P = V_D + \eta V_{CC} = 0.6 + 0.6 * 12V = 7,8V$$

El cálculo del tiempo equivalente al rango de variación que se necesita es:

$$\text{Para } f = 60Hz \rightarrow T = 16,67ms$$

$$t_{1(10^\circ)} = \frac{10^\circ * 16.67ms}{360^\circ} = 0,463ms$$

$$t_{1(160^\circ)} = \frac{160^\circ * 16.67ms}{360^\circ} = 7,408ms$$

El valor de  $R_{eq}$  [32]:

$$T_{osc} = R_{eq} C \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right)$$

$$7,408ms = R_{eq} (0,1\mu F) \ln\left(\frac{1}{1-0,6}\right) \Rightarrow R_{eq} = 80,847k\Omega$$

$$0,463ms = R_1 (0,1\mu F) \ln\left(\frac{1}{1-0,6}\right) \Rightarrow R_1 = 5053\Omega$$

$$R_{eq} = R_1 + P$$

$$P = 80,847k\Omega - 5,053k\Omega = 75,794k\Omega$$

Se selecciona  $R_1 = 5,2 k\Omega / 0,25W$  y  $P = 100k\Omega$ .

Aplicando (2.13) se tiene que:

$$\frac{12 - 2}{6mA} \leq R_{eq} \leq \frac{12 - 7,8}{5\mu F}$$

$$1666,6\Omega \leq R_{eq} \leq 840k\Omega$$

Como se puede observar el valor de  $R_{eq}$  esta dentro de la condición de diseño.

El acoplamiento entre el conversor AC/DC y el circuito de disparo se muestra a continuación:

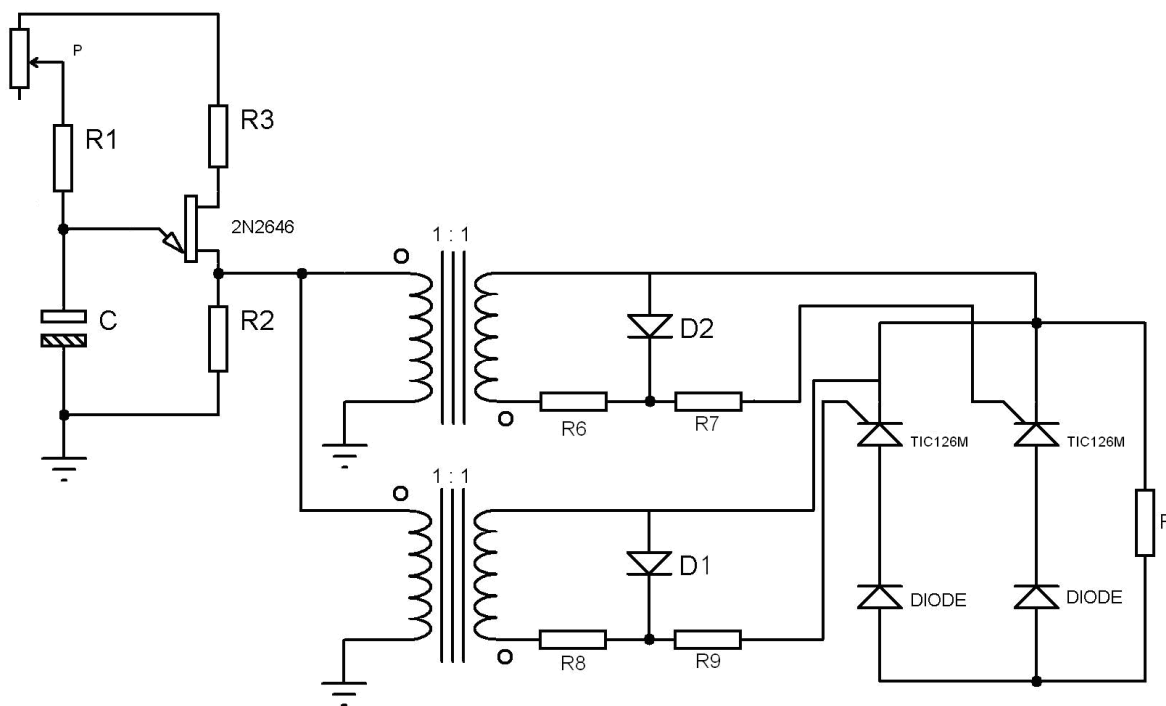


Figura 2.23 Acoplamiento del Circuito de Control al Conversor AC/DC

Se utiliza transformadores de relación 1:1 para el aislamiento de los pulsos del UJT, la resistencia R8, R9 así como las R6, R7 garantizan la corriente necesaria para activar el gate de los SCR. Además se colocan los diodos D1 y D2 para eliminar los picos negativos de los pulsos.

La hoja de datos de los elementos indica que el tiristor tiene una  $I_{GT} = 20\text{mA}$  (máxima). Y el UJT genera pulsos de 3,86V de amplitud, por tanto:

$$R = \frac{3,86}{20 \times 10^{-3}} = 193\Omega$$

Por lo que se puede colocar las resistencias  $R6 = R7 = R8 = R9 = 120\Omega/0,25\text{W}$

El circuito de control completo sincronizado con la red para activar el conversor AC /DC se presenta en el Anexo U.

Como se va a trabajar con un nivel de corriente media, esto generará un calentamiento en los semiconductores, por lo que se necesita colocar un disipador de calor.

### 2.5.6 DISEÑO DEL SISTEMA MICROPROCESADO

El microcontrolador que se va a usar es el ATMEGA16 de la familia ATMEL, en el cual, se utiliza el *puerto A* para manejar el teclado matricial, el *puerto B* para el ingreso de las señales de los sensores, el *puerto C* para manejar el LCD, el reloj en tiempo real DS1307, y el *puerto D* maneja todas las salidas necesarias para los circuitos de fuerza del prototipo.

El LCD es de 2 x 16 (2 líneas con 16 caracteres en cada una), la comunicación entre la LCD y el microcontrolador es en la configuración bus de 4 bits. EL reloj en tiempo real DS1307 utiliza un cristal de 32,768khz., con su respectiva batería de respaldo. La comunicación entre el microprocesador y el reloj en tiempo real es con el protocolo I2C.

Tabla 2.7 Recursos utilizados en el microcontrolador

DESCRIPCIÓN		CONFIGURACIÓN	INTERCONEXIÓN
Puerto A	PA0	Entrada	Keyboard
	PA1	Entrada	Keyboard
	PA2	Entrada	Keyboard
	PA3	Entrada	N/C
	PA4	Entrada	Keyboard
	PA5	Entrada	Keyboard
	PA6	Entrada	Keyboard
	PA7	Entrada	Keyboard
Puerto B	PB0	Entrada	Sensor HL
	PB1	Entrada	Sensor LL
	PB2	N/C	
	PB3	N/C	
	PB4	N/C	
	PB5	N/C	
	PB6	N/C	
	PB7	N/C	
Puerto C	PC0	Entrada	DS1307
	PC1	Entrada	DS1307
	PC2	Entrada	LCD
	PC3	Entrada	LCD
	PC4	Entrada	LCD
	PC5	Entrada	LCD
	PC6	Entrada	LCD
	PC7	Entrada	LCD
Puerto D	PD0	N/C	
	PD1	N/C	
	PD2	Salida	Led de Acceso
	PD3	Salida	Circuito de Bomba 2
	PD4	Salida	Circuito de Bomba 1
	PD5	Salida	Circuito Control Corriente
	PD6	Salida	Circuito Motor Cátodo
	PD7	Salida	Circuito Electro-válvula y Bomba 3

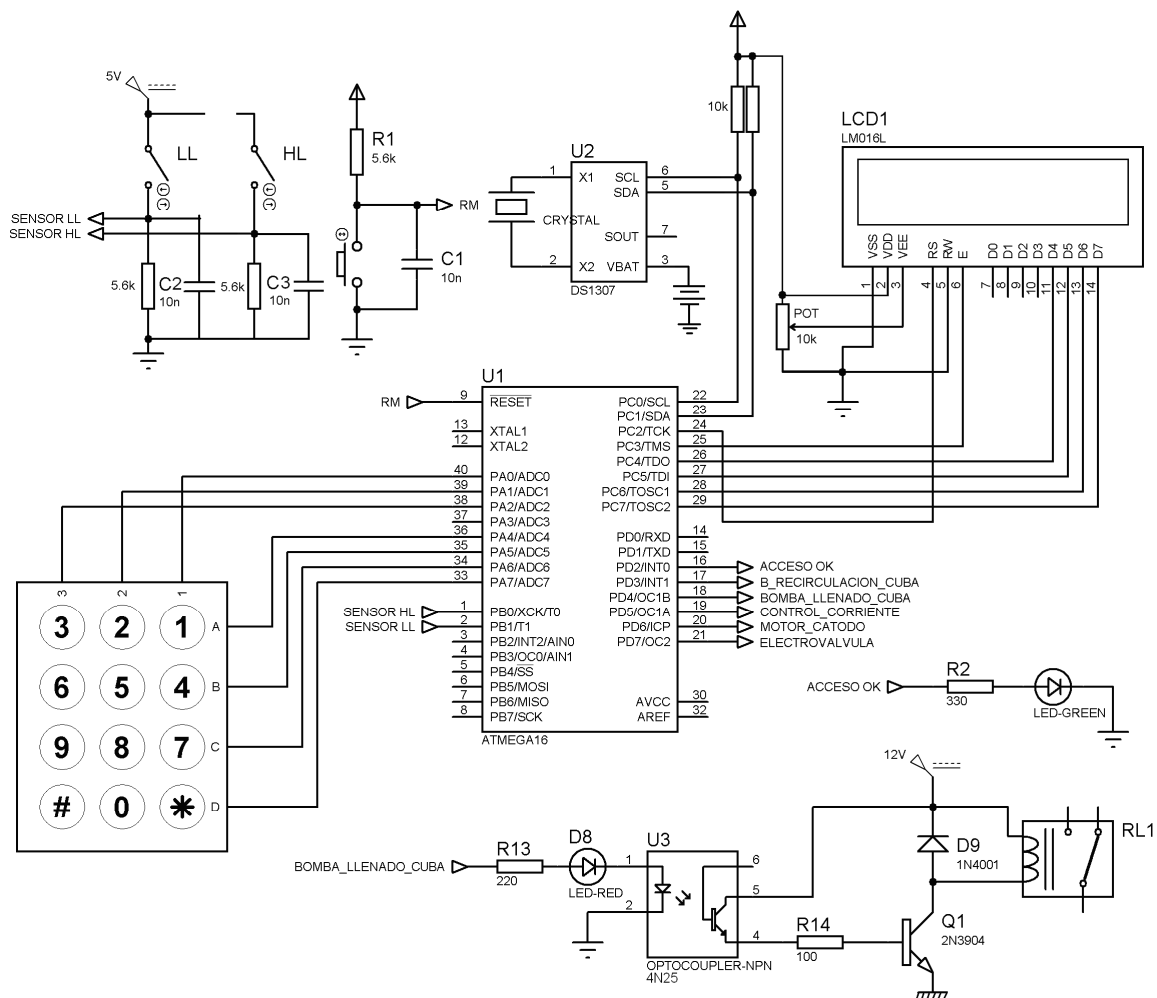


Figura 2.24 Conexión del microcontrolador con los periféricos

Para aislar las salidas del microcontrolador con los circuitos de fuerza se utiliza opto acopladores. Transistores NPN, que trabajan en corte y saturación conjuntamente con los opto acopladores activan y desactivan las bobinas de los relés que controlan las bombas, el motor de AC, el conversor AC/DC y la electroválvula.

Como la corriente que maneja el opto acoplador en su salida no es suficiente para activar correctamente la bobina del relé, se utiliza un transistor de unión bipolar 2N3904 para cada caso. Además, en el puerto de salida se coloca un diodo led en cada pin para verificar visualmente el funcionamiento de los periféricos.

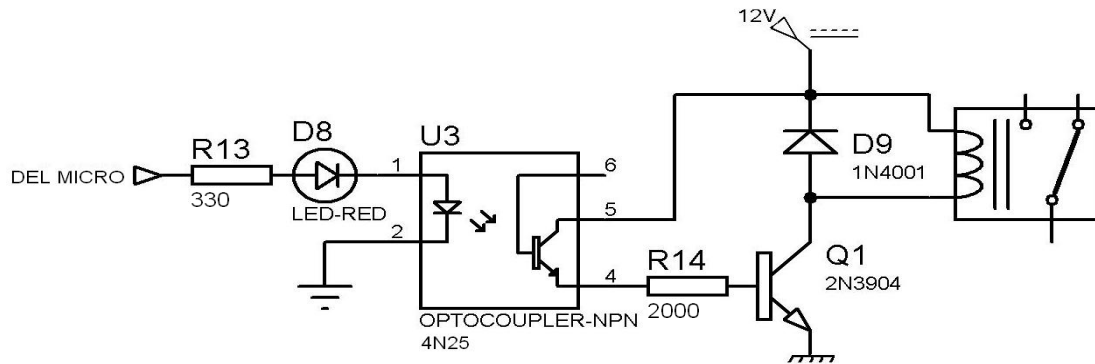


Figura 2.25 Conexión de la bobina del relé con la salida del microcontrolador

La resistencia R14 es calculada en base a los datos del fabricante, el cual indica que debe circular una corriente de base de 5 mA para el correcto funcionamiento en corte y saturación.

$$R_{14} = \frac{V_{CC} - V_{CEsat} - V_{BEsat}}{I_{Bsat}} = \frac{12V - 1V - 0,7V}{5mA} = 2060\Omega \quad \Rightarrow R_{14} = 2000\Omega$$

La tasa de transferencia en el opto acoplador es del 100% entre la corriente del diodo del opto acoplador ( $I_F$ ) y la corriente colector emisor, y tomando en consideración que el ATMEGA16 provee una corriente de salida de 20 a 25mA, se diseña para que circule una corriente de 15mA que es suficiente para encender el led y polarizar el diodo del opto acoplador.

$$R_{13} = \frac{5V}{15mA} = 333,3\Omega \quad \Rightarrow R_{13} = 330\Omega$$

La entrada del ATMEGA16 permite una corriente un poco mayor a 1mA para detectar como un nivel alto, por tanto para limitar la corriente de los sensores de nivel se utiliza resistencias en serie con el contacto del sensor.

$$R = \frac{5V}{1mA} = 5k\Omega \quad \Rightarrow R = 5.6k\Omega$$

El puerto B se lo ha configurado como entrada y salida para conectar el teclado matricial, se utilizan las resistencias internas del microcontrolador para disminuir el hardware.

Para proveer la energía para el microcontrolador, LCD y demás periféricos se diseña una fuente de 5V/1A, y para polarizar los transistores de las salidas aisladas por los opto acopladores se utiliza una de 12V/1A en la misma tarjeta electrónica. El diagrama circuital completo se presenta en el Anexo W.

## 2.6 LOCALIZACIÓN DE BOMBAS Y SENSORES EN EL PROTOTIPO

Las bombas deben estar localizadas muy próximas al tanque respectivo de almacenamiento del químico y cuba electrolítica, sobre una base firme para evitar movimientos y vibraciones. Al mismo tiempo, deberá tenerse especial preocupación de no hacer funcionar la bomba en seco y adoptar las protecciones necesarias que eviten la pérdida total de la bomba frente a eventuales fallas en el sistema.

Utilizando las curvas de capacidad vs altura que provee el fabricante IWAKI para las bombas centrífugas de acople magnético serie MD, se selecciona el modelo de bomba a utilizar en el prototipo.

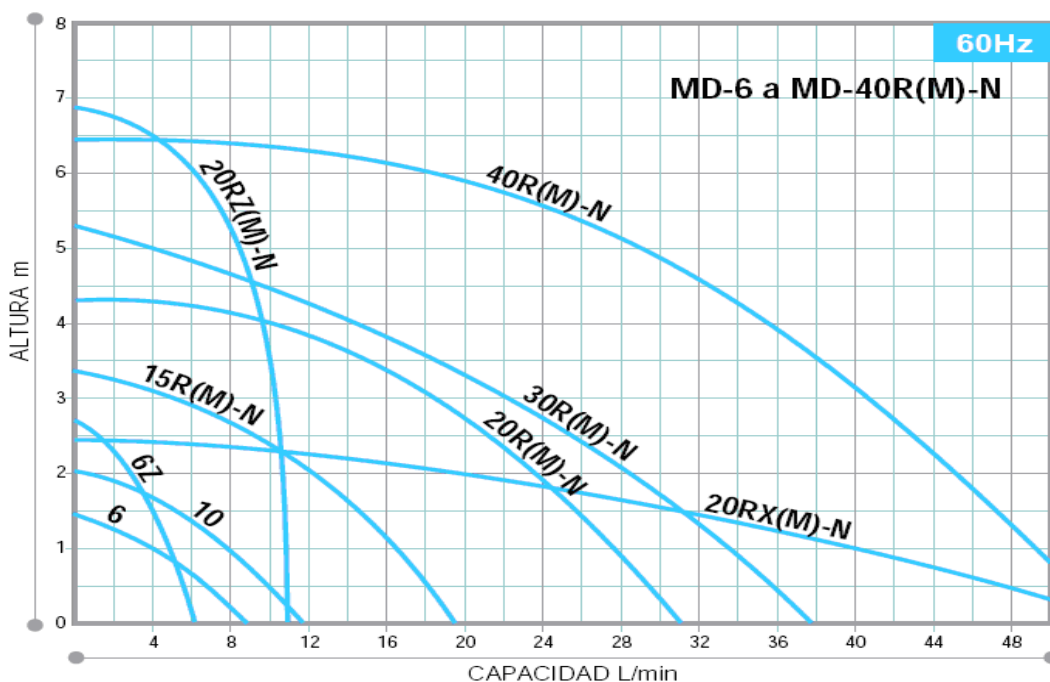


Figura 2.26 Curva de Capacidad vs altura, tomado de [6].



Para la bomba de recirculación que estará instalada en la cuba electrolítica se tiene que:

Volumen total de la solución en la cuba es de 20 Lts.

Altura del líquido en la Cuba de 42,5 cm.

Como se puede observar en las curvas, conforme se incrementa la altura se pierde capacidad, por tal motivo se debe trabajar en un punto de la gráfica donde la altura y la capacidad de la bomba sean proporcionales.

Para este caso se puede observar que la bomba **MD - 6** permite trabajar con una capacidad de 8L/min a una altura de 150 cm. Lo que es suficiente ya que la bomba estaría trabajando con casi el 50% del volumen de la cuba por minuto.

#### Datos de Placa de la Bomba:

Marca: Noritsu KOKI CO. LTD.

Model: PD-10-2

Max. Capacity 12 litro/min

Max. Head 2.4m

Volts 24V

Amps 0,4 A

Out Put 5W

Rating: Continuous

La bomba que llevará el químico del tanque de almacenamiento hacia la cuba electrolítica debe ser capaz de superar una altura del líquido 1,10 m.

La bomba **MD - 15** permite trabajar con una capacidad de 15L/min a una altura de 140 cm, lo que sería suficiente, ya que el requerimiento es llenar la cuba electrolítica.

Datos de Placa de la Bomba:

Marca Noritsu KOKI CO. LTD.

Model PD-20

Max. Capacity 26 litro/min

Max. Head 4.1m

Volts 24V

Amps 1,46 A

Out Put 20W

Rating: Continuous

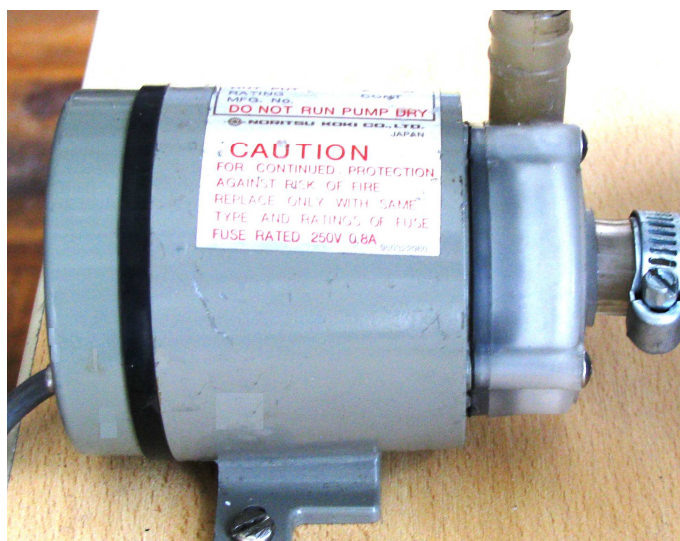


Figura 2.27 Bomba de Acople magnético PD-10-2 marca Noritsu.

Para seleccionar los relés adecuados, se debe saber cual es el voltaje y corriente al que van estar expuestos, las bombas, la electro-válvula y el conversor, por lo que se detalla los siguientes datos:

- Para las bombas centrífugas de acople magnético:

Bomba 1:

Voltaje = 24Vdc

Amperaje =1,5 A máximo

Bomba 2:

Voltaje = 24Vdc

Amperaje =1,5 A máximo

Bomba 3:

Voltaje = 24Vdc

Amperaje = 1,5 A máximo

- Para el conversor AC/DC:
  - Voltaje = 21V
  - Amperaje = 10A máximo
  
- Para el motor del cátodo de la cuba electrolítica:
  - Voltaje = 220Vac
  - Amperaje = 1A máximo
  
- Para la electro-válvula:
  - Voltaje = 110Vac
  - Amperaje = 0,45A

Entonces se seleccionan 2 relés de 2 contactos y 2 relés de 4 contactos con sus respectivos sockets para riel con las siguientes características:

Modelo = JQX – 13F

Bobina = 12Vdc

Contactos: 250Vac / 28Vdc 10A 2 contactos

250Vac /28Vdc 15A 1 contacto.



Figura 2.28 Relé de 2 contactos utilizado en el prototipo.

Para el conversor AC/DC se selecciona un contactor con los siguientes datos de placa:

Marca = OMRON

Modelo = LC1-D093

Voltaje de bobina = 120Vac / 60Hz

Voltaje de Aislamiento  $U_i = 660V$ .

Corriente Nominal  $I_{th} = 25A$

Numero de Polos = 3

Contactos: AC3 220Vac / 2,2 kw

380-480Vac /4Kw

660 Vac / 5,5Kw

Corriente continua = 20A 60 – 75°C.



Figura 2.29 Contactor de 3 Polos

Las bombas de acople magnético se las adquirió con la fuente de alimentación respectiva, dicha fuente utiliza 220V<sub>ac</sub> como voltaje de entrada y provee a la salida un voltaje de 24V<sub>dc</sub>.

EL circuito de potencia del prototipo se presenta en el anexo W.

Cabe mencionar que las conexiones de las bombas con la tubería tanto para la entrada como para la salida es de 14mm ( $\approx 1/2$  pulgada).

Como observación cabe mencionar que en el país se encontró el mismo tipo de bombas pero en marca Noritsu con un valor menor al 50% de lo que cuestan las bombas marca IWAKI.

Las tuberías del prototipo deben ser también de un material que sea resistente a la corrosión, por tal motivo se utiliza tubería plástica de PVC.

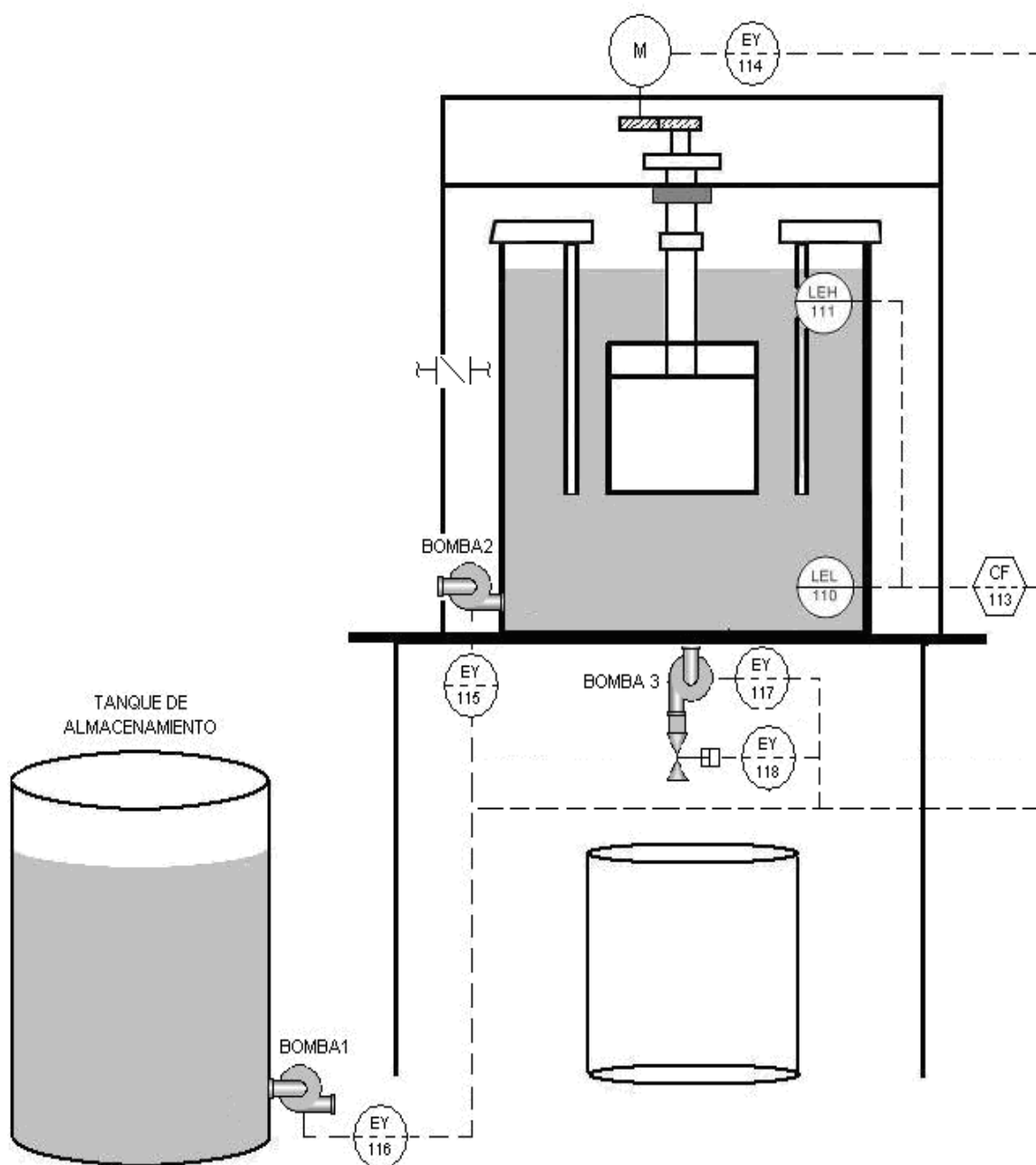


Figura 2.30 Ubicación de la instrumentación del prototipo

Tabla 2.6 Interconexión de la Instrumentación del Prototipo

Código	Identificación	Tipo de Instrumento	Interconexión	
			Entrada	salida
LEH 111	Sensor de nivel Alto	Magnético	Q.uba Electrolytica	CF 113
LEL 112	Sensor de nivel Bajo	Magnético	Q.uba Electrolytica	CF 113
EY 114	Rele de Voltaje	Eléctrico	CF 113	Motor
115			CF 113	Bomba 2
116			CF 113	Bomba 1
117			CF 113	Bomba 3
118			CF 113	Electroválvula
CF 113	Microcontrolador	Eléctrico	Varias	Varias

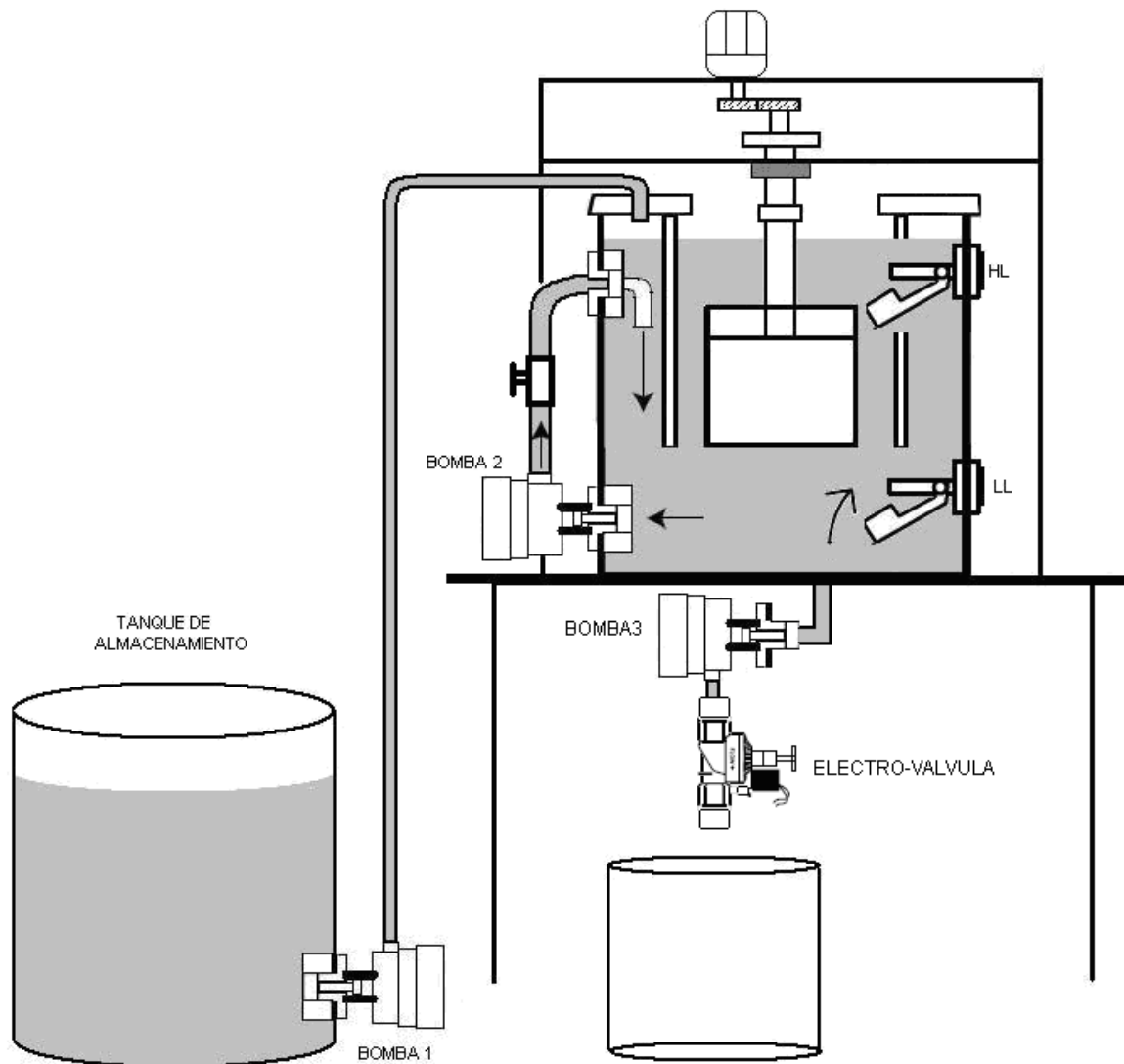


Figura2.31 Vista lateral del Prototipo

## 2.7 DISEÑO DE ENGRANAJES PARA AJUSTAR LA VELOCIDAD DEL MOTOR

Se denomina engranaje o rueda dentada al mecanismo utilizado para transmitir potencia de un componente a otro dentro de una máquina. Los engranajes están formados por dos ruedas dentadas, de las cuales, la mayor se denomina engranaje y la menor piñón (generalmente esta transmite la potencia) [28].

### 2.7.1 CIRCUNFERENCIAS DE UN ENGRANAJE

Un par de engranes que trabajan unidos se diseñan a partir de sus **Círculos Primitivos o de Paso**, estos círculos son siempre tangentes entre sí [28].

En cambio a partir de la **Circunferencia Base** se genera el perfil de envolvente. Por lo que se tiene la siguiente expresión [28]:

$$r_b = r \cos \phi \quad (2.14)$$

Donde:  $r$  = Radio de la circunferencia primitiva.

La **Circunferencia de Addendum** es la correspondiente a la superficie exterior del diente (cresta). Mientras que la **Circunferencia de Dedendum** es la del fondo de los dientes del engranaje [28].

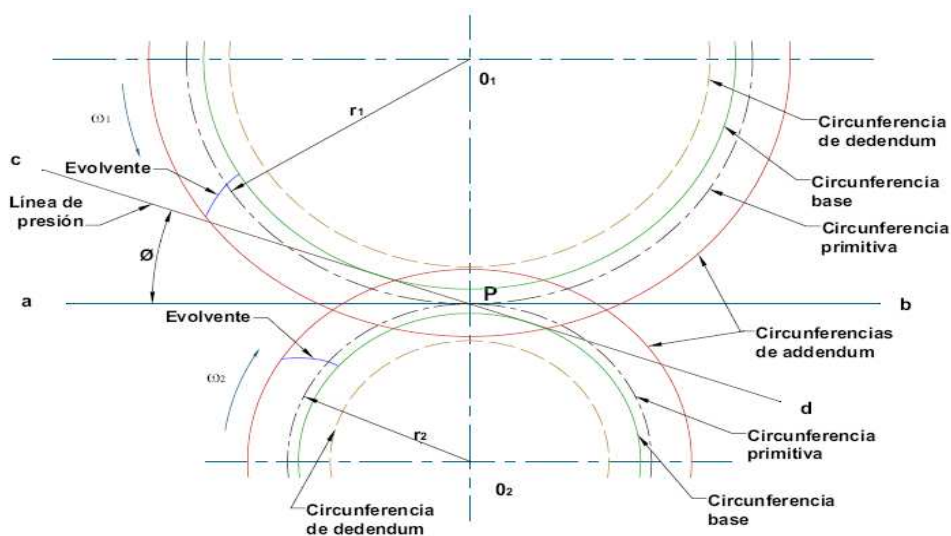


Figura 2.32 Circunferencias constitutivas de un Engranaje Recto, tomado de [28]

### 2.7.2 NOMENCLATURA DE UN ENGRANAJE RECTO

El **Paso Circular ( $p$ )** es la longitud de arco del círculo primitivo comprendido entre un punto en un diente, al punto del diente adyacente [28].

$$p = \frac{\pi d}{N} \quad (2.15)$$

Donde:

$d$ = Diámetro de paso [mm].

$N$ = Numero de dientes.

El **Paso Diametral ( $P$ )** es la relación entre el número de dientes del engranaje y el diámetro de paso expresado en pulgadas [28].

$$P = \frac{N}{d} \quad [\text{dientes}/in] \quad (2.16)$$

Donde:  $d$  = Diámetro de paso [in]

$$pP = \pi \quad (2.16.1)$$

El **Módulo** es la relación del diámetro de paso al número de dientes. Para que dos engranajes trabajen juntos deben tener igual módulo [28].

$$m = \frac{d}{N} \quad (2.17)$$

Donde:  $d$  : diámetro primitivo o de paso [mm].

$m$  : módulo [mm].

$$\pi m = p \quad (2.17.1)$$

El **Ancho de la Cara** es la longitud del flanco del diente, cuya dimensión debe garantizar la resistencia a la rotura y desgaste como consecuencia de transmitir la carga requerida [28].



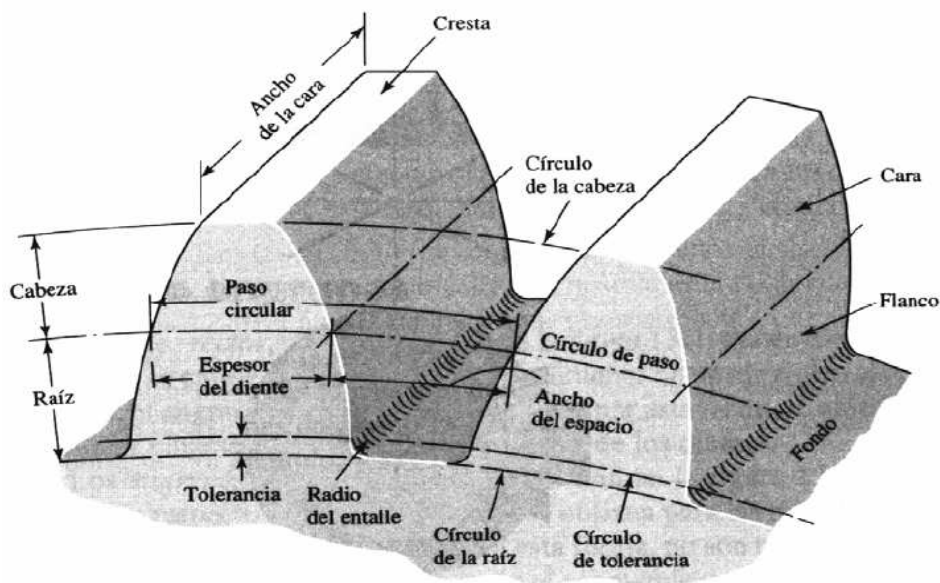


Figura 2.33 Nomenclatura de los dientes de un engranaje recto, tomado de [28]

El **Angulo de Presión** es el formado entre la línea de acción y la tangente común a las circunferencias primitivas. [28]

Las velocidades de entrada (eje conductor) y salida (eje conducido) están inversamente relacionadas con el número de dientes de las ruedas a las que están conectados. Por lo que si se tienen dos engranajes 1 y 2 con velocidades de giro  $Z_1$  [rpm] y  $Z_2$  [rpm] se pueden obtener unas relaciones de gran utilidad [29].

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 \quad (2.18)$$

$$N_1 / N_2 = d_2 / d_1 \quad \text{Pero } d = m N$$

$$N_1 / N_2 = Z_2 / Z_1 \quad (2.19)$$

Donde:

**Z1** Velocidad de giro del eje conductor

**Z2** Velocidad de giro del eje conducido

**N1** Número de dientes del eje conductor

## $N_2$ Número de dientes del eje conducido

Se define la **relación de transmisión  $i$**  como la cantidad de vueltas que debe dar el engranaje motor para que el engranaje conducido de una vuelta. La  $i$  puede ser reductora de velocidad o multiplicadora de velocidad [29].

$$\text{En general: } i = N_1 / N_2 = d_2 / d_1 = Z_2 / Z_1 \quad (2.20)$$

De esta forma, un diseño de engranajes parte por definir el módulo y la relación de transmisión que se desea, de esta forma y usando las relaciones anteriores se obtienen los diámetros de paso. A continuación se muestran los valores típicos para el módulo [29]:

Tabla 2.7 Módulos para el diseño de engranajes, tomado de [30]

Módulos	
Preferidos	2 <sup>da</sup> Opción
1	1.125
1.25	1.375
1.5	1.75
2	2.25
2.5	2.75
3	3.5
4	4.5
5	5.5
6	7
8	9
10	11
12	14
16	18
20	22
25	28
32	36
40	45

Los tamaños más utilizados para el Paso diametral son:

Tabla 2.8 Paso Diametral para el diseño de engranajes, tomado de [30]

Paso diametral	
Bastos	Finos
2	20
2.25	24
2.5	32
3	40
4	48
6	64
8	80
10	96
12	120
16	150

### 2.7.3 DATOS INICIALES PARA EL DISEÑO

Potencia a transmitir:  $H = 160W = 0,214HP$   
 Revoluciones del piñón:  $Z1 = (2600/6) = 433,33$   
 Ángulo de presión:  $\Phi = 20^\circ$   
 Relación de transmisión:  $i = 3:1$

Para comenzar el diseño se escoje un módulo  $m = 1,25$  y un  $N_1 = 13$

Usando la ecuación 2.8 se tiene que:  $N_2 = 39$

Usando la ecuación 2.4 se tiene que los diámetros primitivos son:

$$d_1 = 16,25 \text{ [mm]}$$

$$d_2 = 48,75 \text{ [mm]}$$

La siguiente parte es el *diseño de los dientes*, que deben tener una forma tal que en todo momento exista contacto entre el piñón (menor diámetro) y el engranaje (mayor diámetro) [29].

El perfil utilizado generalmente es el de la evolvente de círculo, que es la trayectoria descrita por un punto de una recta generatriz que se mantiene tangente y sin deslizar sobre una circunferencia base durante el movimiento. La recta generatriz siempre se mantiene normal al perfil de envolvente en el punto de contacto [28].

Para la construcción del perfil se divide la circunferencia base de forma angular en un número de partes iguales ( $OA_0, OA_1, \dots, OA_5$ ), luego se trazan perpendiculares a cada uno de los radios ( $A_1B_1, A_2B_2, \dots, A_5B_5$ ). Sobre la recta  $A_1B_1$  se ubica la distancia correspondiente al arco  $A_0A_1$  y que a su vez es el valor del radio de curvatura  $\rho_1$  del perfil de envolvente con centro instantáneo en  $A_1$ ; en  $A_2B_2$  se ubica la distancia correspondiente al arco  $A_0A_2$ , etc. Obteniéndose de esta manera los puntos que determinan el perfil de envolvente.

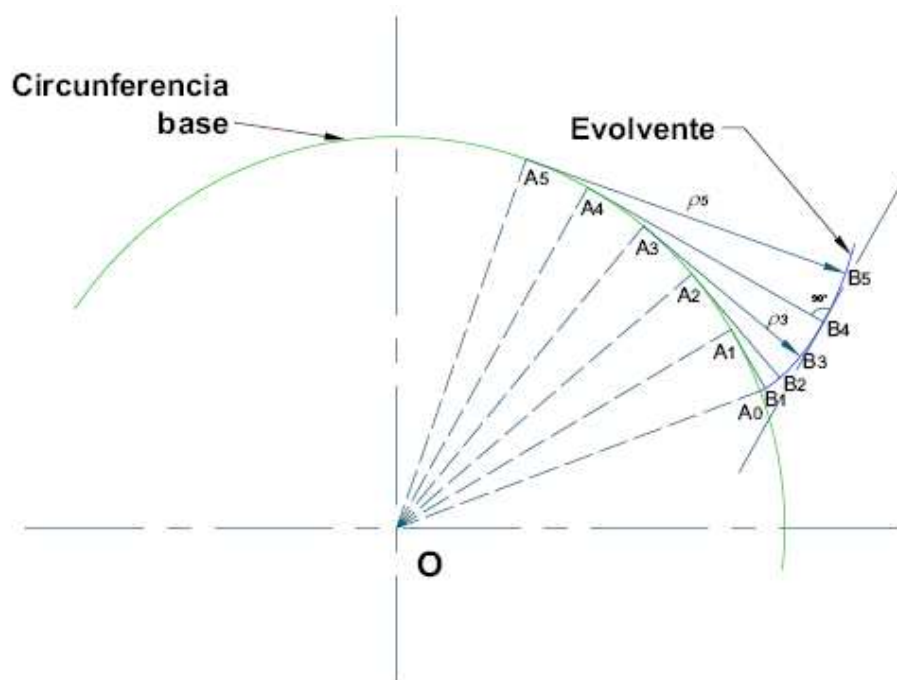


Figura 2.34 Generación del perfil de evolvente, tomado de [28]

Los dientes de todo engrane se empujan en una dirección llamada línea de presión, línea de acción o generatriz, esta línea se encuentra inclinada con respecto a la línea AB, tangente a ambos círculos de paso [30].

Se tiene entonces:

Piñon	Engranaje
$m = 1,25$	$m = 1,25$
$N = 13$	$N = 39$
$d = 16,25$	$d = 48,75$

Los valores más utilizados para la inclinación de la línea de presión son [29]:

$20^\circ$	$20.5^\circ$	$25^\circ$	$14.5^\circ$ (obsoleto)
------------	--------------	------------	-------------------------

Para este caso el ángulo de presión es  $20^\circ$

La figura siguiente muestra el inicio del trazado del par de engranes, indicando los diámetros primitivos o de paso y la línea de presión.

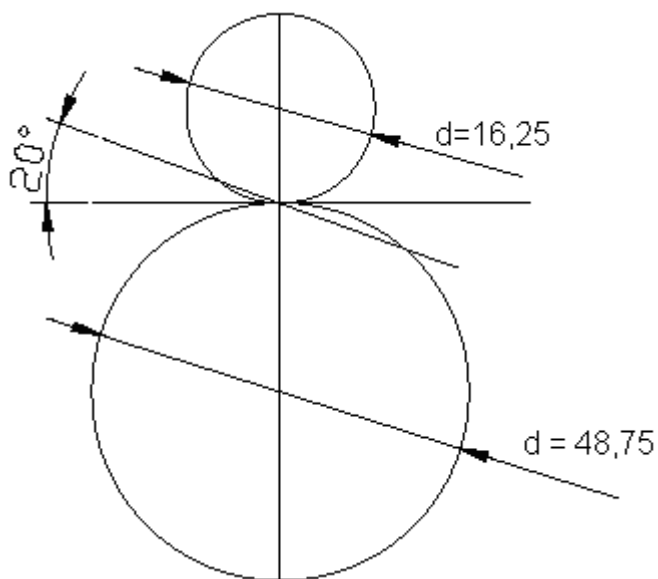
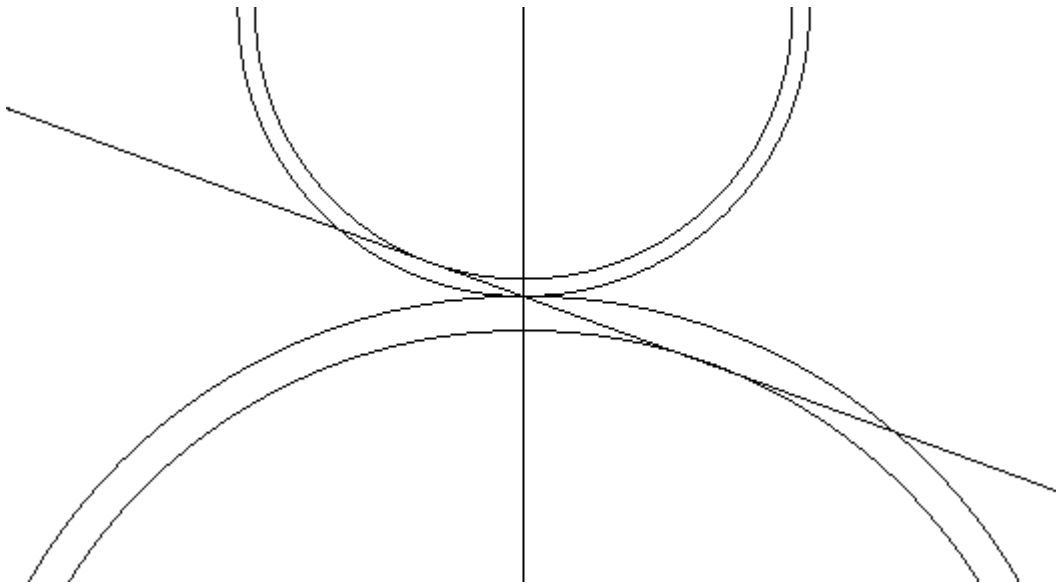


Figura 2.35 Trazado de los Engranajes

Para generar las curvas evolventes en ambos engranajes se traza el círculo de base, concéntrico con el círculo de paso y tangente a la línea de presión [29].



Finalmente se limita el tamaño de los dientes entre dos círculos, por encima y por debajo del círculo de paso. El límite inferior, se obtiene restando al radio de paso el dedendum, mientras que el límite superior se obtiene sumando al radio de paso el addendum [29] [30].

El dedendum es  $d = 1.25/P$  o  $d = 1.25m = 1,25(1,25) = 1,5625$

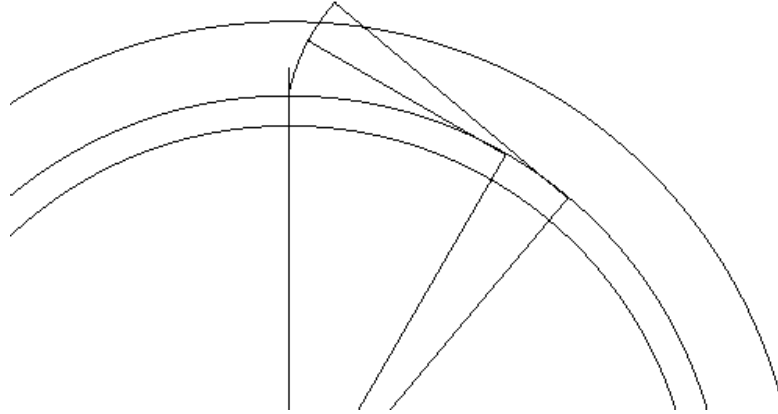
El addendum es:  $a = 1 / Pd$  o  $a = m = 1,25$

Por tanto los radios para las circunferencias quedan:

Tabla 2.9 Valores de los radios de los Engranajes

	<b>Radio del Piñón</b>	<b>Radio del Engranaje</b>
Circunferencia de Addendum	9,4 mm	25.6 mm
Circunferencia de Dedendum	6,6 mm	22,8 mm
Circunferencia Primitiva o paso	8,125 mm	24,375 mm

A continuación se procede al dibujo de las curvas evolventes para ambos engranes, usando el proceso mostrado anteriormente [29].



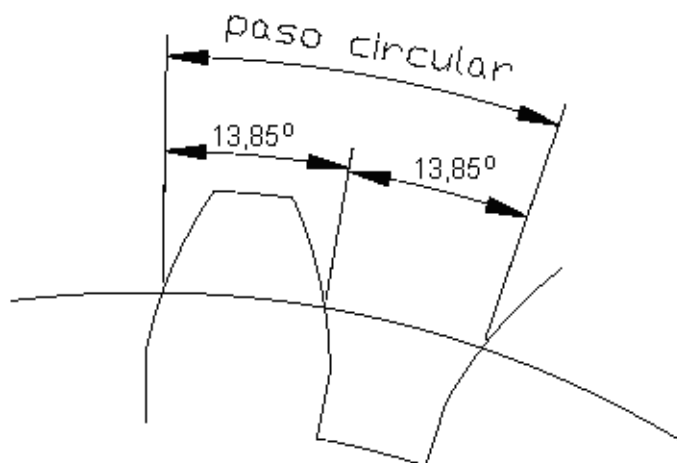
Para dibujar un diente se necesita conocer su espesor, aplicando la ecuación (2.16.1) y seleccionando un paso diametral de 2 se obtiene que el paso circular es:

$$p = \frac{\pi}{2} = 1,57in$$

Por lo tanto el espesor del diente es [30]:

$$t = \frac{p}{2} = \frac{1,57}{2} = 0,785in$$

Con esta distancia para el espesor del diente así como para el espacio del diente. Como el piñón tiene 13 dientes, esto indica que cada  $27,7^\circ$  hay un diente, mientras que el engranaje tiene 39 dientes, esto indica que cada  $9,23^\circ$  hay un diente.



En el siguiente gráfico se muestran los dientes del piñón y el engranaje en su forma final, es importante apreciar que el contacto entre los dientes se lleva a cabo a lo largo de la línea de presión indicada. [29]

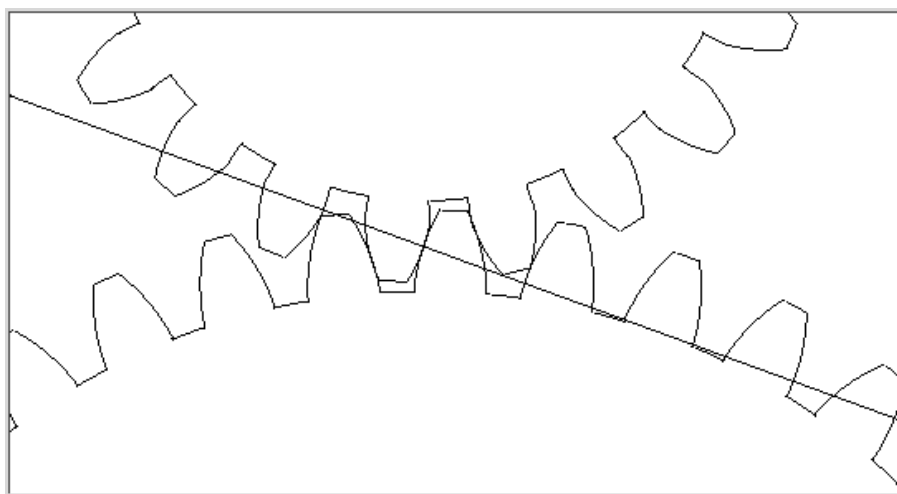


Figura 2.35 Formado de los dientes en los engranajes

El material utilizado para la construcción de los engranajes es el polioximetileno, comúnmente llamado Acetal (Acetal Copolymer-POMc), es un polímero cristalino obtenido de la polimerización del formaldehído, ha tenido una rápida y enorme difusión por sus óptimas características mecánicas, por su estabilidad ante la humedad y por ser fácil de trabajar [31].

Como características del material se puede citar [31]:



- Elevada resistencia al estrés.
- Buena estabilidad dimensional.
- Bajo coeficiente de fricción.
- Resistencia a la compresión, resistencia a los golpes y a las bajas temperaturas.
- Se puede trabajar muy bien especialmente por máquinas automáticas.
- color: natural y negro.



Figura 2.36 Barras de Polioximetileno, tomado de [31]

Cabe mencionar que en todo sistema de engranajes se debe analizar los esfuerzos a los que estos van estar sujetos, en éste caso el esfuerzo es mínimo ya que la carga es el cátodo, pero el motor transmite el movimiento a una chumacera que no es más que un rodamiento que presenta una fricción y esfuerzo mínimo para vencer a la inercia.

Haciendo una analogía, en un diagrama de cuerpo libre del engranaje las fuerzas se resolvieron en componentes radial y tangencial, siendo [28] [30]:

$$F_{32}^t = W^t = \text{Carga tangencial transmitida}$$

$$F_{32}^r = W^r = \text{Carga radial transmitida.}$$

La carga tangencial es en realidad la componente útil, porque la componente radial no tiene un fin, ya que no transmite potencia [28] [30].

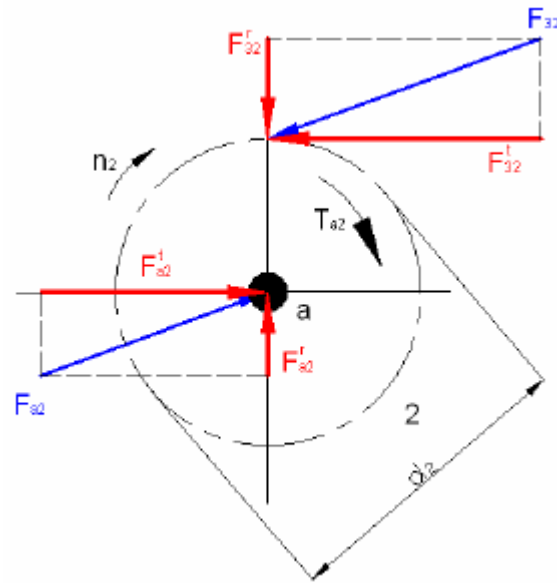


Figura 2.37 Descomposición de las fuerzas que actúan en un engranaje, tomado de [28]

## CAPITULO 3

### DESARROLLO DEL PROGRAMA DE CONTROL

#### 3.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Para la parte del control del prototipo se utiliza un microcontrolador de la familia ATMEL (ATMEGA16) descrito en el capítulo 2, el cual se encarga de activar los circuitos de potencia y activar las comunicaciones con los periféricos conectados. El lenguaje de programación es Basic utilizando el compilador Bascom AVR 1.11.9.1

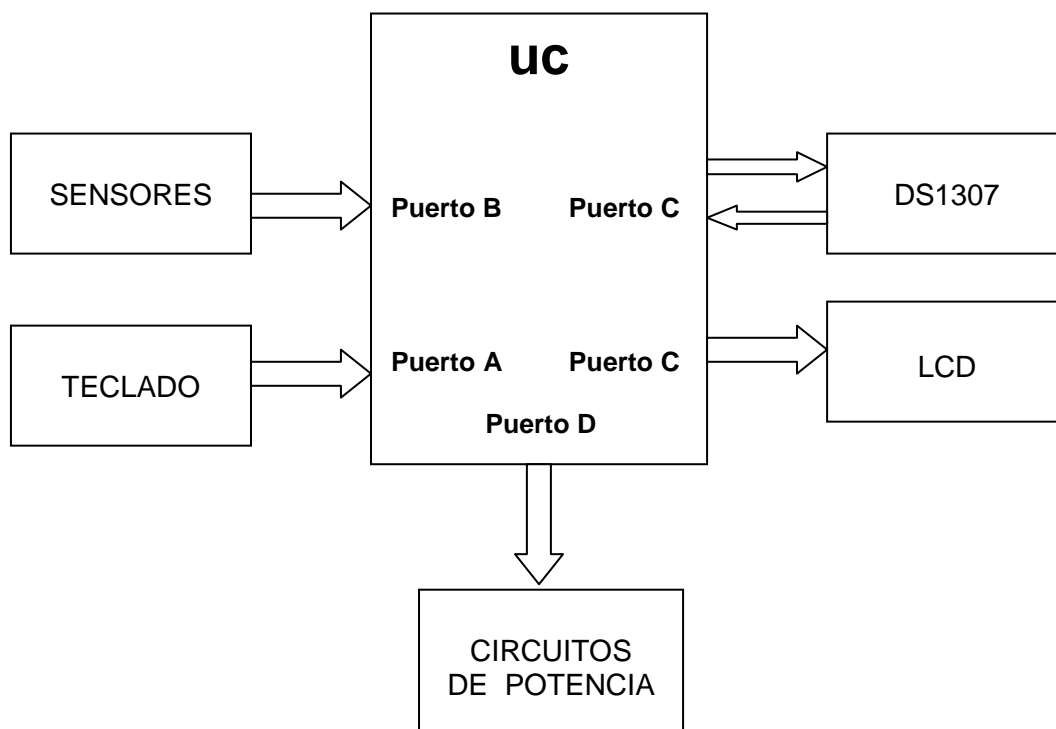


Figura 3.1 Arquitectura del Programa

El HMI consta de un teclado matricial que tiene como función ingresar la clave de acceso, un LCD que permite la visualización de las diferentes etapas del proceso, y diodos led colocados a las salidas del microcontrolador para identificar el funcionamiento de los diferentes periféricos.

### 3.2 VISION MACRO DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE LA PLATA

El proceso de recuperación electrolítico tiene 3 etapas definidas, en la primera se necesita recolectar el químico de desecho para posteriormente procesarlo; en la segunda etapa se da inicio al proceso de recuperación de la plata que requiere tomar una muestra de químico (baño) y aplicarle una densidad de corriente por un determinado tiempo, y la tercera etapa es la recolección de la plata del cátodo.

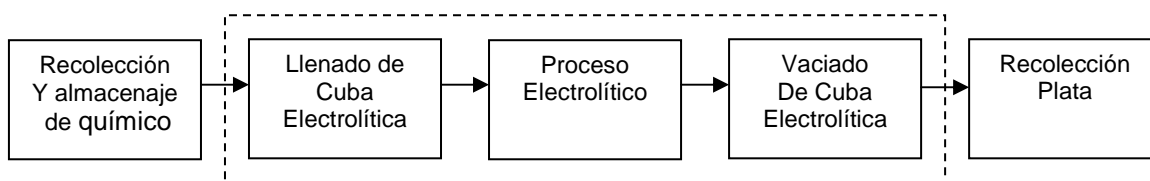


Figura 3.2 Diagrama de flujo del Proceso de Recuperación de Plata

#### 3.2.1 SUBETAPA DEL PROCESO ELECTROLÍTICO

La etapa 2 del proceso de recuperación involucra en cada baño hacer recircular el químico mientras se le aplica una densidad de corriente a través de la rotación del cátodo durante un tiempo determinado.

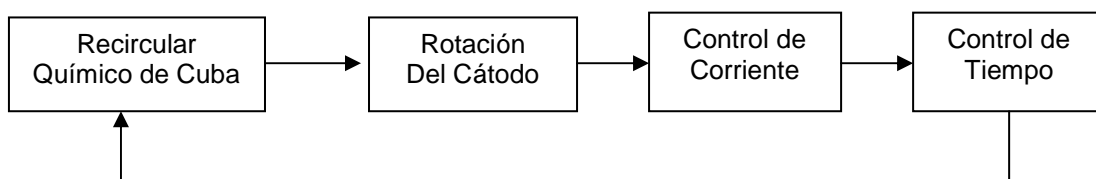


Figura 3.3 Diagrama de flujo de la Sub-etapa del Proceso Electrolítico

### **3.2.2 DESCRIPCIÓN DE LA OPERACIÓN DEL PROCESO**

En primer lugar, el almacenamiento del químico se lo realiza en un tanque, en la cuba electrolítica un sensor de nivel alto y otro de nivel bajo son los encargados del inicio y fin del llenado de la cuba usando la bomba 1, así como del vaciado del mismo usando la bomba 3 y la electro-válvula.

La corriente aplicada a la solución es controlada por el retardo en la conducción de los tiristores del convertidor semicontrolado AC/DC, mientras que la rotación del cátodo se lo consigue con un motor de corriente alterna al que se le acopla una caja reductora y un par de engranajes. Para la recirculación del químico en la cuba se utiliza la bomba 2.

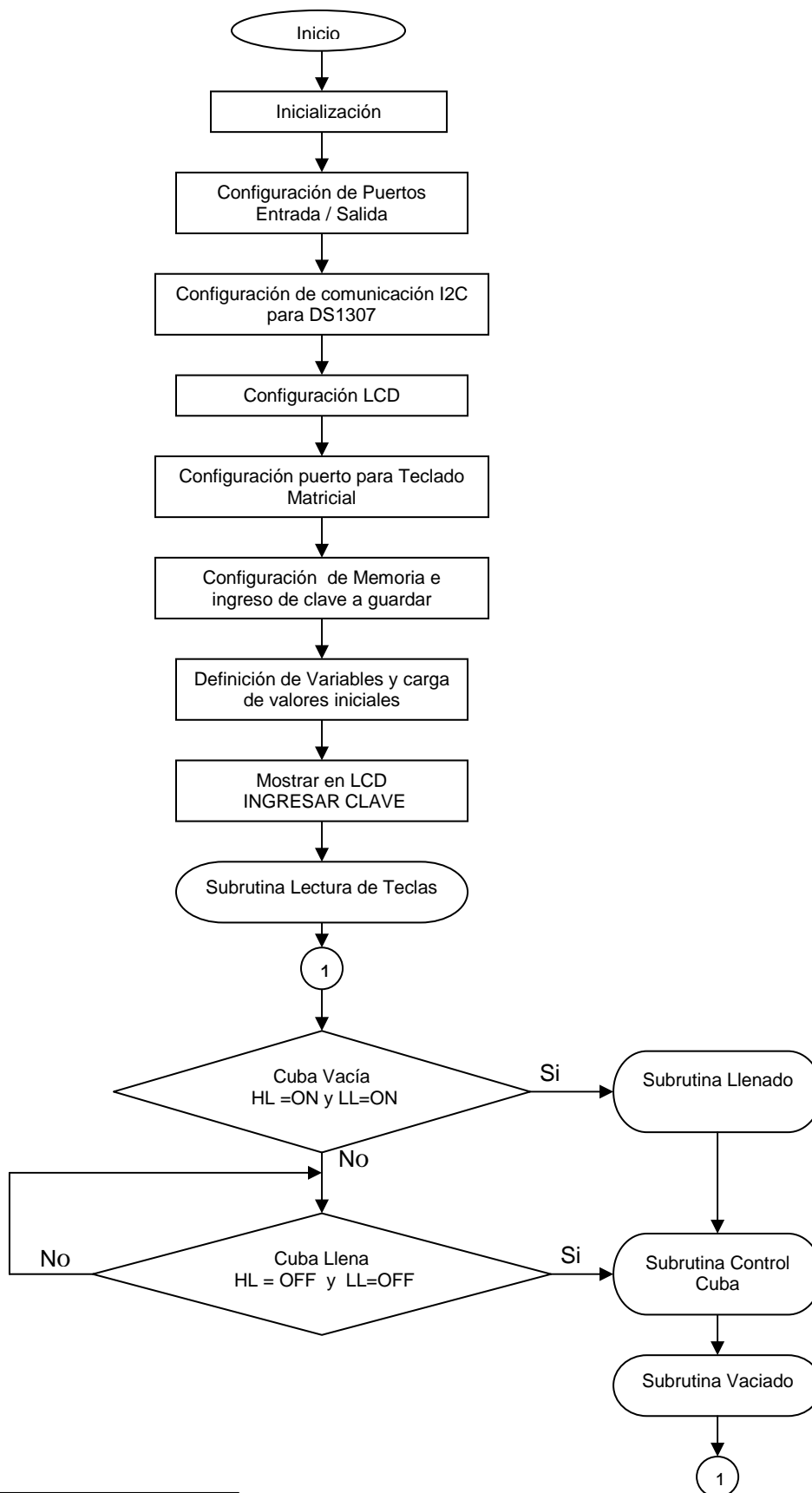
Para controlar el tiempo de aplicación de la corriente a la solución se utiliza el circuito integrado DS1307, que no es más que un reloj en tiempo real, el tiempo que se establece en el programa es el calculado en el capítulo anterior.

### **3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA PARA EL FUNCIONAMIENTO DEL PROTOTIPO**

El programa del prototipo está estructurado con un programa principal y 4 subrutinas.

En el programa principal se configura todas las entradas y salidas a las que se les ha conectado los periféricos correspondientes, inmediatamente el programa lee la primera subrutina que es el ingreso de la clave de acceso para habilitar el inicio del proceso electrolítico.

El diagrama de flujo del programa principal se describe a continuación:



HL = High Level, LL = Low Level

Figura 3.4 Diagrama de flujo del Programa Principal implementado

### 3.3.1 SUBROUTINA DE INGRESO DE CLAVE

La función de esta subrutina es la de limitar el acceso a personas no autorizadas a iniciar el proceso. Lee y asigna un valor a la tecla presionada, dicho valor es visualizado en el LCD, y solo se permite acceder con una clave de 4 dígitos igual a la almacenada en la memoria del microprocesador.

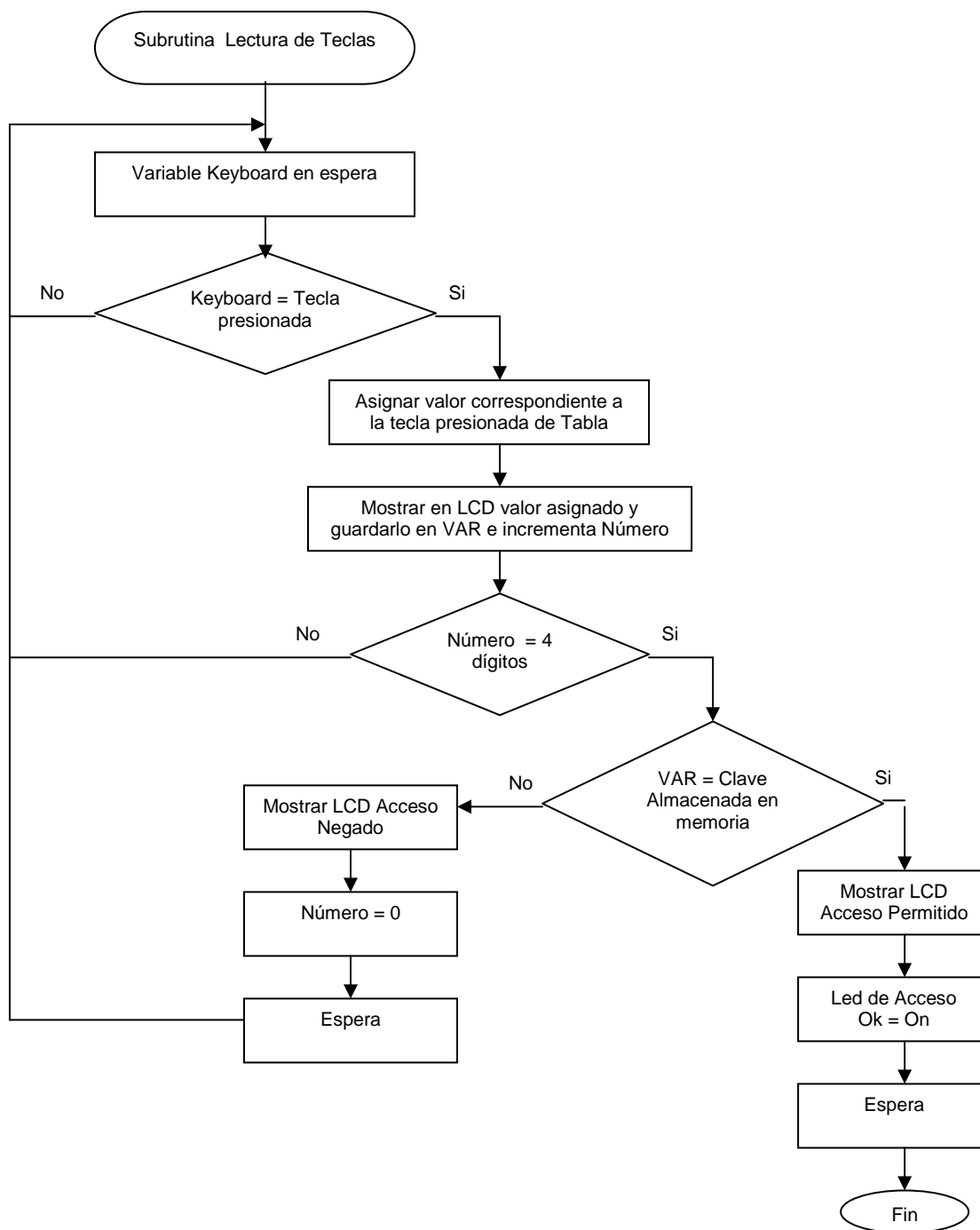


Figura 3.5 Diagrama de flujo de la Subrutina de Ingreso de Clave

### 3.3.2 SUBROUTINA LLENADO

Esta subrutina del programa es la encargada de activar la bomba 1 para llevar el químico desde el tanque de almacenamiento hacia la cuba electrolítica, esta etapa del proceso es identificada en el LCD. Los sensores de nivel alto y bajo determinan cuando la subrutina llega a su fin.

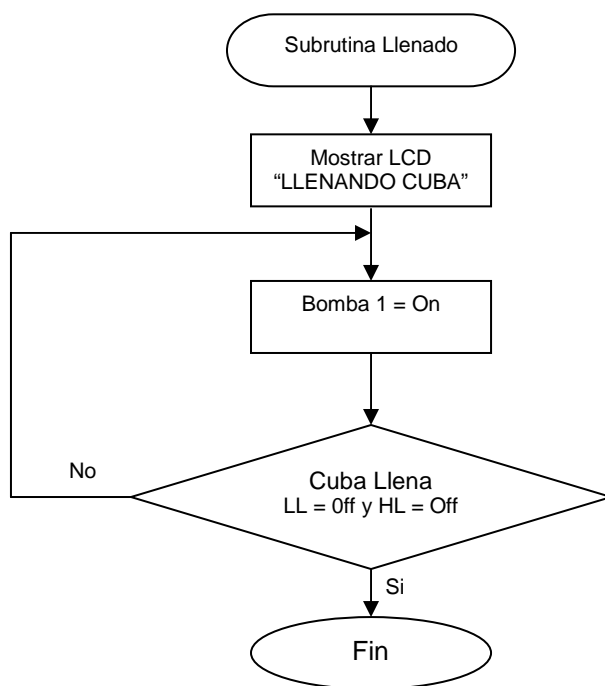


Figura 3.6 Diagrama de flujo de la Subrutina de Llenado de la Cuba

### 3.3.3 SUBROUTINA CONTROL CUBA

Esta subrutina del programa es la encargada del proceso electrolítico, es decir, aquí se activa el motor del rotación del cátodo, la bomba de recirculación de químico (bomba2) y el conversor AC/DC, además para controlar el tiempo del baño electrolítico se establece la comunicación I2C entre el reloj en tiempo real (DS1307) y el microcontrolador. El final de la subrutina es activado por el DS1307, cuando el tiempo de este es igual al calculado.



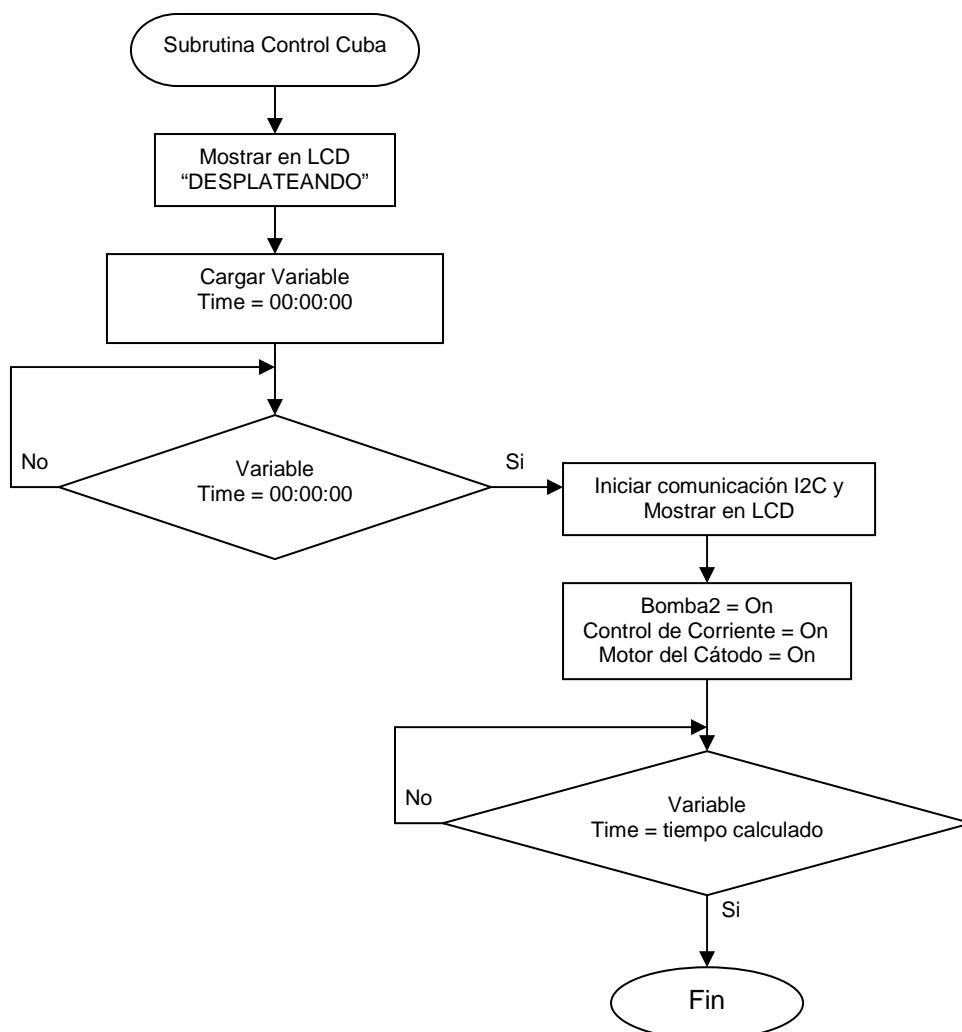


Figura 3.7 Diagrama de flujo del Control de la Cuba Electrolítica

### 3.3.4 SUBROUTINA VACIADO

En esta subrutina se detiene el proceso electrolítico que maneja la subrutina anterior, se detiene la comunicación I2C y se desactiva el motor de rotación del cátodo, la bomba 2, y el conversor AC/DC, dando paso a la activación de la electro-válvula para el vaciado de la cuba electrolítica. Los sensores de nivel alto y bajo determinan la finalización de esta subrutina.

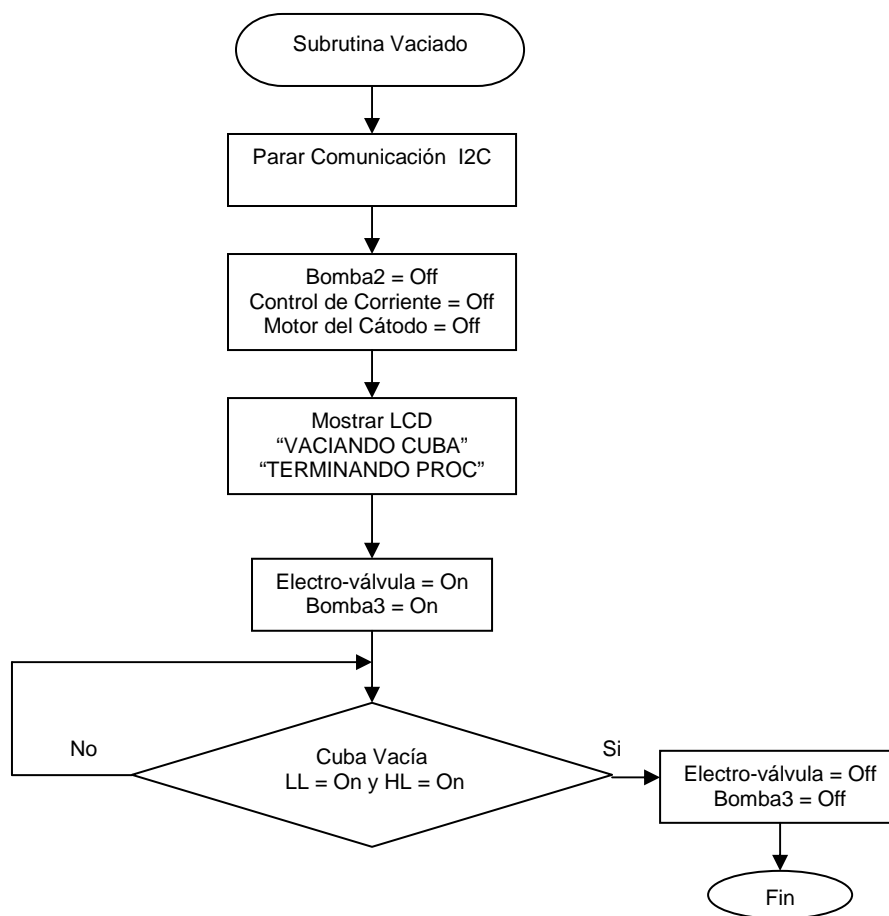


Figura 3.8 Diagrama de flujo del Vaciado de la Cuba Electrolítica

## **CAPÍTULO 4**

### **PRUEBAS Y RESULTADOS**

#### **4.1 CONSIDERACIONES GENERALES**

La cantidad de plata que se encuentra en el químico de desbordamiento varía extensivamente de solución a solución, por lo que la cantidad que se recupere en cada baño electrolítico no es fija.

EL químico debe haber tenido un buen control de proceso para que el estado final de este sea el adecuado.

La muestra del químico de desbordamiento sea en lo posible del mismo tipo (Blanqueador-Fijador RA4) y no mezclado con los otros desechos.

EL valor de la densidad de corriente y el tiempo del proceso con los que se inicia las pruebas son los calculados en el capítulo 2.

Antes de comenzar un baño electrolítico se verifica que el químico de desbordamiento contenga una concentración de plata aceptable, caso contrario se debe desechar dicho químico, para dicha verificación se utiliza una varilla de cobre (este método se detalla más adelante).

#### **4.2 PUESTA EN MARCHA**

- Colocar el cátodo de la cuba en su posición, si es el caso de que se retire la plata obtenida en una prueba anterior, la superficie de este debe ser pulida.

- Verificar que el tanque de almacenamiento contenga el químico a procesar.
- Verificar que la válvula manual acoplada a la bomba de recirculación de la cuba electrolítica no esté cerrada.
- Verificar el estado de los sensores (flotadores no estén endurecidos).
- Activar el interruptor termo magnético general del prototipo.
- Ingresar la clave de inicio del proceso (la clave es 7890).
- Verificar que las salidas del microprocesador trabajen adecuadamente (esto se consigue observando los leds en el tablero)
- Comprobar, y ajustar el nivel de corriente, debido a que, el cátodo rota y las propiedades del medio conductor varían también en cada muestra, influyendo en el valor de la carga acoplada al conversor (varía levemente).

### **4.3 DETERMINACION DE LA PLATA COMO CLORURO**

Hay un sin número de técnicas disponibles para medir la plata, estas pueden variar desde simples pruebas cualitativas hasta análisis sofisticados realizados en un laboratorio analítico. La clase de prueba usada depende del material que se está probando y el propósito del análisis.

#### **4.3.1 FRANJAS DE PRUEBA CUALITATIVA**

Esta técnica incluye el usar una *franja de papel* impregnada con un material que es sensible a la plata o una *franja de cobre pulido*. La franja se sumerge en la muestra por un período de tiempo corto. Si hay descolorimiento esto indica la presencia de plata soluble en la muestra. Los niveles variantes de descolorimiento indican las diferentes concentraciones de plata [34].

### **4.3.2 COLORIMETRÍA**

Esta técnica implica el añadir un químico a muestras que contienen plata. La plata reacciona con el químico y forma un color específico, la intensidad del color de la muestra tratada se compara a una muestra de referencia. La diferencia en el color corresponde a la concentración de plata en la solución. Esto hace que estas pruebas sean muy cualitativas [34].

### **4.3.3 LABORATORIOS ANALÍTICOS**

Muestras que requieren un análisis preciso, tales como demostrar acatamiento a las regulaciones utilizan este tipo de análisis. Una vez que se recibe la muestra en el laboratorio analítico, el método de preparación depende de la clase de análisis que se necesita.

En el laboratorio de Química Analítica de la Facultad de Química de la Escuela Politécnica Nacional se realizó un procedimiento para identificar la concentración de plata en una solución antes y después de procesarla en el prototipo desarrollado. (Dicho análisis fue realizado por el Ing. Oswaldo Proaño).

Al final del análisis se obtiene que en 200ml de solución (químico antes de proceso), hay 50 miligramos de plata. Y en la solución final (después del proceso), hay 19 miligramos.

## **4.4 OBTENCION DE LA PLATA**

### **4.4.1 LA HOJUELA DE PLATA**

Las unidades electrolíticas producen una hojuela metálica de plata, dicha hojuela debe ser un sólido de color gris-marrón. El funcionamiento inadecuado de la

unidad electrolítica puede causar que sulfuro de plata negro se forme en la superficie del cátodo, el cual reduce la eficiencia de la misma [35].

La hojuela de plata producida por una unidad electrolítica que funciona adecuadamente debe ser plata metálica de alta pureza, es decir, el enchapado de plata es típicamente mayor al 90% de plata por peso [35].

#### **4.4.2 COMO REMOVER LA PLATA DEL CÁTODO**

La preparación de la superficie del cátodo es la clave para poder remover fácilmente la hojuela de plata. Se recomienda pulir ligeramente la superficie con una estopa de acero, o algo similar, antes de comenzar el proceso de electrólisis.

En algunos casos, donde la hojuela está bien formada pero hay dificultad en removerla del cátodo, ayudará si antes de comenzar el proceso de electrólisis se limpia la superficie del cátodo con una capa muy delgada de cera de automóvil [2].

#### **4.4.3 COMO REFINAR MATERIALES QUE CONTIENEN PLATA**

Para refinar los materiales cargados de plata de una instalación se requiere diferentes procesos, la complejidad de los mismos es la razón de la diferencia del costo. La hojuela de plata se seca y se funde directamente, por lo que se toma una muestra del material y se analiza cuidadosamente para determinar el contenido de plata [35].

#### **4.4.4 SOLUCIONES Y CONSEJOS PARA UN MEJOR FUNCIONAMIENTO DE LA UNIDAD ELECTROLITICA**

La tabla mostrada a continuación provee una guía de varios problemas que pueden ocurrir con el equipo de recuperación electrolítica y sus soluciones [2].

Tabla 4.1: Consejos y soluciones para mejorar su unidad electrolítica.

<b>Problema</b>	<b>Causa Probable</b>	<b>Solución</b>
<b>Niquelado de plata bajo o pérdida de plata</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La corriente es muy alta</li> <li>• El tiempo de niquelado no es correcto</li> <li>• Preparación de superficie de cátodo no es correcta</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ajuste la corriente o el tiempo de niquelado</li> <li>• Antes de comenzar electrólisis pula con estopa de acero o algo similar</li> </ul>
<b>Sulfuración</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La corriente es muy alta para la concentración de plata</li> <li>• El tiempo de niquelado es muy largo</li> <li>• La agitación es muy baja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ajuste la corriente o el tiempo de niquelado</li> </ul>
<b>Plata recuperada no es pura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La corriente es muy alta lo que resulta en sulfuración</li> <li>• La corriente no es apropiada para la clase de solución que se está desplatando</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ajuste la corriente o el tiempo de niquelado</li> <li>• Apareamiento de la corriente que se necesita con la clase de solución que se está desplatando</li> </ul>
<b>Nódulos en el cátodo o célula tienen un cortocircuito</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suciedad acumulada en las planchas de baño o obstruyen la plancha de plata</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asegúrese de filtrar adecuadamente el fijador ya usado antes de electrólisis</li> </ul>
<b>Formación de sulfuro de plata (El niquelado de plata se cae o se acumula en la parte de abajo de la célula)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sulfito bajo en la solución</li> <li>• La corriente es muy alta o la unidad funciona por un tiempo muy largo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para mantener la eficacia de niquelado de la mayoría de los fijadores, la concentración de sulfito de sodio debe ser 8 - 10 g/L cuando el nivel de plata es 1 - 5 g/L</li> <li>• Ajuste la corriente o el tiempo</li> </ul>
<b>La solución no ha sido desplatada al nivel apropiado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo pH</li> <li>• La corriente es baja o no hay suficiente tiempo</li> <li>• Problemas eléctricos, mala conexión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ajuste el pH</li> <li>• Ajuste la corriente o el tiempo</li> <li>• Verifique la conexión, vea el manual de funcionamiento</li> </ul>
<b>Planchas muy oscuras</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La concentración inicial de la plata es muy baja</li> <li>• La corriente de niquelado es muy alta o la unidad funciona por un tiempo muy largo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ajuste la corriente</li> <li>• Ajuste la corriente o el tiempo de niquelado</li> </ul>

#### 4.4.5 ELECTROLISIS

En Soluciones como el blanqueador-fijador RA4, particularmente, el pH se encuentra en un estado ligeramente alcalino, entre 7.8 al 8.0, para prevenir que el complejo de hierro se oxide y resoluble la plata electroplateada. (No debe dejar el blanqueador-fijador en la célula cuando este apagada, ya que la solución puede resolubilizarse o disolver la plata del cátodo) [2].

#### 4.4.6 MEDIDA DEL pH

El pH es un indicador de la acidez de una sustancia. Está determinado por el número de iones libres de hidrógeno (H+) en una sustancia.

Tabla 4.2 Asignación de valores del pH

pH	TIPO
0 – 7	Ácido
7	Neutro
7 – 14	Alcalino

#### 4.5 PRUEBAS Y RESULTADOS

Como prueba principal para verificar el correcto funcionamiento de las secuencias a seguir del prototipo, se realizan pruebas de hardware y software usando agua en lugar del químico.

Se probó el conversor AC/DC con una resistencia de potencia de 2Ω, simulando la carga y se obtuvo excelentes resultados tanto en el control de la corriente, y el funcionamiento de los semiconductores.

La prueba de hardware involucra al sistema mecánico y las tarjetas electrónicas construidas. Luego del diseño de las partes del prototipo y posteriormente su



construcción, el sistema no ha sufrido modificaciones significativas, excepto la alimentación de la electro-válvula, y el diseño de la tarjeta del convertor AC/DC. Las primeras pruebas del software (programa del microprocesador), se iniciaron con el simulador PROTEUS, posteriormente con el funcionamiento del prototipo se hizo un pequeño cambio en la subrutina de vaciado de la cuba para eliminar errores recurrentes.

#### 4.5.1 PRIMERA PRUEBA

**Densidad de Corriente Aplicada:** 6 Amperios.

**Tiempo del Baño electrolítico:** 6 horas con 30 minutos.

**Ánodos:** Electrodo de carbón EG34D (Soporta de 8 a 12 A/cm<sup>2</sup> en régimen permanente)

**Químico a procesar:** Blanqueador – Fijador RA4.

**Estado inicial de la varilla de Cobre:** Se sumerge 20 segundos, su color es gris ligeramente claro.

#### Los Resultados son:

- Placa del Convertor AC/DC no presenta problemas.
- Todas las partes mecánicas trabajaron muy bien.
- Programa del microprocesador trabaja muy bien.
- Los ánodos no soportan la prueba, se deformaron y resquebrajaron.

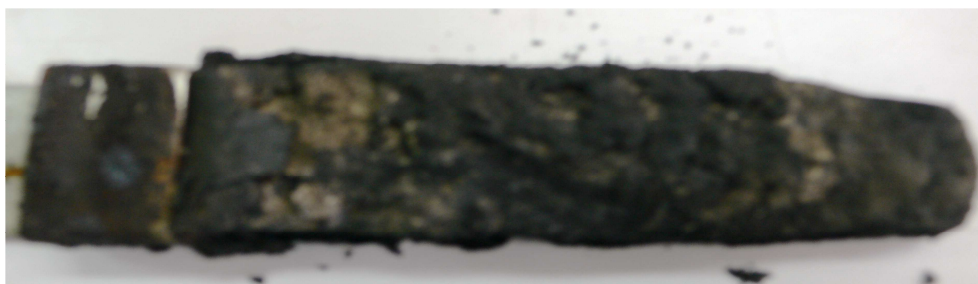


Figura 4.1 Ánodo expuesto al baño electrolítico de la primera prueba

- El cátodo presenta un color negro muy oscuro con anaranjado.



Figura 4.2 Cátodo expuesto al baño electrolítico de la primera prueba

#### Medición del pH de la solución:

Se procede a medir el pH del químico de desecho antes (foto lado izquierdo) y después (foto lado derecho) del baño electrolítico, el pH-meter negro mide el pH de la solución calibrado a la temperatura de 25°C, mientras que el pH-meter rojo con blanco mide el pH a la temperatura en que la solución se encuentra. Observando estos resultados, el nivel de acidez de la solución antes y después del baño electrolítico no presenta una variación notable.



Figura 4.3 Medición del PH en el químico de desecho de la primera prueba

### Medición de la Conductividad:

Se procede a medir la salinidad del químico de desecho antes (foto lado izquierdo) y después (foto lado derecho) del baño electrolítico, el conductímetro mide la conductividad de la solución a la temperatura que esta se encuentra. El nivel de salinidad indica cuán conductivo es una sustancia, observando los resultados de las mediciones antes y después del baño electrolítico, se identifica que hay una pequeña disminución de la salinidad en las sustancias, esta diferencia no es muy notoria, debido a que las muestras tienen un gran contenido de hierro.



Figura 4.4 Medición de la Conductividad del químico de desecho de la prueba 1

Tabla 4.3 Resultado de las mediciones de la Prueba 1

	<b>pH</b>	<b>Conductividad</b>
Antes Proceso	8.12	37.9
Después Proceso	8.07	37.4

Al final se sumerge nuevamente la varilla de cobre en la solución desplateada, esta no presenta ningún cambio.

### **Análisis de los Resultados:**

Como se puede observar se necesita reemplazar los ánodos de la cuba por unos con propiedades más resistentes, debido a que estos, además de soportar una

densidad de corriente de 6 Amperios, deben soportar la acción corrosiva del químico, asociado a un ligero movimiento.

Además se puede observar que la medición del pH en la solución antes y después del baño electrolítico es prácticamente el mismo por lo que este no es un parámetro que ayude a identificar la concentración de la plata en la solución así como ajustar el tiempo de proceso para optimizarlo.

#### 4.5.2 SEGUNDA PRUEBA

**Densidad de Corriente Aplicada:** 6 Amperios.

**Tiempo del Baño electrolítico:** 7 horas con 30 minutos.

**Ánodos:** Electrodo de carbón FH42 (Soporta de 10 a 12 A/cm<sup>2</sup> en régimen permanente)

**Químico a procesar:** Blanqueador – Fijador RA4.

**Estado inicial de la varilla de Cobre:** Se sumerge 20 segundos, su color es gris claro.



Figura 4.5 Placa de cobre sumergida en químico de desecho antes del baño electrolítico de segunda prueba

#### **Los Resultados son:**

- La placa del convertor AC/DC presenta un color negro (baquelita quemada), en el contacto entre los diodos y la baquelita.



Figura 4.6 Placa del convertor AC/DC

- Todas las partes mecánicas trabajaron muy bien.
- Subrutina de vaciado de la cuba electrolítica falla. Se modifica el programa.
- Los electrodos están intactos, no presentan resquebrajamiento ni se deforman.
- El cátodo indica una ligera capa de sulfuro de plata negro, además se puede notar la ligera presencia de hierro.



Figura 4.7 Cátodo expuesto al baño electrolítico de la segunda prueba

- Alrededor de la 5ta hora se escucha un silbido en la parte de la rotación del cátodo, se elimina el ruido limpiando la superficie de contacto de los carbones con el eje de rotación del cátodo,
- Al inicio de la 6ta hora se percibe la presencia de azufre en el ambiente.

Tabla 4.4 Resultado de las mediciones de la Prueba 2

	<b>PH</b>	<b>Conductividad</b>
Antes Proceso	8.09	36.7
Después Proceso	8.03	36.4

Al final se sumerge nuevamente la varilla de cobre en la solución desplateada, esta no presenta ningún cambio.



Figura 4.8 Placa de cobre sumergida en químico de desecho después del baño electrolítico de segunda prueba

### **Análisis de los Resultados:**

Tomando como base el cuadro de recomendación de la Tabla 4.1 se decidió aumentar el tiempo del baño de la solución, como resultado se obtuvo en el cátodo sulfuro de plata de color negro asociado a la presencia de azufre en el ambiente (olor a huevo podrido).

Al finalizar el baño electrolítico se sumerge la varilla de cobre y se puede observar que esta no presenta ningún cambio, por lo que se concluye y comprueba que el químico tenía una concentración de plata muy pobre, además a partir de la sexta hora se comienza a recuperar el hierro que tiene la solución asociado a otros componentes como es el caso del azufre.

La medición del pH revela el mismo resultado de la prueba anterior, este parámetro no ayuda a optimizar el proceso.

#### **4.5.3 TERCERA PRUEBA**

**Densidad de Corriente Aplicada:** 4,5 Amperios.

**Tiempo del Baño electrolítico:** 7 horas con 30 minutos.

**Ánodos:** Electrodo de carbón FH42 (Soporta de 10 a 12 A/cm<sup>2</sup> en régimen permanente)

**Químico a procesar:** Blanqueador – Fijador RA4.

**Estado inicial de la varilla de Cobre:** Se sumerge 20 segundos, su color es gris oscuro.

#### **Los Resultados son:**

- Placa del Conversor AC/DC trabaja bien pero presenta el mismo aspecto de la prueba anterior, se observa un debilitamiento de la misma.
- Todas las partes mecánicas trabajaron muy bien.
- Programa del microprocesador trabaja muy bien.
- Los electrodos están intactos, no presentan resquebrajamiento ni se deforman.
- La electro-válvula falla, al energizarse la misma no se abre completamente.



Figura 4.9 Electro-válvula marca Orbit

- El cátodo indica una capa de sulfuro de plata negro.



Figura 4.10 Cátodo expuesto al baño electrolítico de la tercera prueba

Tabla 4.5 Resultado de las mediciones de la Prueba 3

	<b>PH</b>	<b>Conductividad</b>
Antes Proceso	8.07	37.1
Después Proceso	8.05	36.7



### **Análisis de los Resultados:**

La solución muestra una buena concentración de plata inicial, el cátodo tiene una capa de sulfuro de plata negra, en base a las recomendaciones de la Tabla 4.1 se disminuye la densidad de corriente manteniendo el tiempo del baño de la prueba 2, por lo que la conclusión es que el tiempo del baño es demasiado largo, se debe encontrar el tiempo adecuado en el cual se recupere la mayor parte de plata del químico sin llegar al punto de obtener sulfuro de plata. Se debe considerar que cada muestra nunca va a presentar iguales características, por lo que el tiempo debe ser estándar para todos los baños, esto implica que no se pueda recuperar con este método el 100% de plata de la solución.

#### **4.5.4 CUARTA PRUEBA**

**Densidad de Corriente Aplicada:** 4,5 Amperios.

**Tiempo del Baño electrolítico:** 6 horas con 30 minutos.

**Ánodos:** Electrodo de carbón FH42 (Soporta de 10 a 12 A/cm<sup>2</sup> en régimen permanente)

**Químico a procesar:** Blanqueador – Fijador RA4.

**Estado inicial de la varilla de Cobre:** Se sumerge 20 segundos, su color es gris oscuro.

### **Los Resultados son:**

- Placa del Conversor AC/DC trabaja bien pero presenta el mismo aspecto de la prueba anterior, se observa un debilitamiento de la misma.
- Todas las partes mecánicas trabajaron muy bien.
- Programa del microprocesador trabaja muy bien.
- Los electrodos están intactos, no presentan resquebrajamiento ni se deforman.

- La Electro-válvula (normalmente cerrada) presenta fallas, sin energía se queda un 20% abierta, con energía no se observa ningún cambio, se debe reemplazar por otra.
- El cátodo indica una capa de sulfuro de plata negro.



Figura 4.11 Cátodo expuesto al baño electrolítico de la cuarta prueba

Tabla 4.6 Resultado de las mediciones de la Prueba 4

	<b>PH</b>	<b>Conductividad</b>
Antes Proceso	8.01	36.8
Después Proceso	8.01	36.7

### **Análisis de los Resultados:**

La solución muestra una buena concentración de plata inicial, el cátodo presenta una capa de sulfuro de plata no muy negra, en base a las recomendaciones de la

Tabla 4.1 y manteniendo la densidad de corriente de la prueba anterior se concluye que el tiempo del baño todavía es demasiado largo. Se decide comenzar las siguientes pruebas con un tiempo de dos horas para luego ir incrementando hasta encontrar el tiempo más adecuado. Se decide reemplazar la electro-válvula.

#### 4.5.5 QUINTA PRUEBA

**Densidad de Corriente Aplicada:** 4,5 Amperios.

**Tiempo del Baño electrolítico:** 2 horas con 10 minutos.

**Ánodos:** Electrodo de carbón FH42 (Soporta de 10 a 12 A/cm<sup>2</sup> en régimen permanente)

**Químico a procesar:** Blanqueador – Fijador RA4.

**Estado de la varilla de Cobre:** Se sumerge 20 segundos, su color es gris oscuro.



Figura 4.12 Placa de cobre sumergida en químico de desecho antes del baño electrolítico de quinta prueba

#### **Los Resultados son:**

- Al iniciar el llenado de la cuba electrolítica la electro-válvula presenta problemas, sin energía esta se encuentra abierta alrededor de un 20%. Se procede a revisarla, no se encuentra ningún desperfecto. Se hace pruebas con la misma y concluyo que tiene un defecto de fábrica.

- 10 minutos después de iniciado el baño electrolítico se rompe una pista de la tarjeta del convertor AC/DC, se necesita rediseñar la placa.

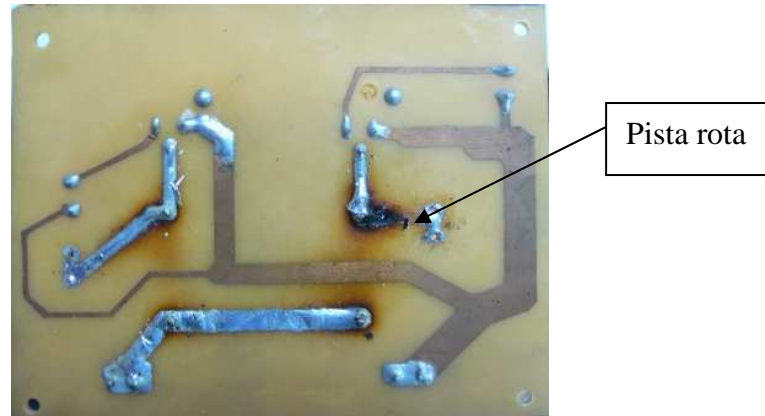


Figura 4.13 Placa del convertor AC/DC dañada

- Todas las partes mecánicas trabajaron muy bien.
- Programa del microprocesador trabaja muy bien.
- Los electrodos están intactos, no presentan resquebrajamiento ni se deforman.
- El cátodo indica una capa de plata de color gris con algo de marrón.



Figura 4.14 Cátodo expuesto al baño electrolítico de la quinta prueba

Tabla 4.7 Resultado de las mediciones de la Prueba 5

	<b>PH</b>	<b>Conductividad</b>
Antes Proceso	8.1	37.7
Después Proceso	8.1	37.3

### **Análisis de los Resultados:**

En base a la Tabla 4.1 se decide mantener la densidad de corriente de la prueba anterior y modificar el tiempo del baño electrolítico. Como resultado se observa que el cátodo presenta una capa de plata de color gris con algo de marrón, pero al introducir la varilla en la solución al final del baño se observa que este presenta un color gris no muy diferente al inicial, por lo que se debe aumentar el tiempo del baño para obtener una mayor cantidad de plata en el cátodo.

La rotura de la pista de la placa del conversor se debe a que esta se fue debilitando en cada prueba hasta llegar a un punto crítico, por lo que se decide diseñar otra placa de doble lado con caminos de mayor dimensión.

#### **4.5.6 SEXTA PRUEBA**

**Densidad de Corriente Aplicada:** 4,5 Amperios.

**Tiempo del Baño electrolítico:** 3 horas

**Ánodos:** Electrodo de carbón FH42 (Soporta de 10 a 12 A/cm<sup>2</sup> en régimen permanente)

**Químico a procesar:** Blanqueador – Fijador RA4.

**Estado de la varilla de Cobre:** Se sumerge 20 segundos, su color es gris oscuro.

### **Los Resultados son:**

- Nueva Placa del Conversor AC/DC no presenta problemas.
- Nueva electro-válvula instalada en el prototipo, trabaja bien.
- Todas las partes mecánicas trabajaron muy bien.
- Programa del microprocesador trabaja muy bien.
- Los electrodos están intactos, no presentan resquebrajamiento ni se deforman.

- El cátodo indica una capa de plata de color gris con algo de marrón.



Figura 4.15 Cátodo expuesto al baño electrolítico de la sexta prueba

Tabla 4.8 Resultado de las mediciones de la Prueba 6

	<b>PH</b>	<b>Conductividad</b>
Antes Proceso	8.15	36.9
Después Proceso	8.12	36.8

### **Análisis de los Resultados:**

Se observa que el cátodo presenta una capa de plata de color gris con algo de marrón, pero la cantidad de plata en el cátodo es muy pobre. Además al final del baño electrolítico se sumerge la varilla de cobre nuevamente, presentando un color gris claro, por tal razón se decide aumentar el tiempo del baño para la siguiente prueba.

#### **4.5.7 SEPTIMA PRUEBA**

**Densidad de Corriente Aplicada:** 4,5 Amperios.

**Tiempo del Baño electrolítico:** 5 horas.

**Ánodos:** Electrodo de carbón FH42 (Soporta de 10 a 12 A/cm<sup>2</sup> en régimen permanente)

**Químico a procesar:** Blanqueador – Fijador RA4.

**Estado de la varilla de Cobre:** Se sumerge 20 segundos, su color es gris muy oscuro.

**Los Resultados son:**

- Nueva Placa del conversor AC/DC no presenta problemas.
- Todas las partes mecánicas trabajaron muy bien.
- Programa del microprocesador trabaja muy bien.
- Los electrodos están intactos, no presentan resquebrajamiento ni se deforman.
- El cátodo indica una capa de plata de color gris con algo de marrón.



Figura 4.16 Cátodo expuesto al baño electrolítico de la séptima prueba



Figura 4.17 Plata removida del cátodo

Se toma la muestra y se coloca en una funda hermética, se lleva al Laboratorio de Metalurgia extractiva de la Escuela Politécnica Nacional para que se realice el análisis de la misma.

### **Análisis de los Resultados:**

Con esta prueba concluyo que se ha llegado a un tiempo estándar aplicable a todos los baños futuros que se decida hacer, la cantidad de plata que se recupero en esta prueba es la mayor, además presenta el color adecuado.

El resultado de los análisis realizados en el Laboratorio de Metalurgia extractiva se muestran en el Anexo H.

## **4.6 ANALISIS FINAL DE TODAS LAS PRUEBAS**

Se partió con la idea de que el pH de la solución era una variable que permitiría determinar el tiempo del proceso del prototipo, y en base a esto poder determinar la concentración de la plata al final del proceso, pero después de realizar las pruebas se puede confirmar que la medición del PH antes y después de procesar la solución no es una variable que determina la concentración de plata en la solución ni mucho menos la calidad del mismo.

El parámetro de la pureza de la plata y la concentración de este en la solución depende del proceso primario que el químico haya sufrido. En el prototipo la densidad de corriente que se le aplique a la solución en cada baño y el tiempo de permanecía de este en la cuba son los únicos parámetros sobre los cuales se tiene control, además, estos, determinan la calidad de la plata recuperable, pero hay que acotar que por más de que se afine el proceso, si la muestra que se tiene de químico listo a procesar es muy pobre en plata o esta contaminado los resultados finales no serán los adecuados.



El tiempo del baño del químico en la cuba es crítico ya que si este es muy largo tiende a retirar a más de la plata otros componentes que se encuentran en la solución, provocando que la plata recuperada se mezcle con estos y sea necesario para su fundición aplicarle procesos adicionales. La corriente en cambio provoca una sulfuración de la plata tendiendo hacerla negra y debilitando la eficiencia de la celda ya que el cátodo tiende a generar una pasta negra con una adherencia muy fuerte. Cabe acotar que cuando se tiene sulfuración si se tiene plata, pero en poca cantidad.

Una vez encontrado el valor de la densidad de corriente adecuado el parámetro a variar fue el tiempo del baño electrolítico, con el tiempo seleccionado se puede recuperar alrededor de un 80% de plata de la solución. En el caso de requerir un porcentaje mayor se necesita utilizar un proceso secundario (puede ser filtros de recuperación).

Cabe aclarar que el circuito de control del convertidor AC/DC muestra una completa inmunidad al campo magnético generado por el transformador. La pequeña histéresis que presenta la corriente en el circuito acoplado a la carga se debe a:

- El medio conductor del convertidor a la carga es un químico con propiedades variables.
- El acoplamiento de los carbones con el cátodo presentan pérdidas al momento de la rotación del mismo.
- Voltaje del convertidor constante, valor de la resistencia de la carga variable.
- Prácticamente en la cuba electrolítica se está aplicando un corto circuito.

#### **4.7 LISTA DE MATERIALES DEL PROTOTIPO**

A continuación se detalla la lista de materiales y elementos eléctricos, electrónicos y mecánicos utilizados para el desarrollo del presente proyecto, además se incluye el valor de cada uno para tener el presupuesto del mismo.

Tabla 4.9 Materiales y elementos Mecánicos utilizados en el Prototipo

ITEM	DETALLE	CANTIDAD	VALOR UNITARIO USD	VALOR USD
1	Mesa de madera	1	20	20
2	Caja Metalica	1	40	40
3	bomba de acople magnetico de 20W	2	60	120
4	bomba de acople magnetico de 5W	1	35	35
5	Fuente regulada de 220Vac a 24Vdc	1	25	25
6	Sensor de nivel de flotador LVH200	2	35	70
7	Motor Bifasico 220Vac + Caja reductora	1	30	30
8	Recipiente plástico ( 24litros)	1	10,5	10,5
9	Recipiente plástico (15 Galones)	1	8,5	8,5
10	Recipiente plástico (10 Galones)	1	6	6
11	Chumacera de pared 1/2"	1	8	8
12	Electro-valvula 120Vac	1	20	20
13	Valvula de bola 1/2"	1	3,5	3,5
14	Catodo de acero inoxidable	1	30	30
15	Electrodos de Grafito (2EG34 y 2 FH42Z2)	4	11	44
16	Carbón Original Oster	1	2,5	2,5
17	Estructuras de Sujeción (Prototipo + Motor cátodo)	1	50	50
18	Eje de sujeción de Cátodo	1	15	15
19	Socalos de sujeción de anodos en acero de 2 mm.	2	4	8
20	Engranaje de polioximetileno de 13 dientes	1	17	17
21	Engranaje de polioximetileno de 39 dientes	1	40	40
22	Abrazaderas metálicas de 1/2"	22	0,5	11
23	Codo Polipropileno 1/2" 90°	7	0,3	2,1
24	Codo Polipropileno 1/2" 45°	1	0,5	0,5
25	Universal Polipropileno 1/2"	2	0,8	1,6
26	Unión Polipropileno 1/2"	2	0,3	0,6
27	Neplo polipropileno 1/2" x 6cm	3	0,2	0,6
28	Neplo Polipropileno 1/2" x 10cm	1	0,2	0,2
29	Neplo de PVC 1/2" x 16cm	1	0,4	0,4
30	Neplo Corrido PVC 1/2"	2	0,3	0,6
31	Tubo PVC 1/2" (1metro)	1	2	2
32	Sacado de Rosca tubo 1/2" varios tamaños	1	4,5	4,5
33	Codo PVC 1/2" para jardin	2	0,4	0,8
34	Adaptador Flex PVC 1/2" para jardin	8	0,3	2,4
35	Mangera de jardín 1/2" (1 metro)	1	1	1
36	Mangera de gas (1 metro)	1	0,5	0,5
37	Canaleta plástica	1	2	2
38	Tornillos y pernos varios tamaños	1	3,3	3,3
39	Silicone transparente	1	3,5	3,5
40	Rollo de teflon	1	0,4	0,4
41	Grapas metalicas	2	0,4	0,8
	TOTAL			641,8

Tabla 4.10 Materiales y elementos Eléctricos-Electrónicos utilizados en el  
Prototipo

ITEM	DETALLE	CANTIDAD	VALOR UNITARIO USD	VALOR USD
1	Transformador 110V a 12V / 1A	1	3,5	3,5
2	Transformador 110V a 12V / 0,5A	1	3	3
3	Socalo de 8 patas planas para relé	3	2	6
4	Socalo de 14 patas para relé	3	2,5	7,5
5	Relé de 12 Vdc 2 contactos	2	3,4	6,8
6	Relé de 12 Vdc 4 contactos	3	3,8	11,4
7	Contactador 110Vac 3 polos	1	14,5	14,5
8	Bornera de 20 terminales	1	2,4	2,4
9	Borneras para riel	8	0,4	3,2
10	Interruptor bipolar	1	3,5	3,5
11	Ventilador de 110Vac	2	7,5	15
12	Porta fusible de Regleta 10A + Fusible	1	3,5	3,5
13	Porta fusible + Fusible	4	0,6	2,4
14	Funda Acido para placas de cobre	6	0,5	3
15	Baquelita de 15x20 un solo lado	2	1,4	2,8
16	Baquelita de 10x15 doble lado	1	2,5	2,5
17	Baquelita de 30x20 un solo lado	1	3,5	3,5
18	Terminal hembra 22-16	26	0,1	2,6
19	Terminal hembra 22-10	20	0,1	2
20	Postes para placas	12	0,1	1,2
21	Borneras plásticas	6	1	6
22	Sócalos plasticos para placas impresas	18	0,3	5,4
23	Cable eléctrico (varios calibres)	1	6	6
24	Diodo 6A / 140V	2	0,2	0,4
25	SCR ECG5466	2	0,6	1,2
26	Diodo Led	6	0,3	1,8
27	DS1307	1	3,9	3,9
28	Teclado 4 x 3 Bl.	1	9,2	9,2
29	Cristal 32768hz	1	0,8	0,8
30	LCD 2x16	1	6,5	6,5
31	Atmega16	1	5,5	5,5
32	Potenciómetro 20K /5w	2	0,4	0,8
33	Potenciómetro 50K /2w	1	0,5	0,5
34	Resistencias varios valores (30)	1	2,2	2,2
35	UJT 2n2646	1	0,8	0,8
36	Transformadores de aislamiento	2	1,6	3,2
37	Diodo zener de 12V / 0,5w	2	0,2	0,4
38	Regulador Voltaje LM7812	1	0,3	0,3
39	Regulador Voltaje LM7805	1	0,25	0,25
40	Resistencia de 3,2 k /10w	1	0,3	0,3
41	Puente rectificador 1A / 200V	2	0,4	0,8
42	Transistor 2N3904	6	0,2	1,2
43	Terminales para bus de datos (4)	1	4	4
44	Condensadores varios valores (5)	1	3,7	3,7
45	Otros	1	100	100
TOTAL				265,45

Se debe considerar también el valor del químico que se utilizó para las pruebas, 5 galones tiene un precio de USD 20,00

El *Costo total* para la construcción del prototipo es de USD 907,25 y el *costo de* las pruebas de funcionamiento es de USD 140.

El costo de ingeniería que representa el diseño y construcción del prototipo, está determinado en base al número de horas efectivas de trabajo, es así que 396 horas de trabajo significa un valor aproximado de \$ 4000 (\$10/hora).

Por tanto el costo de la implementación y construcción del prototipo es de USD 5047,25.

Tabla 4.11 Cuadro de Resumen de Costos

<b>ITEM</b>	<b>Descripción</b>	<b>VALOR USD</b>
1	Materiales	1047,25
2	Diseño	3000
3	Mano de Obra	1000
	<b>TOTAL</b>	<b>5047,25</b>

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

- El Diseño y Construcción de una máquina recuperadora de plata proveniente del desecho de los químicos de revelado fotográfico fue cumplido en su totalidad.
- Como se pudo comprobar la medición del PH no es una variable que permite determinar la concentración de la plata en la solución mucho peor ayudar a determinar el tiempo más adecuado para cada baño electrolítico.
- Como se ha podido observar y comprobar las ecuaciones para determinar la densidad de corriente y el tiempo del baño electrolítico no son exactas, ya que estas no consideran todos los parámetros que esto involucra, por lo que ha sido necesario realizar muchas pruebas para encontrar el punto más adecuado para tener un mejor proceso.
- Se comprueba que un microprocesador común en el mercado puede trabajar eficientemente con una lógica de programación adecuada y con un correcto acoplamiento de la partes de potencia.
- Se puede observar claramente que diseñar y construir el prototipo utilizando un microprocesador que tiene un costo de \$6,5 en lugar de un PLC con un costo de \$140 redujo considerablemente el costo final de los materiales.

- Los sensores de nivel utilizados en la cuba electrolítica son muy sencillos en su funcionamiento pero muy robustos en su construcción, además comparados con los sensores ultrasónicos son más económicos.
- El requerimiento indispensable para la selección de la instrumentación y actuadores, es que estos presenten características muy fuertes ante la corrosión y que su respuesta no se vea afectada por el proceso electrolítico.
- Se comprueba que es necesario aislar al microprocesador para que este no se vea afectado por el campo magnético producido por el transformador.
- La temperatura a la que esta expuesta toda la parte eléctrica-electrónica del prototipo es un factor muy importante, ya que como se está trabajando con un nivel de corriente de 4,5A fue necesario dar un buen porcentaje de seguridad en el diseño del disipador de calor asociado a dos ventiladores que extraigan el calor y mantengan una temperatura uniforme en el interior del tablero de control.
- En la selección del grafito adecuado para la cuba electrolítica, además de la investigación y los criterios de profesionales en el tema, las pruebas contribuyeron y fortalecieron dicha selección.
- Para conseguir el proceso óptimo es necesario tener un químico en lo posible bastante homogéneo en sus características, esto es de un solo laboratorio manteniendo cierto cuidado en la recolección (Situación que es muy difícil).
- Si se necesita procesar mayor cantidad de químico lo único que se debe modificar en el prototipo es la dimensión del Cátodo y los ánodos, colocar una tubería adicional y una bomba de mayor potencia para hacer recircular el químico del tanque de almacenamiento con la cuba electrolítica.

- Para que la extracción de la plata del cátodo sea muy simple, siempre se debe pulir este con una estopa de acero antes de comenzar un baño electrolítico.
- El nuevo diseño de la placa del conversor AC/DC es adecuado, con el limitante del encapsulado de los diodos que no permite utilizar un disipador.
- Los análisis que se hicieron para determinar la concentración de la plata así como para determinar la pureza de la misma (Ley) fueron los correspondientes a la prueba 7.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- Se debería buscar un acoplador de polipropileno para la electro-válvula, ya que el de bronce con el tiempo será afectado por la corrosión del químico que se procesa.
- Si es el caso de que se necesite trabajar con un mayor nivel de corriente, es decir mayor a las 8 amperios, se recomienda que se reemplace los diodos del conversor AC/DC por unos que permiten disipar el calor (encapsulado DO5 o TO-220).
- Se debe tener muy en cuenta que el tanque de almacenamiento siempre esté con químico, ya que las bombas de acople magnético no deben trabajar en vacío. Para esto se puede mejorar el sistema colocando un sensor de nivel bajo.
- Si se va a modificar el tamaño del cátodo y ánodos para procesar mayor volumen de químico se debe considerar que en el país los grafitos disponibles son bloques de 15 x 10 x 15 centímetros.

- Se recomienda que cuando se adquiere el químico de desecho se compre solo la cantidad necesaria a procesar, ya que si lo almacenamos por algún tiempo tiende a dañarse.
- Inmediatamente después de terminado un baño electrolítico, si se desea retirar la plata del cátodo, se recomienda esperar un par de horas para realizarlo, debido a que, cuando la plata se seca basta con golpear levemente el cátodo para que ésta se desprenda con mayor facilidad.
- Cuando se realice mediciones del pH y la conductividad del químico de desecho, siempre lavar el electrodo con agua destilada antes y después de usarlo en cada medición.
- Se recomienda tomar las normas de seguridad pertinentes cuando se manipule el químico de desecho y cuando se retira la plata del cátodo, es decir, utilizar guantes, gafas y en lo posible una mascarilla, ya que si hay contacto con la piel este puede causar dermatitis.
- Si se desea hacer el análisis de cada una de las muestras que arroja cada prueba se debe considerar la disponibilidad de tener un presupuesto económico y el tiempo que implica analizarlas.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] The Silver Council, "Guía para el código de prácticas de control para fotoprocadores," Estados Unidos, Febrero del 2000,  
[http://www.silvercouncil.org/cmp\\_span.pdf](http://www.silvercouncil.org/cmp_span.pdf)
- [2] Eastman Kodak Company, "Como Recuperar la Plata en Soluciones de Procesamiento Fotográfico," Estados Unidos, 1999,  
[http://www.kodak.com/eknec/documents/00/0900688a80054b00/J-222\\_ESL.pdf](http://www.kodak.com/eknec/documents/00/0900688a80054b00/J-222_ESL.pdf)
- [3] Comisión Nacional del Medio Ambiente Región Metropolitana Santiago de Chile, "Guía para el control y la prevención de la Contaminación Industrial," Santiago de Chile, 1999,  
<http://www.sofofa.cl/ambiente/documentos/Laboratorios%20Fotogr%C3%A1ficos.pdf>
- [4] Eastman Kodak Company, "La Tecnología de la Recuperación de la Plata en las Plantas de Procesamiento Fotográfico," Estados Unidos, 1999  
[http://www.kodak.com/eknec/documents/ff/0900688a80054aff/J-220\\_ESL.pdf](http://www.kodak.com/eknec/documents/ff/0900688a80054aff/J-220_ESL.pdf)
- [5] Acomy Bombas SA, "Bomba Centrifuga de Acople Magnético," Argentina, Agosto del 2003,  
[http://www.acomybombas.com.ar/product\\_info.php/cPath/21\\_34\\_48/products\\_id/45](http://www.acomybombas.com.ar/product_info.php/cPath/21_34_48/products_id/45)
- [6] Iwaki América, "Magnetic Drive Pumps," Estados Unidos, Junio del 2007,  
[http://www.iwakiwalchem.com/Literature/MD\\_WMD/WMDmanual.pdf](http://www.iwakiwalchem.com/Literature/MD_WMD/WMDmanual.pdf)
- [7] Iwaki Ibérica Pumps AS, "Manual de Bombas Centrífugas Magnéticas," Argentina, Agosto del 2003,  
[http://www.acomybombas.com.ar/download/Folleto\\_Iwaki\\_MD\\_espanol.pdf](http://www.acomybombas.com.ar/download/Folleto_Iwaki_MD_espanol.pdf)

- [8] Heidolph, "Datasheet of Small gears up 10Nm," Inglaterra.
- [9] Corrales Luis, "Libro de Instrumentación Industrial," EPN, Ecuador, Octubre del 2006.
- [11] E-bay, "Electric Solenoid Valve," Estados Unidos, Octubre del 2009,  
<http://cgi.ebay.com>
- [12] Omega, "Single Station Horizontal Level Switch," Estados Unidos, 2003,  
<http://www.omega.com/ppt/pptsc.asp?ref=L VH-200&Nav=grek12>
- [13] Omega, "Datasheet Single Station Horizontal Level Switch LVH200," Estados Unidos, 2003,
- [14] Kobold, "Interruptores Plásticos de Nivel," España, 2003,  
[http://www.koboldmessring.com/fileadmin/koboldfiles/pdf/es/n1es\\_nkp.pdf](http://www.koboldmessring.com/fileadmin/koboldfiles/pdf/es/n1es_nkp.pdf)
- [15] X-rite, "Datasheet of Sylver Recovery System 616/632," Estados Unidos, Noviembre del 2004,
- [16] Harris Daniel C, "Análisis químico Cuantitativo," Michelson laboratory China lake, California USA, 1992.
- [17] Carbone Lorraine, "Escobillas y porta escobillas para motores eléctricos," Colombia, 2004, <http://www.carbonelorraine.com.co/preguntas.htm#2>
- [18] Carbone Lorraine, "Guía Técnica: Escobillas para maquinas eléctricas," Colombia, 2004, <http://www.carbonelorraine.com.co/pdfs/10.pdf>
- [19] Grupo Schunk Ibérica SA, "Tipos de escobillas industriales y de tracción," España, 2005  
[http://www.schunk.es/sixcms/media.php/1702/10\\_18sTiposdeescobillas-ayudapedido.pdf](http://www.schunk.es/sixcms/media.php/1702/10_18sTiposdeescobillas-ayudapedido.pdf)

- [20] Textos Científicos, "Propiedades del Carbón," desconocido, Abril del 2006, <http://www.textoscientificos.com/energia/combustibles/propiedades-carbon>
- [21] Grupo Schunk Ibérica SA, "Escobillas para aplicaciones industriales y de tracción," España, 2005, [http://www.schunk.com.mx/sixcms/media.php/1701/10\\_12sMaterialesEscobillas.pdf](http://www.schunk.com.mx/sixcms/media.php/1701/10_12sMaterialesEscobillas.pdf)
- [22] Mena López M., "Diseño y Construcción de una fuente conmutada para variadores de velocidad de corriente alterna," EPN, Ecuador, 2003
- [23] Cuenta Digital, "Calculo del Transformador online," Buenos Aires, desconocido. <http://www.aurover.com.ar/clconline/conscalctraf.htm#1>
- [24] Wikipedia, "Transformer design," Estados Unidos, Julio del 2008, <http://en.wikipedia.org>
- [25] Mohan N., "Power Electronics Conveters, Applications and Design," Estados Unidos, tercera edición, 2003.
- [26] Muhammad H. Rashid, "Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones," México, tercera edición, 2004.
- [28] Gamboa H., Vistin D., "Análisis Tensional en transmisiones de Engranajes Rectos mediante el método de los elementos finitos," EPN, Ecuador, Abril del 2006.
- [29] Pontificia Universidad Católica de Chile, "Diseño de Engranajes," Chile, Abril 1999. <http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/engrana/disenoc.html>
- [30] Shigley Joseph E., "Diseño en Ingeniería Mecánica," Mcgraw-Hill, México, 2002.

- [31] Omnia Plástica, “Características Acetal y Poliéster PEM,” Italia. Desconocido, <http://www.omniaplastica.it/spagnolo/pomc.html>
- [32] Laboratorio de Electrónica de Potencia, “Elementos de Resistencia Negativa,” EPN Facultad de Ingeniería en Electrónica y Control, Ecuador, 2007.
- [33] Grupo Schunk Ibérica SA, “Catálogos Altas temperaturas - Calidades y características del grafito y CFC,” España, 2005, [http://www.schunk.es/sixcms/media.php/1700/Glas\\_Werkstoffe\\_span.pdf](http://www.schunk.es/sixcms/media.php/1700/Glas_Werkstoffe_span.pdf)
- [34] Eastman Kodak Company; “Measuring Silver in Photographic Processing Facilities,” Estados Unidos, 1999, <http://www.kodak.com/eknec/documents/f0/0900688a800f80f0/J211ENG.pdf>
- [35] Eastman Kodak Company, “Como Refinar la Plata que se Recupera en Instalaciones de procesamiento Fotográfico,” Estados Unidos, 1999, <http://www.kodak.com/eknec/documents/03/0900688a800f8103/J213ESL.pdf>
- [36] Atmel, “Datasheet ATMEGA16”, 2002
- [37] Dallas Semiconductor, “Datasheet DS1307”, Enero 2001
- [38] Motorota Semiconductor “Datasheet 4N25”, 1995
- [39] Philips, “Datasheet 2N2646”, Diciembre 1990.
- [40] Power Innovation, “Datasheet TIC126M”, 2000