



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE QUIMICA

**Diseño de la Unidad para Aplicación por Electrodeposición del
Recubrimiento Anticorrosivo en una Planta Automotriz**

TESIS MANCOMUNADA

Que para obtener el título de
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A N

Victor Manuel Sánchez Espinoza

Guillermo Sierra Vázquez

José Luis Solís

México, D. F.

1983



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

CAPITULO I	1
INTRODUCCION Y OBJETIVOS	
CAPITULO II	11
PRINCIPIOS TEORICOS Y FENOMENOLOGIA DEL PROCESO DE ELECTRODEPOSITO.	
RELACION DE DIBUJOS DEL CAPITULO II	12
2.1 GENERALIDADES SOBRE CORROSION Y SU CONTROL	14
2.1.1 Importancia del Estudio de la Corrosión	14
2.1.2 Aspectos Generales de los Procesos Corrosivos	14
2.1.3 Corrosión Atmosférica del Acero	17
2.2 ASPECTOS GENERALES DEL ELECTRODEPOSITO DE RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS	25
2.3 COMPARACION DEL ELECTRODEPOSITO DE PRIMARIOS CÁTODICOS Y ANÓDICOS	34
2.3.1 Desarrollo Histórico	34
2.3.2 Comparación de la Fenomenología en los Procesos de Aplicación	34
2.4 ESTRUCTURA FISICO QUIMICA DE LOS PRIMARIOS CÁTODICOS	36

2.4.1 Composición Química	36
2.4.2 Estructura Física del Baño	57
2.5 CINÉTICA Y MECANISMO DEL PROCESO DE ELECTRODEPOSITO	60
2.5.1 Fenomenología del Proceso para un Primario Catódico	60
2.5.2 Capa Fronteriza del Cátodo	62
2.5.3 Cinética del Electrodeposito Catódico	64
2.6 COMPROBACION EXPERIMENTAL DEL MODELO CINETICO PROPUUESTO PARA EL ELECTRODEPOSITO A VOLTAJE CONSTANTE	76
2.6.1 Antecedentes	76
2.6.2 Diseño del Experimento	77
2.6.3 Técnica Experimental	84
2.6.4 Tratamiento Estadístico de los Resultados Experimentales	85
2.6.5 Resultados Experimentales	91
2.6.6 Conclusiones	103
CAPITULO III	105
BASES DE DISEÑO	
RELACION DE DIBUJOS DEL CAPITULO III	106

3.1	INTRODUCCION A LAS BASES DE DISEÑO	107
3.2	REQUERIMIENTOS Y DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE ELECTRODEPOSITO DEL PRIMARIO CATODICO SOBRE CARROCERIAS	108
3.3	BASES DISEÑO	112
3.3.1	Generalidades	112
3.3.2	Capacidad y Flexibilidad	112
3.3.3	Especificaciones de las Carrocerías a Recubrir	113
3.3.4	Especificaciones del Primario	116
3.3.5	Condiciones de Aplicación del Primario	116
3.3.6	Características de la Película Depositada	117
3.3.7	Servicios Auxiliares	117
3.3.8	Condiciones Climatológicas	119
3.4	CRITERIOS DE DISEÑO PROPORCIONADOS POR EL PROVEEDOR DEL PRIMARIO	120
3.4.1	Sistema de Electrodeposito	120
3.4.2	Sistema de Filtración	122
3.4.3	Sistema de Reposición de Primario	122
3.4.4	Sistema de Enfriamiento	122
3.4.5	Sistema de Agitación	123

3.4.6 Sistema del Anolito	123
3.4.7 Sistema Cerrado de Enjuagues	123
3.4.8 Agua Desmineralizada	124
3.4.9 Materiales de Construcción	124
C A P I T U L O IV	126
DISEÑO DE LA UNIDAD	
RELACION DE DIBUJOS DEL CAPITULO IV	127
4.1 INTRODUCCION AL DISEÑO DE LA UNIDAD	129
4.2 DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS DEL PROCESO	130
4.2.1 Sistema de Electrodeposición	130
4.2.2 Sistema de Filtración	134
4.2.3 Sistema de Reposición de Primario	136
4.2.4 Sistema de Enfriamiento	138
4.2.5 Sistema de Agitación	140
4.2.6 Sistema del Anolito	142
4.2.7 Sistema de Almacenamiento	146
4.2.8 Sistema Cerrado de Enjuagues	149
4.3 DISEÑO DE LOS SISTEMAS DEL PROCESO	155
4.3.1 Sistema de Electrodeposición	155

4.3.2 Sistema de Filtración	177
4.3.3 Sistema de Reposición de Primario	185
4.3.4 Sistema de Enfriamiento	190
4.3.5 Sistema de Agitación	202
4.3.6 Sistema de Anolito	203
4.3.7 Sistema de Almacenamiento	207
4.3.8 Sistema Cerrado de Enjuagues	213
4.3.9 Diseño Mecánico de Tanques	229

C A P I T U L O V	238
-----------------------	-----

EVALUACION ECONOMICA

5.1 INTRODUCCION A LA EVALUACION ECONOMICA	239
5.2 EVALUACION DE LA INVERSION	240
5.2.1 Costos de Equipo	240
5.2.2 Evaluación de los Costos de Inversión	244
5.3 EVALUACION DE LOS COSTOS DE PRODUCCION Y EL COSTO UNITARIO	246

C A P I T U L O VI	250
------------------------	-----

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPITULO	VII	256
BIBLIOGRAFIA		
7.1	LIBROS	257
7.2	REVISTAS	260
7.3	REFERENCIAS DIVERSAS	262

C A P I T U L O I

INTRODUCCION Y OBJETIVOS

Fue a principios de este siglo cuando los primeros automóviles ensamblados en serie comenzaron a circular; el hecho de que un bien (cuyo uso estaba destinado en forma exclusiva a los pudientes, dado su proceso de fabricación prácticamente artesanal) de pronto estuviera al alcance de una gran cantidad de personas, generó uno de los procesos económicos más importantes de la época. Aquellos automóviles (Ford Modelo T) eran completamente iguales entre sí, incluso en su color ya que todos se vendían en negro. Construidos en la forma más sencilla posible y cambiaron durante los 19 años que duró su producción; era para utilidad según lo diría el propio Henry Ford.

Sin embargo hacia 1925, aunque se habían producido más de 15 millones de automóviles de este modelo, la presencia de los competidores amenazaba con disminuir al 25% la participación de Ford en el mercado; esto motivó la desaparición del Modelo T en 1927, sustituido por otros vehículos más atractivos al comprador, y marcó la fecha en que el automóvil se convirtió de un objeto puramente utilitario en un artículo de consumo. A partir de entonces los fabricantes se han preocupado por introducir en sus vehículos un sinnúmero de modificaciones en la tecnología, funcionamiento, seguridad, comodidad y acabado del automóvil, tendientes a lograr la aceptación de los consumidores y a disminuir los costos de producción y venta; en los últimos años, debido al aumento en los precios de los combustibles se han logrado notables avances en el desarrollo de vehículos que con un mínimo consumo de combustible consiguen las mismas velocidades que los modelos de hace unos años lograban con motores hasta de ocho cilindros.

El acelerado crecimiento de la industria automotriz (en México por ejemplo la producción de vehículos creció en 120% de 1970 a 1979, y en 1979 el valor de dicha producción contribuyó con un 5% al producto interno bruto), ha obligado al desarrollo paralelo de otras industrias proveedoras de la automotriz, entre las que se encuentran: las industrias química y petroquímica que producen combustibles, lubricantes, semiconductores, fluidos de frenos, plásticos, cables, telas sintéticas, ceras, pinturas, recubrimientos anticorrosivos, etc.; y la industria metal-mecánica en la que se han desarrollado máquinas y herramientas adecuadas al proceso de ensamble del automóvil, aleaciones y soldaduras de alta resistencia, procesos de fundición y tratamiento térmico, etc.

Siendo el automóvil un artículo de consumo, existe un sinnúmero de factores que motivan al comprador a elegir un modelo y marca en particular; éstos van desde el precio y caracterización del vehículo como deportivo, comercial o de lujo, hasta el color; las diferentes colores que se utilizan en pinturas automotrices generalmente se definen en función de un análisis del efecto psicológico que produce en el consumidor el color de su automóvil; una vez que se han seleccionado los colores "tipo", se desarrollan formulaciones adecuadas para aplicación sobre carrocerías que garanticen la mínima deteriora de la pintura en las diversas condiciones a que puede someterse el automóvil. Las características de tersura, brillo y dureza de la pintura se hacen a que después de ser aplicadas generalmente deben ser curadas (horneadas) para promover la polimerización de la resina empleada en su formulación.

Existe un factor adicional, muy relacionada con la aplicación de la pintura, que garantiza que el automóvil pueda-

emplearse en condiciones extremas (por ejem. en zonas costeras) sin perder su integridad estructural, durante cierto tiempo; este factor es la protección anticorrosiva y generalmente no es considerado por el consumidor; sin embargo el no aplicarla, o el hacerla en forma deficiente, acarrearía pérdidas económicas innecesarias tanto para el comprador como para el fabricante. En un principio, los automóviles se producían con placas de acero de espesor elevado, lo que dificultaba su manejo y troquelado, pero aseguraba excelentes tolerancias a la corrosión y una buena resistencia mecánica; adicionalmente, las carrocerías y otros componentes metálicos se protegían con varias capas de esmalte, generalmente aplicadas a mano. Al transcurrir el tiempo los diseñadores debieron aumentar la eficiencia del automóvil tratando, al mismo tiempo, de reducir su costo. Esto obligó al empleo de carrocerías fabricadas con placa de espesor gradualmente menor, además de otros materiales no metálicos (por ejem. fibra de vidrio) con el objeto de reducir el peso del vehículo; como parte de las disminuciones en los costos de producción, fue necesario reducir al mínimo la aplicación de esmalte. Todo lo anterior generó la necesidad de aplicar una protección anticorrosiva adecuada a las condiciones de empleo del automóvil.

Existen diferentes formas de protección anticorrosiva; las más comunes son la reducción de la humedad relativa, la protección catódica, el empleo de inhibidores de la corrosión, el empleo de aleaciones y la aplicación de recubrimientos anticorrosivos. Todas se fundamentan en el hecho de que la corrosión se debe a la interacción del metal con su medio circundante, por lo que deberán minimizar o, en el mejor de los casos, impedir la interacción; cada método tiene aplicaciones específicas y puede afirmarse que

ninguna puede emplearse en todas las situaciones en que se requiere proteger componentes metálicos de la acción de la corrosión. Así, por sus características, el uso de inhibidores de la corrosión se prefiere en donde existen medios fluidos en circulación, y la protección catódica en componentes metálicos que se ven afectados en forma constante por el mismo medio corrosivo. Sin embargo, el automóvil puede verse sometido a un sinnúmero de ambientes corrosivos en el transcurso de su vida útil por lo que es necesario el empleo de un método de protección que actúe en la forma más efectiva posible en todos los casos probables; este método, es la aplicación de recubrimientos anticorrosivos.

En la forma más sencilla puede decirse que un recubrimiento anticorrosivo está compuesto por una resina o aceite, que al ser aplicado sea capaz de formar una capa homogénea lo menos porosa posible, al que se adicionan pigmentos que pueden tener propiedades para inhibir la corrosión, evitar la permeación de humedad, impedir la acción destructiva de los rayos ultravioleta sobre la resina o simplemente modificar la consistencia del recubrimiento. Tanto la resina como el pigmento deben mezclarse en la proporción adecuada y diluirse o suspenderse en un vehículo apropiado a la forma de aplicación que se deba utilizar. En general, a esta mezcla de resina, pigmento y vehículo se le conoce como primario, pintura anticorrosiva o recubrimiento anticorrosivo.

Existe una gran variedad de resinas y pigmentos que pueden emplearse en pinturas anticorrosivas, y es un hecho común que la gran mayoría de ellas se produzcan empleando mezclas o copolímeros de resinas y más de un pigmento.

Al igual que con las pinturas para acabada, existen diversas formas de aplicar los recubrimientos anticorrosivos - que siguen empleándose en la actualidad en la totalidad de los casos en que deben utilizarse recubrimientos.

Estos métodos son la aplicación con rasillo o brocha de palo, la aplicación por inmersión, la aplicación por esprayado y la aplicación por electrodepósito. En orden sucesional cada método aventaja al anterior en la facilidad para recubrir áreas cada vez mayores y lograr espesores de recubrimiento uniforme en toda la superficie que se recubra. Hoy en día, la mayor parte de las plantas proveedoras de automóviles emplean el método de esprayado para la aplicación, tanto del recubrimiento anticorrosivo como del esmalte de acabado. Este método se fundamenta en la fina atomización de la pintura y la posterior proyección de la neblina resultante hacia la pieza que se desea recubrir. Desde su invención se ha empleado aire comprimido como medio de atomización y en la actualidad se han desarrollado otras técnicas, como la aspersión electrostática o la aspersión en caliente, que por su alto costo o dificultad de operación se limitan a ciertas aplicaciones. Sin embargo, la carrocería del automóvil es una estructura metálica de conformación sumamente intrincada; existe en ella una gran cantidad de sitios de difícil acceso que, aun empleando la aspersión, no pueden ser cubiertos satisfactoriamente y representan puntos susceptibles de la acción destructiva de la corrosión. Por esta razón, hacia 1950, y precisamente en la industria automotriz, comenzó a desarrollarse un método de aplicación de recubrimientos anticorrosivos sumamente novedoso. Este método, el electrodepósito, es similar en su principio a los procedimientos galvanotécnicos de aplicación de recubrimientos metálicos y se fundamenta en el empleo de disoluciones poco

... .7.

... de resinas pigmentadas eléctricamente cargadas. Por la naturaleza de las resinas es posible que éstas puedan cargarse positiva o negativamente, con lo que el depósito del recubrimiento puede formarse en el cátodo o ánodo de la celda formada al efectuar el proceso. En la forma más sencilla puede decirse que el proceso de electrodeposición consiste en introducir la pieza metálica que se desea recubrir en un recipiente que contenga la dispersión de resina pigmentada (primario). La pieza se conecta al cátodo o ánodo (dependiendo de la carga de la resina) de una fuente de corriente directa, el electrodo opuesto requerido para cerrar el circuito pueda ser el recipiente que contiene al primario, si éste es metálico, pudiéndose emplear también electrodos de diversos materiales conductores. Al permitirse el flujo de corriente en el sistema se depositará en el electrodo correspondiente a la carga de la resina, una película de gran adherencia cuyo espesor aumenta con el tiempo; adicionalmente ocurre la descomposición electrolítica del agua empleada para la dispersión, desprendiéndose oxígeno en el ánodo e hidrógeno en el cátodo. Una de las diferencias del electrodeposición respecto a los procedimientos galvanotécnicos, y de hecho una de sus principales ventajas, es que el depósito de resina ofrece una gran resistencia al flujo de corriente eléctrica, por lo que el espesor de la película se limita a ciertos valores.

Las principales ventajas del proceso de electrodeposición son: espesor uniforme de la película depositada en toda la pieza que se recubre, cobertura en zonas de difícil acceso de la pieza, baja porosidad del recubrimiento lo que aumenta la resistencia a la corrosión, alto contenido de sólidos en el depósito recién formado lo que minimiza el

consumo de energía para eliminar el exceso de agua, alta utilización del agua utilizada y empleo de agua como disolvente que disminuye los riesgos de fuego y contaminación. Entre las principales desventajas de este procedimiento se tienen: limitación en la formulación de los materiales empleados, limitación del tratamiento de la pintura por la alta resistencia de ésta, alta inversión inicial y costos directos elevados en las unidades industriales que lo emplean.

Considerando que el electrodepósito es un procedimiento relativamente nuevo que a partir de su origen se emplea en un número cada vez mayor de establecimientos industriales en el mundo, esta tesis se orienta a su estudio pretendiendo alcanzar los siguientes objetivos:

- a) Hacer una descripción simplificada de los procesos corrosivos, con especial atención a aquéllos que afectan al acero.
- b) Plantear las medidas que se han desarrollado para prevenir la corrosión, indicando sus características y necesidades de empleo para de aquí establecer porque se prefiere la utilización de recubrimientos para proteger contra la corrosión a las carrocerías de automóviles.
- c) Indicar cuáles son las formas en que pueden aplicarse los recubrimientos anticorrosivos haciendo un análisis de ventajas y desventajas de todos ellos en función de las dificultades que afecta una carrocería para ser recubierta.
- d) Plantear los principios teóricos prácticos del proceso de electrodepósito de recubrimientos anticorrosivos considerando los siguientes aspectos:

fenomenología del proceso.

Estructura fisiológica de los baños para electrodeposición, incluyendo una descripción de los materiales que pueden emplearse en la formulación de primarios para aplicación por electrodeposición, con especial interés en resinas y pigmentos.

Existencia de primarios catódicos y anódicos mencionados, cómo es posible producirlos y por qué razones es preferible el empleo de los catódicos sobre los anódicos.

Cinética y mecanismo del electrodeposición, estableciendo un modelo que permita predecir el crecimiento de la película y el valor de otras variables del sistema, considerando que el proceso puede efectuarse en condiciones de voltaje o intensidad de corriente constante.

Comprobación experimental del modelo cinético propuesto incluyendo el diseño y técnicas del experimento, el tratamiento estadístico de los resultados experimentales y el reporte, análisis y conclusiones derivadas de dichos resultados.

- e) Plantear los requerimientos mínimos necesarios (bases de diseño) para efectuar el diseño de una unidad de aplicación del recubrimiento anticorrosivo sobre carrocerías de automóviles, vía electrodeposición, indicando las necesidades y diagrama de bloques del proceso a nivel industrial, las características de capacidad y flexibilidad de la unidad, y las del primario y servicios auxiliares que deben emplearse, e incluyendo además algunos criterios de diseño proporcionados por el proveedor del primario mismo que permitan la operación segura y eficiente de la unidad.

- f) Efectuar el diseño de la unidad en función de la información obtenida en la parte experimental y de los datos proporcionados en las bases de diseño. El diseño se orientará exclusivamente a obtener las características básicas (no detalladas) del equipo requerido en el proceso.
- g) Hacer una evaluación, de orden de magnitud, de la inversión requerida para el montaje e inicio de operaciones de la unidad, y una estimación de los costos totales de producción por año; en función de lo anterior, se determinará el costo unitario de aplicación del recubrimiento.
- h) Establecer conclusiones y recomendaciones de cada una de las partes de que consta este trabajo.

C A P I T U L O I I

PRINCIPIOS TEORICOS Y FENOMENOLOGIA DEL
ELECTRODEPOSITO

- 2.1 GENERALIDADES SOBRE CORROSION Y SU CONTROL.
- 2.2 ASPECTOS GENERALES DEL ELECTRODEPOSITO DE RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS.
- 2.3 COMPARACION DEL ELECTRODEPOSITO DE PRIMARIOS CATODICOS Y ANODICOS.
- 2.4 ESTRUCTURA FISICO - QUIMICA DE LOS PRIMARIOS CATODICOS.
- 2.5 CINETICA Y MECANISMO DEL PROCESO DE ELECTRODEPOSITO.
- 2.6 COMPROBACION EXPERIMENTAL DEL MODELO CINETICO PROPUESTO PARA EL ELECTRODEPOSITO A VOLTAJE CONSTANTE.

RELACION DE DIBUJOS

CAPITULO II

PAG.

19	II.1 MECANISMO SIMPLIFICADO DE LA CORROSION DEL ACERO.
28	II.2 REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL ELECTRODEPOSITO DE UN PRIMARIO ANODICO.
29	II.3 REPRESENTACION ESQUEMATICA DEL ELECTRODEPOSITO DE UN PRIMARIO CATORICO.
38	II.4 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE UNA MICELA DE RESINA CATORICA.
69	II.5 AUMENTO DEL ESPESOR DE PELICULA CON EL TIEMPO PARA UN ELECTRODEPOSITO A INTENSIDAD DE CORRIENTE CONSTANTE.
72	II.6 VARIACION DEL VOLTAGE CON EL TIEMPO PARA UN ELECTRODEPOSITO A INTENSIDAD DE CORRIENTE CONSTANTE.
74	II.7 AUMENTO DEL ESPESOR DE LA PELICULA CON EL TIEMPO PARA UN ELECTRODEPOSITO A VOLTAGE CONSTANTE.
75	II.8 VARIACION DE LA DENSIDAD DE CORRIENTE CON EL TIEMPO PARA UN ELECTRODEPOSITO A VOLTAGE CONSTANTE.

76 II.9 MONTAJE DE EQUIPO PARA LA REALIZACION DEL EXPERIMENTO.

80 II.10 DISTRIBUCION DE DIMENSIONES EN LA CELDA.

92-98 II.11 - II.17 CURVAS I v.s. t PARA LOS TESTIGOS EMPLEADOS EN
EL EXPERIMENTO.

2.1 GENERALIDADES SOBRE CORROSIÓN Y SU CONTROL

2.1.1 Importancia del Estudio de la Corrosión

El estudio de los procesos de corrosión y el desarrollo de métodos eficaces para su control es importante por dos aspectos: en primer lugar el económico, que comprende la reducción de las pérdidas de material que se producen por el desgaste progresivo o ruptura de componentes metálicos y en segundo, por la conservación de los recursos naturales cuya reserva mundial, en el caso de los metales, es limitada; las pérdidas de éstos implican un consumo adicional de otros recursos como agua y energía, cuyo costo es también significativo. En el caso particular de este trabajo puede decirse que la razón principal de proteger las carrocerías de automóviles contra la corrosión, es de orden económico, ya que los armadores deben garantizar que los vehículos producidos por ellos conservarán su integridad estructural, aun en condiciones extremas (p. ejem. en zonas costeras), durante cierto tiempo. Aunque este aspecto no es considerado por el consumidor, el no aplicar protección anticorrosiva, o el hacerla en forma deficiente, tendría como consecuencia pérdidas económicas innecesarias tanto para el comprador como para el fabricante, debido principalmente a fallas en los componentes metálicos del vehículo, expuestos directamente al medio, o a variaciones en la apariencia exterior del mismo.

2.1.2 Aspectos Generales de los Procesos Corrosivos

El término corrosión se ha definido como el ataque destructivo que sufre un metal por reacción electroquímica con su medio ambiente; el ataque se entiende como la

oxidación del metal y su posterior transformación en otras compuestas. La corrosión se distingue de la erosión, la abrasión y el desgaste, por ser éstos, fenómenos exclusivamente físicos, sin embargo, en algunos casos puede presentarse un ataque químico acompañado por daños físicos.

Los fenómenos corrosivos son complejos y se ven afectados por las características del metal que se corroe y las de su medio ambiente; entre las primeras pueden citarse la composición, el estado físico y la condición superficial del metal, y en las segundas, las fases presentes y sus composiciones, la temperatura y su fluctuación, el movimiento o circulación del medio en contacto con el metal, y la naturaleza de los productos de corrosión y su relación respecto a la superficie metálica. Existen dos clases generales de reacciones corrosivas: aquéllas en que el metal se combina directamente con elementos no metálicos, dando lugar a la llamada "corrosión seca"; son ejemplos de este fenómeno las reacciones de oxidación, nitrógeno y sulfatación. La otra clase citada corresponde a las reacciones que originan la "corrosión húmeda" y se caracterizan por el reemplazo del hidrógeno del agua o ácidos, o de otro metal, en soluciones salinas, al disolverse el metal que corroe. Cuando los metales se corrompen en la atmósfera pueden presentarse uno u ambos tipos de reacciones; a temperaturas elevadas y en ambientes secos, se favorecen las reacciones directas, mientras que al aumentar la humedad atmosférica serán más factibles las reacciones de reemplazo. Ambas clases de corrosión son de carácter electroquímico y dependen de la operación de celdas en corto circuito, en la superficie del metal. En el caso de la corrosión seca la celda puede visualizarse en la siguiente forma: los elemen-

tas no metálicas que rodean al metal se adsorben en su superficie formando una capa monomolecular que actúa como cátodo, mientras que la misma superficie metálica actúa como ánodo. Por efecto de la alta temperatura, se produce el salto de electrones de la banda de conducción de los átomos metálicos, que en el caso de los más superficiales, traspasan la interfase y actúan ionizando los elementos no metálicos adsorbidos para convertirlos en aniones; éstos se unen a los cationes metálicos, generados por la pérdida de electrones, formando un compuesto sólido conocido como producto de corrosión. El curso sucesivo del ataque corrosivo dependerá de la estructura física y la conductividad eléctrica del sólido formado. Considerando ahora la corrosión húmeda, queda establecerse que existen dos tipos de reacciones que ocurren simultáneamente en la superficie del metal: unas que corresponden a la oxidación del metal y otras a la reducción de H^+ para formar hidrógeno o a la producción de iones hidroxilo, dependiendo del medio. Es evidente, dado que los iones tienen dimensiones finitas, que ambas reacciones no pueden ocurrir en un mismo punto, por lo tanto, existen dos clases de áreas en la superficie metálica: aquellas en que se descarga hidrógeno o se forma OH^- (catódicas), y aquellas en que el metal se disuelve (anódicas); a menos que se hayan preparado en forma especial, las superficies metálicas presentan áreas que son química o físicamente diferentes al resto de la superficie. La presencia de impurezas, óxidos, y las diferencias en la estructura cristalina y en los esfuerzos mecánicos presentes, implican diferentes tendencias a la solución en el metal. En la actualidad no se cuenta con metales perfectamente homogéneos a escala comercial, y aunque estuvieran disponibles, es muy remota la posibilidad de un medio ambiente homogéneo.

2.1.3 Corrosión Atmosférica del Acero

Medidas Preventivas

El acero se encuentra entre los principales metales que se emplean para la fabricación de maquinaria, herramientas, equipo, estructuras y una gran variedad de implementos requeridos por el hombre. Este material es en realidad una combinación de hierro y carbono en pequeña cantidad (0.5-2%), que al alearse con otros metales, por ejemplo Cu, Ni, Cr, W, Si, produce los llamados aceros especiales. Las propiedades físico-mecánicas de los aceros dependen de su proceso de elaboración, de los tratamientos termomecánicos a que se someten, y del empleo de aleaciones y sus composiciones. La gran variedad que de ellas se produce hoy en día permite su uso en las más diversas aplicaciones, por ejemplo en la industria automotriz que desde sus inicios ha utilizado acero en la fabricación de una gran parte de los componentes de sus vehículos, como es el caso del motor, del chasis y de la carrocería. Considerando las carrocerías cabe mencionar que anteriormente se producían con placas de espesor elevado lo que dificultaba su manejo y trapeado, pero aseguraba excelentes tolerancias a la corrosión y una buena resistencia mecánica; adicionalmente, las carrocerías se protegían con gruesas capas de esmalte, generalmente aplicadas a mano. Al transcurrir el tiempo los diseñadores debieron aumentar la eficiencia de los automóviles tratando paralelamente de reducir su costo; esto obligó al empleo de carrocerías fabricadas con placas de espesor gradualmente menor además de otros materiales no metálicos (por ejemplo, fibra de vidrio y algunas resinas) con el objeto de reducir el peso del vehículo. En la actualidad se cuenta con aceros cuyas propiedades garantizan la integridad estructural del vehículo, aun empleándose en espesores pequeños, pero que deben ser cuidadosos

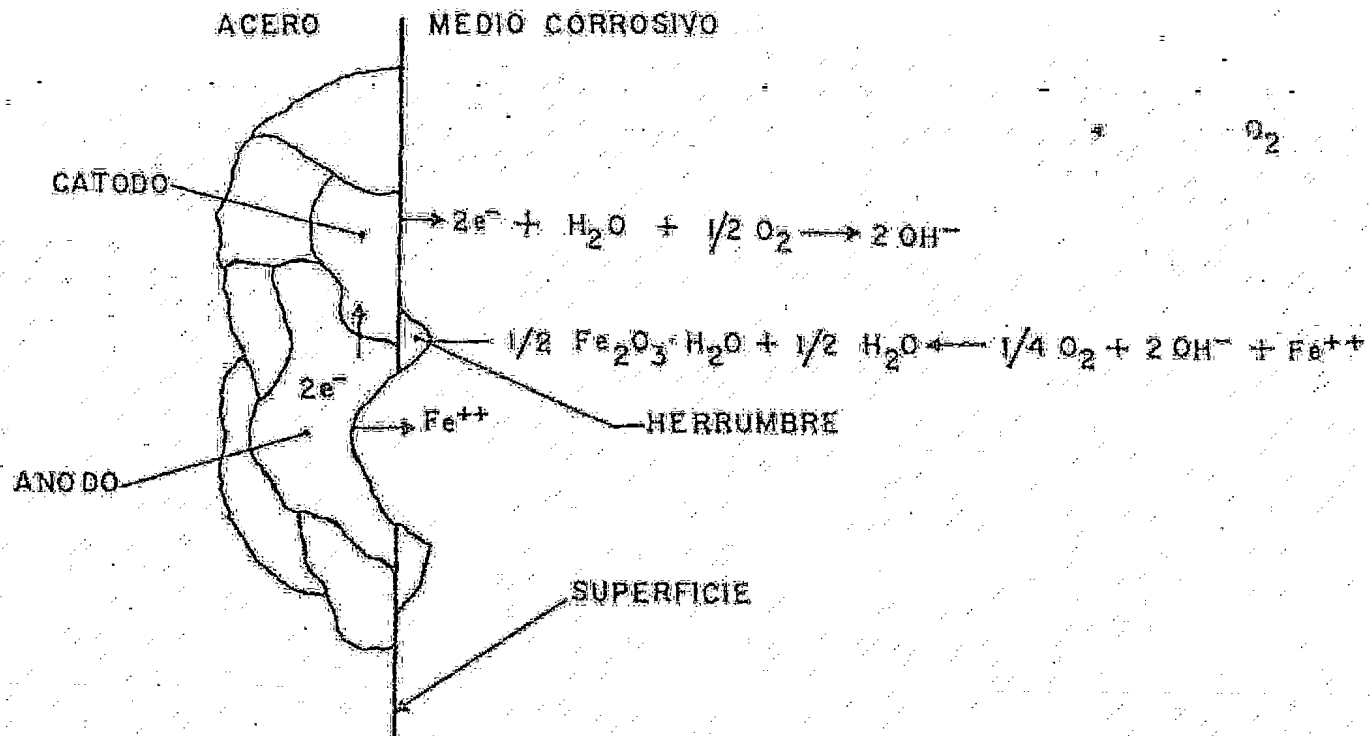
mente protegidos contra la corrosión para permitir su funcionamiento en óptimas condiciones.

Por la importancia del acero, el hombre ha puesto especial atención en el estudio de los mecanismos de corrosión de este metal en los diversos medios a los que puede verse expuesto, además de haber desarrollado medidas preventivas para su control. Es importante resaltar que, generalmente, el acero se ve sometido a reacciones corrosivas de tipo húmedo, mismas que involucran la oxidación del metal en las áreas anódicas y la formación de iones hidroxilo o el desprendimiento de hidrógeno en las áreas catódicas. En la figura II.1 se presenta el esquema simplificado de la corrosión del acero.

Todas las medidas empleadas para el control de la corrosión se fundamentan en el hecho de que este fenómeno resulta de la interacción de los metales con su medio circundante, por lo tanto cualquier medida deberá minimizar, en el mejor de los casos, impedir la interacción. Esto puede lograrse modificando algunas de las propiedades del metal, para hacerlo resistente al ataque corrosivo, o formando una barrera protectora sobre la superficie metálica expuesta al medio agente que impida el contacto directo entre ambos, o variando las características del medio para disminuir su agresividad. En el caso de la corrosión del acero puede decirse que las medidas preventivas más eficaces que se han desarrollado para el control de este fenómeno son las siguientes:

a) Reducción de la humedad relativa ambiental

Esto se consigue aumentando la temperatura del aire o disminuyendo su contenido de humedad; en la mayoría de los casos es suficiente un decremento de la humedad relativa a



REF.: APUNTES DEL CURSO REGIONAL SOBRE
CORROSION, SU PREVENCIÓN Y CONTROL.
INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO.

TESIS PROFESIONAL. S. S. S.
MÉCANISMO SIMPLIFICADO DE LA CORROSION DEL ACERO.

FIGURA II.1

valores cercanos a un 100% de saturación, aunque debe disminuirse más cuando están presentes en la atmósfera polvos u otras sustancias higroscópicas. Esta medida es efectiva excepto cuando la corrosión se debe a vapores o gases de carácter ácido y se emplea en recipientes cerrados no muy grandes, generalmente utilizados para almacenamiento de piezas o materiales.

b) Protección catódica

El mecanismo de corrosión del acero implica un flujo de electrones que abandonan la superficie metálica con la consecuente disolución del acero en forma de iones Fe^{++} . En la protección catódica se imprime corriente al componente a proteger, a través de un circuito eléctrico externo o un sistema de ánodos de sacrificio, invirtiendo el sentido del flujo de electrones y evitando así el fenómeno de oxidación. Este método se emplea preferentemente en tuberías, equipos, o estructuras, enterradas o sumergidas.

c) Empleo de inhibidores de la corrosión

Este método contempla el uso de pequeñas cantidades de compuestos orgánicos o inorgánicos capaces de formar una película adherente en la superficie del acero, por atracción eléctrica o reacción con el sustrato, evitando el acceso de los agentes corrosivos. Los inhibidores de corrosión se caracterizan por altas cargas eléctricas en los extremos de sus moléculas, capaces de ser atraídas por la superficie a proteger; desafortunadamente esta atracción no es permanente lo que hace necesaria una dosificación constante en el medio. Los inhibidores de corrosión se utilizan comúnmente en donde existen medios fluidos en circulación.

d) Empleo de aleaciones

Cuando las condiciones de presión y temperatura sean extremas o bien el medio sea excesivamente agresivo, se puede recurrir a una adecuada selección de materiales (por ejemplo aceros inoxidable) que generalmente son más caros. La alta resistencia a la corrosión de los aceros inoxidable se basa en la formación de una delgada capa de óxido del metal muy adherente e impermeable. A este fenómeno se le conoce como pasivación. Por su costo, el empleo de aleaciones se limita a la fabricación de equipos y materiales que no pueden protegerse adecuadamente en otra forma.

e) Empleo de recubrimientos anticorrosivos

Este método, al igual que en los inhibidores de la corrosión, considera la formación de una barrera que impida, en lo posible, el contacto directo entre el metal y el medio corrosivo, pero a diferencia de aquéllos, la barrera se forma a partir de la aplicación de una dispersión líquida de resina y pigmento, con eliminación posterior del solvente, orientándose una película sólida adherida firmemente a la superficie metálica. La duración de la película está condicionada a la resistencia de la misma al ataque del medio corrosivo y es función también de otros factores como el pretratamiento de la superficie metálica y la forma de aplicar el recubrimiento. Actualmente el uso de recubrimientos se encuentra ampliamente extendido en la protección de estructuras, instalaciones, equipos y materiales, aéreos o sumergidos.

Considerando el aspecto económico de cada uno de estos métodos así como sus limitaciones, las cuales necesariamente repercuten en la eficiencia de protección, se con -

cluye que la solución a los problemas de corrosión está enfocada a su control más que a su eliminación.

Para la protección anticorrosiva de las carrocerías resulta evidente, según lo expuesto, que el mejor método para lograrla es el empleo de recubrimientos anticorrosivos los que, correctamente aplicados, aseguran una protección adecuada a las condiciones de empleo del automóvil. En cuanto a la forma de aplicarlos es conveniente señalar que se han desarrollado varios métodos no limitados a la protección de partes automotrices, que cubren la totalidad de casos en que deben utilizarse recubrimientos.

Los métodos de aplicación de recubrimientos anticorrosivos son los siguientes:

a) Aplicación con rodillo o brocha de pelo

Este método es el más antiguo que se conoce y en comparación con otros, resulta excesivamente lento por lo que se prefiere para recubrir áreas pequeñas o de conformación difícil; además, presenta ciertos problemas en el control del espesor de la película. Entre sus ventajas más sobresalientes se pueden mencionar: fácil humectación, aun en áreas difíciles, bajo costo de equipo y desperdicio mínimo de material.

b) Aplicación por inmersión

El método de inmersión aventaja en rapidez a la aplicación con brocha, sin embargo, no ofrece ningún control sobre el espesor de la película por lo que se utiliza para recubrir partes que no requieren un acabado fino. En este método son necesarias al menos dos inmersiones para garantizar la aplicación del recubrimiento en áreas que, por el efecto de escurrimiento, no fueran cubiertas en la-

primera inmersión. Adicionalmente, se requieren recipientes cuyas dimensiones dependan del tamaño y forma de la pieza que se recubre; esto implica, en algunos casos, grandes volúmenes de recubrimiento y amplias superficies expuestas al polvo y otros contaminantes. Independientemente de la falta de uniformidad en el espesor de la película, la inmersión tiene como desventajas el desperdicio de material y la falta de adherencia de la película aplicada. Como sus principales ventajas se pueden citar el bajo costo de las instalaciones requeridas y la rapidez del proceso.

a) Aplicación por esprayado

Este método se desarrolló ante la necesidad de aumentar las velocidades de aplicación y mejorar el control de espesor de la película, y como una consecuencia de las cada vez más grandes áreas a recubrir y la agresividad de los medios corrosivos que se presentan en la industria.

La aspersión se fundamenta en la fina atomización del recubrimiento y la posterior proyección de la neblina resultante hacia la pieza a recubrir. Desde su invención, se ha empleado aire comprimido en los equipos de esprayado como medio de atomización y no obstante que es el vehículo más utilizado se han desarrollado otros procedimientos tales como la aspersión electrostática, la aspersión en caliente, la aspersión con vapor y la aspersión sin aire, que por su alto costo o dificultad de operación se limitan a ciertas aplicaciones. Los equipos de esprayado son sencillos y constan por lo común de: pistola, compresor, recipiente para el recubrimiento, filtros de aire, mangueras y reguladores de presión, además de otros accesorios que permiten una operación segura y eficiente.

Las principales ventajas de la aspersión son: tersura, -

durabilidad y buena adherencia de los recubrimientos aplicados además de un control adecuado del espesor de la película y costos de equipo relativamente bajos; su principal desventaja es el desperdicio de material.

d) Aplicación por electrodepósito

El electrodepósito es la técnica desarrollada más recientemente para la aplicación de recubrimientos anticorrosivos y otras clases de pinturas. Su origen se derivó de la creciente necesidad de recubrir piezas metálicas de conformación difícil, que requerían un espesor de película uniforme en toda su superficie.

En los siguientes puntos de este capítulo se establecen los principios teórico - prácticos del electrodepósito y se indican los materiales que pueden ser aplicados por este procedimiento. Cabe aclarar que, independientemente de las grandes ventajas que ofrece sobre los otros métodos citados, sus desventajas han limitado su empleo a ciertas aplicaciones, la más extensa de las cuales se encuentra en la industria automotriz.

Todos los métodos mencionados de aplicación de recubrimientos se siguen empleando en la actualidad; la elección de alguno en particular depende, entre otras cosas, de las características deseadas del recubrimiento una vez aplicado, del área a cubrir, de la complejidad de la pieza de trabajo y de la disponibilidad de equipo y materiales. Además, cada procedimiento, por sus características, implica diferencias en las propiedades físico - químicas del recubrimiento empleado tales como viscosidad, densidad, contenido de sólidos, empleo de solventes, etc., que deben ser tomadas en cuenta al seleccionar la forma de aplicación.

2.2 ASPECTOS GENERALES DEL ELECTRODEPOSITO DE RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS

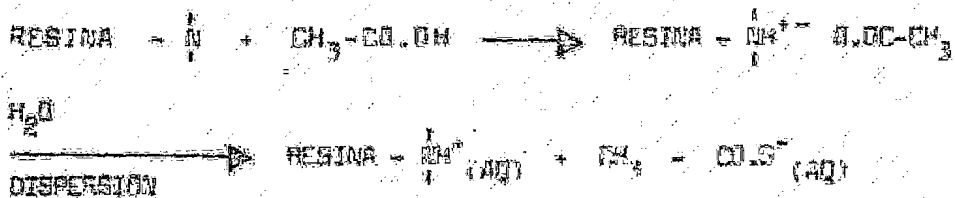
El proceso de electrodeposito de recubrimientos anticorrosivos tiene por finalidad aplicar una película continua, de espesor uniforme, de resina y pigmento sobre una pieza metálica conductora. Es similar en su principio, a los procedimientos galvanotécnicos de recubrimiento, tales como el niquelado, el cromado, el cobrizado, etc. Sin embargo, existen algunas diferencias entre ellos:

- a) En la galvanoplastia el depósito se obtiene a partir de una solución acuosa de una sal que contenga los iones del metal deseado. En el proceso de electrodeposito se parte de una dispersión coloidal acuosa de resina eléctricamente cargada y pigmento.
- b) En los procesos galvanotécnicos, el depósito de metal se efectúa en el cátodo, mientras que el electrodeposito de la mezcla de resina y pigmento puede hacerse en el cátodo o el ánodo.
- c) La capa de metal depositada mediante los procedimientos galvanotécnicos no tiene ninguna influencia sobre las características de conducción de la parte a recubrir, en tanto que la mezcla electrodepositada de resina y pigmento es no conductora y aísla la pieza de trabajo, disminuyendo su conductividad y limitando el espesor de la película a ciertos valores.

Las resinas empleadas para electrodeposito no son, por sí solas, dispersables en agua; es necesario producir las como resinas con funcionalidades ácidas o básicas que por reacción de neutralización producen sales que sí son dispersables. La cantidad de neutralizante o "solubilizador"

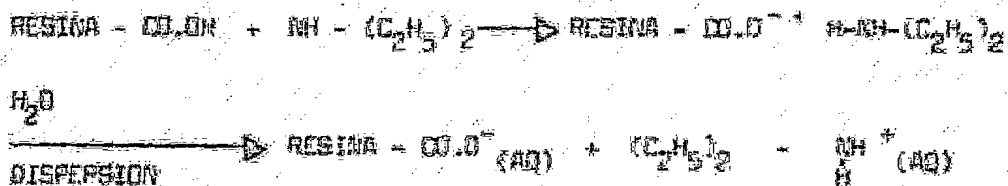
empleado debe ser suficiente para producir el baño estable, pero debe ser menor que la cantidad requerida para neutralizar el total de las funcionalidades ácidas o básicas de la resina.

Las resinas con funcionalidades básicas se producen con radicales amínicos, primarios, secundarios, o terciarios, y algunos otros (sulfónico, fosfónico, acetato de amonio, etc.), que comúnmente se neutralizan y solubilizan con ácido acético.



Las resinas así formadas se denominan catódicas o catiónicas: al mezclarse en la preparación adecuada con pigmento, agua y otras sustancias forman los llamados primarios catódicos o pinturas anticorrosivas catódicas, ya que por la carga de la resina se depositarán en el cátodo.

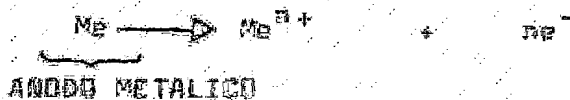
Las resinas con funcionalidades ácidas se producen con radicales del tipo ácido orgánico que comúnmente se neutralizan con dietilamina.



Este tipo de resinas se conocen como anódicas o aniónicas: su mezcla con pigmento, agua y otras sustancias forma los llamados primarios anódicos o pinturas anticorrosivas anódicas, ya que por su carga la resina se depositará en el ánodo.

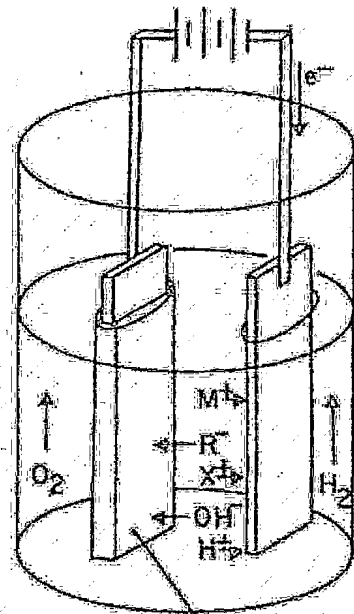
En ambos tipos de primarios la resina actúa como vehículo del pigmento. Por su elevado peso molecular, cada partícula de resina tiene asociadas y es capaz de transportar a varias moléculas de pigmento. La composición de los primarios se tratará más adelante.

El proceso de electrodepósito se efectúa introduciendo la pieza metálica conductora que se desea recubrir en un recipiente que contiene el primario. La pieza se conecta al cátodo o ánodo (dependiendo del tipo de primario empleado) de una fuente de corriente directa. El electrodo opuesto, requerido para cerrar el circuito, puede ser el recipiente que contiene la dispersión, si éste es metálico, pudiéndose emplear también electrodos de diversos materiales conductores convenientemente dispuestos en el baño. Al permitir el flujo de corriente en el circuito se formará entre los electrodos un campo eléctrico continuo; bajo su influencia las partículas de resina, eléctricamente cargadas, se moverán hacia el electrodo con carga opuesta hasta ponerse en contacto con él. Al ocurrir esto neutralizan su carga y coagulan, formando una película de gran adherencia cuyo espesor aumenta con el tiempo. Simultáneamente, en los electrodos ocurre la descomposición electrolítica del agua empleada para la dispersión, desprendiéndose oxígeno en el ánodo e hidrógeno en el cátodo. Un fenómeno adicional es la disolución de los ánodos, ya que por su carga eléctrica son susceptibles de oxidación. Esto puede representarse como:



Los fenómenos involucrados en el proceso de electrodepósito se muestran esquemáticamente en las figuras 11.2 y 11.3.

ANODO (+) CATODO (-)



PELICULA DEPOSITADA

R^- = ANION DE RESINA Y,
PIGMENTO ASOCIADO.

X^+ = CATION DE SOLUBILIZADOR

M^+ = CATION METALICO PRODUCIDO
POR OXIDACION DEL ANODO

REF.: PINTURAS PITTSBURGH
DE MEXICO.

TESIS PROFESIONAL. S. S. S.

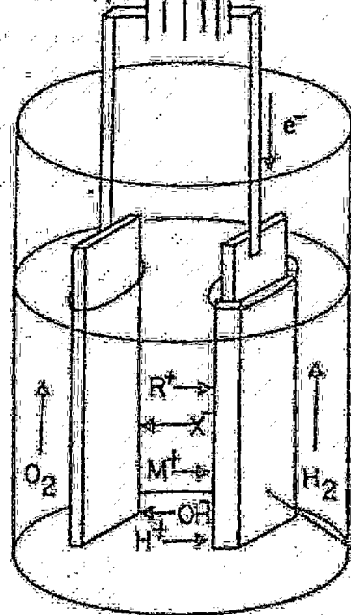
REPRESENTACION DEL ELECTRO

DEPOSITO DE UN PRIMARIO

ANODICO

FIGURA II.2

ANODO (+) CATODO (-)



R^+ = CATION DE RESINA Y
PIGMENTO ASOCIADO.

X^- = ANION DE SOLUBILIZADOR

M^+ = CATION METALICO PRODUCIDO
POR OXIDACION DEL ANODO.

PELICULA DEPOSITADA.

REF.: PINTURAS PITTSBURGH
DE MEXICO.

TESIS PROFESIONAL - S. S. S.

REPRESENTACION DEL ELECTRO-

DEPOSITO DE UN PRIMARIO

CATODICO.

FIGURA II.3

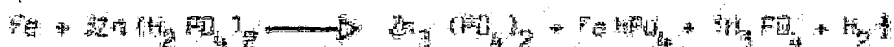
Para lograr un efecto completo de protección anticorrosiva, la pieza de trabajo debe ser pretratada cuidadosamente y no se debe después de recuararse. El pretratamiento consiste fundamentalmente de tres pasos:

- i) Limpieza alcalina en caliente para eliminar grasas y mugres así como vestigios del aceite utilizado en el troquelado de las piezas o como protección temporal. En este caso se emplean detergentes de formulación especial o soluciones muy diluidas de soda o potasa cáusticas.
- ii) Aplicación de fosfato de zinc. En este paso se aplica una solución de fosfato de zinc en ácido fosfórico en equilibrio con el superfosfato correspondiente.



La solución se balancea en tal forma que la saturación del fosfato de zinc se encuentre cercana a la de saturación.

El superfosfato reacciona con el sustrato metálico, produciendo fosfato ácido. En el caso del acero la reacción es la siguiente:



El aumento en la concentración del fosfato de zinc acelera la saturación de la solución y la formación, sobre la superficie metálica, de una capa cristalina de este compuesto que contiene pequeñas cantidades del fosfato ácido producido. La aplicación del fosfato de zinc tiene como objetivo primordial el ayudar a la retención del primario o pintura que se aplica inmediatamente después, aunque algunas veces se emplea como protección temporal contra la corrosión, recubriendo la cara con una grasa o aceite que disminuye la acción de la humedad ambiental.

- iii) Enjuague con ácido crómico para eliminar el exceso de sales de zinc que no quedaron directamente adheridas a la pieza metálica. Este enjuague se realiza con soluciones muy diluidas de ácido (aproximadamente 0.045% en volumen) para evitar ataques al metal.

Todos los pasos del pretratamiento pueden efectuarse por inmersión, aplicación manual o aspersión. En los sistemas modernos generalmente se emplea la aspersión, ya que permite la automatización del proceso y garantiza una buena aplicación de las reactivos. Adicionalmente, entre los pasos mencionados y al final del pretratamiento, es necesario enjuagar las piezas e recurrir para eliminar al máximo el exceso de las sustancias empleadas evitar así contaminaciones en los pasos subsiguientes. En los enjuagues puede utilizarse agua común para servicios de ningún tratamiento especial, aunque es preferible que el último se haga con agua desmineralizada para impedir el acorreo de componentes iónicos, los cuales pueden restabilizar el baño de electrodeposición.

El hervido tiene por objeto promover la polimerización de la resina del depósito, lo que garantiza el endurecimiento del mismo y su continuidad sobre toda la superficie recubierta. Aunque las condiciones de hervor pueden variar de un resabrimiento a otro, en la mayoría de los casos esta operación se efectúa durante 10 ó 15 minutos a temperaturas del orden de 180°C.

Experimentalmente, el electrodeposición puede efectuarse en condiciones de densidad de corriente constante o voltaje constante. En el caso de densidad de corriente constante, al aumentar el espesor de la película con el tiempo, se incrementa la resistencia de la pieza de trabajo; de la ley de Ohm se infiere un aumento en el voltaje en forma -

proporcional con el tiempo.

En el caso de voltaje constante, la densidad de corriente disminuye al aumentar el espesor de la película con el tiempo. A nivel industrial el electrodeposición se efectúa generalmente a voltaje constante, ya que este parámetro no debe sobrepasar el voltaje de ruptura de la película. Por otra parte resulta más económico mantener un voltaje constante en el circuito.

Las principales ventajas del proceso de electrodeposición son:

- a) Espesor uniforme de la película depositada en toda la pieza de trabajo.
- b) Cobertura en zonas de difícil acceso de la pieza.
- c) Baja porosidad de la película, las películas son dúctiles y alta resistencia a la corrosión.
- d) Formación de una película con alto contenido de sólidos: su bajo contenido de agua implica un consumo mínimo de energía para eliminar el solvente.
- e) Alta utilización del reactivo (90-99%).
- f) Automatización completa del proceso.
- g) Empleo de agua como dispersante, en vez de solventes orgánicos, reduciendo los riesgos de fuego y contaminación.

Y algunas de sus desventajas:

- a) Limitación en la formulación de los materiales complejos, ya que no se permiten altos niveles de pigmento, pigmentos insolubles o resinas solubles en agua altamente iónicas.

- b) Sólo se pueden recuperar plazas condicionalmente.
- c) El crecimiento de la población se limita a sí mismo.
- d) Se requiere una inversión inicial alta y un espacio económico para las instalaciones.

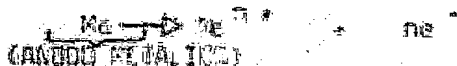
2.3 COMPARACION DEL ELECTRODEPOSITO DE PRIMAARIOS CATODICOS Y ANODICOS

2.3.1 Desarrollo Histórico

Los primeros recubrimientos anticorrosivos que se desarrollaron para aplicación por electrodeposición a nivel industrial fueron los anódicos. Su uso se extendió a partir de la década de los 60's especialmente en la industria de trompetas. Sin embargo, al inicio de los 70's se comenzaron a probar experimentalmente los primarios catódicos, demostrando superar algunas inconvenientes que los anódicos tenían. A partir de entonces la mayor parte de los establecimientos industriales en el mundo han convertido sus instalaciones para poder emplear sistemas catódicos; la transformación resulta sencilla y económica, y asegura la formación de recubrimientos con una resistencia a la corrosión superior a la obtenida con los primarios anódicos.

2.3.2 Comparación de la Tecnología en los Fundidos de Aluminio

La superioridad de los primarios catódicos sobre los anódicos se debe principalmente a uno de los fenómenos electroquímicos que ocurren durante el proceso de aplicación. Como se recordará paralelamente a la formación del depósito, en el electrodo correspondiente el tipo de primario empleado, los ánodos se disuelven, ya que por su carga pueden oxidarse de acuerdo con la reacción:



Cuando se trabaja con primarios catódicos este efecto puede evitarse empleando ánodos de un material inerte en un primario se emplean ánodos de grafito los cuales no

sultaban pesados y frágiles; en la actualidad, si se tiene un control adecuado del pH en el baño, pueden utilizarse ánodos de acero inoxidable. Al emplear primarios catódicos la pieza a recubrir no sufre ningún daño, ya que es el cátodo en el circuito.

En el caso de los sistemas anódicos (donde la parte a recubrir es el ánodo) la oxidación provoca:

- a) Pérdida de material en la pieza de trabajo.
- b) Formación de centros susceptibles de oxidación posterior.
- c) Ataque a la capa de fosfato aplicada en el pretratamiento.

Adicionalmente puede ocurrir que la película depositada se descomponga por la presencia de oxígeno nascente en el ánodo.

Estos factores no son deseables cuando se trata de mejorar la resistencia a la corrosión en la pieza que se recubre, y han obligado a que la mayor parte de los desarrollos experimentales efectuados hoy en día se encaminen a la búsqueda de formulaciones adecuadas para aplicaciones específicas empleando materiales electrodepositables catódicamente.

2.4 ESTRUCTURA FÍSICOQUÍMICA DE LOS PRIMARIOS CATÓDICOS

2.4.1 Composición Química

Los principales componentes de cualquier pintura anticorrosiva de tipo anódico son la resina y el pigmento, aunque deben incluirse en la formulación otras sustancias que aseguran la estabilidad del primario, características de aplicación adecuadas, y propiedades satisfactorias en la película formada.

En la actualidad, se cuenta con una gran variedad de formulaciones para aplicaciones específicas que los fabricantes recomiendan basados principalmente en su experiencia y en el conocimiento del medio al que será expuesta la pieza recubierta.

En la tabla II-A se muestra la composición típica de un primario catódico para aplicación por electroléctrolito sobre carrocerías.

A continuación se presenta la descripción de cada uno de los componentes requeridos en los primarios catódicos indicando las funciones que cumplen en el baño o en la película y resaltando algunas de sus características más importantes.

a) Resinas

Las resinas tienen como función primordial formar una capa continua que aisle de su ambiente a la superficie metálica que se recubre impidiendo en parte los fenómenos de corrosión. Este efecto no se logra con el solo hecho de aplicar el primario; como se indicó, es necesario promover la polimerización de la resina (empleando generalmente alta temperatura) a través de ciertos radicales en su-

T A B L A I B - A

COMPOSICION EN PORCIENTO EN PESO DE UN PRIMARIO PATODICO

Resina	16%
Pigmento	4%
Aditivo de Flujo	0.1%
Solubilizador	4%
Fungicida e Bactericida	0.1%
Agua	36%

REF.: PINTURAS PITTSBURGH DE MEXICO, S. A.

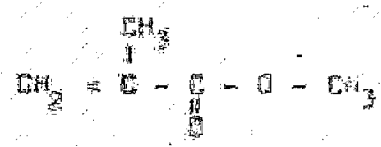
estructura.

Las resinas pueden emplearse solas o formando copolímeros que mejoren sus propiedades de dureza, resistencia, flexibilidad, aspecto, etc., al ser aplicadas.

Entre las de mayor uso en recubrimientos anticorrosivos se tienen:

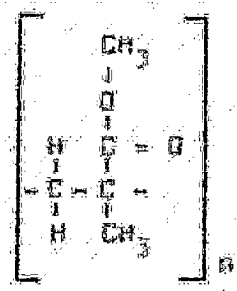
Resinas Acrílicas

Estas resinas están basadas en ésteres de los ácidos acrílicos por ejemplo:



METIL METACRILATO

Y se forman por polimerización catiónica



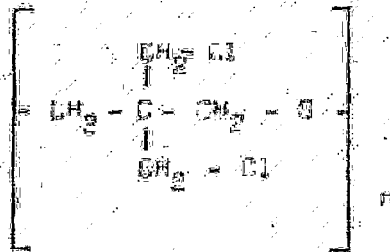
Su costo es relativamente elevado, pero destacan por su buena retención del color y su durabilidad en exteriores.

Resinas Alquídicas

Se forman por la reacción de ácidos polibásicos, polialcoholes y ácidos grasos monobásicos. La estructura básica de estas resinas es:

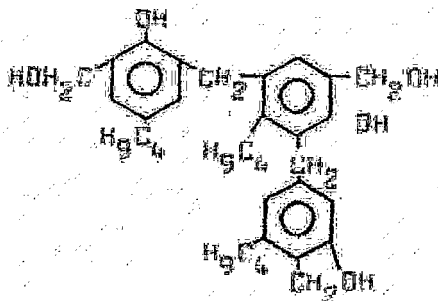
Polietares Clorados

Ofrecen una buena protección contra la corrosión a temperaturas superiores a las 240°F. El polímero presenta una excelente resistencia al agua. Estas resinas requieren curarse a 425°F aproximadamente. Pueden producirse como:



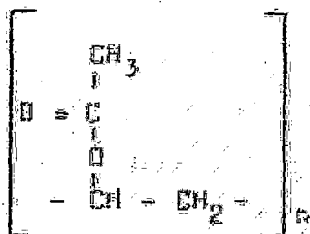
Fenólicos

Se producen por condensación de varias moléculas fenólicas con formaldehído o sus derivados. Generalmente se obtienen una vez aplicadas. Son durables y presentan buena resistencia al álcali. Su estructura típica es:

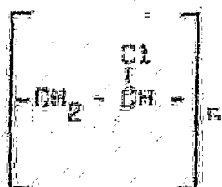


Vinílicas

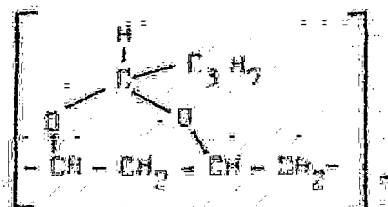
Existen en el mercado en tres formas generales:



ACETATO DE VINILO



CLORURO DE VINILO



BUTIRAL

El acetato forma por sí solo películas duras por lo que generalmente se copolimerizan para suavizarlas. Presentan buena retención de color y durabilidad en aplicaciones exteriores.

El cloruro tiene una gran resistencia al agua y buena flexibilidad, pero poca estabilidad a la luz. Por su alto contenido de cloro, es resistente al fuego.

El butiral se emplea en recubrimientos que requieren cierta flexibilidad.

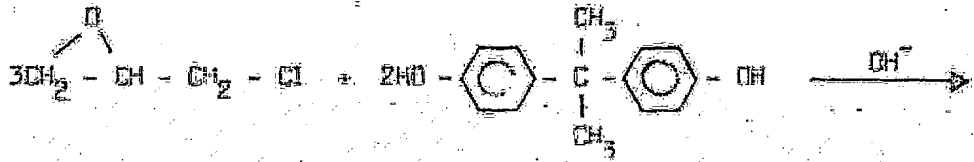
Epoxicas

Estas resinas son las de más amplia uso industrial y doméstico en la actualidad; del total producido cada año, aproximadamente el 50% se emplea en recubrimientos.

Por sus características provee una excelente adhesión, resistencia química, durabilidad y flexibilidad a las películas que forma.

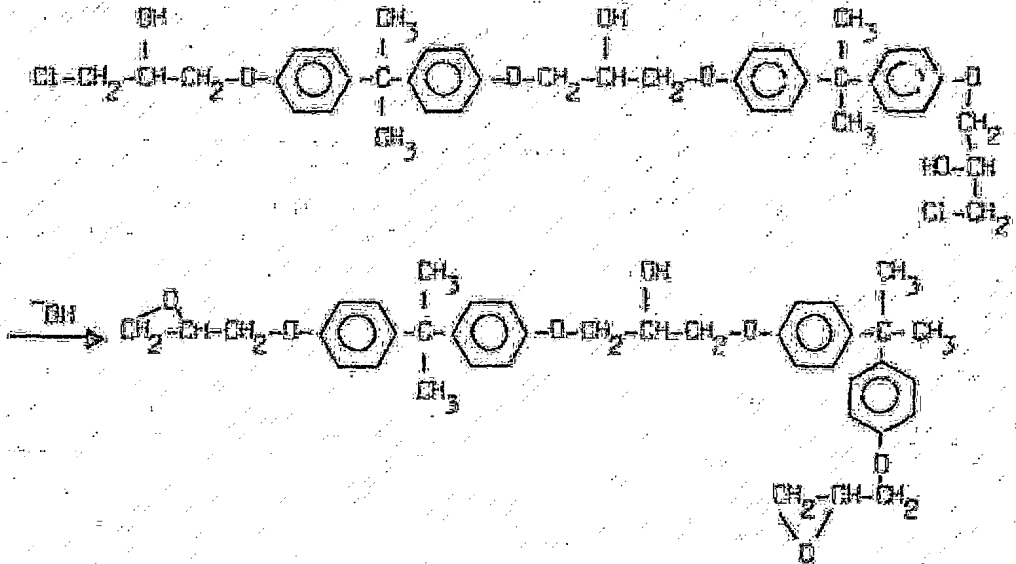
La naturaleza versátil de su molécula ha permitido la formulación de una amplia gama de recubrimientos para diversos usos en todos los campos. Las de mayor aceptación co

merical, se forman por condensación de epíclorhidrina y difenil propano (bisfenol "A") en medio básico, pudiendo producirse en forma sólida.

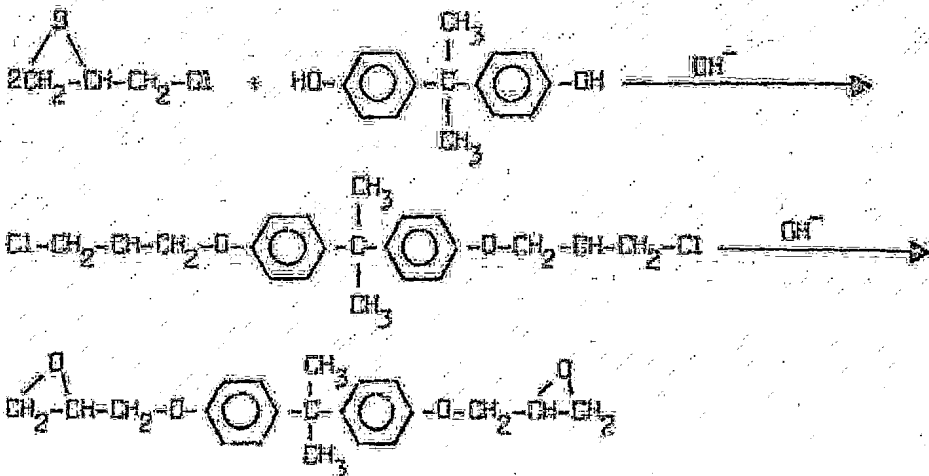


EPICLORHIDRINA

DIFENIL PROPANO (BISFENOL "A")

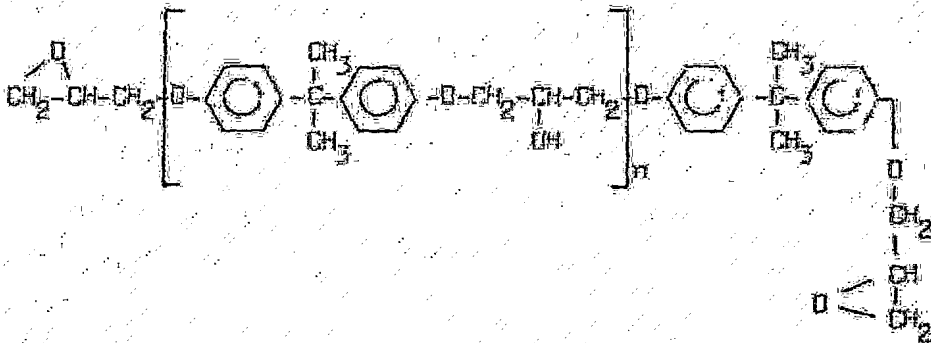


a) en forma líquida



Generalmente se emplea un exceso de epiclohidrina para asegurar la formación de grupos epóxicos terminales requeridos en modificaciones posteriores.

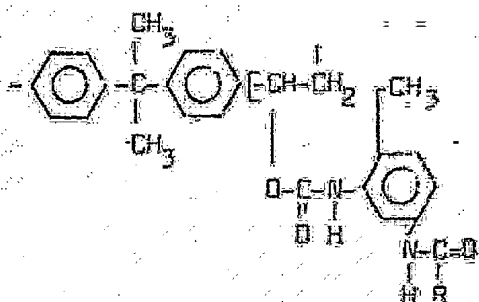
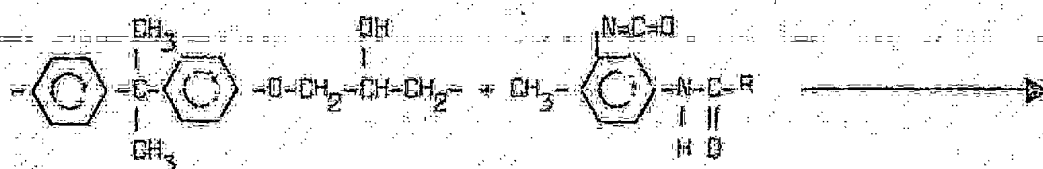
En condiciones adecuadas, la polimerización puede continuar hasta el agotamiento del difenil obteniéndose una estructura sólida del tipo :



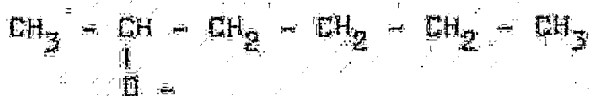
donde n es aproximadamente 15.

El curado de estas resinas puede efectuarse a través de los radicales epóxicos u oxhidrilos de la cadena. Sin embargo ambos son suficientemente reactivos como para provocar la polimerización de la resina en las condiciones del baño y la consiguiente formación de material de peso molecular elevado que puede sedimentar fácilmente. Para evitar esto, se ha desarrollado un mecanismo de curado que consiste en bloquear los radicales oxhidrilos con grupos que permiten la polimerización sólo en condiciones de temperatura elevada. Los radicales epóxicos se reservan para incluir en la molécula los grupos amínicos requeridos en la solubilización.

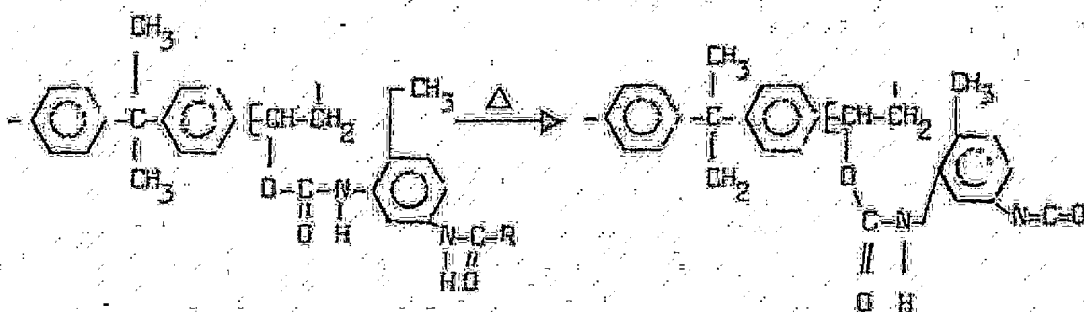
El mecanismo citado, conocido como del isocianato bloqueado, se fundamenta en la siguiente reacción:



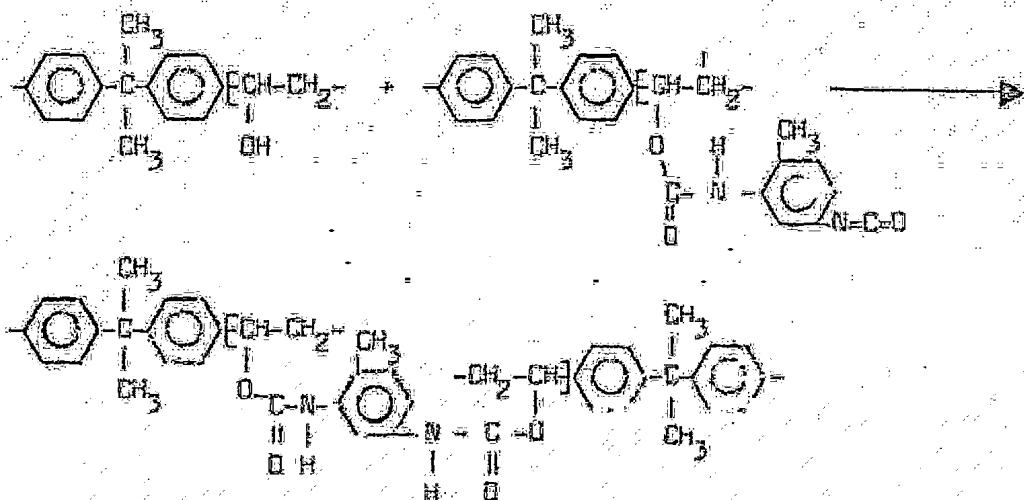
donde R es:



Cuando la pieza ya cubierta se hornea, se elimina una molécula de alcohol, formándose un nuevo radical isocianato:



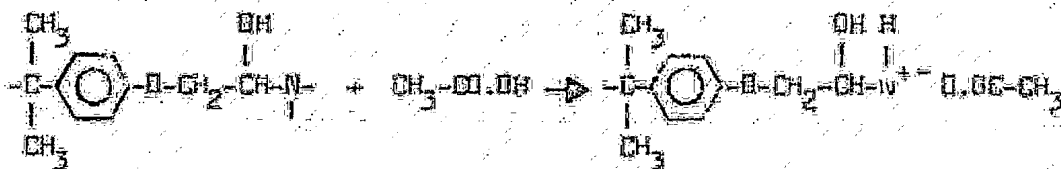
que puede reaccionar con otras moléculas de resina, aumentando así el tamaño de la cadena y endureciendo la película formada;



Como se mencionó la introducción de los grupos amínicos - se efectúa a través de los radicales epóxido por reacción de éstos con una amina primaria, secundaria o terciaria, - en un proceso conocido como modificación catódica.



Por último los radicales amínicos (incluyendo los del isocianato bloqueado) se neutralizan con una solución de ácido acético cuya concentración permite obtener una dispersión estable;



Abundando en la estructura química de estas resinas, cabe mencionar que las excelentes propiedades de las películas

ya curadas se deben a la disposición de los radicales que forman la cadena y que contribuyen:

A la resistencia química

El polímero contiene a lo largo de la molécula enlaces éter y carbón - carbón muy estables.

A la flexibilidad

El amplio espacio entre los grupos epóxido bloqueados y los radicales hidroxilo aseguran que los enlaces formados en el curado se encuentren lo suficientemente alejados impidiendo así la formación de una estructura rígida.

A la resistencia térmica

Esto debido a la presencia de anillos aromáticos en la estructura del polímero.

b) Pigmentos

Los pigmentos son compuestos orgánicos o inorgánicos coloridos, necesarios en los recubrimientos anticorrosivos para asegurar las cualidades requeridas de protección en el metal que se recubre; su presencia en la formulación ayuda a mejorar algunas propiedades, tanto de la dispersión como de la película curada.

En los primarios de aplicación directa o por inmersión, aumentan la consistencia de la dispersión, haciéndola más fácilmente aplicable u obligando a la formación de recubrimientos uniformes sobre todo en superficies verticales o inclinadas; los que tienen un elevado índice de refracción (mayor a 2.5) se utilizan en recubrimientos que requieren brillantez, mientras algunos opacos actúan absorbiendo los rayos ultravioleta, mismos que provocan reacciones de tipo

Fotodérmicos capaces de descomponer la resina empleada en el recubrimiento; pueden variar las estructuras de la película formada aumentando su dureza y la resistencia a los esfuerzos termomecánicos o reduciendo la velocidad de permeación de humedad; una vez aplicado el primario pueden oxidarse, en contacto con la humedad atmosférica, para reaccionar con el sustrato y pasivarlo o para formar un medioambiente capaz de inhibir los procesos corrosivos.

Generalmente en la formación del primario se emplean dos o más pigmentos ya que ninguno, por sí solo, posee todas las cualidades descritas; la proporción utilizada así como la mezcla con otros pigmentos dependerá del medio a que será expuesta la pieza recubierta, así como de la forma de aplicar el primario.

Existen varias formas de clasificar los pigmentos; las más generales se basan en el color que presentan y en su procedencia orgánica o inorgánica. Esta clasificación, mostrando los pigmentos más comúnmente empleados, incluso en recubrimientos exteriores, se muestran en la tabla II.8.

Los pigmentos más utilizados en recubrimientos anticorrosivos son los siguientes:

Rojó de plomo (Pb_3O_4)

De todos los pigmentos que se han utilizado en primarios para metales ferrosos, el rojé de plomo es el que mejores resultados ha dado. Aproximadamente se emplean 25 000 toneladas anuales de él en recubrimientos anticorrosivos. Se produce por tostación de PbO (litargiria) obteniéndose con concentraciones de aproximadamente 97% en peso de Pb_3O_4 , además de 1% de PbO y otras impurezas. Por su naturaleza de oxidante fuerte actúa como inhibidor de la corrosión. Generalmente se emplea junto con otros pigmentos inertes más

baratos (por ejemplo barita) que mejoran las características de aplicación del recubrimiento sin que varíen sus propiedades protectoras. La pequeña cantidad de itárgirio presente en él ayuda a disminuir la permeación de humedad en la película formada.

Blanco de plomo

El blanco de plomo o carbonato básico de plomo es uno de los pigmentos blancos que se han empleado durante más tiempo en recubrimientos exteriores. En su forma comercial consta de tres compuestos que tienen la composición $4\text{PbCO}_3 \cdot 2\text{Pb}(\text{OH})_2 \cdot \text{PbO} \cdot 2\text{PbCO}_3 \cdot \text{Pb}(\text{OH})_2$ y PbCO_3 ; se dice que reacciona con los productos de descomposición ácidos de los recubrimientos originando compuestos insolubles. Su reactividad es menor que la del rojo de plomo, pero se usa en recubrimientos anticorrosivos ya que por su naturaleza alcalina actúa como inhibidor. Apparentemente su resistencia al medio se debe a la formación de jabones básicos de plomo.

Cromato de zinc o amarillo de zinc

A continuación del rojo de plomo, este pigmento es el que más ampliamente se ha utilizado como inhibidor de corrosión; es particularmente útil en primarios para protección de aluminio y magnesio; generalmente se utiliza junto con óxido de hierro para aplicaciones sobre acero. Su fórmula corresponde a la de un tetraóxido y se expresa como: $4\text{ZnO} \cdot 4\text{CrO}_3 \cdot \text{K}_2\text{O} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, en la que el contenido de óxido de zinc se encuentra entre un 35% y 40%; de esta fórmula se han estandarizado dos composiciones con diferente contenido de cloruro y sulfato. El cromato de zinc debe sus características inhibitoras a su contenido de cromato solu-

ble y a su naturaleza ligeramente alcalina. Por sus características no puede emplearse en recubrimientos que requieran hordearse a temperaturas mayores a los 180°C o en atmósferas con alto contenido de SO_2 .

Cromato de bario - potasio

El cromato de bario-potasio es un nuevo pigmento inhibidor de la corrosión con características promisorias. Se prepara por calentamiento de dicromato de potasio junto con ácido crómico haciendo reaccionar esta mezcla con carbonato de bario a 650°C . Por su solubilidad es una fuente de iones cromato en concentraciones mayores a las de otros pigmentos que contienen cromatos. Generalmente se emplea en primarios para aluminio y magnesio, y en combinación con otros pigmentos como rojo de plomo o fosfato dibásico de plomo en aplicaciones para acero.

Oxido de hierro

El óxido de hierro es probablemente, el pigmento más antiguo conocido por el hombre y en la actualidad uno de los más ampliamente utilizados en recubrimientos anticorrosivos. Se encuentra disponible en un número considerable de formas naturales o sintéticas. Los óxidos naturales se obtienen de diversos minerales de hierro por métodos que dependen de la naturaleza del mineral; las formas más conocidas son los ocreos, sienas, pardos, hematitas, magnetitas, etc. Se conocen tres formas sintéticas; Fe_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ y Fe_3O_4 (de color rojo, amarillento y negro respectivamente) que se producen por calcinación de sales de hierro (por ejemplo sulfato ferraso) o precipitación a partir de soluciones de sales de hierro.

El óxido de hierro es opaco a la luz ultravioleta y ayuda a la formación de recubrimientos impermeables de alta durabilidad. No es un pigmento inhibidor, pero se utiliza ampliamente con otros pigmentos reactivos (por ejemplo cromatos, rojo de plomo y óxido de zinc) para mejorar las características de la película.

Oxido de zinc

El óxido de zinc se utiliza ampliamente en pinturas. Por su índice de refracción relativamente alto (2.08) y su opacidad a la luz ultravioleta, asegura una buena protección contra la destrucción fotoquímica del sustrato. Es ligeramente alcalino, por lo que tiende a neutralizar los ácidos absorbidos de atmósferas industriales y los productos ácidos de descomposición de la resina, actuando al mismo tiempo como inhibidor de corrosión. Se produce por oxidación del metal en fase vapor (proceso francés) o por calentamiento de una mezcla carbón-mineral en un horno abierto (proceso americano). Generalmente se obtiene un producto más puro del proceso francés, aunque el óxido producido mediante el proceso americano es lo suficientemente puro para su empleo como pigmento.

Mica

La mica es un mineral de hierro que se presenta en forma de hojuelas (escamas). Se emplea principalmente para reducir la permeación de humedad a través del recubrimiento. Las partículas de mica son extremadamente delgadas y por su poca o nula reactividad se utiliza como pigmento inerte para mejorar la resistencia al calor y otras propiedades físicas (por ejemplo dureza) del recubrimiento. Por lo general se emplea junto con el óxido de zinc y bióxido de titanio en proporciones que van del 12.5% al 25% del

T A B L A II.B

CLASIFICACION DE LOS PIGMENTOS CONSIDERANDO SU COLOR Y ORIGEN

<u>ORIGEN</u>	<u>COLOR</u>	<u>PIGMENTO</u>
Inorgánico	Blanco	Dióxido de Titanio
		Blanco de Plomo
		Oxido de Zinc
		Sulfato de Zinc
		Barita
		Tiza
		Talco
		Mica
Inorgánico	Negro	Oxido de Hierro
		Siéna
Inorgánico	Amarillo, Ocre	Cromato de Plomo
		Cromato de Zinc
		Oxido de Hierro
		Amarillo de Cadmio
Inorgánico	Rojo	Oxido de Hierro
		Rojo de Cadmio
		Rojo de Plomo
Orgánico	Azul	Ftalocianato de Cobre
Orgánico	Verde	Nitro Naftol de Hierro
		Ftalocianato de Cobre Clorados

T A B L A II.B

(CONTINUACION)

ORIGEN	COLOR	PIGMENTO
Orgánico	Amarillo	Amarillos Benzidínicos Pigmentos Azóicos
Orgánico	Naranja	Naranjas Benzidínicos Dinitroanilina
Orgánico	Rojo	Naftol Taluidinas Rojo Azóico
Orgánico	Negro	Negro Mineral Negro Humo Grafito

REF.: BURNS, R.M.

PROTECTIVE COATINGS FOR METAL.

peso total de pigmento requerido.

c) Aditivo de flujo

Los aditivos de flujo son solventes orgánicos de elevado punto de ebullición que se emplean en los recubrimientos anticorrosivos, y en general en cualquier pintura, para ayudar a la formación de la película; se conocen también como agentes de coalescencia o formadores de película. Se emplean en recubrimientos de secado al aire o por hornos, ayudando a mejorar la uniformidad, la resistencia a la fricción, el secado, la tersura y la adhesión de la película, sin embargo si se emplean en exceso pueden afectar la estabilidad de la pintura durante el almacenamiento y el secado del recubrimiento, impidiendo además la posibilidad de aplicar una nueva capa de recubrimiento.

Existen muchos materiales que pueden utilizarse como aditivos de flujo, sin embargo, por sus características, los que a continuación se enumeran, son los más comúnmente empleados:

Carbital

Acetato de Carbital

Hexilenglicol

Acetato de Butil Celiosolve

Acetato de Butil Carbital

De éstos, el que mejores resultados ha dado es el hexilenglicol empleándose tanto para recubrimientos exteriores (0.5% en peso) como para recubrimientos anticorrosivos (0.1% en peso).

d) Solubilizador

El solubilizador más comúnmente empleado en recubrimientos anticorrosivos para aplicación por electrodeposición catódica, es el ácido acético. Este ácido (CH_3COOH) es un líquido incoloro de punto de fusión elevada que se expone comercialmente con el nombre de ácido acético glacial (99.5% de pureza). Se obtiene, con un excelente rendimiento, por oxidación de acetaldehído a 80°C , en presencia de acetato de manganeso.



Por su bajo valor de constante de disociación (1.8×10^{-5}) se considera un ácido débil lo que implica que, al reaccionar con los radicales amínicos de la resina y neutralizarlos, se genera un efecto amortiguador que, en parte, sirve para controlar el pH del baño. Además, por su debilidad no es de esperarse un ataque violento sobre las partes metálicas que se recubren o sobre el equipo que se emplea para el proceso.

Al igual que con los otros componentes del primario, es necesario cuidar la pureza del solubilizador para impedir la presencia de sustancias, sobre todo del tipo iónico, en el baño de electrodeposición.

e) Fungicidas o bactericidas

Todos los recubrimientos de tipo acuoso se ven sujetos al ataque de hongos y bacterias durante su almacenamiento y una vez aplicados. Estos microorganismos requieren para existir de humedad; nutrientes y una temperatura adecuada;

bajo estas condiciones y en ausencia de sustancias inhibidoras, se multiplican, con el resultado final de la destrucción del recubrimiento.

En cualquier pintura acuosa el vehículo orgánico (resina) puede ser el principal nutriente de microorganismos; cuando éstos se multiplican sin control, se presenta una acción enzimática que puede provocar disminución de la viscosidad, olores desagradables, protuberancias en recipiente que contiene la pintura, cambios de pH, y en general, variaciones en las propiedades del recubrimiento; además, los hongos atacan a las películas aplicadas, una vez secas, formando depósitos oscuros, a menudo confundidos con mugre, que provocan fallos prematuras y pérdida de adhesión del recubrimiento.

Los compuestos empleados como bactericidas o fungicidas deben tener una alta eficiencia antimicrobiana debiendo actuar, al mismo tiempo, sobre la amplia gama de microorganismos capaces de atacar a los recubrimientos, sin tener efectos nocivos sobre la pintura. Los de mayor uso en la actualidad son:

Orto-fenil-fenolato de sodio.

Pentaclorofenolato de sodio.

Fenil-acetato de mercurio.

En cualquier tipo de recubrimiento, estas sustancias se usan generalmente en proporción no mayor al 0.1% en peso.

f) Agua

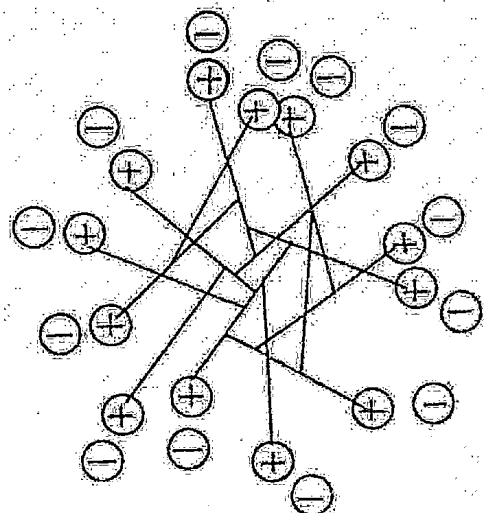
El agua es el componente que se encuentra en mayor propor-

ción en la formulación del primario, ofreciendo importan-
tes ventajas sobre los solventes orgánicos que se utilizan
en algunos recubrimientos. Por su relativa abundancia re-
sulta más barata que los solventes y su uso elimina riesgos
de intoxicación o fuego. Debido a su naturaleza, es compa-
tible con especies polares o iónicas, lo que permite su em-
pleo como dispersante o solvente, e independientemente de
su amplísima utilización en todas las ramas industriales,
ha implicado una gran aceptación en el campo de recubrimien-
tos.

Para el caso particular de los recubrimientos para aplica-
ción por electrodepósito es indispensable un control es-
tricto sobre el agua que se utiliza ya que cualquier impu-
reza o contaminación, sobre todo del tipo iónico, puede al-
terar las características de conducción de la dispersión, -
evitando que se deposite correctamente el recubrimiento o
produciendo reacciones electroquímicas extrañas, capaces -
de alterar la apariencia terminal de la película, por lo -
que debe utilizarse agua desmineralizada, con una conduc-
tividad no mayor de $25 \mu \text{ohm}^{-1} \text{cm}^{-1}$, para evitar estos pro-
blemas. En otras pinturas de base acuosa no es necesario
un control excesivo, aunque es indiscutible que mientras -
mayor sea su pureza se obtendrán mejores resultados, sobre
todo en recubrimientos exteriores.

2.4.2 Estructura Física del Baño

Para comprender la estructura física de un baño de electrodepósito catódico debe recordarse que los principales componentes del primario son la resina y el pigmento asociado a ella. Como se sabe, las resinas son compuestas orgánicas (polímeros) que se forman por la concatenación de monómeros (unidades formadas por uno o más grupos orgánicos) a través de ciertos radicales en la cadena; esto implica estructuras sumamente largas de peso molecular elevado. En las resinas catódicas, la presencia de grupos amínicos, susceptibles de neutralizarse, supone cierta afinidad del polímero con el agua, sin embargo, la elevada longitud de la cadena hidrofóbica hace al sistema termodinámicamente inestable. En ausencia de fenómenos adicionales el sistema resina-agua tendería a minimizar su energía, permitiendo un aumento en las interacciones resina-resina y agua-agua, y disminuyendo las interacciones resina-agua, lo que promovería la precipitación del polímero. Empero, es un hecho experimental que por encima de cierto valor de concentración es posible la formación de conglomerados o micelas a partir de las moléculas de resina. Este fenómeno conlleva una variación acusada de algunas propiedades de la dispersión, por ejemplo, conductividad eléctrica, tensión superficial, turbidez, presión osmótica, etc. Las micelas de resinas catódicas se forman de entre 30 y 150 moléculas individuales, y su tamaño varía entre 6 y 150nm, lo que las coloca en el rango coloidal. Por la estructura química del polímero se supone que las micelas se presentan en forma esférica, con la parte hidrofóbica de la resina dispuesta en el núcleo y los radicales amínicos, cargados positivamente, en la superficie de la micela (ver Figura II.4); esto obliga a que cierta cantidad de aniones



— ⊕ MOLECULAS DE RESINA
 — ⊖ ANION DE SOLUBILIZADOR

REF.: PIERCE, PERCY E.
 CATHODIC ELECTRODEPOSITION.

TESIS PROFESIONAL, S. S. S.	
REPRESENTACION ESQUEMATICA	
DE UNA MICELA DE RESINA	
CATODICA	FIGURA II.4

de solubilizador se localicen en las inmediaciones de la micela dando lugar a una doble capa eléctrica.

El tamaño de la micela queda determinado por el número de grupos amínicos cargados presentes en la estructura de la resina; al aumentar se incrementarán las repulsiones eléctricas entre ellos y, al mismo tiempo, crecerá la tendencia de la micela a dispersarse en el agua, por lo tanto, el diámetro de ésta será relativamente pequeño. Es de esperarse que al disminuir el número de radicales amínicos aumente el tamaño de la micela.

La importancia de la estructura coloidal de los baños de electrodeposición se refleja en una operación que ha permitido la escalación del proceso a nivel industrial. Esta operación, la ultrafiltración, se fundamenta en el empleo de membranas cuyo diámetro de poro es superior a la longitud de una molécula individual de resina, pero menor que el diámetro de la micela, lo que permite separar la parte líquida del primario y emplearla para enjuagar las piezas que se recubren, en un sistema cerrado que disminuye las pérdidas de material y evita consumos excesivos de agua para enjuague.

2.5 KINETICA Y MECANISMO DEL PROCESO DE ELECTRODEPOSITO

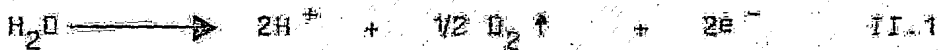
2.5.1 Fenomenología del Proceso para un Primario Catódico

Como se mostró en el punto 2.3 de este capítulo, el proceso de electrodeposición involucra una serie de fenómenos físicos y electroquímicos. En el caso de un primario catódico, éstos ocurren en el siguiente orden;

- a) Migración de las partículas de resina, cargadas positivamente, hacia el cátodo y migración de los aniones de solubilizador hacia el ánodo, por influencia del campo eléctrico existente entre los electrodos.

Simultáneamente, descomposición electrolítica del agua:

Reacción anódica:



Reacción catódica:

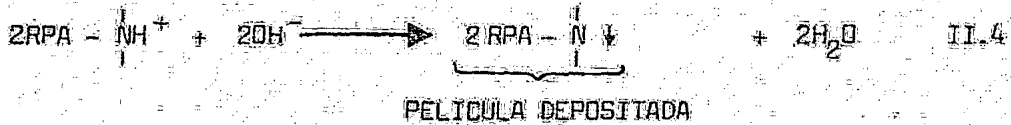


- b) Formación en el cátodo de la película de resina pigmentada y formación en el ánodo del ácido correspondiente a los aniones de solubilizador:

Reacción anódica:



Reacción catódica:

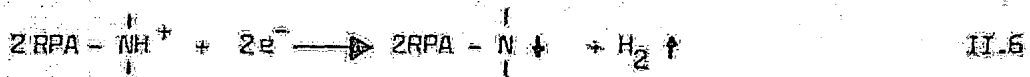


Las siglas RPA representan a una partícula de resina y a las partículas de pigmento que tiene asociadas; el radical amónico se encuentra unido exclusivamente a la molécula de resina.

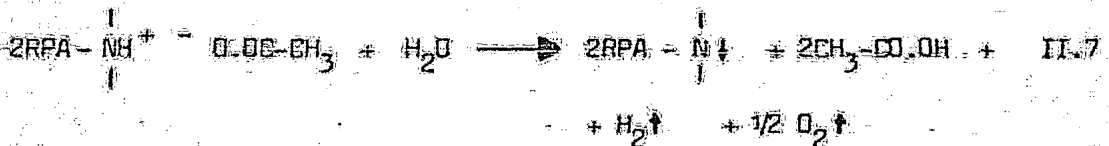
El cambio electroquímico total en el ánodo es la suma de las reacciones II.1 y II.3.



Para el cátodo, es la suma de las reacciones II.2 y II.4.



Y el cambio electroquímico neto en todo el sistema es la suma de las reacciones II.5 y II.6.



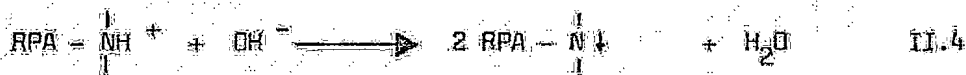
c) Electroósmosis

Debido al alto gradiente de voltaje a través de la película no conductora se produce un fenómeno conocido como electroósmosis por el cual, el agua y los aniones entran

pados en el depósito migran hacia el ánodo, siendo expulsados de la película. Esto permite la formación del depósito con un bajo contenido de agua, generalmente menor de 10%.

2.5.2 Capa Fronteriza del Cátodo

Se ha demostrado experimentalmente que el electrodepósito no comienza en el momento en que inicia el flujo de corriente en el circuito; se requiere un tiempo finito (tiempo de inducción) para establecer, en la capa fronteriza del cátodo, las condiciones adecuadas para la formación del depósito, lo que ocurre según la reacción:



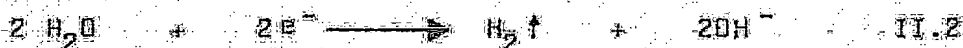
Cuya constante de equilibrio puede expresarse como :

$$K_{eq} = \frac{1}{\left[\text{RPA} - \underset{\text{I}}{\text{NH}^+} \right] \left[\text{OH}^- \right]} \quad \text{II.8}$$

o bien

$$K'_{eq} = \left[\text{RPA} - \underset{\text{I}}{\text{NH}^+} \right] \left[\text{OH}^- \right] \quad \text{II.9}$$

El equilibrio en la reacción II.4 se establece al iniciarse la formación del depósito; esto sucederá (según lo muestran las ecuaciones II.8 y II.9) hasta que en las inmediaciones del cátodo se alcance una concentración crítica de iones OH^- , mismos que se generan por la descomposición electrolítica del agua en este electrodo:



El número de iones hidroxilo producidos dependerá de la densidad de corriente en el circuito. De la primera ley de Faraday.

$$N_{OH^-} = \frac{j t}{F} \quad \text{II.10}$$

donde:

- N_{OH^-} = cantidad producida de iones OH^- ; eq/cm².
 j = Densidad de corriente; amperes/cm².
 t = Tiempo; segundos.
 F = Constante de Faraday; 96500 coulombs/eq.

A su vez, el tiempo requerido para alcanzar la concentración crítica de iones hidroxilo (tiempo de inducción) dependerá de la rapidez de formación de estos iones.

Derivando la ecuación II.10 respecto al tiempo:

$$V_{OH^-} = \frac{d N_{OH^-}}{dt} = \frac{j}{F} \quad \text{II.11}$$

donde:

- V_{OH^-} = Velocidad de formación de los iones OH^- ; eq/cm² seg.
 j = Densidad de corriente; amperes/cm².
 F = Constante de Faraday; 96500 coulombs/eq.

Se ha encontrado empíricamente que, a densidad de corriente constante, el producto de la raíz cuadrada del tiempo de inducción y la densidad de corriente, es una constante:

$$j \theta^{1/2} = K \quad \text{II.12}$$

donde:

j = Densidad de corriente; amperes/cm².

θ = Tiempo de inducción; seg.

K = Constante de proporcionalidad; amperes seg^{1/2}/cm².

Esta constante experimental es una característica de cada primario ya que depende exclusivamente de sus propiedades; de su valor, puede calcularse el tiempo de inducción a cualquier densidad de corriente:

$$\theta = \left[\frac{K}{j} \right]^2 \quad \text{II.13}$$

La ecuación II.13 puede aplicarse también en el caso de electrodepósito a voltaje constante ya que, mientras no comience a formarse la película, la densidad de corriente se mantiene constante en el circuito.

2.5.3 Cinética del Electrodepósito Catódico

Como se mencionó, el electrodepósito puede efectuarse en condiciones de densidad de corriente constante o voltaje constante. A continuación se presenta la ecuación general

de crecimiento de la película y las ecuaciones particula-
res aplicables a cada caso.

a) Ecuación general de crecimiento de la película

La cantidad de resina y pigmento asociado que se deposita-
en el cátodo puede evaluarse de la primera ley de Faraday:

$$NRPA = \frac{jt}{F} \quad \text{II.14}$$

donde:

$NRPA$ = Equivalentes de resina depositados; eq/cm^2 .

j = Densidad de corriente; amperes/ cm^2 .

t = Tiempo; seg.

F = Constante de Faraday; 96500 coulombs/eq.

Cada molécula de resina catódica tiene varios radicales -
amínicos, de los cuales sólo una parte han sido neutraliza-
dos y tienen carga positiva al dispersarse en agua. Por -
lo tanto, si se desea determinar la masa depositada, debe-
conocerse el número de cargas o equivalentes por gramo de-
resina:

$$MRPA = \frac{NRPA}{m} \quad \text{II.15}$$

donde:

M_{RPA} = Masa depositada de resina; g/cm^2 .

N_{RPA} = Equivalentes de resina depositados; eq/cm^2 .

m = Equivalentes por gramo de resina; eq/g .

En la práctica resulta más útil conocer la variación del espesor de la película respecto al tiempo. Multiplicando por el término m y dividiendo entre la densidad de la película ambos miembros de la ecuación II.14 se obtiene:

$$\frac{N_{RPA} m}{\rho_p} = \frac{jt m}{F \rho_p} \quad \text{II.16}$$

donde:

$$\frac{N_{RPA} m}{\rho_p} = S \quad \text{II.17}$$

y:

$$\frac{m}{F \rho_p} = E \quad \text{II.18}$$

S = Espesor de la película; cm .

N_{RPA} = Equivalentes depositados de resina; eq/cm^2 .

m = Equivalentes por gramo de resina; eq/g .

ρ_p = Densidad de la película depositada; g/cm^3 .

E = Eficiencia Coulombica; $cm^3/coulomb$.

F = Constante de Faraday; 96500 coulombs/eq.

La ecuación II.16 puede reducirse a la forma:

$$S = C j t \quad \text{II.19}$$

El valor de la eficiencia coulombica (C) es una característica propia de cada primario y representa la cantidad de resina y pigmento asociado depositados por cada coulomb de electricidad que circula en el sistema; su valor debe determinarse experimentalmente.

Derivando la ecuación II.19 respecto al tiempo:

$$\frac{dS}{dt} = C j \quad \text{II.20}$$

donde:

$\frac{dS}{dt}$ = Rapidez de crecimiento de la película respecto al tiempo; cm/seg.

C = Eficiencia coulombica; cm³/coulomb.

j = Densidad de corriente; amperes/cm².

Esta expresión se conoce como ecuación general de crecimiento de la película y relaciona la rapidez de aumento en su espesor con las características del primario y la cantidad de corriente que fluye en el circuito.

b) Electrodeposición a intensidad de corriente constante. Tal como lo muestra la ecuación general, la rapidez de creci-

miendo de la película es sólo función de la densidad de corriente y es independiente de las variaciones de voltaje que puedan presentarse en el circuito. Integrando la ecuación II.20, considerando que la densidad de corriente se mantiene constante, se obtiene:

$$\int_0^S dS = c j \int_{\theta}^t dt \quad \text{II.21}$$

$$S = c j (t - \theta) \quad \text{II.22}$$

donde:

S = Espesor de la película; cm.

c = Eficiencia coulombica; $\text{cm}^3/\text{coulomb}$.

j = Densidad de corriente; amperes/ cm^2 .

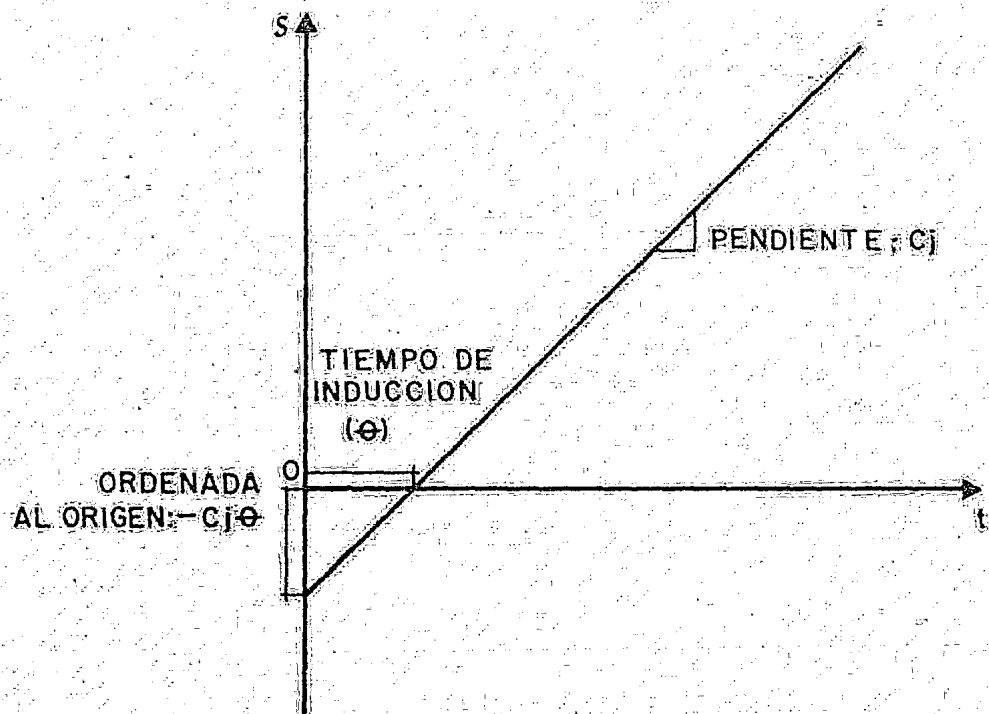
t = Tiempo; seg.

θ = Tiempo de inducción; seg.

La última expresión permite calcular el espesor de la película a cualquier tiempo, después del tiempo de inducción, mostrando además que el espesor aumentará en forma directamente proporcional con el tiempo de depósito. La curva teórica de esta ecuación se muestra en la figura II.5.

Como se indicó, si la densidad de corriente se mantiene constante en el circuito, el voltaje aumentará con el tiempo. De la ley de Ohm:

$$j = \frac{k_p V}{S} \quad \text{II.23}$$



TESIS PROFESIONAL . S . S . S .	
ESPESOR vs. TIEMPO PARA UN	
ELECTRODEPOSITO A INTENSIDAD DE	
CTE. CONSTANTE.	FIGURA II . 5

donde:

j = Densidad de corriente; amperes/cm².

k_p = Conductividad de la película; (ohm cm)⁻¹.

V = Voltaje aplicado; volts.

S = Espesor de la película; cm.

Resolviendo para el voltaje:

$$V = \frac{j S}{k_p} \quad \text{II.24}$$

y sustituyendo la expresión para el espesor de la película (ecuación II.22) se obtiene que:

$$V = \frac{C j^2}{k_p} (t - \theta) \quad \text{II.25}$$

donde:

V = Voltaje; volts.

C = Eficiencia coulombica; cm³/coulomb.

j = Densidad de corriente; amperes/cm².

k_p = Conductividad de la película; (ohm cm)⁻¹.

t = Tiempo; seg.

θ = Tiempo de inducción; seg.

Lo que demuestra que el voltaje aumentará en forma directamente proporcional con el tiempo (ver figura II.6).

c) Electrodeposición a voltaje constante

En este caso, dado que el voltaje se mantiene constante, es de esperarse una disminución de la densidad de corriente al aumentar el espesor de la película; esta consideración impide la integración directa de la ecuación II.20.

Sustituyendo la ecuación II.23 en la ecuación general y reordenando se obtiene:

$$S \frac{dS}{dt} = C k_p V \quad \text{II.26}$$

Integrando la ecuación anterior:

$$\int_0^S S dS = C k_p V \int_{\theta}^t dt \quad \text{II.27}$$

$$\frac{S^2}{2} = C k_p V (t - \theta) \quad \text{II.28}$$

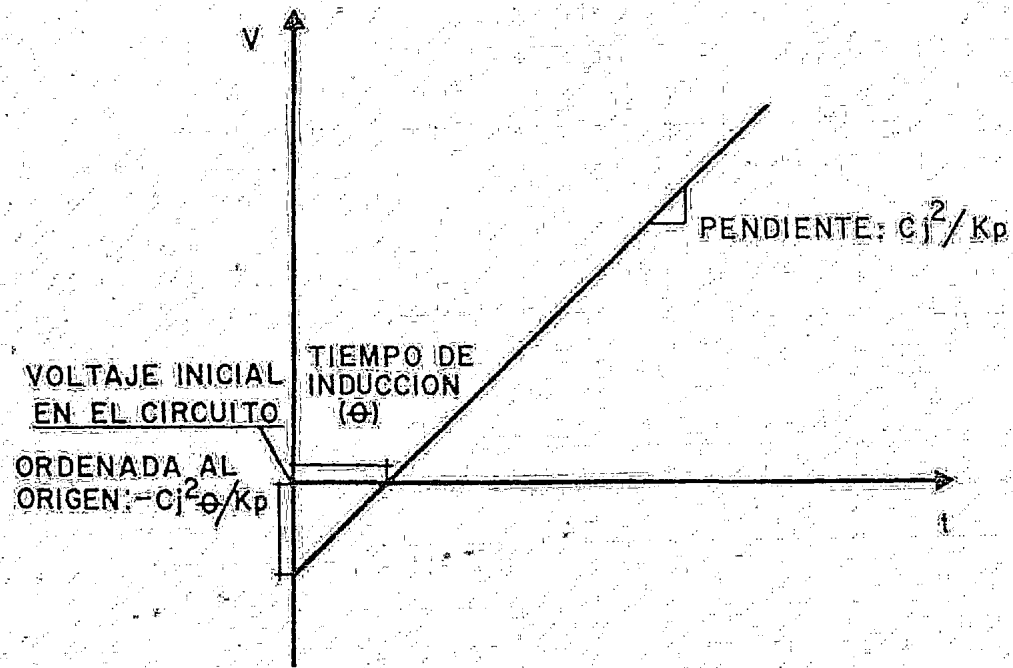
$$S = (2C k_p V)^{1/2} (t - \theta)^{1/2} \quad \text{II.29}$$

donde:

S = Espesor de la película; cm.

C = Eficiencia coulombica; $\text{cm}^3/\text{coulomb}$.

k_p = Conductividad de la película; $(\text{ohm cm})^{-1}$.



TESIS PROFESIONAL . S . S . S .	
VOLTAJE vs. TIEMPO PARA UN ELEC.	
TRODEPOSITO A INTENSIDAD DE CO.	
RIENTE CONSTANTE	FIGURA II.6.

V = Voltaje; volts.

t = Tiempo; seg.

θ = Tiempo de inducción; seg.

La última ecuación permite calcular el espesor de la película a cualquier tiempo, después del tiempo de inducción, si el electrodepósito se efectúa a voltaje constante. Fue de observarse que el espesor de la película aumenta en forma proporcional con la raíz cuadrada del tiempo. La curva teórica de esta relación se muestra en la figura II.7.

Para conocer la disminución de la densidad de corriente con el tiempo se puede sustituir la ecuación II.29 en la ecuación II.23 obteniéndose:

$$j = \frac{\left[\frac{k_p V}{2C} \right]^{1/2}}{(t - \theta)^{1/2}} \quad \text{II.30}$$

donde :

j = Densidad de corriente; amperes/cm².

k_p = Conductividad de la película; (ohm cm)⁻¹.

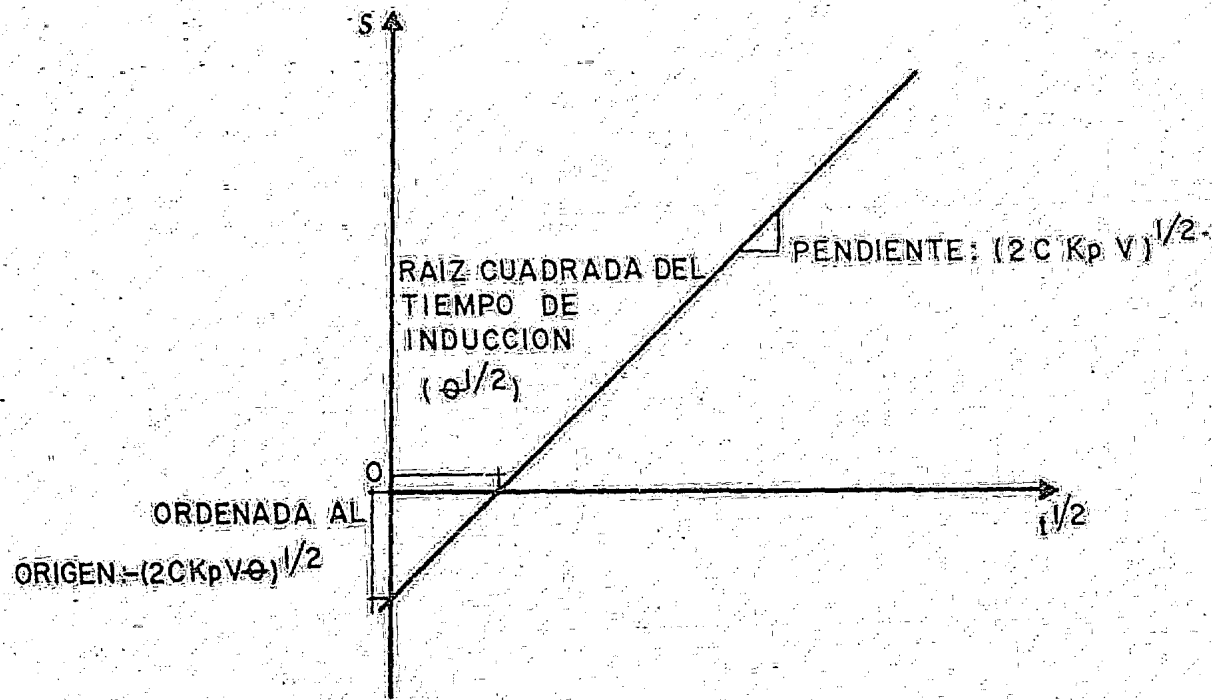
V = Voltaje; volts.

C = Eficiencia coulombica; cm³/coulomb.

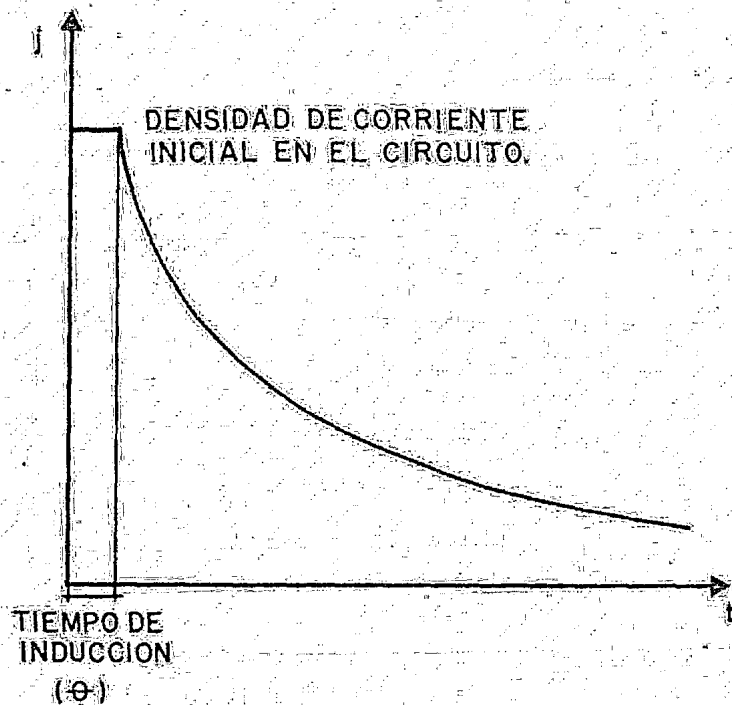
t = Tiempo; seg.

θ = Tiempo de inducción; seg.

Esta relación implica una disminución de la densidad de corriente con el inverso de la raíz cuadrada del tiempo, tal como se muestra en la figura II.8.



TESIS PROFESIONAL, S. S. S.	
ESPESOR vs. TIEMPO PARA UN ELECTRODEPOSITO A VOLTAJE	
CONSTANTE	FIGURA II.7



TESIS PROFESIONAL . S. S. S.

DENSIDAD DE CORRIENTE vs. TIEMPO

PARA UN ELECTRODEPOSITO A VOL

TAJE CONSTANTE | FIGURA II. 8

2.6 COMPROBACION EXPERIMENTAL DEL MODELO CINETICO PROPUESTO PARA EL ELECTRODEPOSITO A VOLTAJE CONSTANTE

2.6.1 Antecedentes

Tal como se mostró en el punto anterior de este capítulo, es posible aplicar los primarios catódicos y anódicos efectuando el electrodeposito en condiciones de densidad de corriente constante o voltaje constante. En ambos casos el espesor de la película de recubrimiento es una función del tiempo y de otros parámetros que dependen exclusivamente del primario con que se trabaja; estos parámetros son la eficiencia coulombica, y la conductividad eléctrica de la película y deben determinarse en forma experimental.

Por otro lado, la ecuación general de crecimiento de la película (ec. II.20), derivada directamente de la 1a. Ley de Faraday, no incluye la posible existencia de otros fenómenos, (adicionales a los ya considerados en la fenomenología del proceso, punto 2.5.1), que pueden afectar sensiblemente el desarrollo del proceso de electrodeposito y por ende, las características terminales de la película o del recubrimiento. Los fenómenos referidos son fundamentalmente la conducción no óhmica a través de la película, la formación de películas porosas y la presencia de corrientes de disolución; cada uno de ellos implica diferentes modelos cinéticos para el proceso.

Por todo lo anterior, y considerando los objetivos de este trabajo, resulta conveniente establecer a nivel experimental, si el modelo propuesto se ajusta a la realidad, para el mismo primario catódico que se considerará en el diseño de la unidad de aplicación por electrodeposito sobre carro

cerías, o si debe corregirse el modelo considerando algún fenómeno adicional; conociendo lo anterior pueden determinarse los valores de eficiencia coulombica y conductividad eléctrica de la película para el primario y aplicar esta información junto con el modelo cinético correcto al diseño de la unidad.

Cabe anticipar que los modelos modificados se estudiarán sólo en caso de que el propuesto no resulte ser el correcto.

2.6.2 Diseño del Experimento

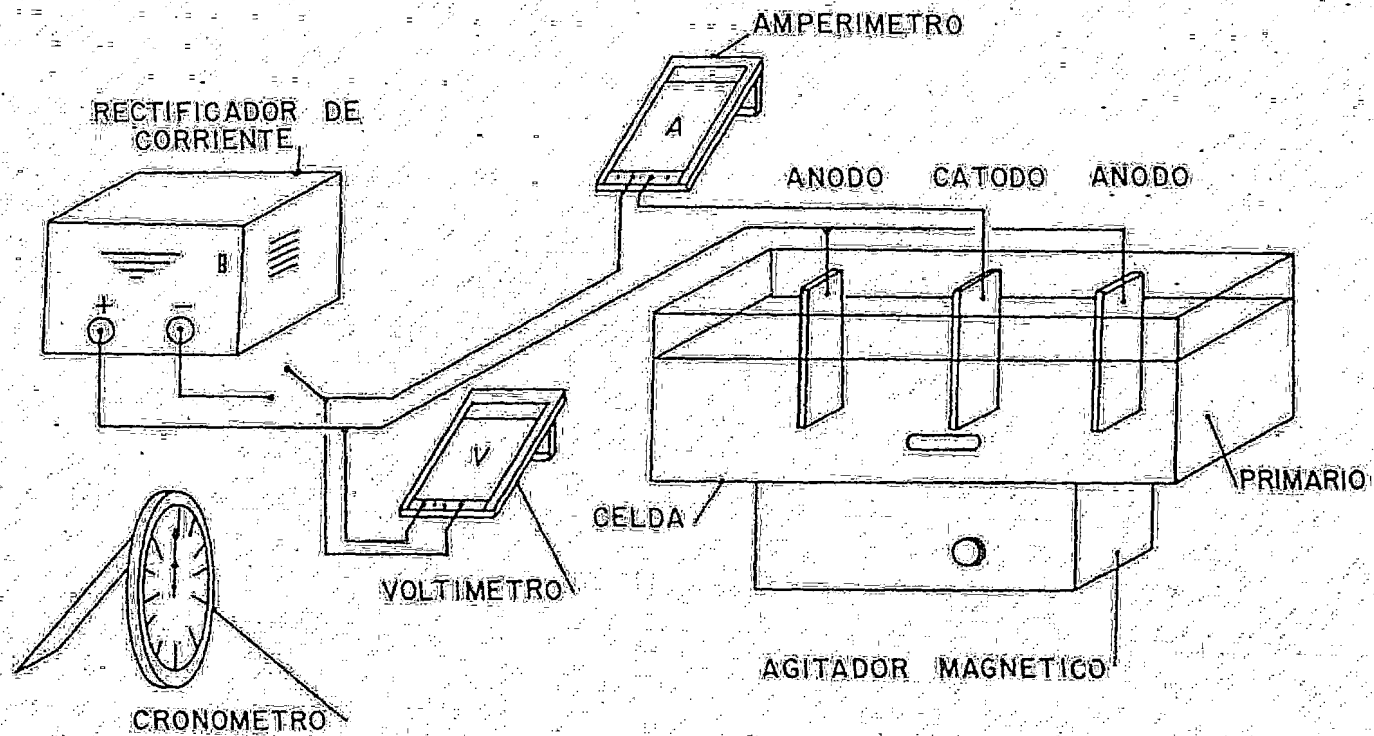
De acuerdo a lo establecido se consideró como objetivo del experimento la comprobación del modelo cinético propuesto y la determinación de los parámetros característicos de un primario catódico típico para aplicación por electrodeposición a voltaje constante sobre cerrocerías. Para el efecto se construyó el sistema mostrado en la figura II.9 mismo cuyas características se describen a continuación:

Rectificador de corriente

Este equipo permite obtener un flujo de corriente directa de voltaje constante a partir de corriente alterna de voltaje constante. En resumen, está constituido de un transformador, que permite obtener el voltaje de salida deseado, seguido de un banco de diodos (elementos rectificadores de corriente). Las condiciones de operación del equipo construido para el experimento fueron:

Alimentación: 120V CA 60Hz.

Salida : 398V 5amp CD vacío
370V 5amp CD carga.



TESIS PROFESIONAL. S. S. S.

MONTAJE DE EQUIPO PARA LA

RELIZACION DEL EXPERIMENTO.

FIGURA II.9

Para determinar las condiciones de operación del rectifica-
dor (y de hecho sus características de construcción) se
partió de la recomendación del proveedor del primario de
aplicarlo a un voltaje entre 300 y 375 volts. Originalmen-
te, se especificó el equipo para que el voltaje de salida-
fuera 350 volts, (valor ideal indicado por el proveedor),
pero al operarlo el valor promedio medido fue de 370 volts,
lo cual no afectó los resultados experimentales, ya que es-
te valor se encuentra en el rango recomendado por el pro-
veedor del primario. La demanda de corriente se determinó
bajo la suposición de que al iniciarse el flujo de corrien-
te en el circuito la única resistencia presente es la debi-
da al primario en el baño.

En estas condiciones, y conociendo las dimensiones de los
electrodos y el área inmersa de los mismos (ver figura -
II.10), se calculó la resistencia total en la celda al ini-
cio del depósito. Un dato adicional requerido es la conduc-
tividad eléctrica del primario empleado, la cual es de
 $1 \times 10^{-3} \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$.

$$R = \frac{1}{k} \times \frac{L}{A}$$

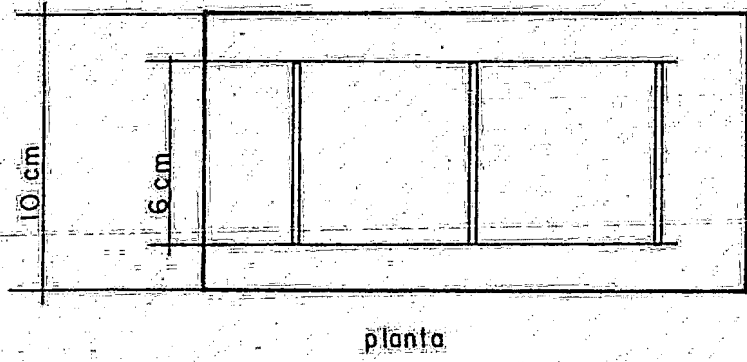
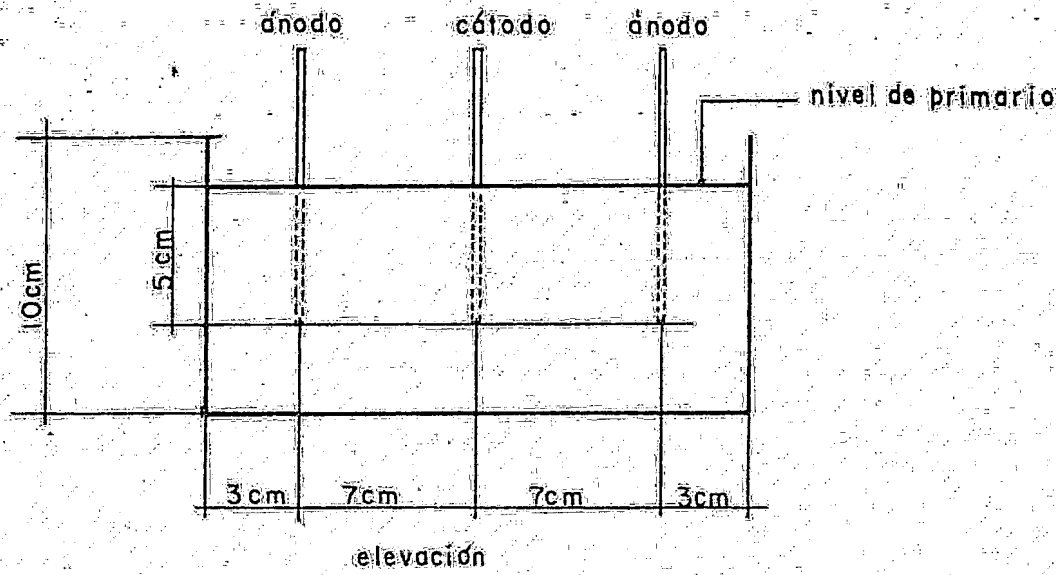
donde:

R = Resistencia; ohm.

k = Conductividad eléctrica del primario; 1×10^{-3}
 $\text{ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$.

L = Separación entre el ánodo y el cátodo; 7 cm.

A = Área inmersa de los electrodos; $5 \text{ cm} \times 6 \text{ cm} = 30 \text{ cm}^2$.



TESIS PROFESIONAL, S. S. S.	
DISTRIBUCION DE DIMENSIONES	
EN LA GELDA	
	FIGURA II.10

$$R = \frac{\text{ohm} \cdot \text{cm}}{1 \times 10^{-3}} \times \frac{7 \text{ cm}}{30 \text{ cm}^2}$$

$$R = 230 \text{ ohm}$$

Dado que la celda se compuso de dos ánodos y un cátodo se tiene un sistema de dos resistencias que por la forma en como se conectaron (ver figura II.9) se encontraban en paralelo; en este caso:

$$R_T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

donde:

R_T = Resistencia total de la celda; ohm.

R_1 o R_2 = Resistencia del primario entre cada par ánodo cátodo; 230 ohm.

como:

$$R_1 = R_2 = R$$

$$R_T = \frac{R}{2}$$

$$R_T = \frac{230 \text{ ohm}}{2}$$

$$R_T = 115 \text{ ohm.}$$

de aquí, la intensidad de corriente inicial en el circuito es de

$$I = \frac{V}{R_T}$$

donde:

I = Intensidad inicial de corriente en el circuito; amp.

V = Voltaje en el circuito; 370 volts.

R_T = Resistencia total en el circuito; 115 ohm.

$$I = \frac{370 \text{ volts}}{115 \text{ ohm}}$$

$$I = 3.22 \text{ amp.}$$

Se escogió el valor de 5 amp para proteger al circuito -- del posible efecto de la polarización.

Celda de vidrio

La celda se construyó con vidrio de 6 mm de espesor con una capacidad para contener un volumen de primario de aproximadamente 2 lts. Las dimensiones escogidas para la celda -- fueron:

Longitud: 20 cm.

Altura: 10 cm.

Ancho: 10 cm.

Cátodo

Sobre este electrodo se efectuó el depósito de recubrimiento, ya que se trabajó con un primario catódico. Se emplea con cátodos de acero al carbón de 10 cm. de longitud por 6 cm. de ancho. Al introducirlos al baño de electrodeposición, se procuró que aproximadamente el 50% de su superficie se encontrará inmersa en el baño.

Anodos

Se emplearon ánodos de acero inoxidable 316 con objeto de evitar la disolución de los mismos y la consecuente contaminación del baño por la presencia de especies iónicas extrañas. Se instalaron dos, uno a cada lado del cátodo para permitir una aplicación homogénea del primario sobre el cátodo. La longitud de los ánodos empleados fue de 10 cm. con un ancho de 6 cm.

Voltímetro

Aunque nominalmente el rectificador de corriente es capaz de mantener un voltaje constante en el circuito, se prefirió adicionar un voltímetro digital, con rango de medición de 0 a 500 volts, con objeto de medir las posibles variaciones de potencial debidas a la polarización de los electrodos.

Amperímetro

Se empleó un amperímetro digital con rango de medición de 0 a 2000 mA.

Cronómetro

Se utilizó un cronómetro analógico de reposición manual, con una precisión de un segundo.

Agitador magnético

Este aparato se empleó para homogeneizar el baño antes de iniciar el experimento y durante la aplicación del recubrimiento para evitar tanto la sedimentación de los componentes del primario como variaciones en su composición.

Primario

El primario empleado es uno de los más comúnmente utilizados para aplicación por electrodepósito catódico sobre carrocerías. Está elaborado a base de resina epóxica (16% peso), pigmentos (4% peso), y agua más aditivos (80% peso). Se dispuso de una muestra de aproximadamente 3.5 l de la cual se emplearon poco menos de 2 l en la celda. Como ya se mencionó el proveedor de primario recomienda que éste se aplique en un voltaje de entre 300 y 375 volts. El valor medido de la conductividad eléctrica del primario fue de $1 \times 10^{-3} \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$.

2.6.3 Técnica experimental

Se emplearon ocho cátodos (testigos) mismos que fueron pretratados químicamente tal como se indica en el punto 2.2 de este capítulo. Esta parte del experimento se efectuó en la planta de pintura de Ford Motor Co., Unidad Cuatitlán, la cual cuenta con instalaciones automatizadas para aplicación del pretratamiento y del primario sobre carrocerías de automóviles y camiones. Los testigos se colgaron en una de las partes más expuestas de una carrocería, y se hicieron pasar, junto con ella, por todos y cada uno de los pasos del pretratamiento; después del último paso se retiraron de la carrocería y se conservaron en un recipiente con agua desmineralizada.

Antes de iniciar el experimento se llenó la celda con primario hasta aproximadamente el 70% de su capacidad y se montaron los ánodos a las distancias especificadas; a continuación se inició la agitación del primario misma que se conservó durante todo el experimento. Para ensayar la forma como se realizarían las mediciones, se tomó uno de los-

testigos, se secó con aire y se conectó al circuito en la forma propuesta, permitiéndose la continuación que se formara el depósito de primario, al circular corriente en la celda, por espacio de tres minutos. De lo observada, se fijó el rango de medición del amperímetro y se evaluó cualitativamente la disminución de la intensidad de corriente con el tiempo; de esto último se determinó que las mediciones de intensidad de corriente se harían cada cinco segundos durante dos minutos. Los siete testigos restantes se secaron con aire y se pesaron en una balanza analítica, con una precisión de milésimas de gramo, registrándose su peso. A continuación se tomó un testigo, se conectó a la celda, se cerró el circuito y a partir de ese momento cada cinco segundos se registró la intensidad de corriente leída en el amperímetro, y se observó el voltaje aplicado. Al completarse los dos minutos se detuvo el flujo de corriente al circuito, se desconectó el testigo, se enjuagó con agua desmineralizada y se secó con aire; se registró nuevamente su peso y después se horneó por espacio de media hora en una estufa con circulación de aire caliente a una temperatura aproximada de 100°C ; al completar el horneó se pesó de nuevo el testigo y se midió y registró el espesor de la película de recubrimiento. Estas operaciones se repitieron con los seis testigos restantes. Aparte de lo anterior se midió y registró la superficie recubierta de todos los testigos.

2.6.4 Tratamiento Estadístico de los Resultados Experimentales

Para evaluar los parámetros característicos del primario y comprobar el modelo cinético propuesto, a partir de los resultados experimentales, se procedió de la siguiente forma:

a.) Determinación de la eficiencia coulombica

Este parámetro representa el volumen de recubrimiento depositado por cada coulomb que circula en el circuito, es decir

$$C = \frac{MRPA}{Q} \times \frac{1}{\rho_p}$$

donde:

C = Eficiencia coulombica; $\text{cm}^3/\text{Coulomb}$.

MRPA = Masa depositada de resina y pigmento asociado; g

Q = Carga eléctrica circulada en el circuito; Coulombs.

ρ_p = Densidad de la película depositada; g/cm^3 .

La masa depositada de resina y pigmento asociado se determinó como la diferencia en el peso del testigo después de efectuarse el depósito y hornearse menos el peso del testigo antes de realizar el depósito:

$$MRPA = MTDH - MTAO$$

donde:

MRPA = Masa depositada de resina y pigmento asociado; g

MTDH = Peso del testigo después de hornearse; g.

MTAO = Peso del testigo antes del depósito; g.

La densidad de la película de recubrimiento se evaluó de los datos de espesor de la película, área recubierta y masa depositada:

$$e_p = \frac{MRPA}{S \cdot A}$$

donde:

- e_p = Densidad de la película depositada; g/cm³.
- $MRPA$ = Masa depositada de resina y pigmento asociado; g
- S = Espesor promedio de la película; cm.
- A = Area recubierta del testigo; cm².

Por último, la carga eléctrica circulada se evaluó de la relación:

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

donde;

- I = Intensidad de corriente; amp.
- Q = Carga eléctrica; Coulombs.
- t = Tiempo; seg.

de la que al separar variables e integrar se obtiene:

$$dQ = I dt$$

$$\int_0^Q dQ = \int_0^t I dt$$

$$Q = \int_0^t I dt$$

El valor de la integral se determinó a partir de los valores medidos de intensidad de corriente y los tiempos correspondientes a cada uno, empleando la aproximación de Simpson.

b) Comprobación del modelo cinético propuesto

Para comprobar el modelo cinético propuesto se empleó la ecuación que relaciona a la densidad de corriente con el tiempo para un electrodepósito a voltaje constante (ecuación II.30) bajo la suposición de que el tiempo de inducción era despreciable; en estas condiciones:

$$j = \left[\frac{k_p V}{2C} \right]^{1/2} \frac{1}{t^{1/2}}$$

donde:

- j = Densidad de corriente; ampere/cm².
- k_p = Conductividad eléctrica de la película; ohm⁻¹ cm⁻¹.
- V = Voltaje aplicado; 370 volts.
- C = Eficiencia Coulombica; cm³/Coulomb.
- t = Tiempo; seg.

como el depósito se efectuó en condiciones de voltaje constante y los valores de la eficiencia coulombica y conductividad eléctrica de la película son también constantes:

$$\left[\frac{k_p V}{2C} \right]^{1/2} = CTE = B$$

y

$$j = Bt^{-0.5}$$

tomando logaritmos de esta expresión:

$$\ln j = \ln B - \ln t^{-0.5}$$

la cual resulta equivalente a la ecuación de una línea recta con pendiente igual a -1 y ordenada al origen igual a $-\ln B$. Las ordenadas están representadas por $\ln j$ y las abscisas por $\ln t$. Los valores de densidad de corriente se calcularon a partir de los datos de intensidad de corriente y superficie recubierta del testigo.

$$j = \frac{I}{A}$$

donde:

j = Densidad de corriente; Ampere/cm².

I = Intensidad de corriente; Ampere.

A = Superficie recubierta de los testigos; cm².

Los valores de $\ln j$ se correlacionaron con los de $\ln t^{-0.5}$ para los datos de cada testigo, pudiéndose comprobar el modelo cinético propuesto a partir de los valores obtenidos de pendiente y coeficiente de correlación para cada serie de datos.

c) Determinación de la conductividad eléctrica de la película

Este parámetro se evaluó a partir de los datos de ordenada al origen ($\ln B$) para cada curva $\ln j$ vs $\ln t^{-0.5}$, sabiendo que el voltaje se mantuvo constante, y con los datos de eficiencia coulombica determinados para cada testigo:

$$\left[\frac{k_p V}{2C} \right]^{1/2} = CTE = B$$

donde:

k_p = Conductividad eléctrica de la película; $\text{ohm}^{-1}\text{cm}^{-1}$.

V = Voltaje aplicado; 370 volts.

C = Eficiencia coulombica; $\text{cm}^3/\text{coulomb}$.

$$k_p = \frac{(e \ln 8)^2 zC}{V}$$

Además de estas determinaciones se evaluó el % de humedad en el depósito recién formado empleando la relación:

$$\% H = \frac{M_{TDD} - M_{TDH}}{M_{TDD} - M_{TAD}} \times 100$$

donde:

$\% H$ = Porcentaje en peso de humedad.

M_{TDD} = Peso del testigo después del depósito; g.

M_{TDH} = Peso del testigo después de hornearse; g.

M_{TAD} = Peso del testigo antes del depósito; g.

2.6.5 Resultados Experimentales

a) Datos de intensidad de corriente contra tiempo

I N T E N S I D A D (mA)

TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
TIEMPO (SEG)							
5	93	89	84	94	95	89	87
10	59	69	59	64	67	65	60
15	49	54	48	52	54	52	48
20	42	45	42	44	47	43	41
25	38	40	37	39	42	38	37
30	35	36	34	35	38	34	33
35	32	32	31	33	35	31	31
40	30	30	29	30	33	29	28
45	29	28	28	28	31	27	27
50	27	26	26	27	29	25	25
55	26	25	25	26	28	24	24
60	25	24	24	24	27	23	23
65	24	22	23	23	25	22	22
70	23	21	22	22	24	21	21
75	22	21	21	22	24	20	20
80	22	20	21	21	23	19	20
85	21	19	20	20	22	18	19
90	20	18	19	20	22	18	18
95	20	18	19	19	21	17	18
100	19	17	18	18	20	17	17
105	19	17	18	18	20	16	17
110	19	16	17	18	19	16	17
115	18	16	17	17	19	15	16
120	18	16	17	17	19	15	16

Estos resultados se muestran gráficamente en las figuras II.11 a II.17.

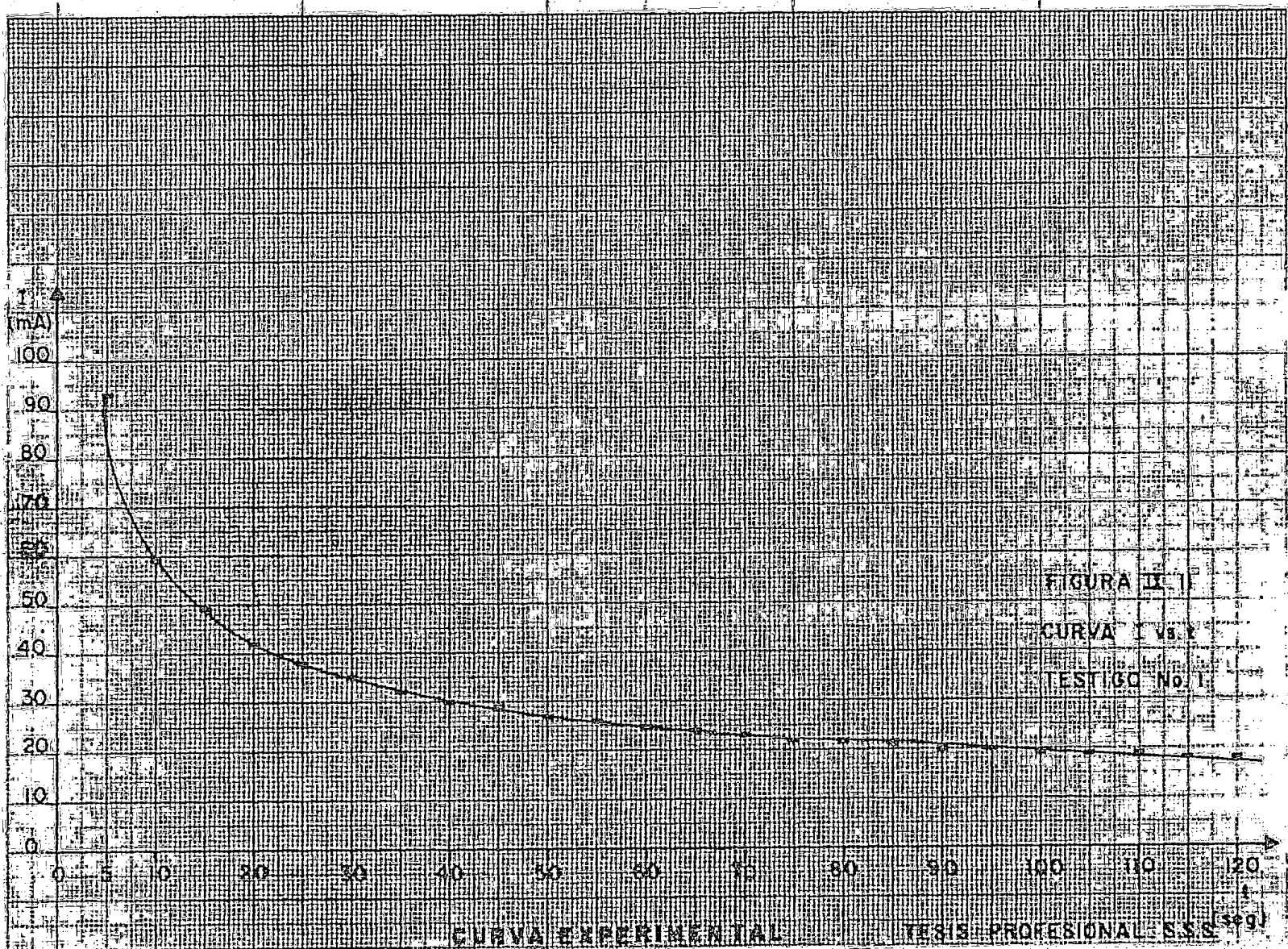


FIGURA II
CURVA vs. x
TESTIGO No. I

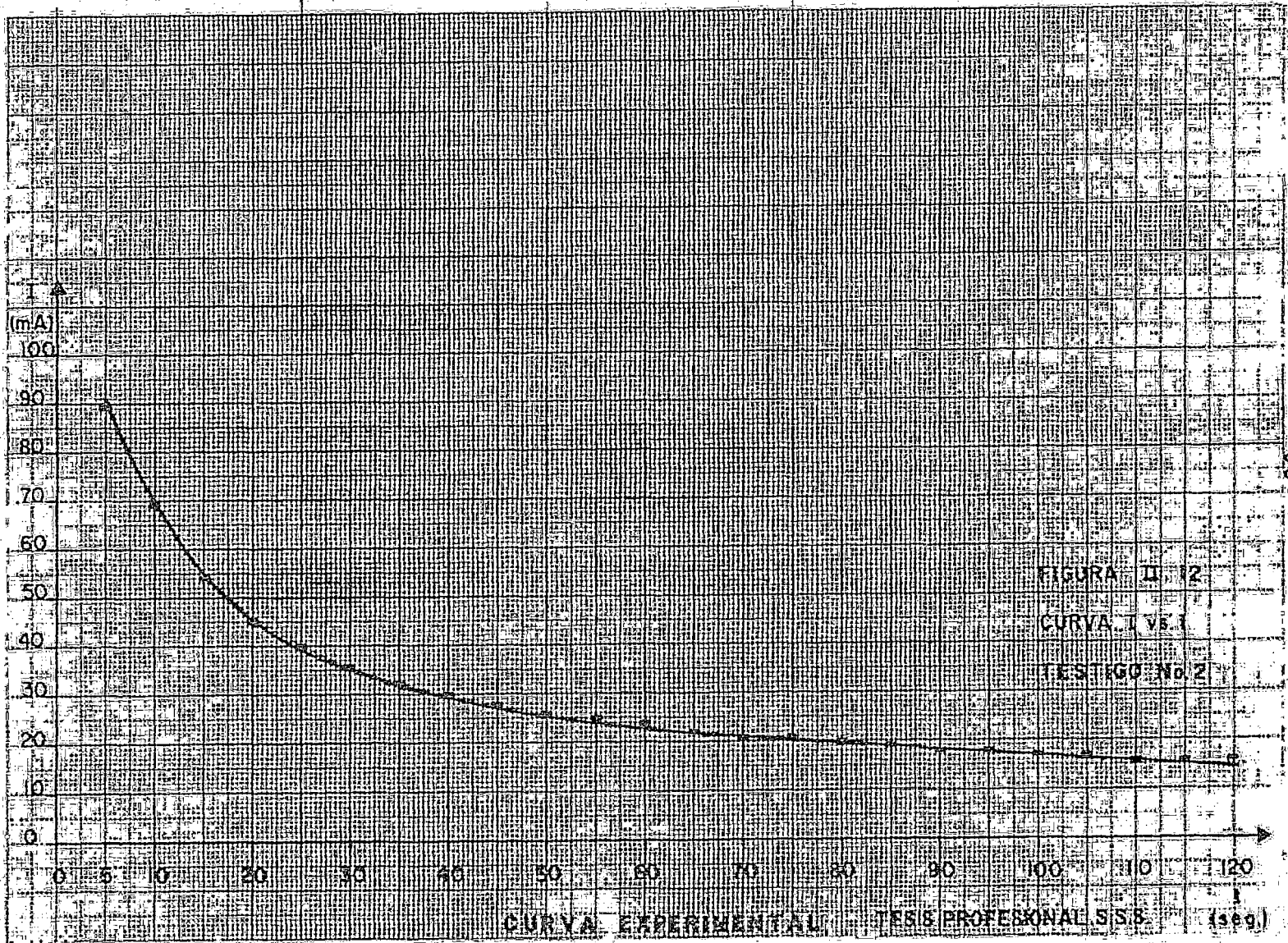


FIGURA II.12
CURVA I vs. t
TESTIGO No. 2

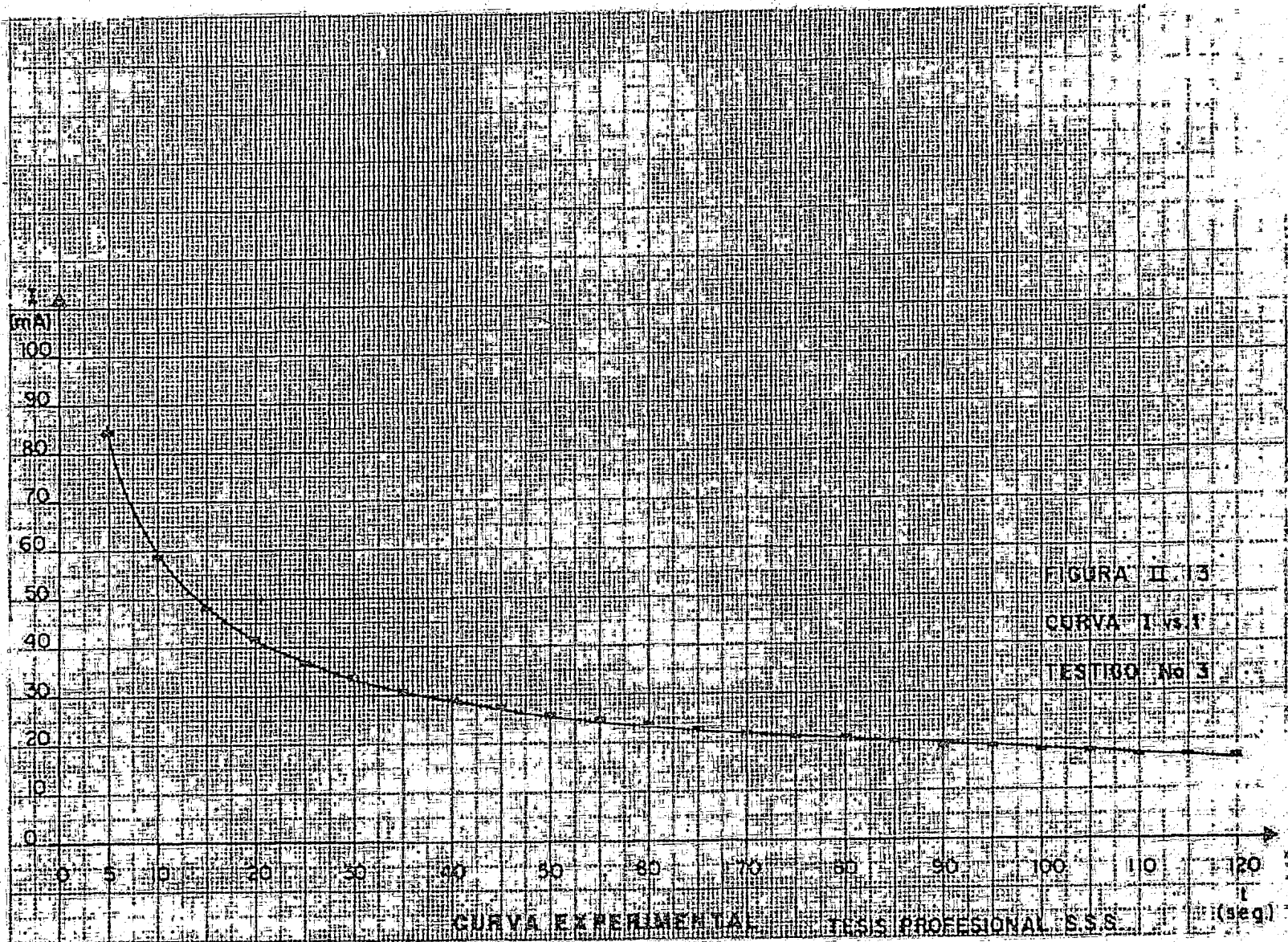


FIGURA II 13
CURVA I vs t
TESTEO No 3

CURVA EXPERIMENTAL TESIS PROFESIONAL S.S.S.

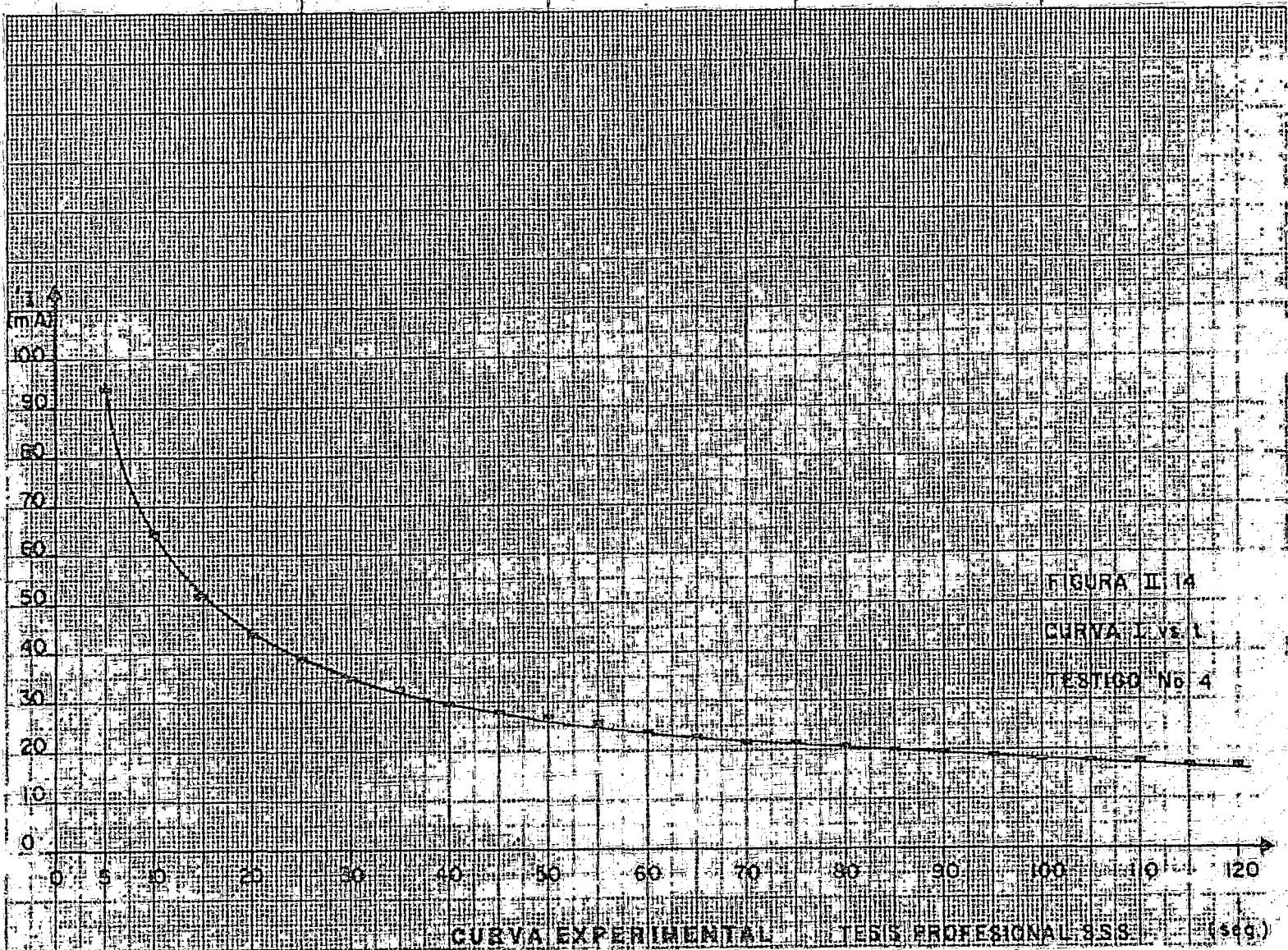


FIGURA II.14
 CURVA I vs t
 TESTIGO N° 4

CURVA EXPERIMENTAL TESIS PROFESIONAL 8SS (seg.)

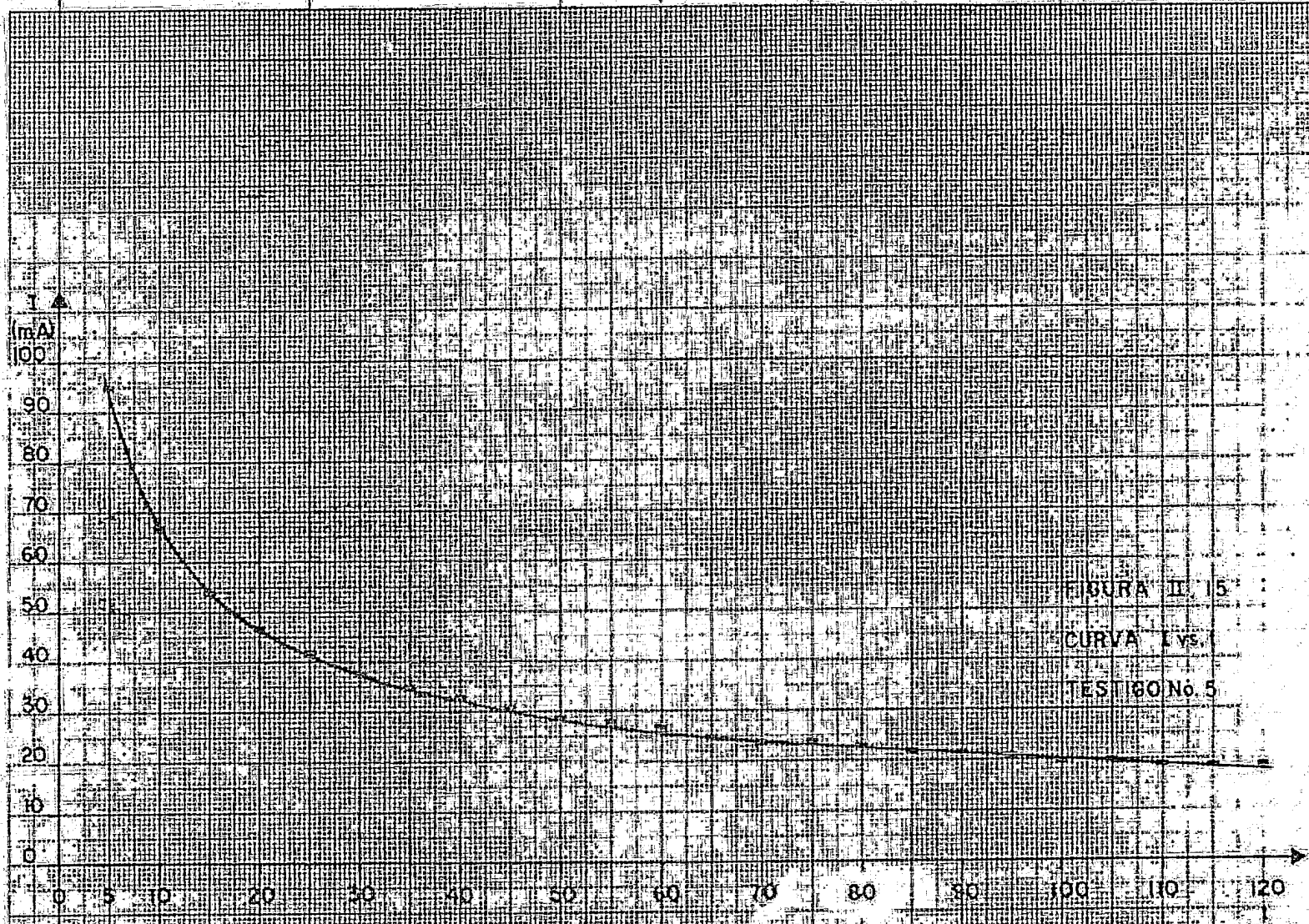


FIGURA II. 15
CURVA I vs.
TESTIGO No. 5

(seg)

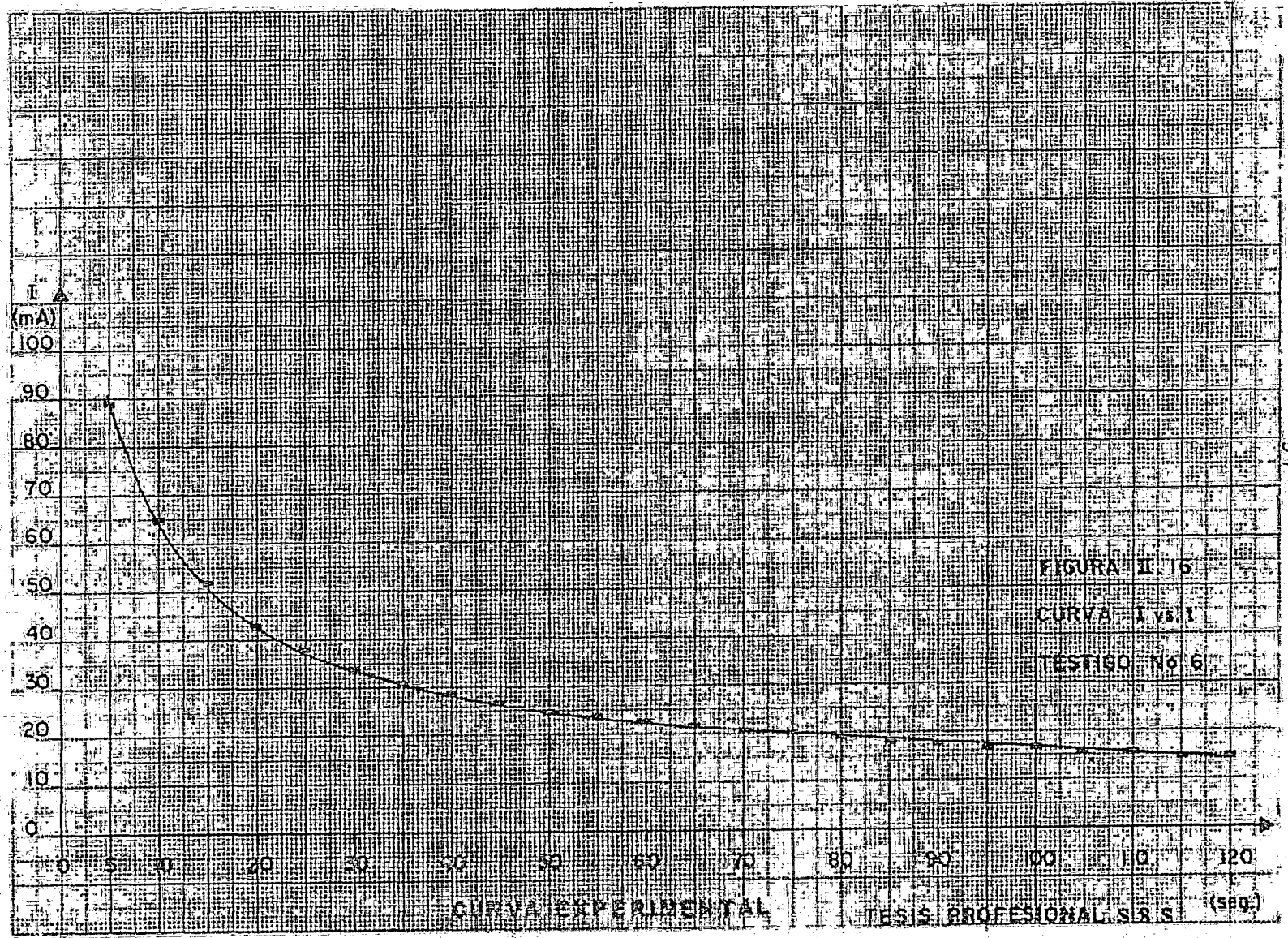


FIGURA II. 15
CURVA - I vs. I
TESTIGO No. 6

CURVA EXPERIMENTAL

TESIS PROFESIONAL S & S (SPQ)

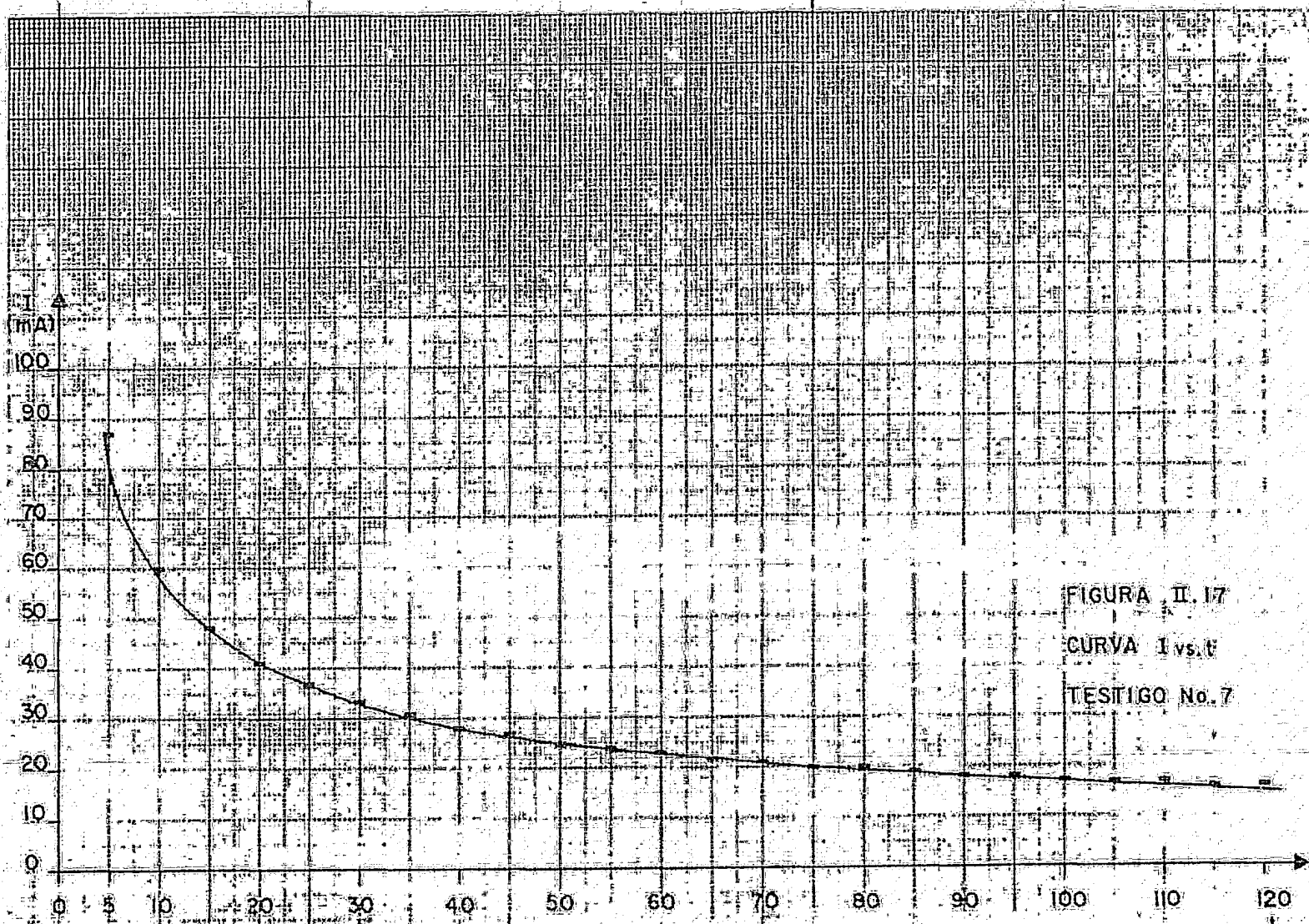


FIGURA II. 17
 CURVA I vs. t
 TESTIGO No. 7

CURVA EXPERIMENTAL TESIS PROFESIONAL S.S.S. (seg.)

b) Area recubierta (A) de los testigos

TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
A, cm ²	57.6	54.0	55.2	57.6	58.8	54.0	55.2

c) Espesor promedio (S) de la película depositada

TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
S X 10 ³ cm	3.13	2.92	3.20	2.98	3.52	3.23	2.98

d) Peso de los testigos

M_{TAD} = Peso del testigo antes del depósito.

M_{TDD} = Peso del testigo después del depósito.

M_{TDH} = Peso del testigo después de hornearse.

M_{RPA} = Masa depositada de resina y pigmento asociado.

TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
M_{TAD} ; g	41.226	42.764	42.069	42.371	42.236	42.308	42.081
M_{TDD} ; g	41.497	43.002	42.313	42.623	42.510	42.544	42.321
M_{TDH} ; g	41.470	42.975	42.290	42.603	42.478	42.520	42.296
M_{RPA} ; g	0.244	0.211	0.221	0.232	0.242	0.212	0.215

e) Densidad de película (ρ_p)

TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
ρ_p g/cm ³	1.353	1.339	1.251	1.350	1.169	1.215	1.306

Densidad promedio $\rho_p = 1.30$ g/cm³

f) Carga circulada en el circuito (Q)

TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
Q Coulombs	5.307	5.267	5.078	5.248	5.550	5.132	4.998

g) Eficiencia Coulombica (C)

TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
$C \times 10^2 \text{ cm}^3/\text{Coulomb}$	3.40	2.99	3.48	3.27	3.73	3.40	3.29

Eficiencia coulombica promedio $\bar{C} = 3.40 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{coulomb}$.h) Curvas $\ln j$ vs $\ln t^{-0.5}$

j = Densidad de corriente.

t = Tiempo.

 $\ln B$ = Ordenada al origen de la recta.

m = Pendiente de la recta.

CC = Coeficiente de correlación de la recta.

- Inj

TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
- Int							
0.8047	6.5424	6.2523	6.4879	6.4180	6.4280	6.3016	6.4528
1.1513	6.8837	6.6626	6.4812	6.8024	6.7772	6.7224	6.8244
1.3540	7.0695	6.9078	7.0475	7.0100	6.9929	6.9455	7.0475
1.4979	7.2236	7.0901	7.1810	7.1771	7.1317	7.1355	7.2051
1.6094	7.3237	7.2079	7.3078	7.2977	7.2442	7.2592	7.3078
1.7006	7.4059	7.3132	7.3924	7.4059	7.3443	7.3704	7.4222
1.7777	7.4955	7.4310	7.4847	7.4648	7.4265	7.4628	7.4847
1.8444	7.5501	7.4955	7.5514	7.5601	7.4854	7.5294	7.5865
1.9033	7.5940	7.5645	7.5865	7.6291	7.5479	7.6009	7.6229
1.9560	7.6654	7.6386	7.6606	7.6654	7.6146	7.6779	7.6998
2.0037	7.7032	7.6779	7.6998	7.7032	7.6497	7.7187	7.7407
2.0472	7.7424	7.7187	7.7407	7.7832	7.6861	7.7612	7.7832
2.0872	7.7832	7.8057	7.7832	7.8258	7.7630	7.8057	7.8277
2.1242	7.8258	7.8522	7.8277	7.8702	7.8038	7.8522	7.8742
2.1587	7.8702	7.8522	7.8742	7.8702	7.8038	7.9010	7.9230
2.1910	7.8702	7.9010	7.8742	7.9168	7.8464	7.9523	7.9230
2.2213	7.9168	7.9523	7.9230	7.9655	7.8909	8.0064	7.9743
2.2499	7.9655	8.0064	7.9743	7.9655	7.8909	8.0064	8.0283
2.2769	7.9655	8.0064	7.9743	8.0168	7.9374	8.0635	8.0283
2.3026	8.0168	8.0635	8.0283	8.0709	7.9862	8.0635	8.0855
2.3270	8.0168	8.0635	8.0283	8.0709	7.9862	8.1242	8.0855
2.3502	8.0168	8.1242	8.0283	8.0709	8.0375	8.1242	8.0855
2.3725	8.0709	8.1242	8.0855	8.1281	8.0375	8.1887	8.1461
2.3907	8.0709	8.1242	8.0855	8.1281	8.0375	8.1887	8.1461

CURVAS DE Inj v.s. Int-0.5

TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
$-\ln B$	5.7574	5.5944	5.6740	5.5408	5.5991	5.6296	5.5820
m	0.9726	1.0629	1.0130	1.0879	1.0272	1.0990	1.0169
CC	0.9974	0.9899	0.9973	0.9950	0.9892	0.9862	0.9973

i) Conductividad eléctrica de la película (k_p)

$$k_p = \frac{(e^{-\ln B})^2}{V} \cdot 2C$$

TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
$B \times 10^3$	3.20	3.70	3.40	3.90	3.70	3.60	3.80
$k_p \times 10^9$ (ohm $^{-1}$ cm $^{-1}$)	1.882	2.213	2.175	2.689	2.760	2.382	2.568

Conductividad eléctrica promedio $k_p = 2.40 \times 10^{-9} \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$

j) Porcentaje de humedad de la película depositada (% H).

TESTIGO	1	2	3	4	5	6	7
% H	9.96	11.34	9.05	7.94	11.68	10.17	10.42

2.6.6 Conclusiones acerca del experimento realizado

De los resultados obtenidos y las observaciones hechas durante el experimento se derivan las siguientes conclusiones :

- a) Aunque no se registró el voltaje aplicado, se observó una polarización despreciable de los electrodos sobre todo al inicio del flujo de corriente en la celda.
- b) El tiempo de inducción es prácticamente nulo, ya que desde el momento en que se inició el flujo de corriente en la celda la intensidad de corriente disminuyó con el transcurso del tiempo. Por lo anterior es válida la suposición hecha en el punto 2.6.4 (tratamiento estadístico de los resultados experimentales) en el sentido de que el tiempo de inducción es despreciable.
- c) Los valores de eficiencia coulombica (C), conductividad eléctrica de la película (k_p) y % de humedad de la película (%H) corresponden aproximadamente a los valores reportados en la literatura para primarios similares al empleado en el experimento (ver referencia xx).
- d) Se comprobó el modelo cinético propuesto a partir de la correlación de los datos de $\ln j$ vs. $\ln t^{-0.5}$. Los elevados coeficientes de correlación y el valor de las pendientes de estas curvas (aproximadamente -1) corroboran lo anterior.
- e) Se comprobó la continuidad de la película en toda la superficie recubierta y la resistencia mecánica de la misma después de hornearse.

De los valores de los parámetros C y k_p es posible establecer la ecuación que relaciona a la densidad de corrien

ta con el tiempo; esta es:

$$j = (3.53 \times 10^{-8} V)^{1/2} t^{-1/2}$$

j = Ampere/cm².

V = Volts.

t = Seg.

La cual será empleada en el diseño de la unidad de aplicación por electrodepósito del recubrimiento anticorrosivo sobre carrocerías de automóviles, a un voltaje distinto al aplicado en el experimento pero incluido en el rango especificado por el proveedor del primario.

C A P I T U L O I I I

B A S E S D E D I S E Ñ O

- 3.1. INTRODUCCION A LAS BASES DE DISEÑO.
- 3.2. REQUERIMIENTOS Y DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE ELECTRODEPOSITO DEL PRIMARIO CATODICO SOBRE CARROCE RIAS.
- 3.3. BASES DE DISEÑO.
- 3.4. CRITERIOS DE DISEÑO PROPORCIONADOS POR EL PROVEEDOR DE PRIMARIO.

RELACION DE DIBUJOS

CAPITULO III

PAG.

111	III.1	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE ELECTRO-DEPOSITO.
114	III.2	DIMENSIONES DE LAS CARROCERIAS.
115	III.3	DETALLES DE LAS CARROCERIAS MONTADAS EN BASTIDORES.

3.1 INTRODUCCION A LAS BASES DE DISEÑO

En el capítulo anterior de este trabajo se definieron los principios teórico-prácticos del proceso de electrodepósito de recubrimiento y se mencionaron algunos de los criterios que han permitido el diseño y la operación de unidades a nivel industrial, que utilizan este procedimiento como medio de aplicación de la protección anticorrosiva requerida en piezas metálicas de conformación difícil, en las que el espesor de la película de recubrimiento debe ser constante en toda su superficie. Por otro lado, se indicó que las desventajas del proceso de electrodepósito (principalmente la alta inversión inicial requerida y costos directos elevados) han limitado su empleo a algunas aplicaciones, la más extensa de las cuales se encuentra en la industria automotriz.

En este capítulo se establecen, en primer lugar, las características del proceso a nivel industrial, mismas que se relacionan con la necesidad de asegurar una operación continua y eficiente. A continuación se establecen los parámetros mínimos requeridos para el diseño de la unidad de aplicación de recubrimiento, derivados de las características de las piezas que se recubren y del primario utilizado. Por último se mencionan algunos criterios que el proveedor de primario proporciona para el diseño de la unidad.

3.2 REQUERIMIENTOS Y DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROCESO DE ELECTRODEPOSITO DEL PRIMARIO CATODICO SOBRE CARROCERIAS.

El proceso tiene por finalidad aplicar por electrodeposición, a voltaje constante, una película de primario catódico, sobre carrocerías de automóviles que en forma continua se desplazan a una velocidad tal que permite obtener el mismo número de unidades/hora que las requeridas en la planta de ensamble.

Para permitir la continuidad del proceso y asegurar una operación estable, se consideran los siguientes aspectos en el diseño de la unidad:

El tanque donde se efectúe el electrodeposición debe permitir el paso longitudinal de las carrocerías durante el tiempo necesario para lograr el espesor de recubrimiento recomendado por el proveedor del primario. Además, se requiere tener una zona de escurrido donde se recolecte la mayor parte de los sólidos no depositados.

Filtración continua del primario para eliminar posibles impurezas externas y coágulos de resina formados por envejecimiento del baño.

Alimentación continua de materiales de reposición, básicamente resina y pigmento, para compensar la salida de material depositado en las carrocerías.

Enfriamiento del primario para eliminar el calor generado por los siguientes conceptos: paso de corriente eléctrica, bombeo requerido en el proceso, transferencia a través de las paredes del tanque y superficie del baño, e inmer-

sión de las carrocerías a diferente temperatura de la del primario. Es necesario mantener constante la temperatura en el tanque de electrodepósito para evitar variaciones en las propiedades del primario y en las características de la película depositada.

- Agitación constante para asegurar una composición homogénea e impedir la sedimentación del primario en el tanque.

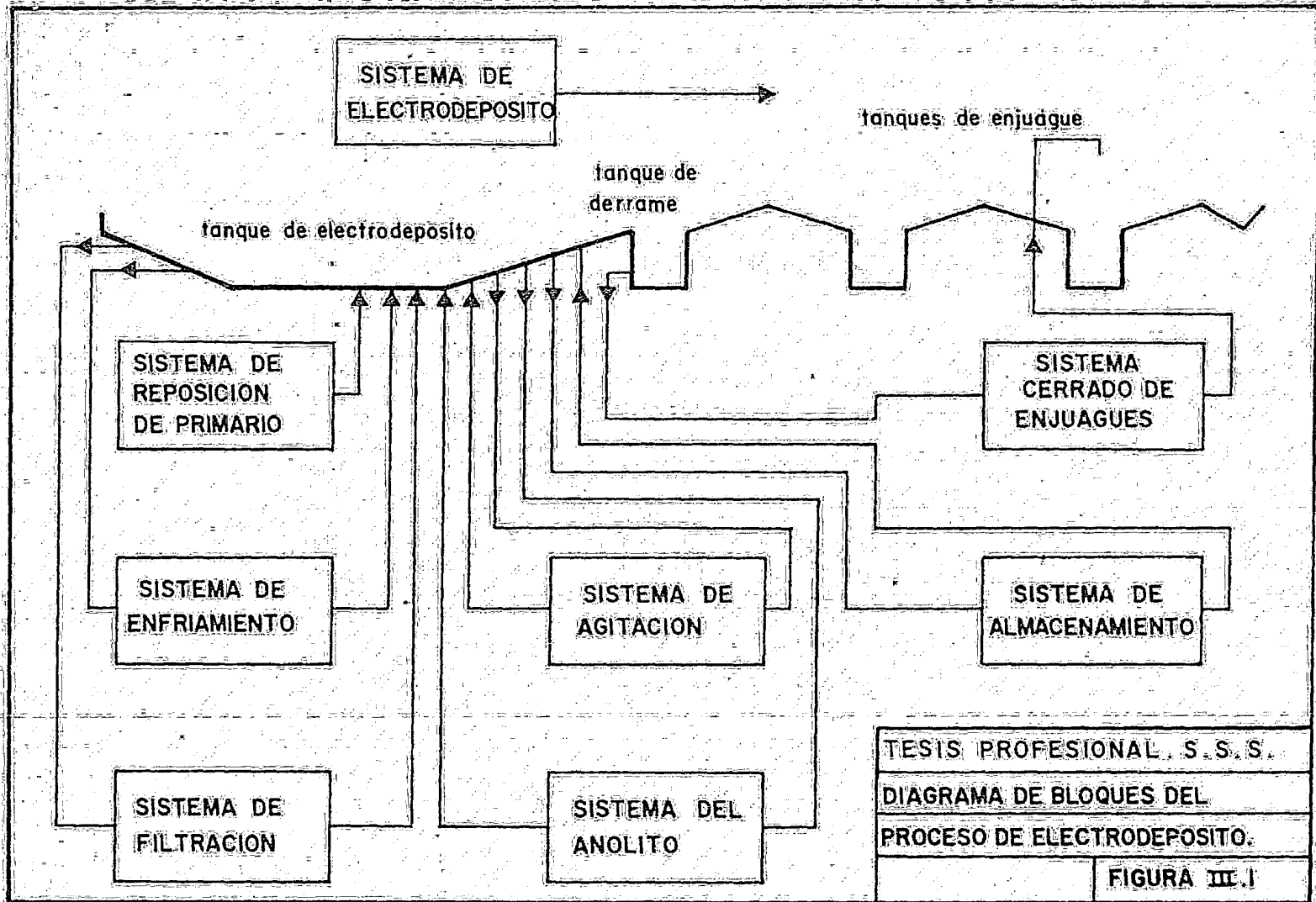
- Eliminación del exceso de solubilizador producido en los ánodos para evitar variaciones de pH (sistema del anolito).

- Un tanque de almacenamiento que permita el vaciado del tanque de electrodepósito, manteniendo las propiedades físicas y químicas del primario durante los períodos de mantenimiento de la unidad.

- Enjuague de las carrocerías ya recubiertas para eliminar partículas de resina y pigmento adheridas a la película depositada.

De estos aspectos, uno de los más importantes, desde el punto de vista económico, es el referente al enjuague de las carrocerías, dado que se requeriría un volumen elevado de agua por cada una de no contarse con un sistema cerrado de enjuagues a contracorriente basado en la ultrafiltración del primario. Esta operación permite obtener, de una corriente proveniente del tanque de electrodepósito, dos corrientes con diferente contenido de sólidos; una que contiene prácticamente todos los sólidos del primario y que se reincorpora al tanque de electrodepósito, y otra con un contenido casi nulo de sólidos (solución de permeato), que se envía a un tanque (de permeato) y de ahí, a la última etapa del sistema cerrado de enjuagues.

En la figura III.1 se presenta el Diagrama de Bloques del Proceso de electrodeposición. En él se incluyen todas las consideraciones anteriormente establecidas, para el diseño de la unidad.



3.3 BASES DE DISEÑO

3.3.1 Generalidades

a) Función de la unidad

La función principal será la de aplicar el recubrimiento anticorrosivo sobre carrocerías de automóviles.

b) Tipo de proceso

El recubrimiento anticorrosivo será aplicado sobre las carrocerías por electrodeposición.

3.3.2 Capacidad y Flexibilidad

a) Factor de servicio

El factor de servicio considerado será de dos turnos de labor por día, de 7.5 horas cada uno, debiéndose recubrir en este periodo 300 unidades. La unidad operará 250 días por año, es decir 3 750 horas por año.

b) Capacidad normal

La capacidad de la unidad de aplicación de recubrimiento será la misma que la de la planta de ensamble en operación normal. Esta es de 75 000 unidades por año.

c) Capacidad de diseño

Se prevé un aumento de 40% en el número de carrocerías procesadas por año. Por lo que la capacidad de diseño será de 105 000 unidades por año.

d) Flexibilidad

La unidad no deberá seguir operando bajo las siguientes condiciones anormales:

- Falla de suministro de energía eléctrica.
- Falla de suministro de agua de enfriamiento.

3.3.3 Especificaciones de las Carrocerías a Recubrir

a) Condiciones de las carrocerías

Las carrocerías que serán recubiertas deberán contar con un pretratamiento consistente en:

- Limpieza alcalina en caliente.
- Aplicación de fosfato de zinc.
- Enjuague con ácido crómico.
- Enjuague con agua desmineralizada.

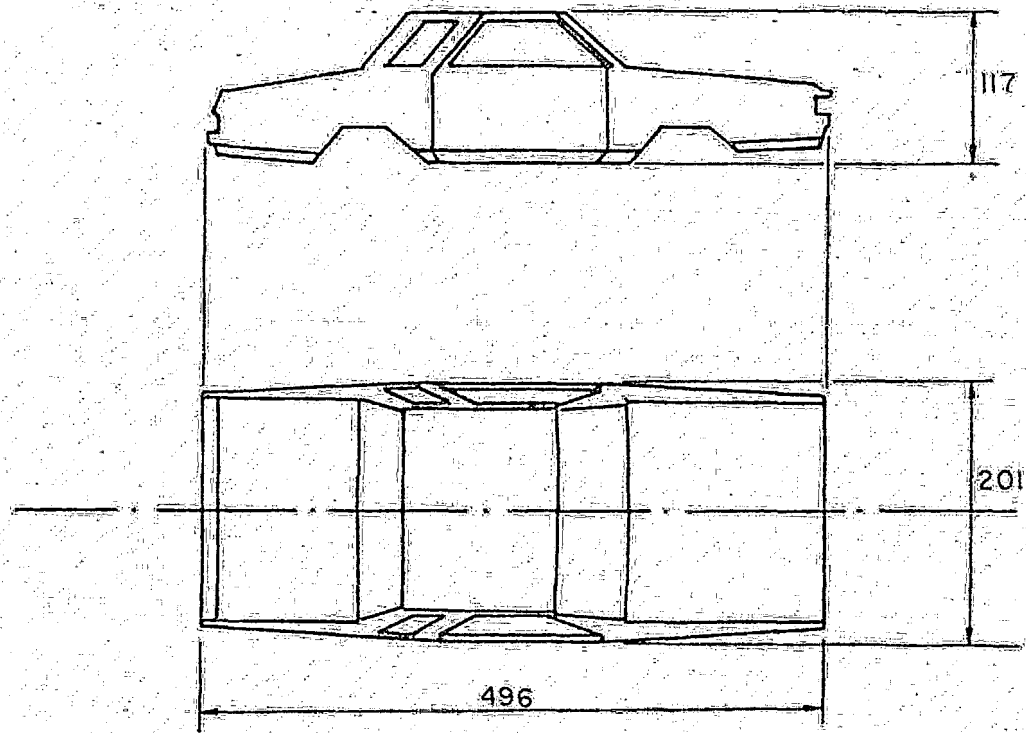
La temperatura de las carrocerías a la entrada del sistema de electrodeposición es de 30°C .

b) Dimensiones de las carrocerías

Las dimensiones promedio de las carrocerías se muestran en la figura III.2 (PLANTA Y ELEVACION). El área total promedio de las carrocerías es de 95m^2 .

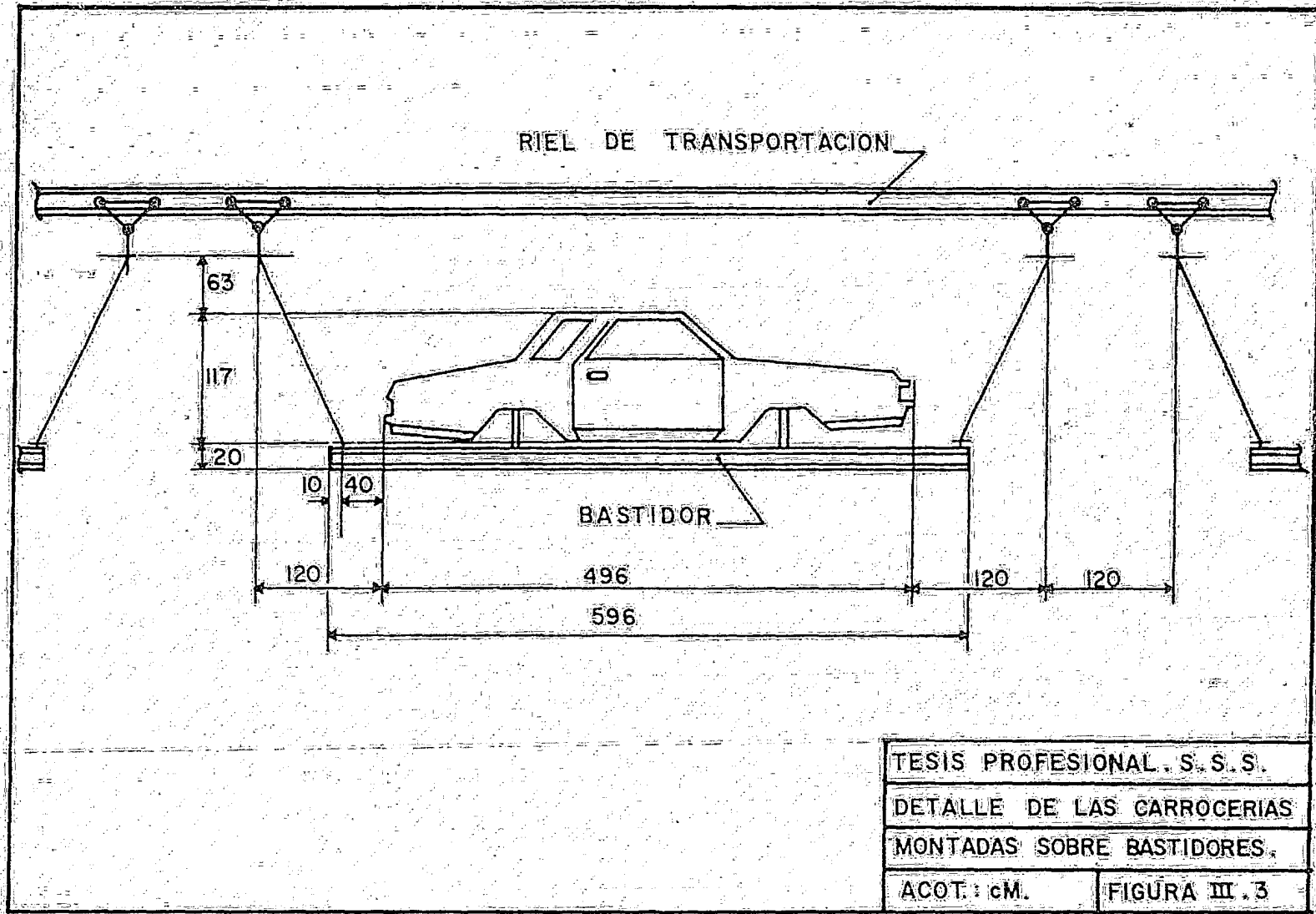
c) Montaje de las carrocerías para efectuar el electrodeposición.

Los detalles del montaje de las carrocerías para efectuar el electrodeposición se muestran en la figura III.3. El peso de la carrocería más su bastidor es de 820kg.



TESIS PROFESIONAL. S.S.S.
DETALLE DE DIMENSIONES DE
LAS CARROCERIAS. ACOT. 1:CM.

FIGURA III.2



3.3.4 Especificaciones del Primario

- a) Tipo : Primario catódico.
- b) Composición (porcentaje en peso)

<u>Componentes</u>	<u>%</u>
Resina	16.0
Pigmento	4.0
Solubilizador	4.0
Aditivo de flujo	0.1
Fungicida o bactericida	0.1
Agua	76.0
TOTAL	100.0

- c) Propiedades físicas

Densidad	1.04 gramos/cm ³
Viscosidad	96 cP
Conductividad térmica	0.669 kcal/hr m ⁰ C
Conductividad eléctrica	1×10^{-3} ohm ⁻¹ cm ⁻¹
Eficiencia coulombica	3.40×10^{-2} cm ³ /coulomb
Calor específico	0.923 cal/g ⁰ C

Propiedades referidas a 27⁰C.

- d) Factor de incrustación para cambiadores de calor:
 $0.001 \text{ m}^2 \text{ hr}^0 \text{ C/kcal}$.

3.3.5 Condiciones de Aplicación del Primario

Las condiciones normales de operación de la unidad durante la aplicación son:

Temperatura	27°C
Presión	Atmosférica
Voltaje	300 - 375 volts
pH del baño	6.5-7

3.3.6 Características de la película depositada

Espesor	2.6×10^{-3} cm (una milésima de pulgada)
Conductividad eléctrica	2.40×10^{-9} ohms ⁻¹ cm ⁻¹
Densidad	1.3 g/cm ³

3.3.7 Servicios Auxiliares

a) Agua de enfriamiento

La temperatura del agua deberá ser la adecuada para efectuar las operaciones de intercambio de calor considerando que el primario se encuentra a temperatura ambiente.

Fuente suministro: Paquete de agua helada fuera de límite de batería.

Condiciones de suministro:

Presión de entrada	5 kg/cm ²
Temperatura de entrada	11°C
Presión de retorno	3.5 kg/cm ²
Temperatura de retorno	18°C

Factor de incrustación para cambiadores de calor:
 $0.0006 \frac{\text{m}^2 \text{hr}^\circ\text{C}}{\text{kcal}}$

Disponibilidad : La requerida.

b) Agua desmineralizada

El agua desmineralizada deberá tener una conductividad que no exceda de $25 \mu \text{ohm}^{-1} \text{cm}^{-1}$.

Fuente de suministro: Unidad de tratamiento fuera del límite de batería.

Condiciones de suministro:

Presión	3.5 kg/cm ²
Temperatura	25°C.

Disponibilidad: La requerida.

c) Aire de planta

Fuente de suministro: Se generará fuera del límite de baterías.

Condiciones de suministro:

Presión	7 kg/cm ²
Temperatura	25°C.

d) Energía eléctrica

Fuente de suministro: Externa.

Condiciones de suministro:

Voltaje	4160 V
Número de fases	3
Frecuencia	60 Hz

Características de alimentación a motores.

Potencia (Hp)	Volts	Fases	Frecuencia (Hz)
De 0 a 3/4	115	1	60
De 1 a 200	440	3	60
De 201 a 2000	4160	3	60

3.3.8 Condiciones Climatológicas

Temperatura anual promedio: 25°C

Presión barométrica: 586 mmHg.

3.4 CRITERIOS DE DISEÑO PROPORCIONADOS POR EL PROVEEDOR DE PRIMARIO

3.4.1 Sistema de Electrodeposición

a) Derrame

Es necesario un tanque de derrame (vertedero) al final del tanque donde se efectúe el electrodeposición para mantener el nivel de éste y recolectar el escurrido inicial de las carrocerías. El derrame permite además remover la espuma o mugre de la superficie del tanque de electrodeposición.

b) Tolerancias

Se recomienda contar con una distancia libre de 46cm entre las paredes y fondo del tanque de electrodeposición y la parte más cercana a ser recubierta, y de 16cm como mínimo entre la superficie del primario y el techo de la carrocería. También es recomendable que durante el electrodeposición se mantengan abiertas las puertas de la carrocería a un espacio no mayor de 15cm para permitir la entrada y salida del primario.

c) Ángulo de entrada de las carrocerías

Se considera satisfactorio un ángulo de aproximadamente 30° para la entrada de las carrocerías al tanque de electrodeposición:

d) Recubrimiento del tanque de electrodeposición

La pared interior del tanque donde se efectúe el electrodeposición debe protegerse, por ejemplo, con pintura epóxica -

catalizada. El recubrimiento debe ser químicamente resistente a los componentes del primario y capaz de soportar una corriente eléctrica de 600 volts.

e.) Espumación

Se evitará en lo posible el entrapamiento de aire en las carrocerías; el primario deberá fluir suavemente al vertedero, evitándose caídas libres para evitar la formación de espuma. No se recomienda el empleo de espumas que formen remolinos.

f.) Anodos

Para establecer el número de ánodos requeridos para efectuar el electrodepósito se recomienda utilizar una relación no mayor de 4 a 1 entre el área de la carrocería y el área de los ánodos adyacentes a la carrocería; además, es necesario que éstos se distribuyan uniformemente en ambos lados del tanque de electrodepósito de forma que no menos del 40% del perímetro del tanque contenga ánodos. Es necesario que los ánodos se construyan de acero inoxidable 316 de un espesor no menor de 3.175 mm (1/8").

g.) Suministro de potencia

Es de esperarse un cambio en los requerimientos de voltaje y amperaje a medida que se desarrollen nuevos primarios. Por esta razón es deseable que se disponga de una fuente de corriente directa (rectificador), que pueda utilizarse en un amplio rango de condiciones; bajo esta premisa, la unidad deberá ser capaz de operar entre 0-600 volts, en pasos no mayores de 10 volts.

3.4.2 Sistema de Filtración

Con el objeto de eliminar el máximo de impurezas, pueden usarse prefiltros de malla de 3.175 mm (1/8") de cartucho o canasta, seguidos de filtros de bolsa o cartucho de 50 μ . Los medios de filtración serán insolubles en agua y no se usarán cartuchos de lana. El volumen total de primario de berá filtrarse al menos una vez por hora.

3.4.3 Sistema de Reposición de Primario

Para reponer el material electrodepositado en las carrocería, el primario se suministrará en tambores de 200kg. cuyo contenido deberá agitarse antes de, y durante la reposición de material. Se recomienda el empleo de bombas dosificadoras para evitar un desajuste en las condiciones de operación del tanque de electrodepósito. El contenido de sólidos del material de reposición es de aproximadamente 37% en peso y su formulación evita que en operación normal se tengan desajustes en la composición del baño. La densidad del material de reposición es de 1.2 g/cm³.

3.4.4 Sistema de Enfriamiento

Para mantener constante la temperatura del primario, puede emplearse agua helada a 11°C como medio de enfriamiento. En caso de utilizar cambiadores de tubo y coraza, se recomienda que el primario se circule por los tubos a una velocidad de 2.0 a 2.5 m/seg. La temperatura del primario en el tanque de electrodepósito no deberá variar en más de 2°C; para efectos de diseño, deberá considerarse un rango de enfriamiento para el primario no mayor de 5°C.

3.4.5 Sistema de Agitación

La agitación del contenido del tanque de electrodepósito puede hacerse bombeando el primario a través de cabezales de distribución con o sin espreas, siendo preferible el uso de espreas. Se recomienda que el contenido total del tanque de electrodepósito y del tanque de derrame se circule una vez cada 2 a 6 minutos a través del sistema de agitación el cual puede incluir el primario manejado en los sistemas de filtración y enfriamiento.

3.4.6 Sistema del Anolito

Todos los ánodos se dispondrán en cajas o celdas de un material no conductor cuya cara adyacente a la carrocería se rá una membrana selectiva que permita el paso de la parte líquida del primario y los aniones del solubilizador. El sistema del anolito deberá construirse de acero inoxidable (excepto las celdas) o plástico para resistir una solución de ácido orgánico de pH 2.0 a 5.0. El líquido en cada celda deberá removerse a razón de 2.0 a 4.0 lpm y enviarse a un recipiente donde se controlará la conductividad del anolito (y de hecho el pH del baño) a aproximadamente $900 \mu \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$.

3.4.7 Sistema Derrado de Enjuagues

El enjuague después del electrodepósito tiene por objeto remover la delgada capa de resina y pigmento que se adhiere a la película electrodepositada; si se permitiera la presencia de pequeñas cantidades de resina y pigmento en la superficie recubierta, se causarían defectos notables en el acabado de la carrocería. El primer enjuague debe hacerse antes de que transcurra un minuto de que la carrocería abandonó el tanque de electrodepósito.

Para implementar un sistema cerrado de enjuagues a contracorriente, se recomiendan dos etapas de enjuague recirculadas que manejen 200 lts por cada 10m^2 de superficie que se desee enjuagar. En estas etapas pueden emplearse espumas de corno lleno que manejen altos volúmenes a baja presión (2.0 a 3.0 kg/cm^2). Para completar el enjuague deberán tenerse dos etapas más, que corresponden al primero y al último enjuague que recibe la carrocería. El primero puede hacerse directamente sobre el tanque de electrodepósito y representa el retorno del sistema cerrado de enjuagues, y el último emplea como líquido de enjuague el permeato obtenido en los ultrafiltros. Para la especificación de los ultrafiltros puede considerarse un flujo de 50 a 70 l/hrm^2 de permeato obtenido de las membranas de ultrafiltración. En estas dos etapas se recomienda manejar un volumen de 8 lts por cada 10m^2 de superficie, y el empleo de espumas de corno lleno que manejen volúmenes bajos a presiones moderadamente altas (4.0 a 5.0 kg/cm^2).

Entre cada etapa de enjuague es necesario que las carrocerías escurran para lograr la máxima recuperación de material no depositado. Para el efecto, se recomienda un tiempo de escurrido de por lo menos un minuto.

3.4.8 Agua Desmineralizada

Se requiere un suministro de agua desmineralizada para ser empleada en sustitución del enjuague en caso necesario, así como para mantener el nivel de líquido en el tanque de electrodepósito. Se recomienda el empleo de agua desmineralizada con una conductividad no mayor de $25\ \mu\text{ohm}^{-1}\ \text{cm}^{-1}$.

3.4.9 Materiales de Construcción

Se recomienda (excepto donde se ha indicado lo contrario) el uso de acero al carbón en tubería, accesorios y equipo.

No se permite el uso de zinc, cobre, bronce, aluminio o materiales galvanizados.

C A P I T U L O I V

D I S E Ñ O D E L A U N I D A D

4.1 I N T R O D U C C I O N A L D I S E Ñ O D E L A U N I D A D.

4.2 D E S C R I P C I O N D E L O S S I S T E M A S D E P R O C E S O.

4.3 D I S E Ñ O D E L O S S I S T E M A S D E P R O C E S O.

RELACION DE DIBUJOS

CAPITULO IV

PAG.

131	IV.1	DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE ELECTRODEPOSITO.
132	IV.2	DETALLE DE LAS ESCOBILLAS PARA CONEXION DE LAS CARROGERIAS.
133	IV.3	DETALLE DE LA CONEXION ENTRE LAS ESCOBILLAS Y LA BARRA CONDUCTORA.
135	IV.4	DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE FILTRACION.
137	IV.5	DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE REPOSICION DE PRIMARIO.
139	IV.6	DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.
141	IV.7	DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE AGITACION.
143	IV.8	DETALLE DEL CABEZAL DE DISTRIBUCION.
144	IV.9	DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DEL ANOLITO.
145	IV.10	DETALLE DE LAS GELDAS ANODICAS.
147	IV.11	DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO.
150	IV.12	DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA CERRADO DE ENJUAGUES.
152	IV.13	DETALLE DEL CARTUCHO PERTENECIENTE A UN ULTRAFILTRO.
153	IV.14	DETALLE GENERAL DE LAS ESPREAS DEL SISTEMA DE ENJUAGUE.
156	IV.15	DISTRIBUCION DE DIMENSIONES EN EL ANCHO DEL TANQUE DE ELECTRODEPOSITO.

-
- 158 IV.16 DISTRIBUCION DE DIMENSIONES EN LA ALTURA DEL TANQUE DE ELECTRODEPOSITO.
- 161 IV.17 DETALLE DE LAS DIMENSIONES DEL TANQUE DE ELECTRODEPOSITO.
- 165 IV.18 DISTRIBUCION DE DIMENSIONES EN LA ALTURA DE LOS ANODOS.
- 166 IV.19 CORTE TRANSVERSAL DE UNA CELDA ANODICA.
- 170 IV.20 ELEVACION DEL TANQUE DE DERRAME Y LA 1a. PLATAFORMA DE ESCURRIDO.
- 176 IV.21 DIAGRAMA I vs t PARA CALCULO DE REQUERIMIENTOS DE CORRIENTE.
- 179 IV.22 DIAGRAMA PARA ESPECIFICACION DE PREFILTROS.
- 180 IV.23 DETALLE DE LOS PREFILTROS.
- 181 IV.24 DIAGRAMA PARA ESPECIFICACION DE FILTROS.
- 182 IV.25 DETALLE DE LOS FILTROS.
- 187 IV.26 DETALLE DE BOMBA DE REPOSICION DE PRIMARIO.
- 189 IV.27 DETALLE DE AGITADOR NEUMATICO.
-
- 217 IV.28 DIAGRAMA PARA ESPECIFICACION DE ULTRAFILTROS.
- 227 IV.29 DETALLE DE LOS ACUMULADORES DE ENJUAGUE.
- 231 IV.30 FACTOR DEPENDIENTE DE LA LONGITUD Y LA ALTURA DEL TANQUE.
- 232 IV.31 FACTOR DEPENDIENTE DE LA LONGITUD Y LA ALTURA DEL TANQUE.
- 234 IV.32 DIAGRAMA DE REACCIONES Y DETALLE DE COLOCACION DE APOYOS HORIZONTALES.

4.1 INTRODUCCION AL DISEÑO DE LA UNIDAD

Teniendo como base la información generada en la comprobación experimental del modelo cinético propuesto así como la proporcionada en las bases de diseño, en este capítulo se diseñará la unidad para aplicación por electrodepósito del primario sobre carrocerías de automóviles. Para facilitar el diseño de la unidad ésta se ha dividido en ocho sistemas (de electrodepósito, filtración, reposición de primario, enfriamiento, agitación, anolito, almacenamiento y cerrado de enjuagues) para cada uno de los cuales se establece, en primer lugar, su función, la forma como opera, el equipo con que debe contar y el diagrama de flujo del sistema. Por último se presenta el diseño de los equipos que componen cada sistema indicando sus principales características.

4.1 INTRODUCCION AL DISEÑO DE LA UNIDAD

Teniendo como base la información generada en la comprobación experimental del modelo cinético propuesto así como la proporcionada en las bases de diseño, en este capítulo se diseñará la unidad para aplicación por electrodepósito del primario sobre carrocerías de automóviles. Para facilitar el diseño de la unidad ésta se ha dividido en ocho sistemas (de electrodepósito, filtración, reposición de primario, enfriamiento, agitación, anólito, almacenamiento y cerrado de enjuagues) para cada uno de los cuales se establecerá, en primer lugar, su función, la forma como opera, el equipo con que debe contar y el diagrama de flujo del sistema. Por último se presenta el diseño de los equipos que componen cada sistema indicando sus principales características.

4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE PROCESO

4.2.1 Sistema de Electrodeposición. Área 100. (Figura IV.1)

Función

Efectuar el electrodeposición del recubrimiento anticorrosivo en el equipo adecuado a las características del primario y a las dimensiones de la carrocería.

Descripción

El sistema está compuesto por los siguientes equipos:

Tanque de electrodeposición (FB-101).

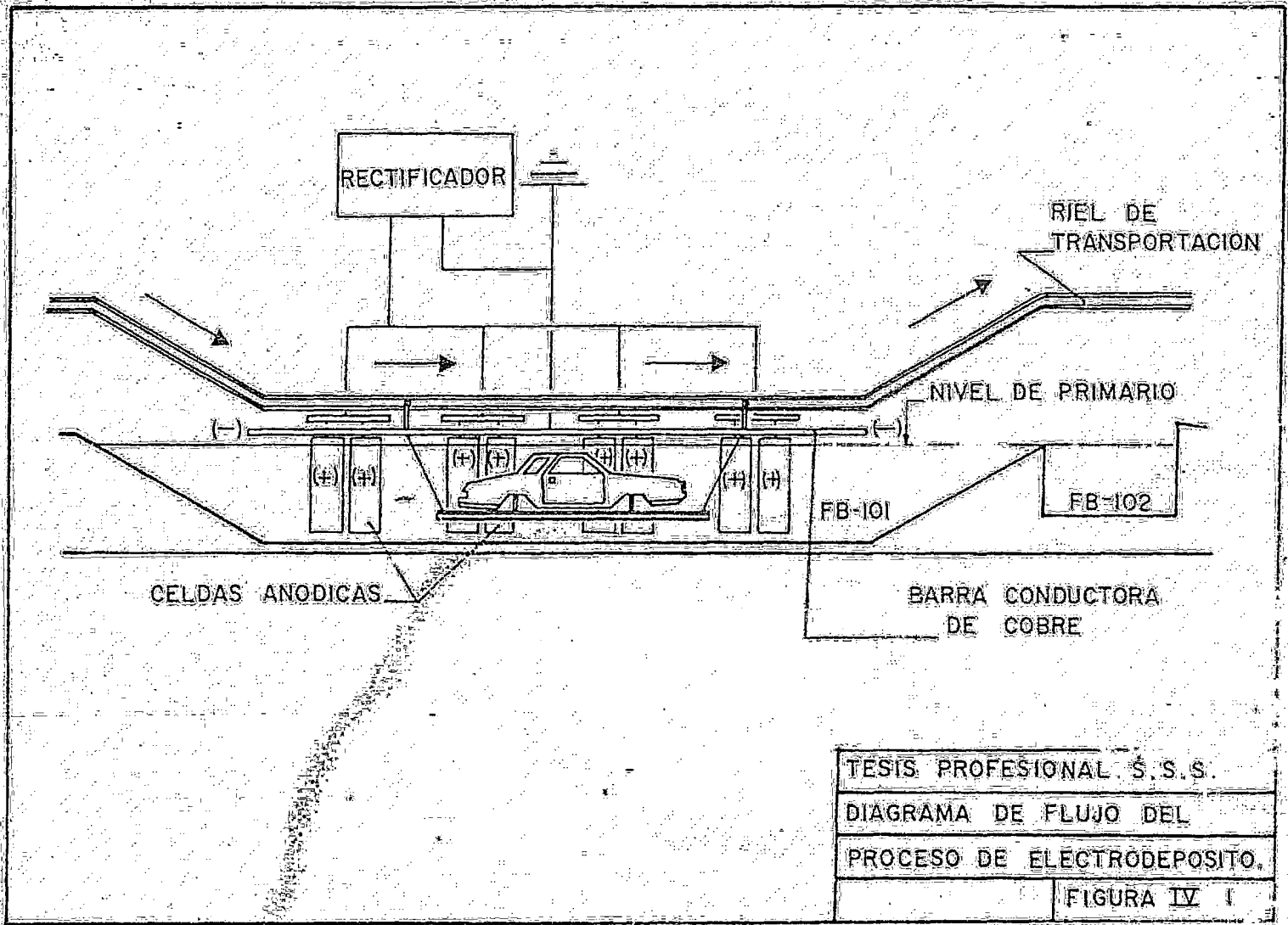
Tanque de derrame (FB-102).

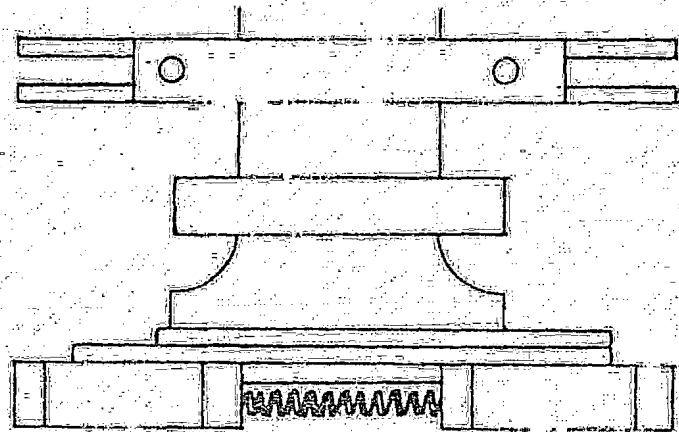
Sistema de ánodos

Rectificador de corriente

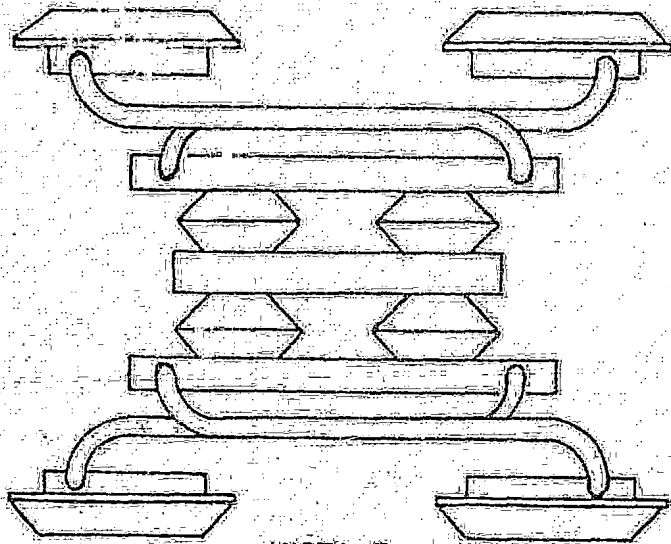
Operación

A las carrocerías provenientes del pretratamiento, montadas en bastidores (ver fig. III.3) se conectan dos calmanes unidos a escobillas colocadas en el riel de transportación (ver fig. IV.2). Hecho esto, se inicia la inmersión de la carrocería en el tanque que contiene al primario; el acceso de ésta al baño debe hacerse con una inclinación que impida el entrampamiento de aire. En el momento que se completa la inmersión y la carrocería está horizontal, las escobillas hacen contacto con una barra de cobre, conectada al polo negativo del rectificador de corriente (ver fig. IV.3). A partir de este instante y durante el recorrido longitudinal de la carrocería a través del tanque FB-101, se forma la película de recubrimiento anticorrosivo. En el tanque de electrodeposición se encuentran inmersos y uniformemente distribuidos, los ánodos que cierran el circuito eléctrico.

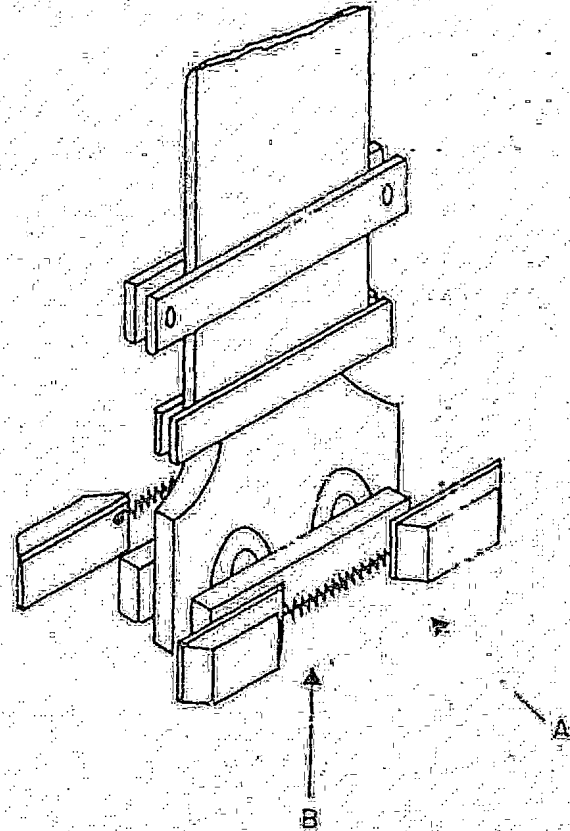




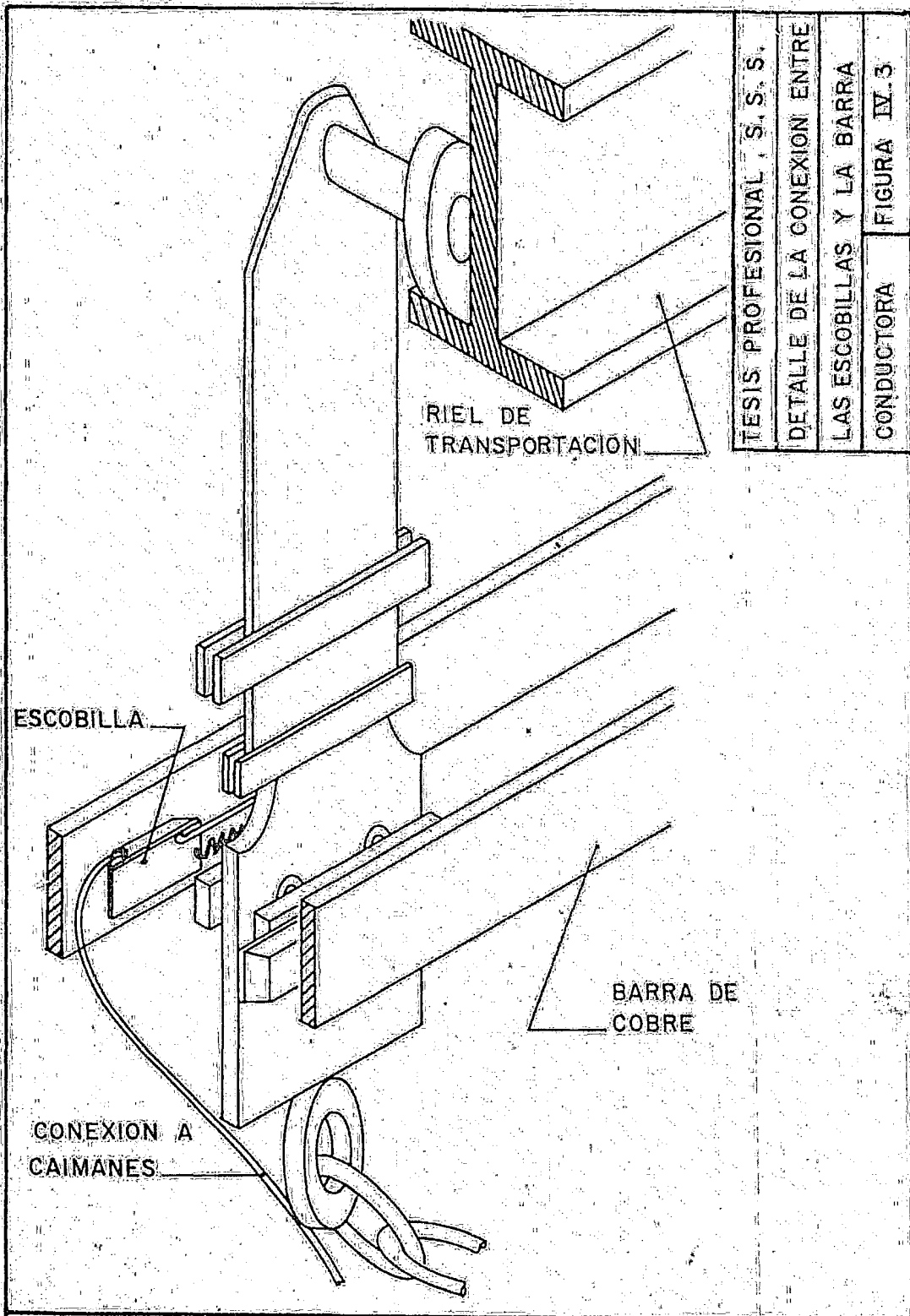
VISTA A



VISTA B



TESIS PROFESIONAL. S. S. S.
 DETALLE DE LAS ESCOILLAS
 PARA CONEXION DE LAS CARRO-
 CÉRIAS. FIGURA IV. 2



Al completar su recorrido, la carrocería emerge del tanque FB-101 con la misma inclinación de entrada, lo que impide la formación de espuma sobre su superficie.

El escurrido inicial de la unidad se recolecta en el tanque FB-102, donde se mezcla con el retorno del sistema cerrado de enjuagues a contracorriente para lograr una solución de composición aproximadamente igual a la del tanque de electrodepósito.

4.2.2 Sistema de filtración. Area 200. (Figura IV.4).

Función

Eliminar en forma continua, del tanque de electrodepósito, coágulos formados por envejecimiento del primario, e impurezas y contaminantes externos.

Descripción

El sistema se compone de los siguientes equipos:

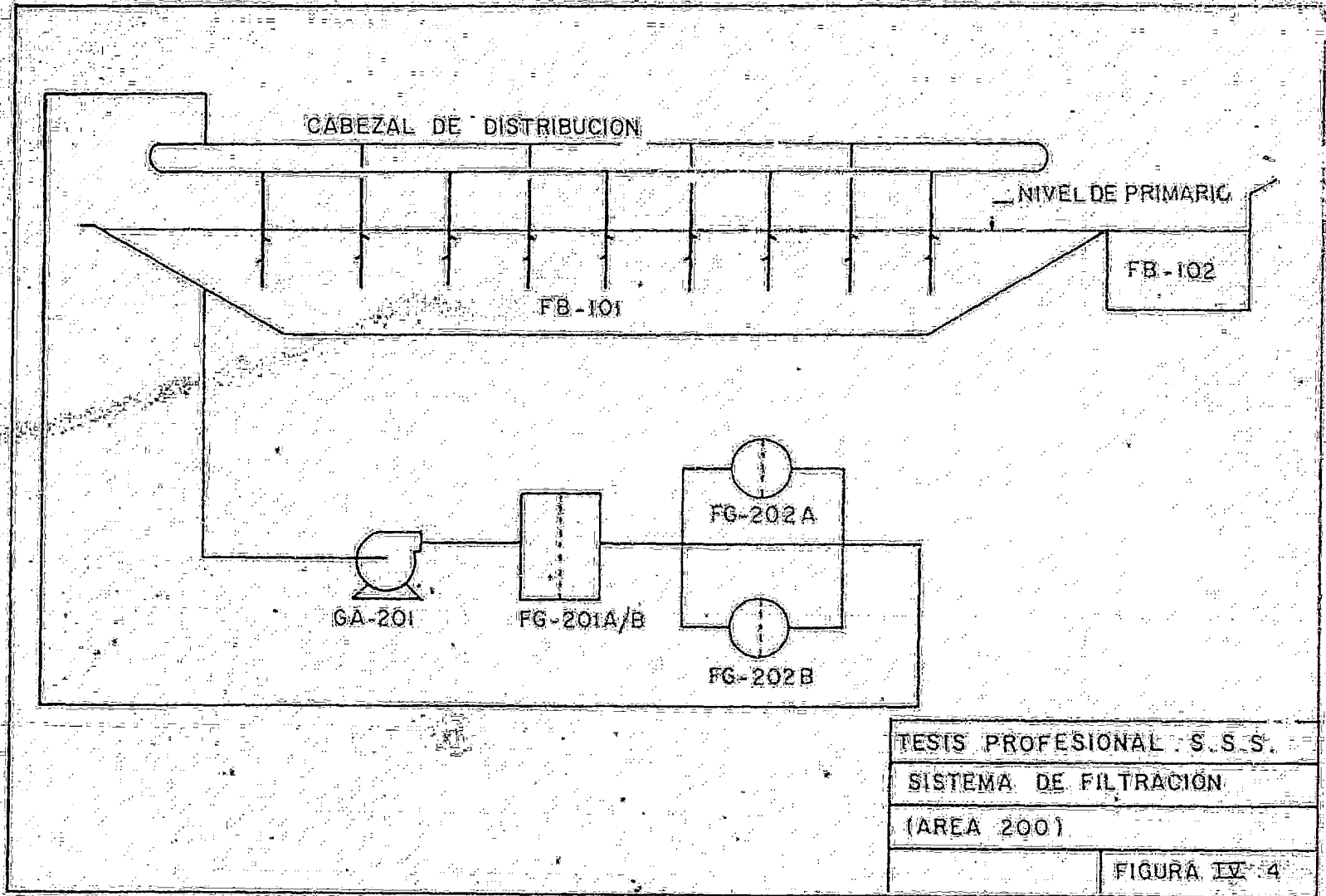
Bomba de filtración (GA-201)

Prefiltros (FG-201 A/B).

Filtros de bolsas (FG-202 A/B).

Operación

Del tanque FB-101 se extrae una corriente de primario que, mediante la bomba GA-201 se envía al prefiltro en operación y de ahí, al filtro de bolsa en operación, para posteriormente retornarse al tanque de electrodepósito a través del cabezal de distribución perteneciente al sistema de agitación.



TESTIS PROFESIONAL S.S.S.	
SISTEMA DE FILTRACIÓN	
(AREA 200)	
	FIGURA IV-4

113

De acuerdo a la recomendación del proveedor de primario, como prefiltros se emplearán filtros de canasta con mallas de 1/8" de perforación, y los filtros serán de bolsa con una porosidad de 50 micras. Es indispensable contar con un prefiltro y un filtro de bolsa adicionales dada la característica de operación intermitente de estos equipos.

La función del prefiltro es eliminar los coágulos de resina y pigmento, en tanto que los filtros de bolsa eliminan partículas de menor tamaño.

4.2.3 Sistema de Reposición de Primario. Area 300 (Figura IV.5).

Función

Asegurar una concentración constante de resina y pigmento en el baño, mediante la reposición del material depositado en las carrocerías que abandonan el tanque de electrodeposición.

Descripción

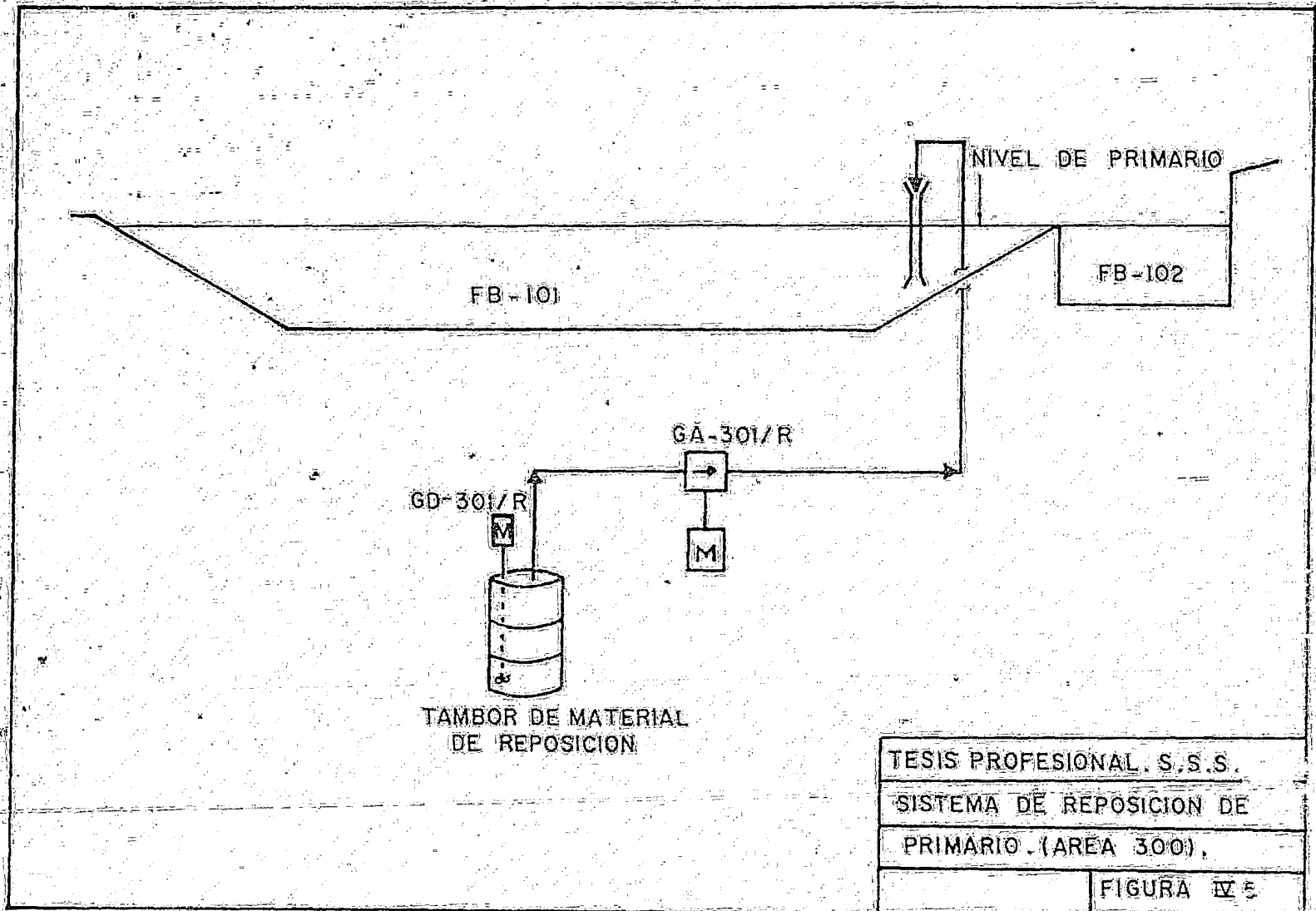
El sistema comprende el siguiente equipo:

Agitador de los tambores de material de reposición (GD-301/R).

Bomba dosificadora de material de reposición. (GA-301/R).

Operación

De acuerdo a lo especificado por el proveedor de primario, el material de reposición se entrega en tambores de 200 kg cuyo contenido debe agitarse antes y durante la alimentación al tanque de electrodeposición. Para el efecto, se cuenta con el agitador neumático GD-301/R, el cual debe montarse directamente sobre el tambor.



137

TESIS PROFESIONAL. S.S.S.	
SISTEMA DE REPOSICION DE	
PRIMARIO. (AREA 300).	
	FIGURA IV 5

El contenido de los tambores se envía al tanque FB-101 mediante la bomba neumática GA-301 que descarga en una parrilla de alimentación dispuesta en el tanque de electrodepósito.

Dada la importancia de este sistema, es necesario contar con un agitador y una bomba de relevo para garantizar la continuidad del proceso, debe considerarse además un inventario adecuado de material de reposición.

4.2.4 Sistema de Enfriamiento. Área 400 (Figura IV.6).

Función

Eliminar el calor generado por el paso de corriente eléctrica, bombeo, transferencia a través de paredes del tanque de electrodepósito y superficie del primario, e inmersión de las carrocerías a diferente temperatura de la del baño.

Descripción

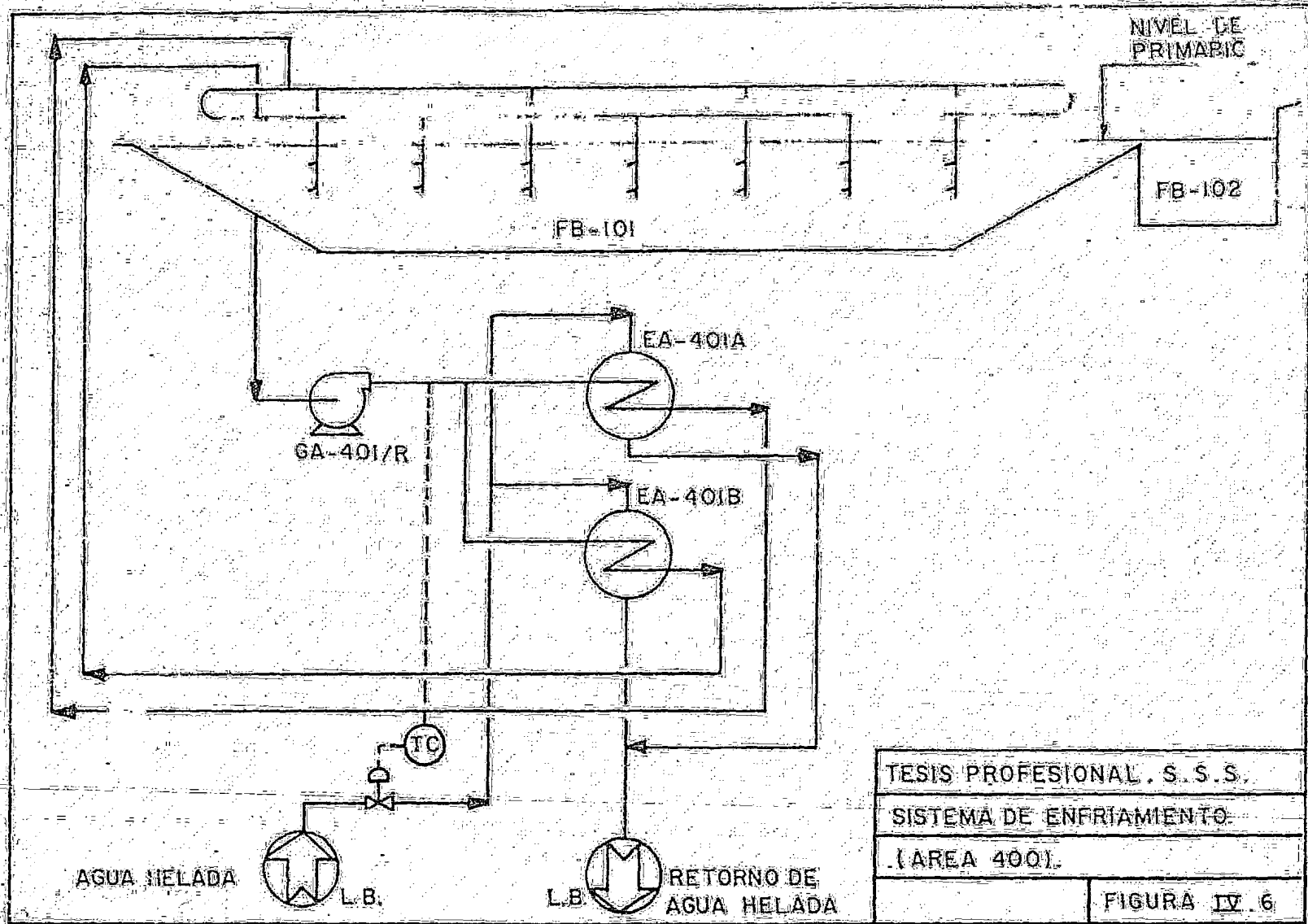
Este sistema está formado por los equipos siguientes:

Bombas de enfriamiento (GA-401/R).

Enfriadores de primario (EA-401 A/B).

Operación

Del tanque de electrodepósito se extrae primario el cual, mediante una línea se envía a la succión de la bomba GA-401/R, para pasar posteriormente a los tubos de los enfriadores EA-401 A/B y de ahí, nuevamente al tanque FB-101 vía el cabezal de distribución. Los cambiadores EA-401 A/B emplean agua helada como medio de enfriamiento, misma que se maneja por el lado de la coraza de estos equipos.



TESIS PROFESIONAL S.S.S.	
SISTEMA DE ENFRIAMIENTO	
. (AREA 400).	
	FIGURA IV.6

La temperatura del primario se controla con una válvula colocada en la línea de alimentación de agua helada a los enfriadores.

La válvula recibe su señal de control de sensores, colocados en las líneas de alimentación de primario a los cambiadores EA-401 A/B.

Es necesario contar con dos cambiadores independientes, ambos normalmente en operación, para asegurar un enfriamiento ininterrumpido del primario; en caso de que uno de ellos esté fuera de operación o en mantenimiento, el otro debe ser capaz de absorber la carga térmica requerida por el sistema.

4.2.5 Sistema de Agitación. Área 500 (figura IV.7)

Función

Mantener al primario en agitación continua en el tanque de electrodepósito, para evitar la sedimentación de la resina y el pigmento y asegurar una composición homogénea en todo el tanque.

Descripción

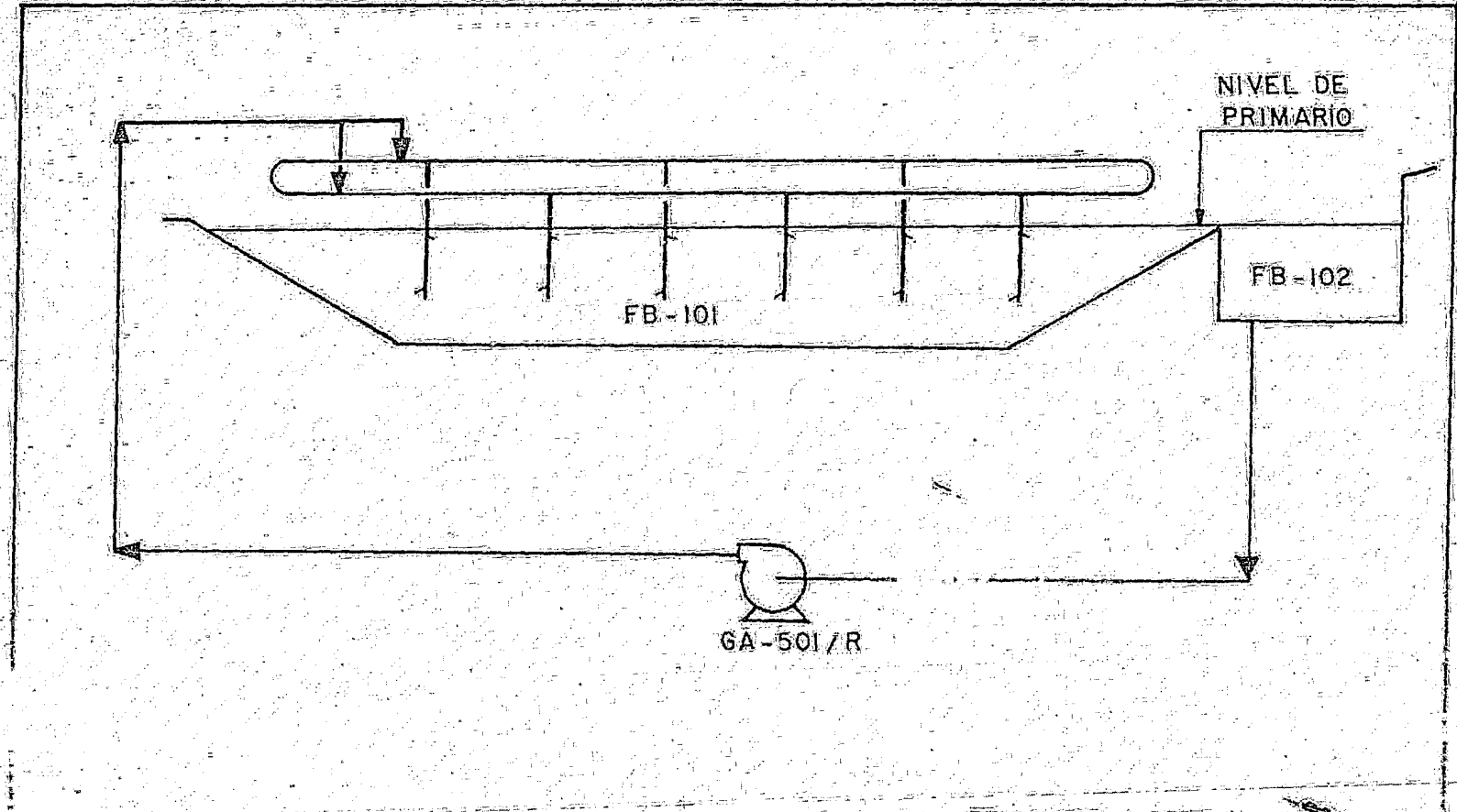
El sistema se compone de:

Bombas de agitación (GA-501/R).

Cabezal de distribución.

Operación

Del tanque de escurrido, mediante una línea se extrae primario, el cual se envía a la succión de la bomba GA-501/R y de ahí al cabezal de distribución. Este cabezal es en



(4)

TESIS PROFESIONAL. S. S. S.	
SISTEMA DE AGITACION.	
(AREA 500).	
	FIGURA IV 7

realidad una línea de tubería que rodea al tanque de electrodepósito por su parte externa inferior; a partir de ella se derivan líneas inmersas en el baño, cada una con varias boquillas o espreas dirigidas en el sentido inverso al sentido normal de flujo de carrocerías en el tanque de electrodepósito (ver figura IV.8).

Debe contarse con una bomba de relevo para asegurar, que se continuará la agitación en forma ininterrumpida.

4.2.6 Sistema del Anólito. Área 600 (figura IV.9)

Función

Eliminar el exceso de solubilizador (ácido acético) generado en los ánodos, permitiendo así, un control adecuado del pH del primario en el tanque de electrodepósito.

Descripción

Este sistema está formado por:

Tanque de anólito (FB-601).

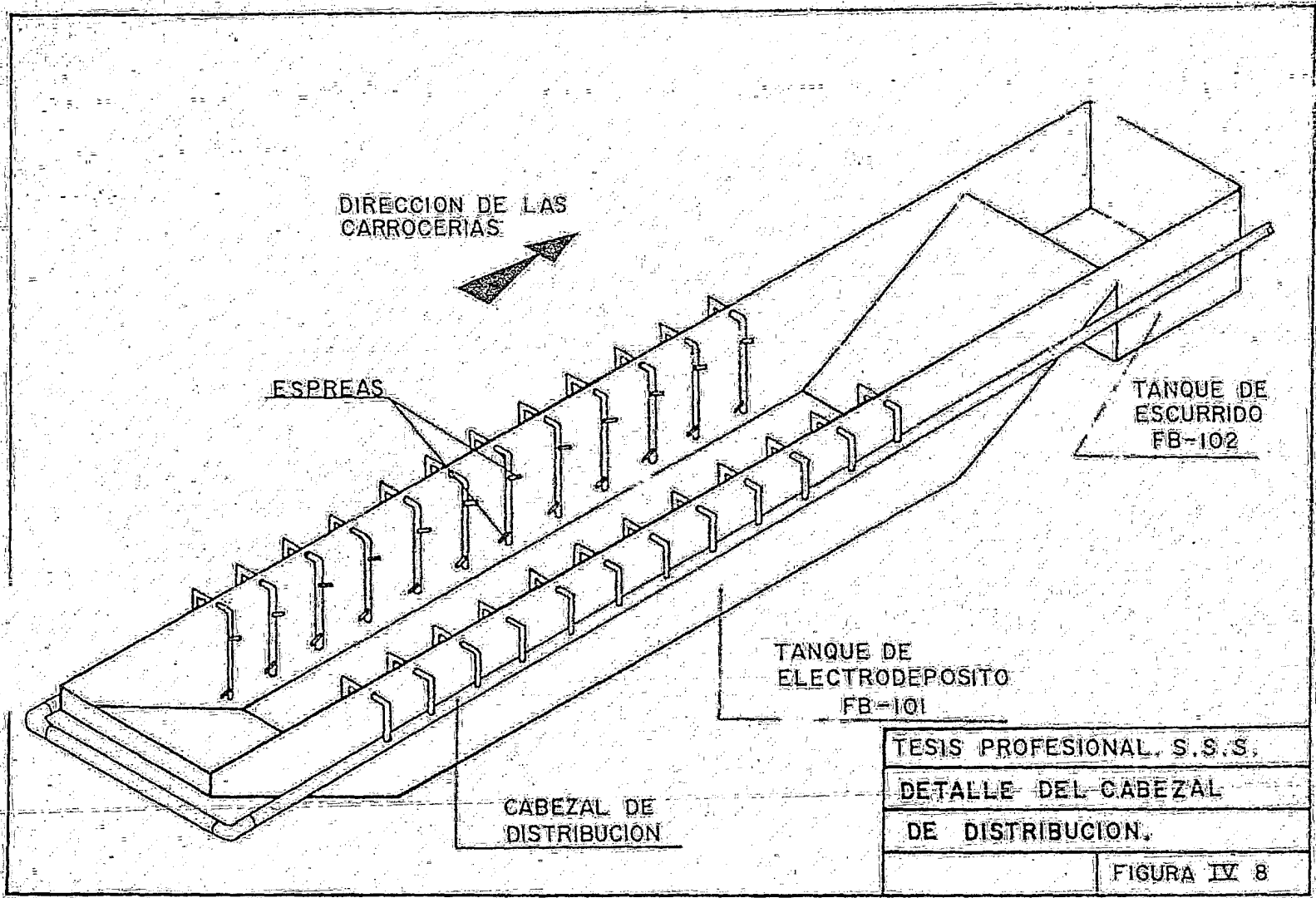
Agitador del tanque de anólito (GD-601).

Bomba de anólito (GA-601).

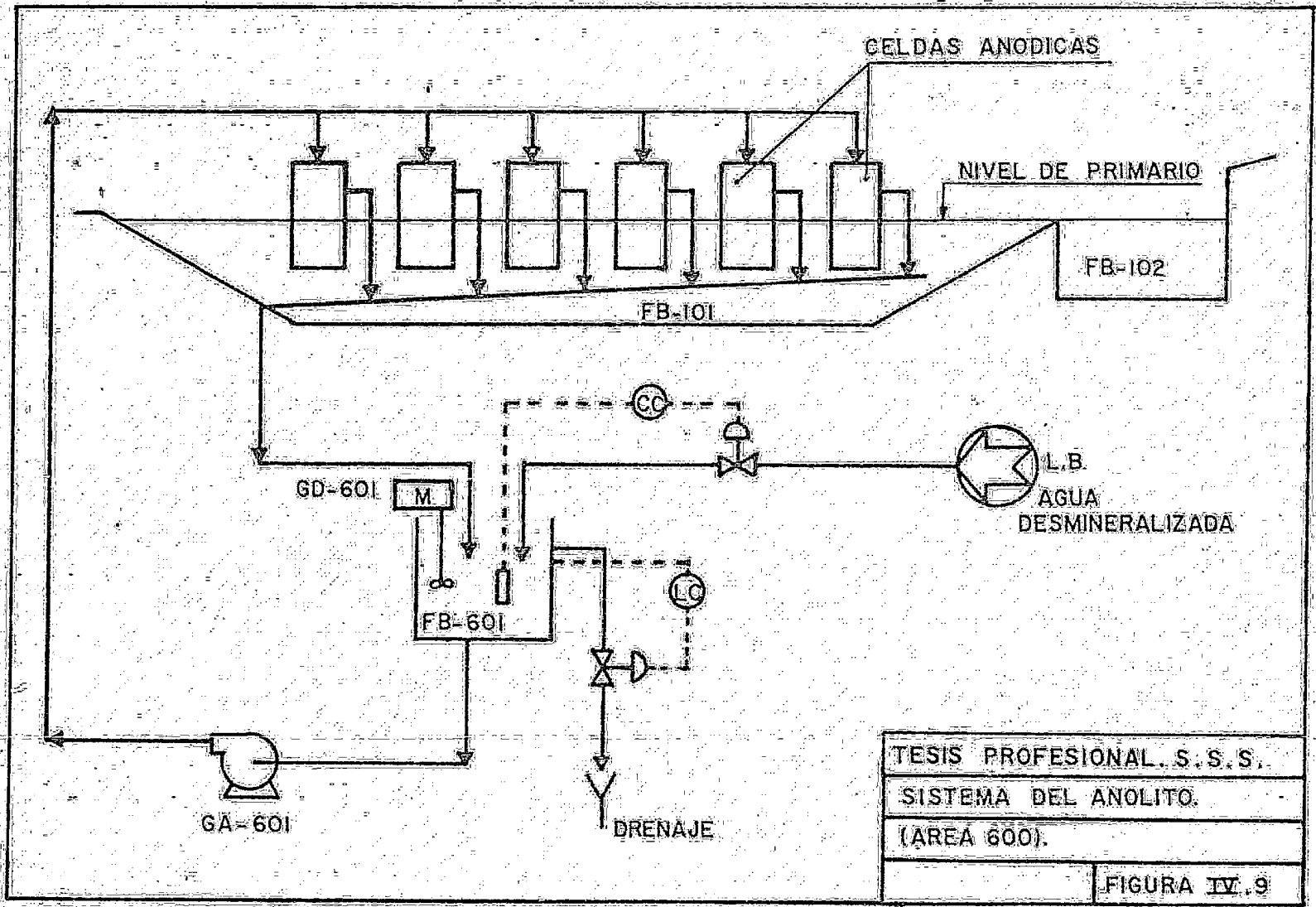
Celdas anódicas.

Operación

Los ánodos se encuentran encerrados en celdas o cajas (fabricadas de un material no conductor) cuya cara anterior es una membrana selectiva dispuesta en forma paralela al ánodo (ver fig. IV.10). La membrana permite el paso sólo hacia el electrodo, de la parte líquida del primario y de los iones acetato, los cuales producen una solución concentrada de ácido acético (anólito). El anólito se extrae de

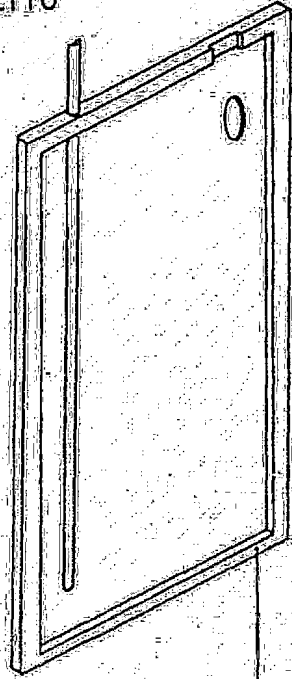


TESIS PROFESIONAL, S.S.S.	
DETALLE DEL CABEZAL DE DISTRIBUCION.	
	FIGURA IV 8



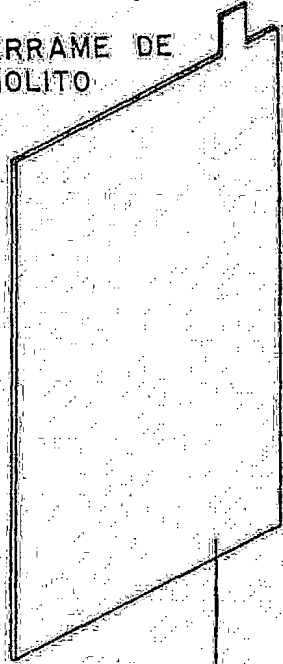
TESIS PROFESIONAL. S.S.S.	
SISTEMA DEL ANOLITO.	
(AREA 600).	
	FIGURA IV.9

ENTRADA DE ANOLITO

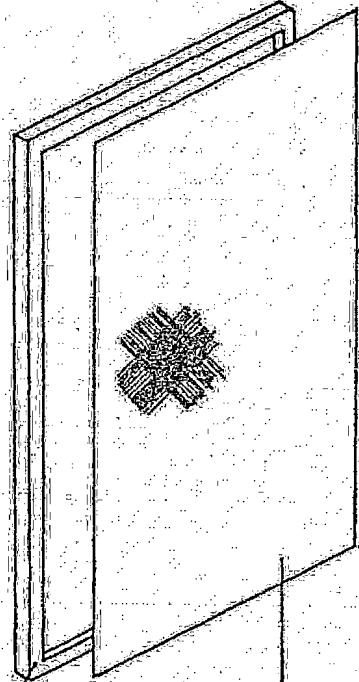


CONTENEDOR DE LA CELDA

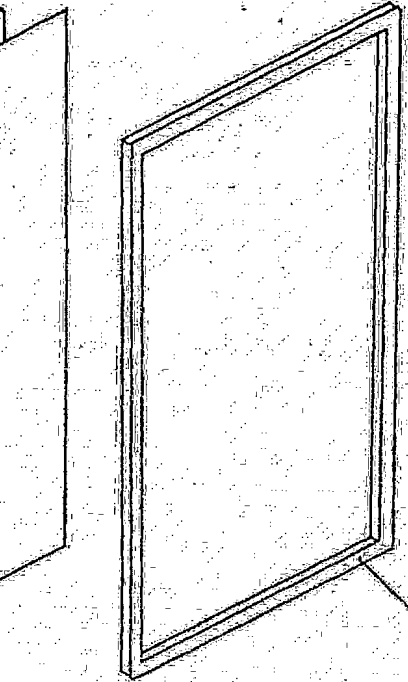
DERRAME DE ANOLITO



ANODO DE ACERO INOXIDABLE



MARCO POSTERIOR DE LA MEMBRANA



MEMBRANA SEMIPERMEABLE MARCO ANTERIOR DE LA MEMBRANA

DETALLE DE LAS CELDAS

ANODICAS.

TESIS PROF.S.S.S. FIGURA IV. 10

las celdas empleando derrames individuales conectados a un cabezal común, el que por gravedad lo envía al tanque FB-601.

Aquí se controla el pH por adición de agua desmineralizada, controlada por una válvula que recibe su señal del sensor de conductividad inmerso en el tanque. Si el valor de pH se encuentra en el rango de control no es necesaria la adición de agua; si disminuye, se agregará la cantidad de agua requerida para elevar el pH a un valor intermedio en el rango. Al ocurrir esto, aumentará la cantidad de líquido en el tanque FB-601 hasta el punto en que el controlador de nivel de este equipo abra automáticamente la válvula que envía el exceso de anólito hacia el drenaje, restableciéndose el nivel normal de operación. El tanque de anólito cuenta además con un agitador que permite la homogenización entre el agua desmineralizada y la corriente proveniente de las caldas.

Independientemente de estas operaciones, en forma continua se envía el anólito del tanque nuevamente hacia las caldas empleando la bomba GA-601, la cual descarga en un cabezal con derivaciones independientes para cada celda.

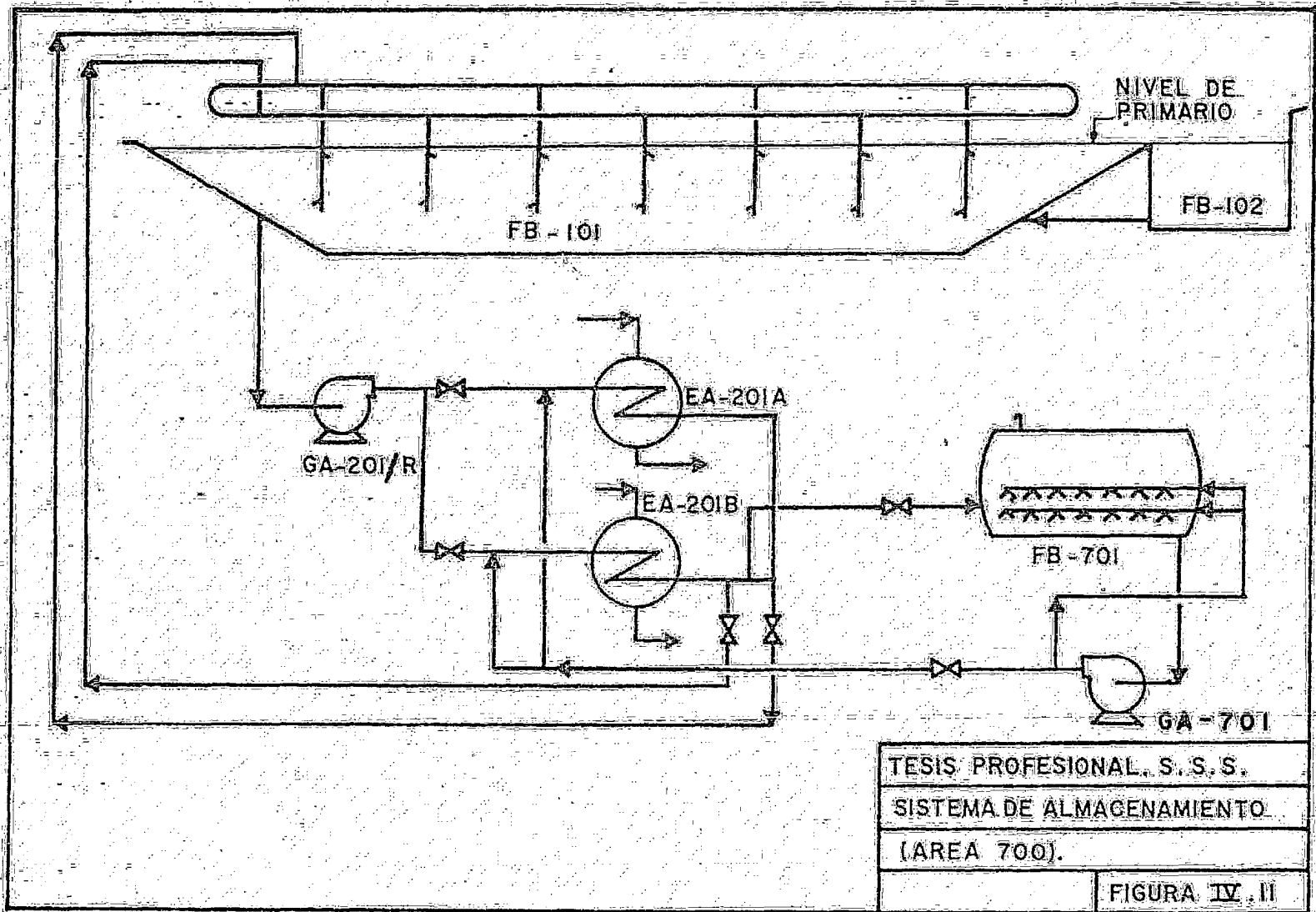
4.2.7 Sistema de Almacenamiento. Area 700 (Figura IV.11).

Función

Almacenar el primario durante los períodos de mantenimiento de la unidad, permitiendo la conservación de sus propiedades.

Descripción

El sistema está compuesto por:



Tanque de almacenamiento de primario (FB-701).

Bomba de retorno y agitación (GA-701).

Operación

Existen tres pasos en la operación de este sistema:

- a) Vaciado del tanque de electrodepósito. En este caso el primario proveniente del tanque FB-101 se transfiere al tanque de almacenamiento a través del sistema de enfriamiento, empleando las bombas GA-201/R, bloqueando el retorno al tanque de electrodepósito en la salida de los cambiadores EA-201 A/B y abriendo la interconexión de estos equipos con el tanque FB-701.
- b) Almacenamiento. Cuando en el tanque de almacenamiento se alcanza cierto nivel comienza a funcionar la bomba GA-701 que en este paso de la operación se emplea únicamente para recircular el primario del tanque; al igual que en el sistema de agitación, esto evita la sedimentación de la resina y el pigmento. La recirculación debe mantenerse durante todo el período de almacenamiento del primario.
- c) Retorno del primario al tanque de electrodepósito. Al concluir el mantenimiento de la unidad, el primario se retorna al tanque de electrodepósito empleando la bomba GA-701 cuya descarga se interconecta a la entrada de los cambiadores EA-201 A/B, haciendo pasar el primario a través de ellos y retornándolo al tanque FB-101 a través del cabezal de distribución.

Una característica importante del tanque de almacenamiento es que debe ser capaz de mantener constante la temperatura

del primario, por lo tanto es necesario aislarlo térmica - mente.

4.2.8 Sistema cerrado de enjuagues a contracorriente. Area 800 (Figura IV.12).

Función

Eliminar las partículas de resina y pigmento adheridas a la película de recubrimiento depositada. Este sistema permite el máximo aprovechamiento del primario y evita la necesidad de un consumo continuo de agua para enjuague.

Descripción

El sistema está compuesto del siguiente equipo:

Tanque de permeato (FB-801).

Tanque acumulador de la primera etapa de enjuague recirculado (FB-802).

Tanque acumulador de la segunda etapa de enjuague recirculado (FB-803).

Ultrafiltros. (FG-801 A/B).

Bombas de los ultrafiltros (GA-801/R).

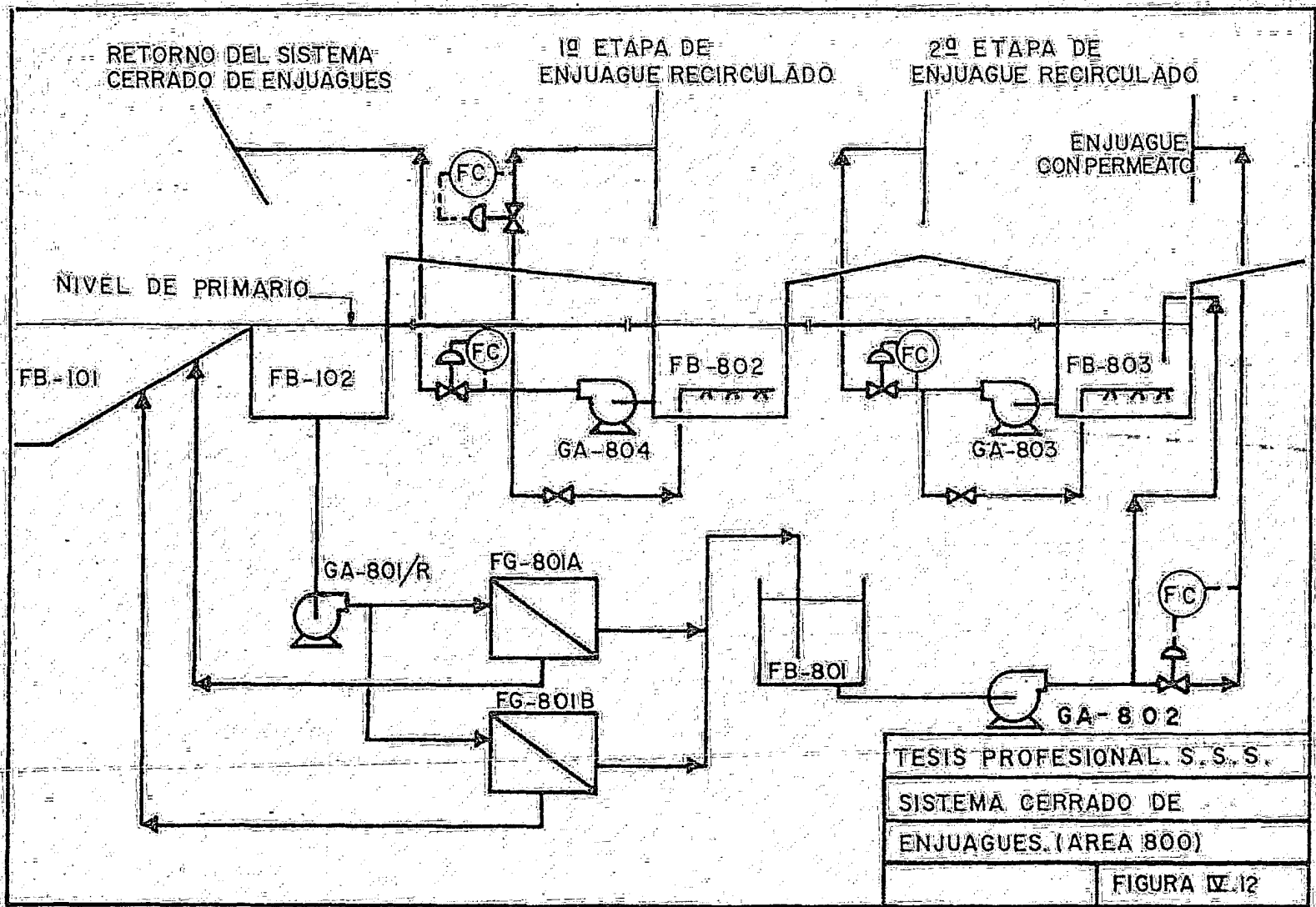
Bomba de permeato (GA-802).

Bomba de la segunda etapa de enjuague recirculado (GA-803).

Bomba de la primera etapa de enjuague recirculado (GA-804).

Operación

Considerando el sentido de flujo de las carrocerías en el proceso y de acuerdo a la recomendación del proveedor de primario, éstas deben pasar por cuatro etapas de enjuague:



TESIS PROFESIONAL. S. S. S.	
SISTEMA CERRADO DE ENJUAGUES. (AREA 800)	
	FIGURA IV.12

- a) Retorno del sistema cerrado de enjuagues.
- b) Primera etapa de enjuague recirculado.
- c) Segunda etapa de enjuague recirculado.
- d) Enjuague con permeato.

Debido a que se trata de un sistema a contracorriente, la descripción de cada etapa de enjuague se hace en sentido inverso al anteriormente establecido.

Enjuague con permeato. Del tanque de derrame se extrae - primario el que, mediante una línea, se envía a la succión de la bomba GA-801/R para de ahí pasar a los ultrafiltros FG-801 A/B (ver figura IV.13).

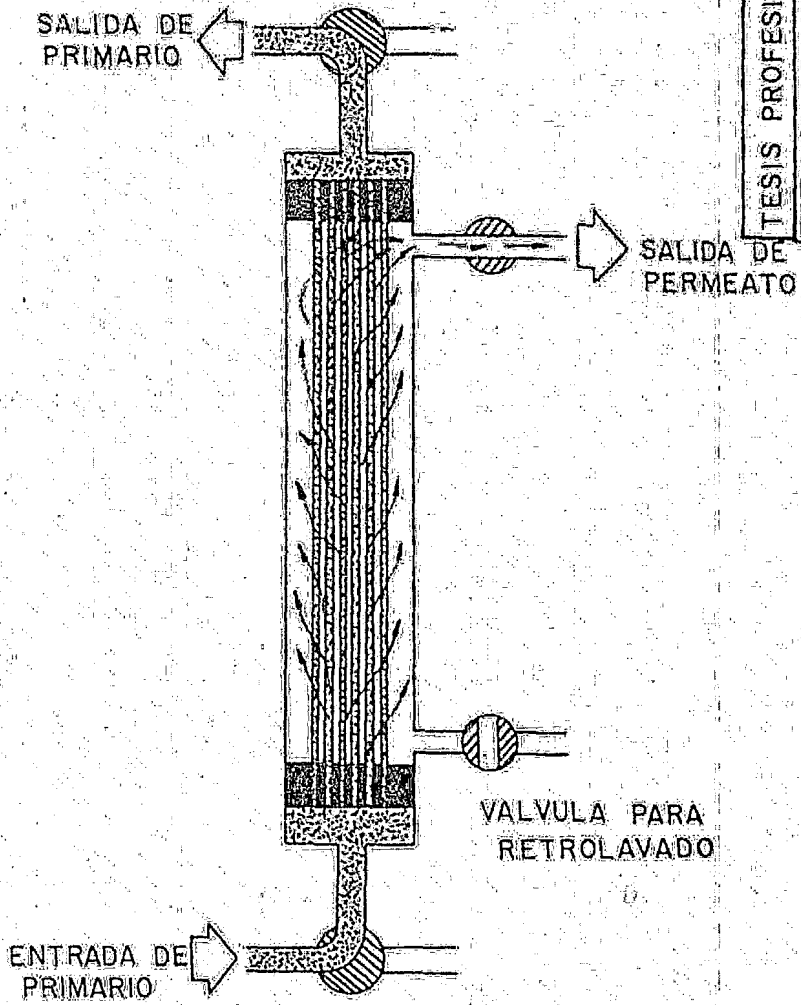
En estos equipos se separa al primario en dos corrientes:

Una que contiene prácticamente todos los sólidos del primario y se retorna al tanque de electrodeposito, y otra con un contenido casi nulo de sólidos (permeato) que se recolecta en el tanque FB-801, para de aquí enviarse mediante la bomba GA-802, bajo control de flujo, a las espreas empleadas en la etapa de enjuague con permeato (ver figura IV.14).

A la descarga de la bomba GA-802 debe preverse la instalación de una línea para efectuar el llenado inicial de los tanques FB-802 y FB-803.

El permeato, una vez enjuagada la carrocería, se recolecta en el tanque FB-803.

Segunda etapa de enjuague recirculado. Del tanque FB-803 se extrae la solución empleada en esta etapa de enjuague, misma que se envía mediante la bomba GA-803 bajo control de Flujo a las espreas correspondientes (ver figura IV.14).



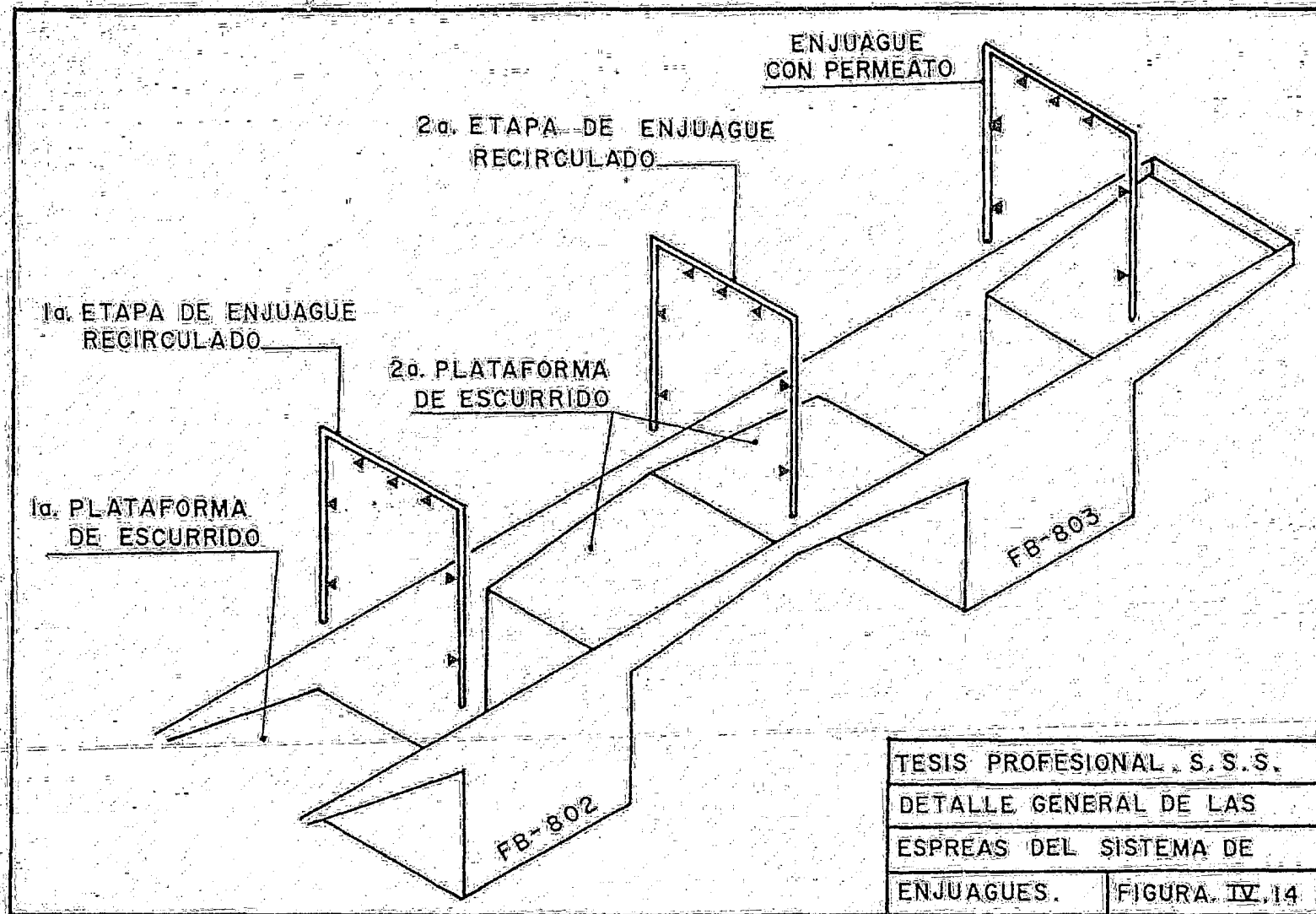
TESIS PROFESIONAL. S. S. S.

DETALLE DE CARTUCHO PARA

ULTRAFILTRACION.

FIGURA IV. 13

REF.: CATALOGO DE FABRICANTE ROMICON.



Es necesario que parte de la solución manejada por la bomba GA-803 se recircule al tanque acumulador FB-803 para provocar la agitación de su contenido. La solución de esta etapa se recolecta en el tanque FB-803, una vez enjuagada la carrocería.

El exceso de solución se envía mediante un derrame al tanque acumulador FB-802.

Primera etapa de enjuague recirculado. Del tanque FB-802, se extrae la solución empleada en esta etapa de enjuague, misma que se envía mediante la bomba GA-804 bajo control de flujo a las espreas correspondientes (ver figura IV.14). Es necesario que parte de la solución manejada por la bomba GA-804 se recircule al tanque acumulador FB-802 para provocar la agitación de su contenido. La solución de esta etapa se recolecta en el tanque FB-802 una vez enjuagada la carrocería, el exceso de solución se envía mediante un derrame al tanque FB-102.

Retorno del sistema cerrado de enjuagues. Esta etapa corresponde al primer enjuague que reciben las carrocerías y se efectúa directamente sobre el tanque de electrodepósito al salir la carrocería. La solución empleada, proviene de la descarga de la bomba GA-804 y se envía bajo control de flujo, a las espreas de esta etapa (ver figura IV.14).

Entre cada paso de enjuague se instalarán plataformas que permitan la recolección del líquido escurrido de las carrocerías, y su envío a los tanques acumuladores. El dimensionamiento de las plataformas depende del tiempo de escurrido recomendado por el proveedor de primario y de la velocidad de las carrocerías en el proceso.

4.3 DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE PROCESO

4.3.1 Diseño del Sistema de Electrodeposición. (Área 100).

a) - Tanque de electrodeposición (FB-101).

Ancho del tanque.

$$A = A_{mc} + 2 C_a + 2 A_p$$

donde:

A = Ancho total del tanque; cm.

A_{mc} = Ancho máximo de la carrocería; 201 cm.

C_a = Claro recomendable en el ancho; 46 cm.

A_p = Apertura recomendable de las puertas; 15 cm.

$$A = 201 \text{ cm} + 2 (46 \text{ cm}) + 2 (15 \text{ cm})$$

$$A = 323 \text{ cm.}$$

(ver figura IV-15).

Altura del tanque:

$$H = H_{mc} + C_s + C_i + H_{sn} + H_b$$

donde:

H = Altura total del tanque; cm.

H_{mc} = Altura máxima de la carrocería; 117 cm.

C_s = Claro recomendable superior; 16 cm.

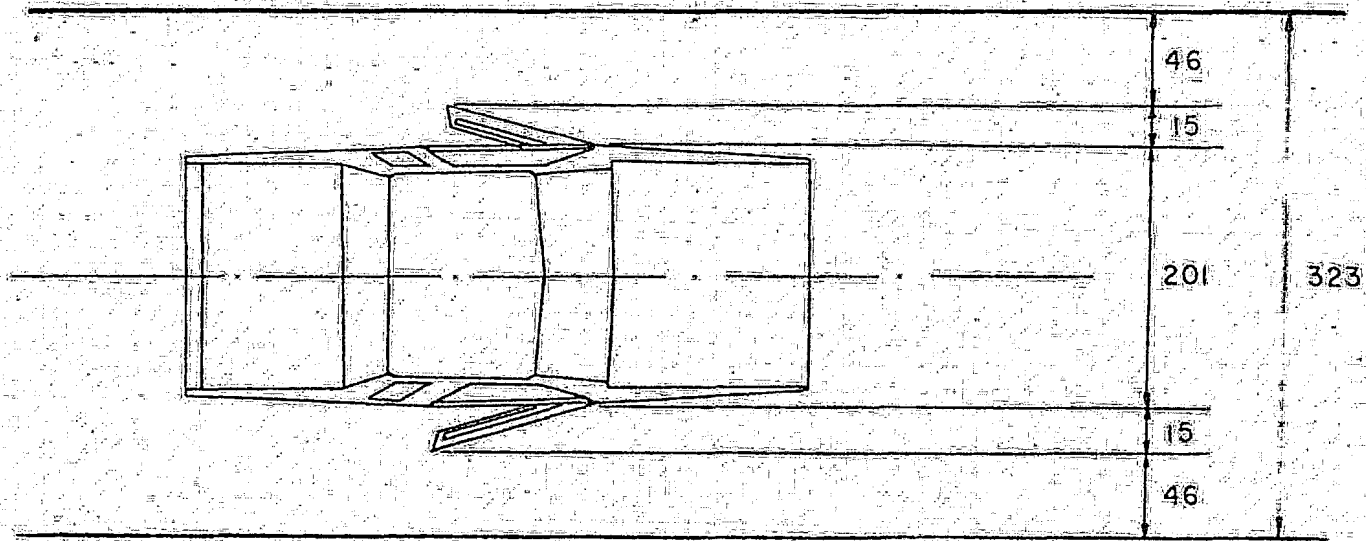
C_i = Claro recomendable inferior; 46 cm.

H_{sn} = Altura sobre el nivel de líquido; 25 cm.

H_b = Altura del bastidor; 20 cm.

$$H = 117 \text{ cm} + 16 \text{ cm} + 46 \text{ cm} + 25 \text{ cm} + 20 \text{ cm}$$

$$H = 224 \text{ cm.}$$



ACOT: cm

TESIS PROFESIONAL S. S. S.

DISTRIBUCIÓN DE DIMENSIONES EN

EL ANCHO DEL TANQUE DE ELEC.

TRODEPOSITO.

FIGURA IV.15

Se considerarán 20cms adicionales entre el piso y la superficie inferior del tanque de electrodepósito para la disposición de apoyos o posibles refuerzos estructurales. (ver figura IV.16).

Longitud del tanque

Esta dimensión es función del tiempo necesario para lograr el espesor de recubrimiento establecido por el proveedor de primario. A voltaje constante se tiene que:

$$t = S^2 (2G k_p V)^{-1} \quad \text{EC. II.29}$$

donde:

t = Tiempo de inmersión; seg.

S = Espesor de recubrimiento; 2.6×10^{-3} cm.

G = Eficiencia Coulómbica; 3.4×10^{-2} cm³/Coulomb.

k_p = Conductividad eléctrica de la película; 2.4×10^{-9} ohm⁻¹ cm⁻¹.

V = Voltaje de aplicación; 350 volts.

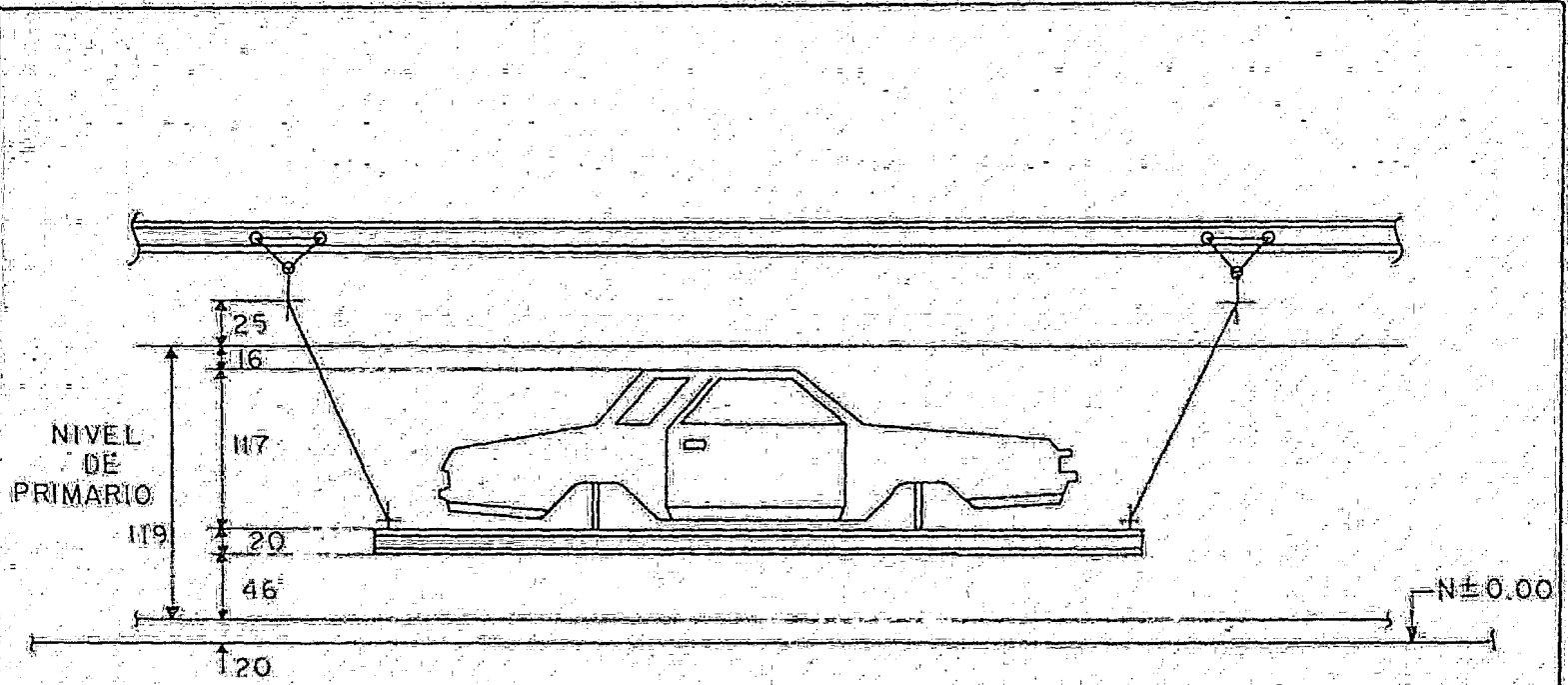
$$t = \frac{(2.6 \times 10^{-3} \text{ cm})^2}{(2)(3.4 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{Coulomb})(2.4 \times 10^{-9} \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1})(350 \text{ volts})}$$

$$t = 118.35 \text{ seg} \approx 120 \text{ seg}$$

$$t = 2 \text{ Min.}$$

Cálculo de la velocidad de las carrocerías en el proceso. Si se requiere una producción anual de 75,000 unidades, -- trabajando 250 días al año y 15 horas diarias, la capacidad por hora será :

$$(75,000 \text{ Unidades/Año}) (1 \text{ Año}/250 \text{ Días}) (1 \text{ Día}/15 \text{ Hrs.}) = 20 \text{ Unidades/Hora.}$$



ACOT:cm
 TESIS PROFESIONAL. S.S.S.
 DISTRIBUCION DE DIMENSIONES EN
 LA ALTURA DEL TANQUE DE ELEC
 TRODEPOSITO. FIGURA IV.16

La velocidad de las carrocerías en el proceso dependerá - de la longitud de las mismas y de los espacios libres entre ellas, (ver figura III.3) así como del número de unidades procesadas:

$$v_c = U (L_{mc} + E)$$

donde:

v_c = Velocidad de las carrocerías dentro del proceso; cm/hr.

U = Carrocerías procesadas por hora; 20 unidades/hr.

L_{mc} = Longitud máxima de las carrocerías; 495 cm/unidad.

E = Espaciamiento entre las carrocerías; 360 cm/unidad.

$$v_c = (20 \text{ unidades/hr}) (495 \text{ cm/unidad} + 360 \text{ cm/unidad}).$$

$$v_c = 17120 \text{ cm/hr} = 285.33 \text{ cm/min.}$$

La longitud que debe recorrer cualquier punto de la carrocería para quedar recubierto debe ser:

$$L_h = v_c t$$

donde:

L_h = Longitud que recorre horizontalmente la carrocería; cm.

v_c = Velocidad de las carrocerías; 285.33 cm/min.

t = Tiempo de inmersión; 2 min.

$$L_h = (285.33 \text{ cm/min}) (2 \text{ min}) \quad L_h = 570.66 \text{ cm} \approx 571 \text{ cm.}$$

Al inicio de las operaciones los ánodos se encontrarán uniformemente distribuidos en la longitud anteriormente calculada más la correspondiente al bastidor de la carrocería, pero como se prevee un aumento máximo de 40% en la capacidad de la unidad debe considerarse la longitud horizontal adicional, que deben recorrer las carrocerías a la velocidad que permita obtener la máxima capacidad, en la que inicialmente no se tentrán ánodos; por lo tanto:

$$L_{hm} = 1.4 L_h$$

donde:

L_{hm} = Longitud que recorre horizontalmente a máxima capacidad; cm.

$$L_{hm} = (1.4) (571 \text{ cm}) \qquad L_{hm} = 799 \text{ cm.}$$

La velocidad de la línea en el caso de máxima capacidad será:

$$v_{cm} = L_{hm}/t$$

donde:

v_{cm} = Máxima velocidad de las carrocerías en el proceso; cm/min.

L_{hm} = Longitud horizontal máxima; 799 cm.

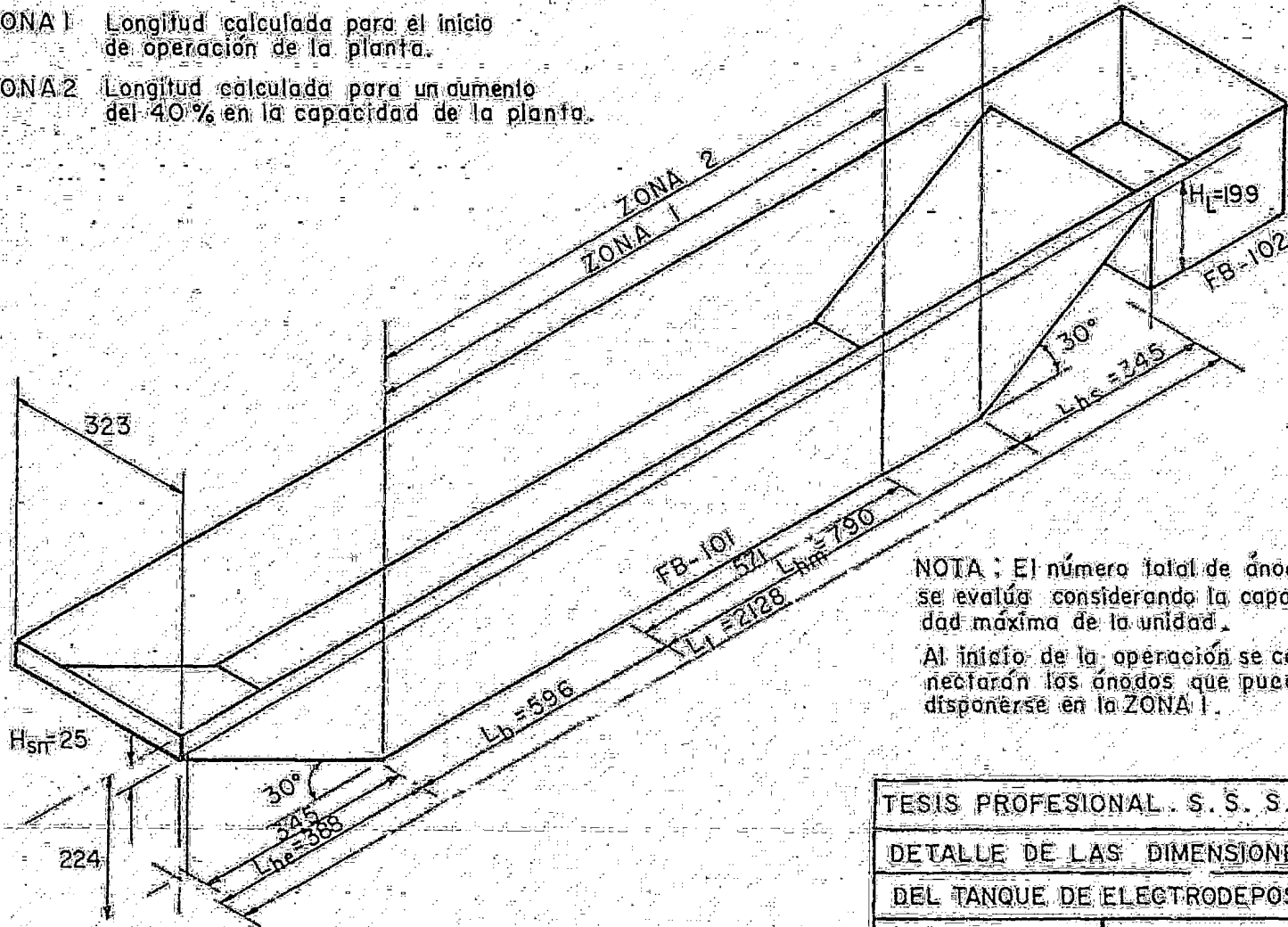
t = Tiempo de inmersión; 2 min.

$$v_{cm} = 799 \text{ cm}/2 \text{ min.} \qquad v_{cm} = 399.48 \text{ cm/min.}$$

La longitud total del tanque será: (ver figura IV.17)

$$L_t = L_{he} + L_b + L_{hm} + L_{hs}.$$

- ZONA 1 Longitud calculada para el inicio de operación de la planta.
- ZONA 2 Longitud calculada para un aumento del 40% en la capacidad de la planta.



NOTA: El número total de ánodos se evalúa considerando la capacidad máxima de la unidad.

Al inicio de la operación se conectarán los ánodos que pueden disponerse en la ZONA 1.

TESIS PROFESIONAL . S . S . S .	
DETALLE DE LAS DIMENSIONES DEL TANQUE DE ELECTRODEPOSITO	
ACOT: : cM	FIGURA IV:17

donde:

$$L_{he} = \text{Longitud horizontal de entrada; } H/\tan 30^{\circ} = 224\text{cm}/0.577 = 388 \text{ cm.}$$

$$L_b = \text{Longitud del bastidor; } 596 \text{ cm.}$$

$$L_{hs} = \text{Longitud horizontal de salida; } H/\tan 30^{\circ}.$$

$$H_j = \text{Nivel de líquido en el tanque; } 199 \text{ cm (ver figura IV.16).}$$

$$L_{hs} = 199 \text{ cm}/0.577 = 345 \text{ cm.}$$

$$L_t = 388 \text{ cm} + 596 \text{ cm} + 799 \text{ cm} + 345 \text{ cm} \quad L_t = 2128 \text{ cm.}$$

Volumen de primario en el tanque de electrodepósito (V_{p1})

$$V_{p1} = V_e + V_h + V_s$$

donde:

V_e = Volumen correspondiente a la entrada; L.

V_h = Volumen correspondiente a la parte horizontal; L.

V_s = Volumen correspondiente a la salida; L.

además:

$$V_e = (H_j A/2) (L_{he} - H_{sn}/\tan 30^{\circ})$$

$$V_h = (H_j A) (L_b + L_{hm})$$

$$V_s = (H_j L_{hs} A) / 2$$

$$V_e = ((199\text{cm}) (323\text{cm})/2) (388\text{cm} - 25\text{cm}/0.577) \quad V_e = 11078100.13 \text{ cm}^3$$

$$V_e = 11078.1 \text{ L.}$$

$$V_h = (199\text{cm}) (323\text{cm}) (596\text{cm} + 799\text{cm}) \quad V_h = 89666415 \text{ cm}^3 = 89666.4 \text{ L.}$$

$$V_s = (199\text{cm}) (345\text{cm}) (323\text{cm})/2 \quad V_s = 11078100.13 \text{ cm}^3 = 11078.1 \text{ L.}$$

$$V_{p1} = 11078.1 \text{ L} + 89666.4 \text{ L} + 11078.1 \text{ L} \quad V_{p1} = 111832 \text{ L.}$$

b) Sistema de ánodos

La superficie total anódica requerida puede calcularse conociendo la máxima superficie de carrocerías que se recubre durante el tiempo de inmersión especificado por el proveedor de primario.

$$S_r = S_c U_m t$$

$$U_m = 1.4 U$$

donde:

S_r = Superficie a recubrir (catódica); m^2 .

S_c = Superficie unitaria de las carrocerías; $95 m^2$ /unidad.

U_m = Máximo número de carrocerías procesadas cada hora = $(1.4) (20 \text{ unidades/hr.}) = 28 \text{ unidades/hr.}$

t = Tiempo de inmersión; 2min.

$$S_r = (95 m^2/\text{unidad}) (28 \text{ unidades/hr}) (1\text{hr}/60\text{min.}) (2\text{min.})$$

$$S_r = 88.66 m^2$$

Como la relación entre el área a recubrir y la requerida de ánodos es 4:1.

$$S_a = S_r/4$$

donde:

S_a = Superficie anódica requerida; m^2 .

$$S_a = 88.66 m^2/4$$

$$S_a = 22.16 m^2$$

Para el dimensionamiento individual de los ánodos puede evaluarse, en primer lugar, la altura de éstos considerando las dimensiones de las carrocerías y las tolerancias an

teriormente establecidas (ver figura IV.18).

$$H_a = H_{mc} + C_s + H_{ta}$$

donde:

H_a = Altura del ánodo; cm.

H_{mc} = Altura máxima de la carrocería; 117 cm.

C_s = Claro recomendable superior; 16 cm.

H_{ta} = Altura recomendable del ánodo sobre el nivel del primario; 3cm.

$$H_a = 117\text{cm} + 16\text{cm} + 3\text{cm} \quad H_a = 136\text{cm} = 1.36 \text{ m.}$$

Por lo tanto el ancho total de ánodos será:

$$A_{ta} = S_a / H_a$$

donde:

A_{ta} = Ancho total de ánodos; m.

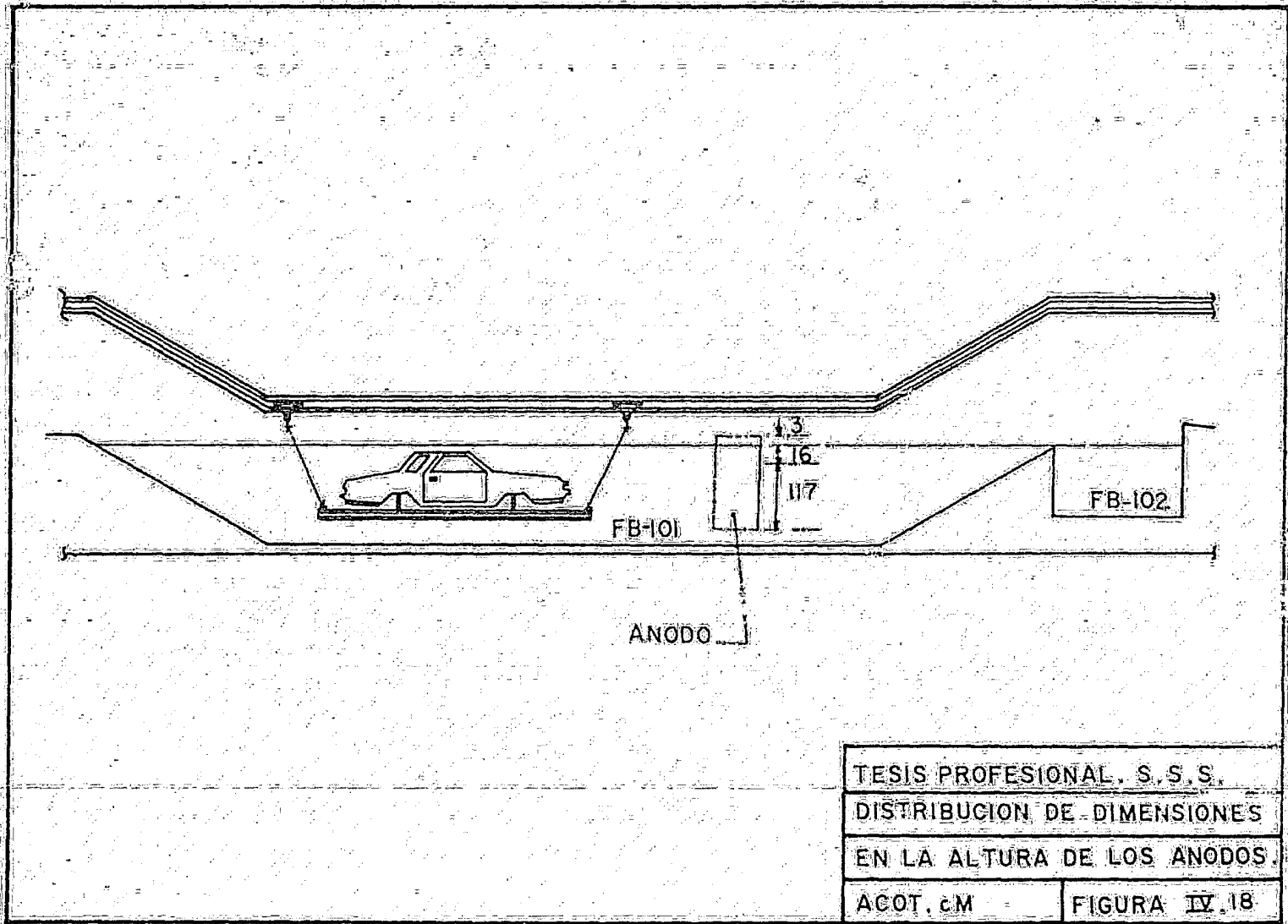
S_a = Superficie anódica; 22.16 m².

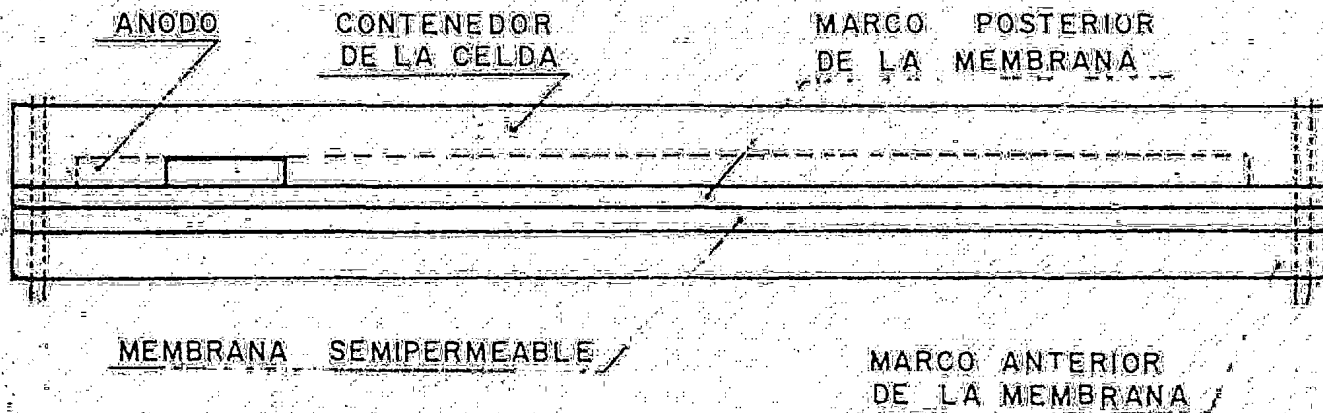
H_a = Altura de ánodos; 1.36 m.

$$A_{ta} = 22.16\text{m}^2 / 1.36\text{m}^2$$

$$A_{ta} = 16.30\text{m.}$$

Como la membrana selectiva se produce con un ancho máximo de 1m. el ancho máximo de la celda será también de 1m. Sin embargo esta dimensión implica dificultad en el manejo de la celda por lo que se propone utilizar membranas de 0.75m. de ancho. Considerando que el ánodo requiera 4cm. por lado para su sujeción en la celda, se tiene un ancho efectivo de 67 cm. por ánodo (ver figura IV.19). Entonces, el -





TESIS PROFESIONAL S. S. S.	
CORTE TRANSVERSAL DE UNA	
CELDA ANODICA.	
	FIGURA IV.19

número total de ánodos será:

$$N_a = A_{ta}/A_{ea}$$

donde:

N_a = Número total de ánodos.

A_{ta} = Ancho total de ánodos; 16.30m.

A_{ea} = Ancho efectivo por ánodo; 0.67 m/ánodo.

$$N_a = 16.30m / (0.67m/ánodo)$$

$$N_a = 24.3 \text{ ánodos} \approx 24 \text{ ánodos}$$

que se distribuirán uniformemente, 12 en cada lado de la parte horizontal del tanque de electrodepósito. Debe recordarse que al inicio de las operaciones de la unidad solamente se dispondrán ánodos en una parte de este tanque.

c) Tanque de derrame (FB-102).

Ancho del tanque.

Se considera que esta dimensión debe ser la misma que la correspondientes al tanque de electrodepósito.

$$A = 323cm.$$

Longitud del tanque

Como se recordará este tanque tiene por finalidad recolectar el escurrido inicial de la carrocería y mezclarlo con el retorno del sistema cerrado de enjuagues. La longitud de este tanque puede evaluarse conociendo la longitud requerida para drenar la carrocería durante el tiempo recomendado por el proveedor del primario.

$$L_2 = V_{cm} \cdot t_e$$

donde:

L_e = Longitud requerida para escurrir las carrocerías;
cm.

v_{cm} = Máxima velocidad de las carrocerías en el proceso;
399.48 cm/min.

t_e = Tiempo de drenado; 1.5 min.

NOTA:

El tiempo mínimo de drenado recomendable es de un minuto.

$L_e = (399.48 \text{ cm/min}) (1.5 \text{ min}).$

$L_e = 600 \text{ cm.}$

Para no tener un tanque de esta dimensión, y debido a que la intensidad con que se drenan las carrocerías en forma natural disminuye con el tiempo, se considera que la mitad de la longitud de drenado corresponde al tanque de derrame y la otra mitad a la primera plataforma de escurrido, misma que se conecta al tanque acumulador de la primera etapa de enjuague recirculado, FB-802. Esta plataforma tiene una inclinación de 8° , suficiente para que por gravedad el drenado remanente circule hacia el tanque FB-802.

$$L = L_e / 2$$

donde:

L = Longitud del tanque de derrame; cm.

L_e = Longitud requerida para escurrir carrocerías; 600 cm.

$L = 600 \text{ cm} / 2$

$L = 300 \text{ cm.}$

además:

$$L_{p1} = L_e - L$$

donde:

L_{p1} = Longitud horizontal de la 1ª plataforma de escurrido; cm.

$$L_{p1} = 600 \text{ cm} - 300 \text{ cm.}$$

$$L_{p1} = 300 \text{ cm.}$$

Altura del tanque

En forma adicional a los 20cm de claro entre el piso y el tanque de electrodepósito, se considerarán 80cm para permitir un adecuado arreglo de tuberías; dado que el nivel de primario es el mismo en este tanque y en el de electrodepósito, la altura de la pared anterior del tanque de derrame será : (ver figura IV.20).

$$H_a = H_1 - 80$$

donde:

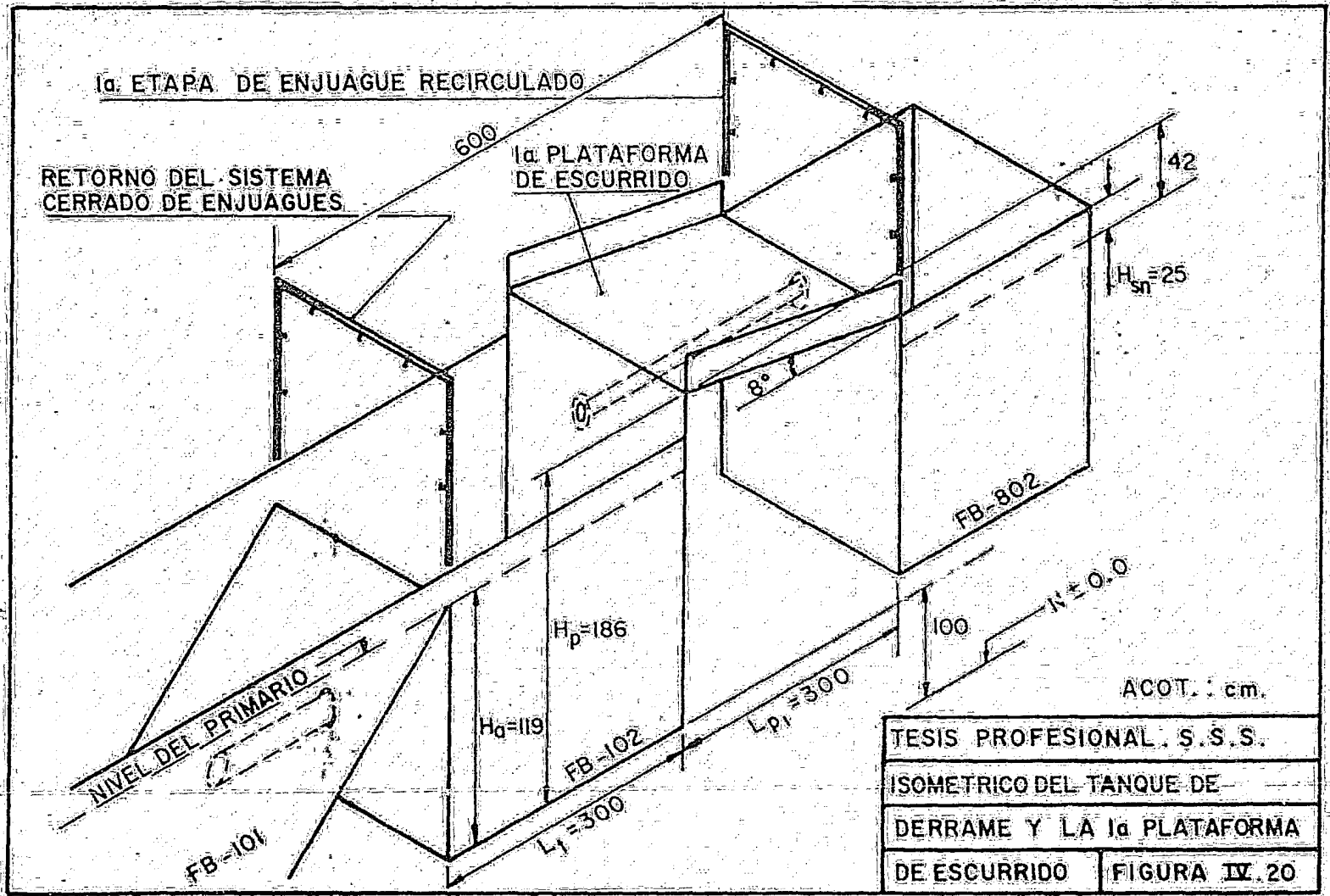
H_a = Altura de la pared anterior del tanque de derrame; cm.

H_1 = Nivel del primario en los tanques de electrodepósito y derrame; 199 cm.

$$H_a = 199 \text{ cm} - 80 \text{ cm.}$$

$$H_a = 119 \text{ cm.}$$

La altura de la pared posterior depende de la longitud vertical requerida para la interconexión entre el tanque de derrame y el acumulador de la primera etapa de enjuague re -



circulado, empleando la primera plataforma de escurrido; además en la altura del tanque FB-802 se considera un claro adicional sobre el nivel del primario, igual al empleado en el cálculo de la altura del tanque de electrodeposición:

$$H_p = H_a + H_{sn} + (L_{p1}) (\tan \theta^{\circ})$$

donde:

H_p = Altura de la pared posterior del tanque de derrame; cm.

H_a = Altura de la pared anterior del tanque de derrame; 119 cm.

H_{sn} = Altura sobre el nivel del líquido; 25 cm.

L_{p1} = Longitud horizontal de la 1a. plataforma de escurrido; 300 cm.

$$H_p = 119\text{cm} + 25\text{cm} + (300\text{cm}) (0.1405) \quad H_p = 186 \text{ cm.}$$

Volumen de primario en el tanque de derrame (V_{p2})

$$V_{p2} = A L H_a$$

donde:

A = Ancho del tanque de derrame; 323 cm.

L = Longitud del tanque de derrame; 300 cm.

H_a = Altura de la pared anterior del tanque de derrame; 119 cm.

$$V_{p2} = (323\text{cm})(300\text{cm})(119 \text{ cm}) \quad V_{p2} = 11531100 \text{ cm}^3 = 11531.1 \text{ L}$$

El volumen total de primario requerido para la operación de la unidad (V_p) será:

$$V_p = V_{p1} + V_{p2}$$

$$V_p = 111832 \text{ L} + 11531.1 \text{ L} \quad V_p = 123363.3 \text{ L} \approx 123400 \text{ L}$$

- d) Cálculo de los requerimientos de corriente en el sistema de electrodepósito y de la potencia del rectificador de corriente. La máxima demanda de corriente corresponderá a la cantidad consumida por una carrocería al inicio del recubrimiento más la consumida por la carrocería precedente en caso de que aún se encuentre conectada; para saber si lo está, es necesario evaluar el tiempo que transcurre entre el paso de una carrocería por el tanque de electrodepósito y la conexión de la siguiente, considerando el caso de máxima velocidad de la línea.

La distancia recorrida por una carrocería completamente inmersa, antes de que la siguiente esté en posición de conectarse será: (ver figura III.3).

$$L_r = L_c + 2L_{cg} + L_{ec}$$

donde:

L_r = Longitud recorrida entre la conexión de las carrocerías; cm.

L_c = Longitud de la carrocería; 496 cm.

L_{cg} = Distancia entre carrocería y gancho; 120 cm.

L_{ec} = Separación recomendada entre carrocerías; 120 cm.

$$L_r = 496 \text{ cm} + 2(120 \text{ cm}) + 120 \text{ cm} \quad L_r = 856 \text{ cm}$$

El tiempo de defasamiento entre carrocerías será:

$$t_d = L_r / v_{cm}$$

donde:

t_d = Tiempo de defasamiento entre carrocerías; min.

L_r = Longitud recorrida entre la conexión de las carrocerías;
856cm.

v_{cm} = Máxima velocidad de las carrocerías en el proceso; 399.48 cm/min.

t_d = $856\text{cm}/(399.48\text{cm/min})$.

t_d = 2.14 min.

Como el tiempo de recubrimiento es de dos minutos, al momento de conectarse una carrocería, la anterior se habrá desconectado 0.14 minutos antes; por lo tanto no se tendrán dos carrocerías conectadas al mismo tiempo.

La demanda de corriente puede evaluarse de la ecuación II.30 a diferentes tiempos.

$$j = (k_p V/2c)^{0.5} (t)^{-0.5}$$

donde:

j = Densidad de corriente; amp/cm².

k_p = Conductividad eléctrica de la película; $2.4 \times 10^{-9} \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}$

V = Voltaje de aplicación; 350 volts.

c = Eficiencia coulombica; $3.4 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{coulomb}$.

t = Tiempo; seg.

$$j = \left[\frac{(2.4 \times 10^{-9} \text{ ohm}^{-1} \text{ cm}^{-1}) (350 \text{ volts})}{(2) (3.4 \times 10^{-2} \text{ cm}^3/\text{coulomb})} \right]^{0.5} (t)^{-0.5}$$

$$j = 3.52 \times 10^{-3} (t)^{-0.5}$$

además:

$$I = j S_c$$

donde:

I = Intensidad de corriente; amp.

j = Densidad de corriente; amp/cm².

S_c = Superficie unitaria de las carrocerías; 950 000 cm².

Adicionalmente se considerará que la máxima demanda de corriente corresponderá al primer instante en que la carrocería está conectada y aún no comienza a formarse el depósito, lo cual corresponde al tiempo 0. Bajo estas condiciones la única resistencia apreciable en el circuito será la del primario en el baño, misma que puede evaluarse según la relación:

$$R = (1/k_b) (L/A)$$

donde:

R = Resistencia del primario en el baño; ohm.

k_b = Conductividad eléctrica del primario en el baño; 1×10^{-3} ohm⁻¹ cm⁻¹

L = Distancia promedio entre los ánodos y la parte más externa y el centro de la carrocería; cm.

A = Área de la mitad de la carrocería = 475 000 cm².

El valor de L puede calcularse de las dimensiones de la carrocería y las tolerancias especificadas (ver figura - IV.15).

$$L = (46\text{cm} + 146\text{cm})/2 = 96\text{cm}.$$

$$R = (1 \times 10^3 \text{ ohm cm}) (96\text{cm}/475000\text{cm}^2).$$

$$R = 0.202 \text{ ohm}.$$

Como se tienen ánodos a ambos lados de la carrocería se tiene un sistema de dos resistencias iguales conectadas en paralelo.

$$R_t = 0.202 \text{ ohm}/2.$$

$$R_t = 0.101 \text{ ohm}.$$

Con esto la demanda de corriente inicial será:

$$I_0 = V/R_t$$

donde:

I_0 = Intensidad de corriente inicial; amp.

V = Voltaje aplicado; 350 volts.

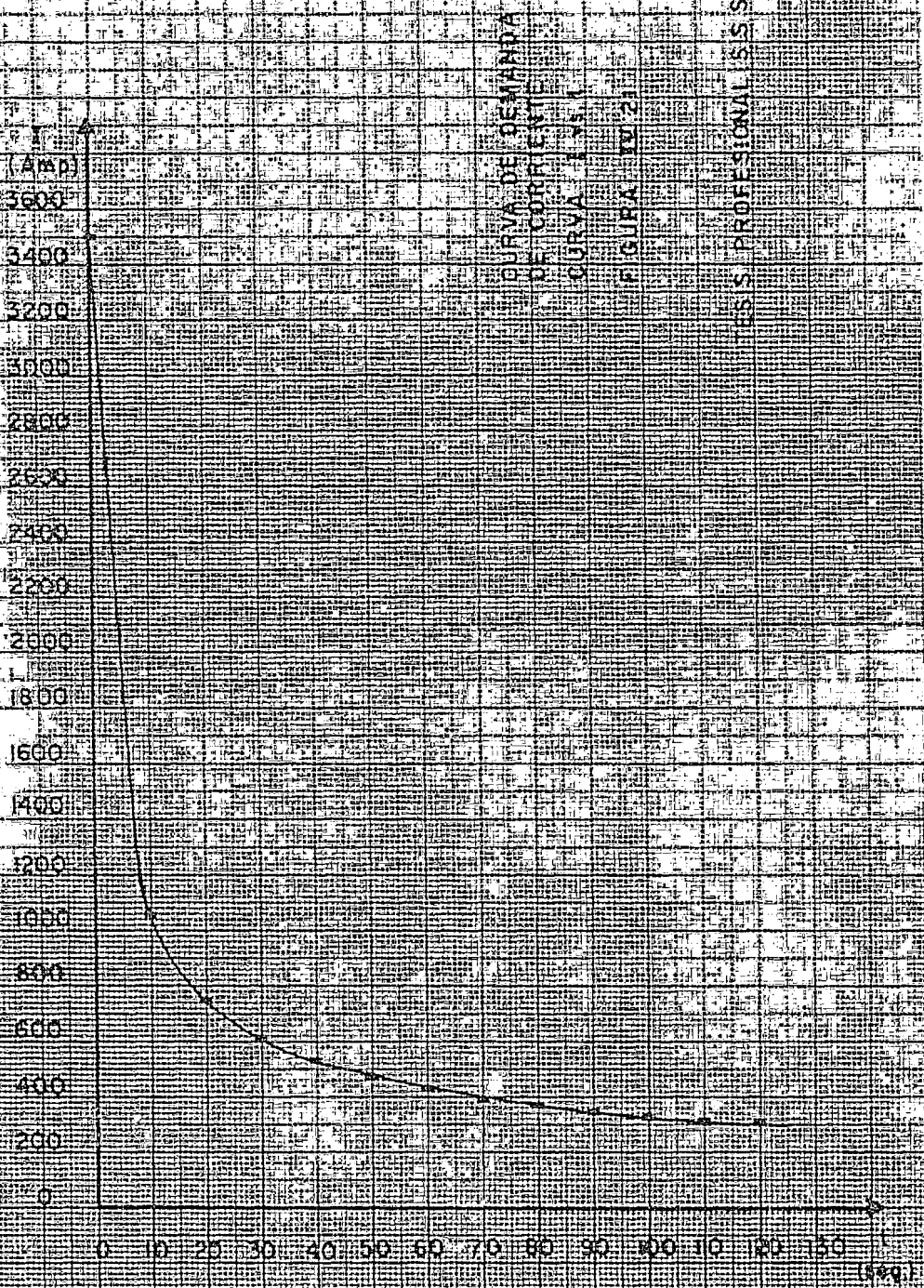
R_t = Resistencia total en el circuito; 0.101 ohm.

$I_0 = 350 \text{ volts}/0.101 \text{ ohm}.$

$I_0 = 3465.35 \approx 3500 \text{ amp}.$

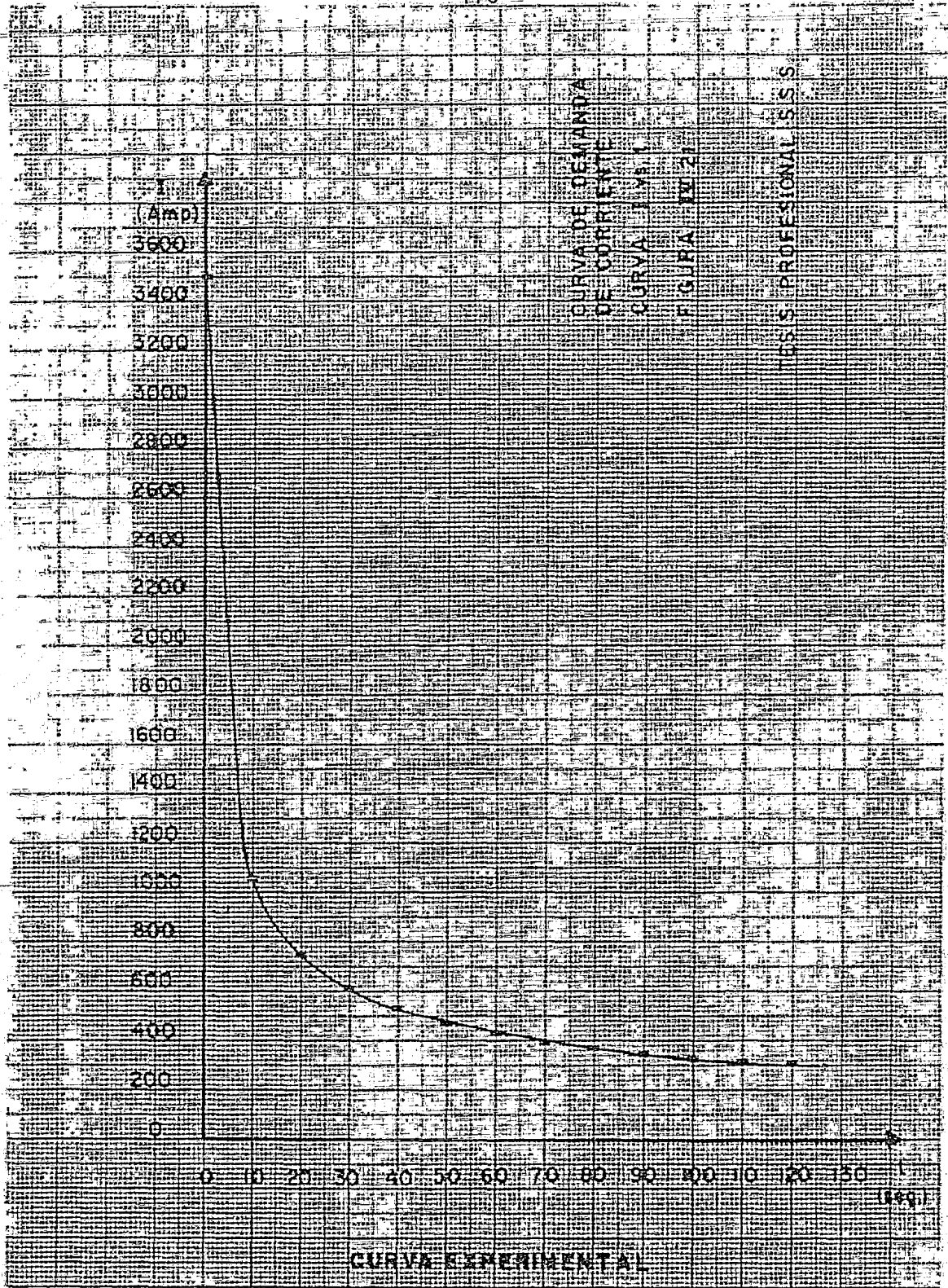
Este valor completa la curva de demanda de corriente en el circuito (ver figura IV.21).

t (seg)	0	10	20	30	40	50	60
I (amp)	3500	1056	747	610	528	472	431
t (seg)	70	80	90	100	110	120	
I (amp)	399	373	352	334	318	305	



CURVA DE DEMANDA
DE CORRIENTE
CURVA EXPERIMENTAL
FIGURA IV.2
BO S PROFESSIONAL S.S.S

CURVA EXPERIMENTAL



CURVA DE DEMANDA
DE CORRIENTE
CURVA Nº 1
CURVA Nº 2
CURVA Nº 3
CURVA Nº 4
CURVA Nº 5
CURVA Nº 6
CURVA Nº 7
CURVA Nº 8
CURVA Nº 9
CURVA Nº 10
CURVA Nº 11
CURVA Nº 12
CURVA Nº 13
CURVA Nº 14
CURVA Nº 15
CURVA Nº 16
CURVA Nº 17
CURVA Nº 18
CURVA Nº 19
CURVA Nº 20
CURVA Nº 21
CURVA Nº 22
CURVA Nº 23
CURVA Nº 24
CURVA Nº 25
CURVA Nº 26
CURVA Nº 27
CURVA Nº 28
CURVA Nº 29
CURVA Nº 30
CURVA Nº 31
CURVA Nº 32
CURVA Nº 33
CURVA Nº 34
CURVA Nº 35
CURVA Nº 36
CURVA Nº 37
CURVA Nº 38
CURVA Nº 39
CURVA Nº 40
CURVA Nº 41
CURVA Nº 42
CURVA Nº 43
CURVA Nº 44
CURVA Nº 45
CURVA Nº 46
CURVA Nº 47
CURVA Nº 48
CURVA Nº 49
CURVA Nº 50
CURVA Nº 51
CURVA Nº 52
CURVA Nº 53
CURVA Nº 54
CURVA Nº 55
CURVA Nº 56
CURVA Nº 57
CURVA Nº 58
CURVA Nº 59
CURVA Nº 60
CURVA Nº 61
CURVA Nº 62
CURVA Nº 63
CURVA Nº 64
CURVA Nº 65
CURVA Nº 66
CURVA Nº 67
CURVA Nº 68
CURVA Nº 69
CURVA Nº 70
CURVA Nº 71
CURVA Nº 72
CURVA Nº 73
CURVA Nº 74
CURVA Nº 75
CURVA Nº 76
CURVA Nº 77
CURVA Nº 78
CURVA Nº 79
CURVA Nº 80
CURVA Nº 81
CURVA Nº 82
CURVA Nº 83
CURVA Nº 84
CURVA Nº 85
CURVA Nº 86
CURVA Nº 87
CURVA Nº 88
CURVA Nº 89
CURVA Nº 90
CURVA Nº 91
CURVA Nº 92
CURVA Nº 93
CURVA Nº 94
CURVA Nº 95
CURVA Nº 96
CURVA Nº 97
CURVA Nº 98
CURVA Nº 99
CURVA Nº 100

CURVA EXPERIMENTAL

Del valor de la intensidad de corriente a tiempo 0 puede evaluarse la potencia de los rectificadores :

$$KVA = VI_0/1000$$

donde:

KVA = Potencia del rectificador; Kilowatt.

V = Voltaje aplicado; 350 volts.

I₀ = Intensidad de corriente inicial en el circuito; 3500 amp.

$$KVA = (350\text{volts})(3500\text{ amp})/1000$$

$$KVA = 1225$$

Suponiendo una eficiencia de 80%

$$KVA = (1225\text{ Kilowatt})/0.8.$$

$$KVA = 1531 \approx 1600\text{ Kilowatts.}$$

4.3.2 Diseño del Sistema de Filtración. (Area 200).

a) Gasto a filtrar

De acuerdo a la recomendación del proveedor del primario es necesario filtrar el volumen total de los bancos de electrodepósito y derrame una vez cada 60 minutos; entonces:

$$Q_f = V_p/t_f$$

donde:

Q_f = Gasto a filtrar; L/hr.

V_p = Volumen total de primario; 123400 L.

t_f = Tiempo del ciclo de filtrado; 60 min = 1 hr.

$$Q_f = 123\,400 \text{ L/hr.}$$

$$Q_f = 123\,400 \text{ L/hr}$$

b) Prefiltros (FG-201 A/B)

De acuerdo a la recomendación establecida, se usarán como prefiltros filtros de canasta con malla de 1/8". Conforme al catálogo del fabricante TATE-ELLIOT pueden emplearse -- filtros modelo ID con conexiones bridadas de 4" capaces de manejar el gasto establecido (543 GPM) y produciendo una caída de presión de 0.70 kg/cm² (10 PSI) cuando el filtro se encuentra completamente limpio (ver figuras IV.22 y IV.23).

Considerando un factor de ensuciamiento del 40%, la caída de presión en el prefiltro queda:

$$\Delta P_{pf} = (1.4) (0.70 \text{ kg/cm}^2)$$

$$\Delta P_{pf} = 0.98 \text{ kg/cm}^2$$

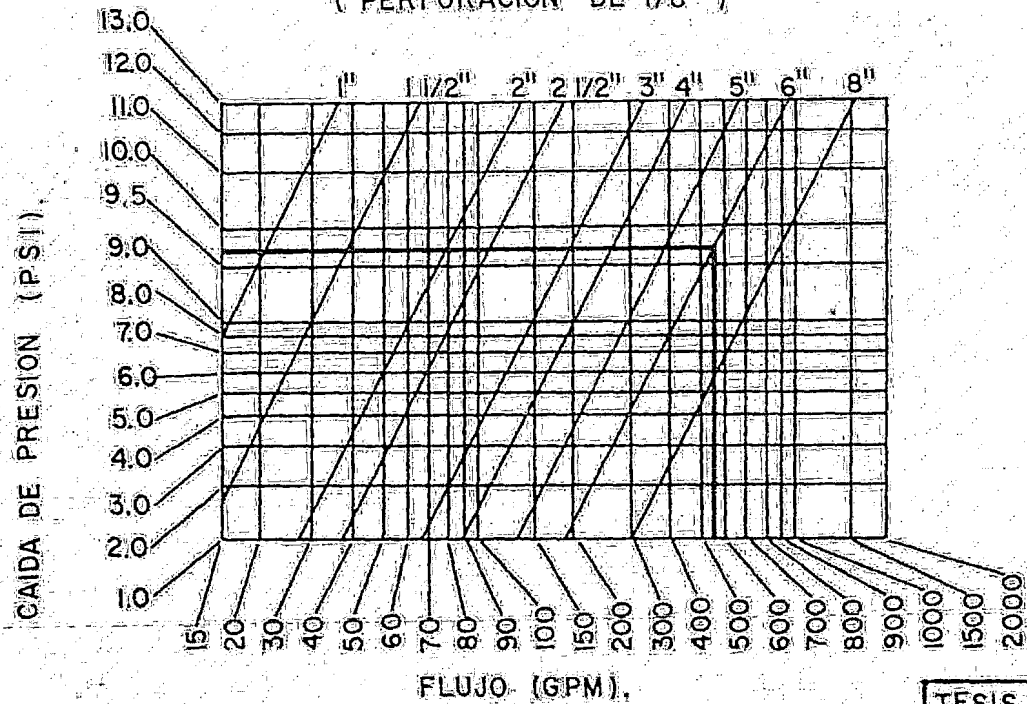
c) Filtros de bolsa (FG-202 A/B)

El fabricante de este tipo de filtros (GAF) especifica que para manejo de pinturas se empleen bolsas filtrantes de viscosa; de éstas se utilizarán las de porosidad de 50 micras tal como lo recomienda el proveedor del primario.

De acuerdo al catálogo del fabricante GAF y sabiendo que la viscosidad del primario es de 96 cP, se establece que el gasto que se maneja es de : (ver figuras IV.24 y IV.25).

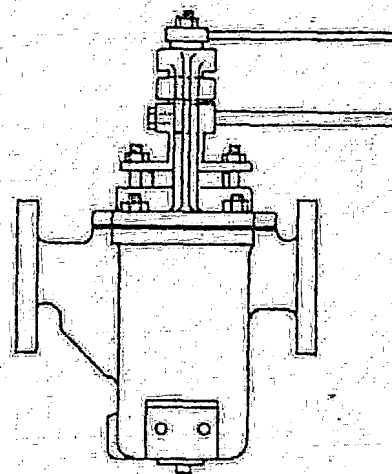
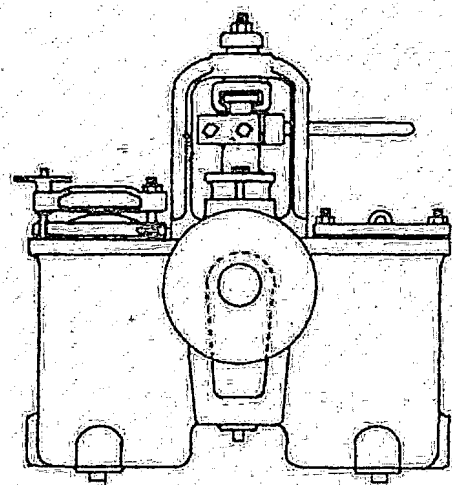
$$Q_{f1} = 18\,000 \text{ L/hr (bolsa No.1) (0.07 kg/cm}^2)$$

MODELO 10 DE FILTROS
 CURVAS DE CAIDA DE PRESION
 (PERFORACION DE 1/8")



REF.: CATALOGO DE FABRICANTE
 TATE ELLIOT .

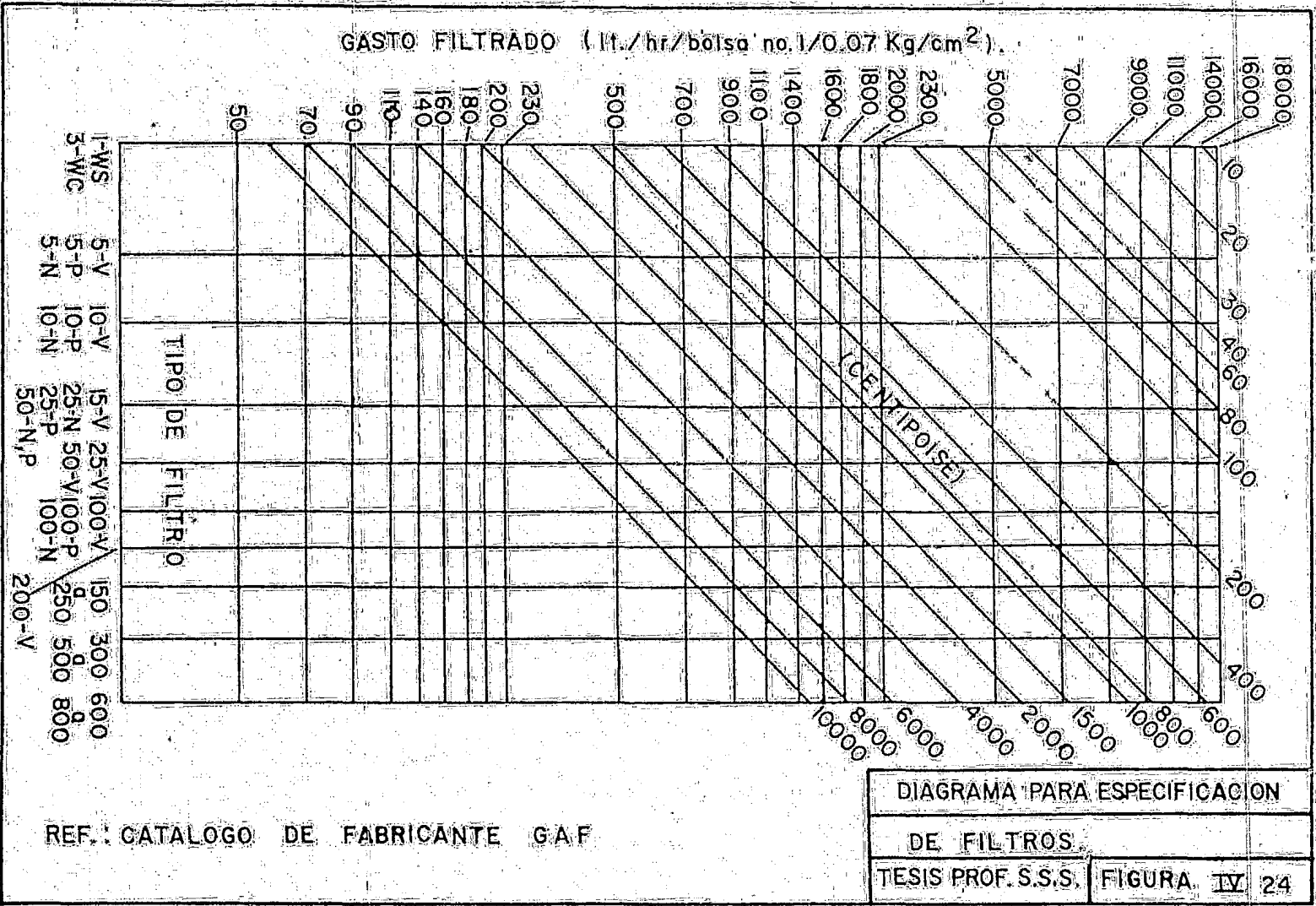
TESIS PROFESIONAL. S. S. S.
DIAGRAMA PARA ESPECIFICACION DE PREFILTROS.
FIGURA IV.22

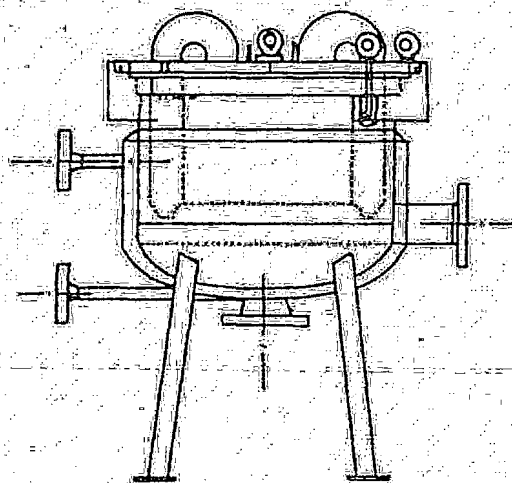
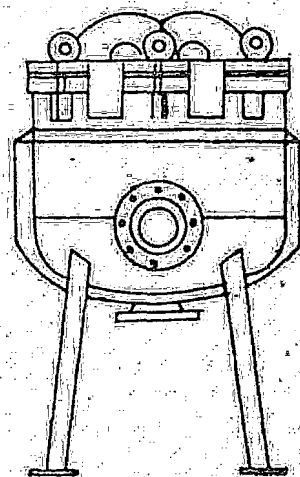
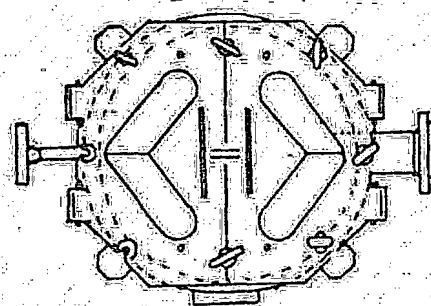


REF. CATALOGO DE FABRICANTE
TATE ELLIOT

TESIS PROFESIONAL S.S.S.
DETALLE DE PREFILTROS

FIGURA IV.23





REF. : CATALOGO DE FABRICANTE
G A F

TESIS PROFESIONAL S.S.S.
DETALLE DE FILTROS DE
BOLSA.

FIGURA IV.25

Dado que el gasto a filtrar es mayor, la caída de presión en el filtro completamente limpio será :

$$\Delta P_f = Q_f / Q_{f1}$$

donde:

ΔP_f = Caída de presión del filtro completamente limpio; kg/cm^2 .

Q_f = Gasto a filtrar; 123400 L/hr.

Q_{f1} = Gasto que maneja un filtro con una bolsa No. 1; 18000 L/hr
 0.07 kg/cm^2 .

$$\Delta P_f = (123400 \text{ L/hr}) / (18000 \text{ L/hr } 0.07 \text{ kg/cm}^2)$$

$$\Delta P_f = 0.478 \text{ kg/cm}^2$$

y considerando un factor de ensuciamiento del 60%, la caída de presión total en el filtro es de:

$$\Delta P_f = (1.6) (0.478 \text{ kg/cm}^2) \quad \Delta P_f = 0.765 \text{ kg/cm}^2$$

d) Bomba de Filtración (GA-2D1).

Para calcular la potencia de la bomba de filtración se consideran los siguientes términos y se supone que la presión de succión es la atmosférica

$$P_d = P_{cd} + \Delta P_{pf} + H + \Delta P'_f + P_f$$

donde:

P_d = Presión de descarga de la bomba de filtración; kg/cm^2 .

P_{cd} = Presión del cabezal de distribución; 2.5 kg/cm^2 .

ΔP_{pf} = Caída de presión de los prefiltros; 0.98 kg/cm^2 .

ΔP_f = Caída de presión de los filtros; 0.765 kg/cm^2 .

H = Presión por cabeza estática; 0.20 kg/cm^2 .

ΔP_{i_f} = Caída de presión por fricción; 0.70 kg/cm^2 .

$$Pd = 2.5 \text{ kg/cm}^2 + 0.98 \text{ kg/cm}^2 + 0.765 \text{ kg/cm}^2 + 0.20 \text{ kg/cm}^2 + 0.70 \text{ kg/cm}^2$$

$$Pd = 5.105 \text{ kg/cm}^2$$

Debido a la suposición de que la presión de succión es la atmosférica, la ΔP de la bomba de filtración será igual a la presión de descarga

$$\Delta P_b = Pd = 5.105 \text{ kg/cm}^2$$

Para calcular la potencia hidráulica de la bomba se puede emplear la siguiente ecuación:

$$H_p = \Delta P_b \cdot Q_f / 27390$$

donde:

H_p = Potencia hidráulica de la bomba de filtración; H_p .

ΔP_b = ΔP de la bomba de filtración; 5.105 kg/cm^2 .

Q_f = Gasto a filtrar; 123400 L/hr .

$$H_p = (5.105 \text{ kg/cm}^2) (123400 \text{ L/hr}) / 27390$$

$$H_p = 22.90$$

Considerando una eficiencia mecánica de 75% la potencia al freno de la bomba será:

$$bHp = 22.90 / 0.75; \quad bHp = 30.53; \quad \text{Comercial } 40 \text{ Hp}$$

4.3.3 Diseño del sistema de reposición de primario. (Area 300)

a) Cantidad de resina y pigmento que debe reponerse por día - en el caso de operación a la máxima capacidad.

Este cálculo puede efectuarse conociendo la superficie que se recubre por carrocería, el espesor de la película depositada y el número máximo de unidades procesadas por día:

$$W_b = S_c \cdot S \cdot U_m \cdot \rho_p$$

donde:

W_b = Gasto masico de primario que debe reponerse; kg/día.

S_c = Superficie unitaria de las carrocerías; $95 \text{ m}^2/\text{unidad}$.

S = Espesor de la película; $2.6 \times 10^{-3} \text{ cm} = 2.6 \times 10^{-5} \text{ m}$.

U_m = máximo número de carrocerías procesadas por hora;
28 unidades/hr = 420 unidades/día.

ρ_p = Densidad de la película depositada; $1.3 \text{ g/cm}^3 = 1.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.

$$W_b = (95 \text{ m}^2/\text{unidad}) (2.6 \times 10^{-5} \text{ m}) (420 \text{ unidades/día}) (1.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3)$$

$$W_b = 1348.62 \text{ kg/día.}$$

Considerando que el material de reposición se provee con un contenido de sólidos (que corresponden exclusivamente a resina y pigmento) de 37%, la cantidad total de material de reposición que debe alimentarse diariamente será:

$$W_r = W_b / 0.37$$

donde:

W_r = Gasto másico de material de reposición; kg/día.

W_b = Gasto másico de primario que debe reponerse; 1348.62 kg/día.

$W_r = (1348.62 \text{ kg/día})/0.37$; $W_r = 3644.92 \text{ kg/día}$.

Como el material de reposición se proporciona en tambores de 200 kg., el número de tambores requeridos por día serán:

$$T_d = W_r/200$$

donde:

T_d = Número de tambores de material de reposición empleados por día.

W_r = Gasto másico de material de reposición; 3644.92 kg/día.

$T_d = (3644.92 \text{ kg/día})/(200 \text{ kg/tambor})$

$T_d = 18.22 \approx 18$ tambores/día.

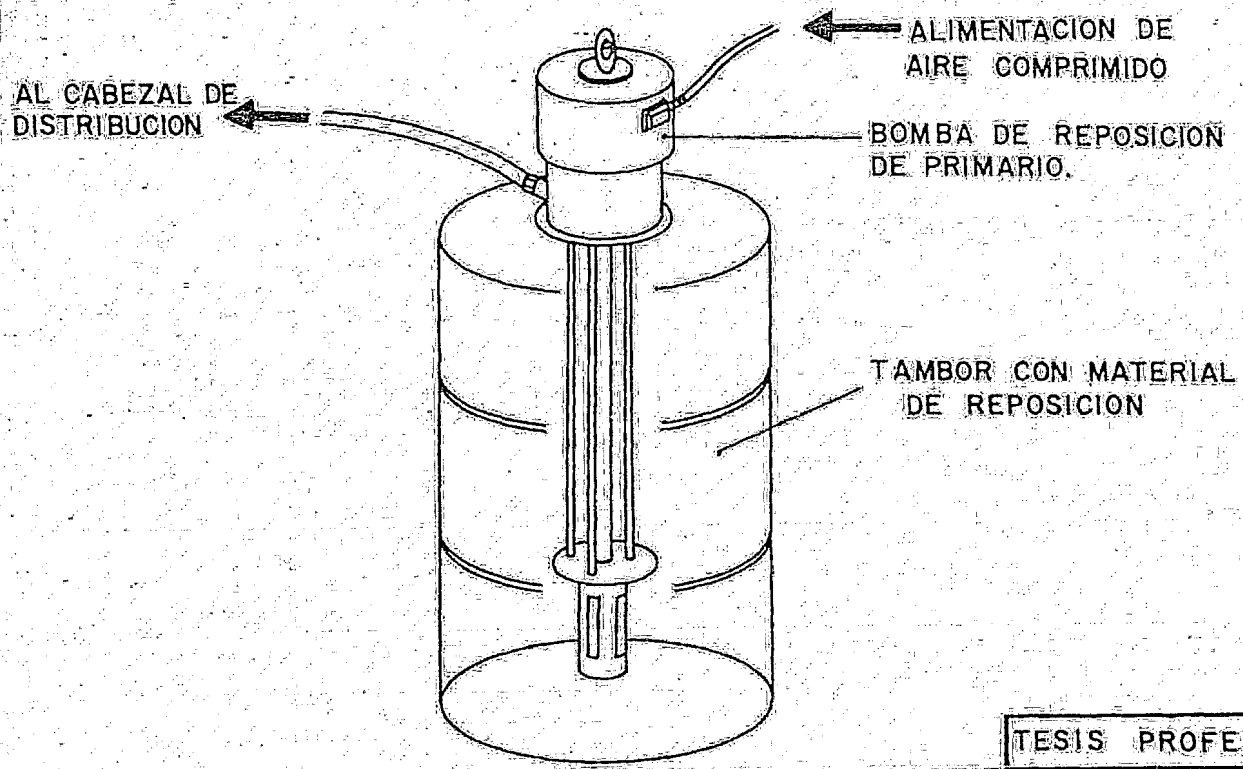
Cuyo contenido se introducirá en el tanque de electrodepósito, en forma intermitente durante las 15 horas de operación de la unidad por día, utilizando las bombas del sistema de reposición de primario, las cuales son dosificadoras de tipo neumático acoplables directamente al tambor.

b) Bombas de reposición de primario (GA-301/R)

Según el catálogo del fabricante GRACO, para los requerimientos del sistema de reposición de primario, pueden utilizarse bombas modelo 903-718 (ver figura IV.26) con las siguientes características:

Tipo : Desplazamiento positivo.

Accionada por: Aire a 7 kg/cm^2 y 25°C .



REF. : CATALOGO DE FABRICANTE GRACO

TESIS PROFESIONAL. S. S. S.	
DETALLE DE LA BOMBA DE REPOSICION DE PRIMARIO.	
	FIGURA IV. 26

Ciclos de la bomba por cada 3.8 L = 6 ciclos.

Número de ciclos recomendados en operación normal: 20 ciclos/min.

Consumo de aire: $1.23 \text{ m}^3/\text{min}$ en operación normal.

De acuerdo con esto cada bomba puede manejar un gasto de:

$$(20 \text{ ciclos/min}) (3.8 \text{ L/6ciclos}) = 12.66 \text{ L/min.}$$

Si la densidad del material de reposición es 1.2 g/cm^3 , cada tambor contiene:

$$(200\text{kg/tambor}) (1 \text{ L}/1.2 \text{ kg}) = 166.66 \text{ L/tambor.}$$

Lo que implica que para vaciar completamente cada tambor se requerirán:

$$(166.66 \text{ L/tambor}) / (12.66 \text{ L/min}) = 13.16 \text{ min/tambor}$$

Como se requiere reponer 18 tambores por día el lapso de tiempo que corresponde a cada tambor será:

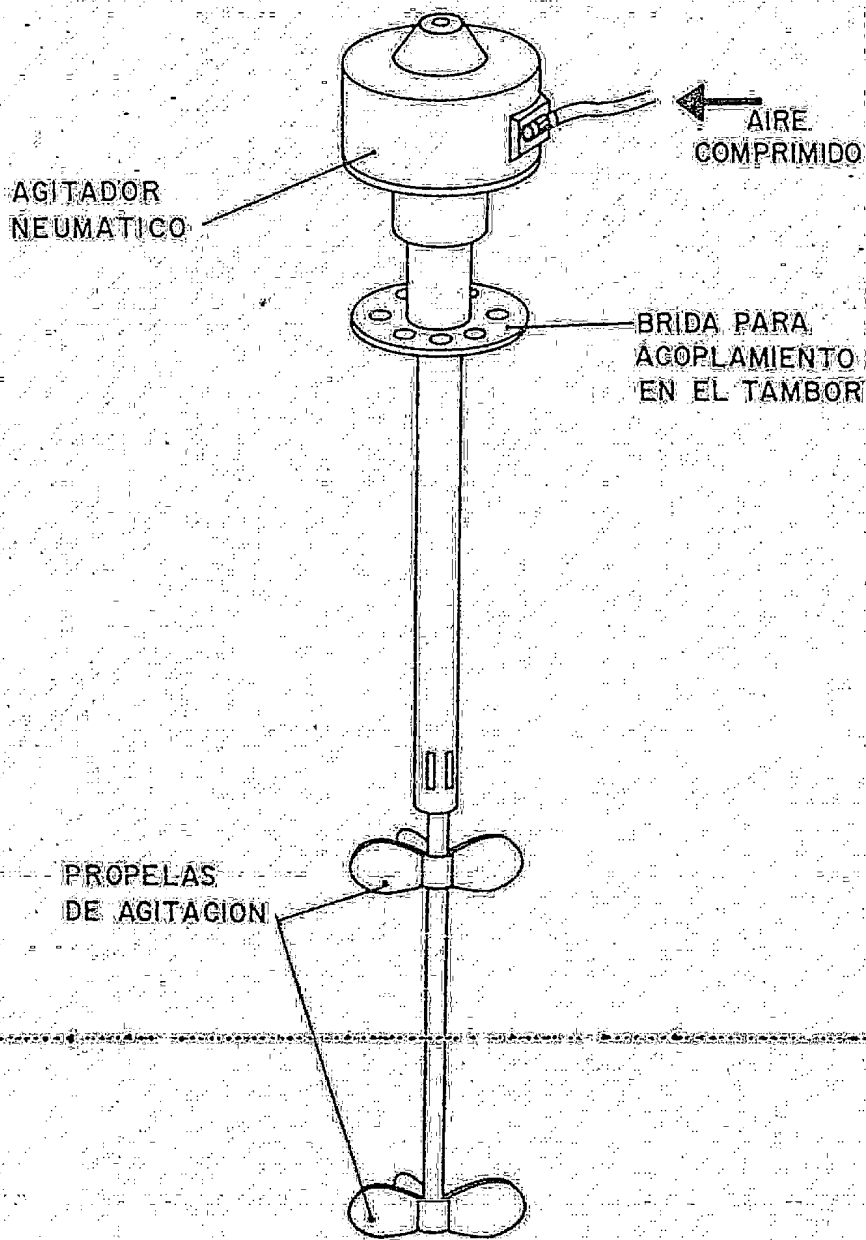
$$(15\text{hr}/18 \text{ tambores}) (60\text{min}/1\text{hr}) = 50 \text{ min/tambor.}$$

descontando un tiempo muerto de 10 minutos para desmontar la bomba, retirar el tambor vacío y colocar uno lleno, y montar nuevamente la bomba, resulta un tiempo libre entre tambor y tambor de:

$$50 \text{ min/tambor} - 10 \text{ min/tambor} = 40 \text{ min/tambor.}$$

el que se emplea para agitar el contenido del tambor, utilizando un agitador tipo neumático acoplable al mismo.

(ver figura IV.27). El fabricante GRACO proporciona también estos equipos con las siguientes características:



DETALLE DE AGITADOR

NEUMATICO

TESIS PROF.S.S.S. FIGURA IV 27

REF.: CATALOGO DE FABRICANTE GRACO

Modelo: 902 - 893

Tipo: Agitador axial

Accionado por: aire a 7 kg/cm^2 y 25°C

Potencia: 1 Hp

Consumo de aire: $0.226 \text{ m}^3/\text{min}$.

El consumo de aire por día considerando una bomba y un agitador normalmente operando será:

bomba:

$$(1.23 \text{ m}^3/\text{min}) (13.16 \text{ min/tambor}) (18 \text{ tambores/día}) = 291.36 \text{ m}^3/\text{día}.$$

agitador:

$$(0.226 \text{ m}^3/\text{min}) (900 \text{ min/día} - (10 \text{ min/tambor}) (18 \text{ tambores/día})) = 162.72 \text{ m}^3/\text{día}.$$

con un consumo total de;

$$291.36 \text{ m}^3/\text{día} + 162.72 \text{ m}^3/\text{día} = 454.08 \text{ m}^3/\text{día}.$$

4.3.4 Diseño del Sistema de Enfriamiento (Area 400)

El diseño de este sistema implica un proceso de iteración. Esto se debe fundamentalmente a que la agitación de los tanques de electrodepósito y derrame puede hacerse empleando el primario manejado en los sistemas de filtración, enfriamiento y agitación, es decir:

$$Q_{ta} = Q_{ag} + Q_e + Q_f$$

donde:

Q_{ta} = Gasto volumétrico total del sistema de agitación; L/hr.

Q_{ag} = Gasto volumétrico manejado por las bombas de agitación; L/hr.

Q_e = Gasto volumétrico del sistema de enfriamiento; L/hr.

Q_f = Gasto volumétrico del sistema de filtración; 123 400 L/hr.

De estos flujos el único que se ha fijado, de acuerdo al criterio del proveedor del primario, es el del sistema de filtración. Sin embargo, existe también un criterio para establecer el flujo total del sistema de agitación que es el de recircular el contenido de los tanques de electrodepósito y derrame (123 400 L) a través de las espreas de agitación una vez cada cuatro a seis minutos. Si se consideran cinco minutos:

$$Q_{ta} = (123\,400 \text{ L/5min}) (60 \text{ min/1hr})$$

$$Q_{ta} = 1\,480\,800 \text{ L/hr.}$$

sustituyendo este resultado en la ecuación anterior:

$$Q_{ag} + Q_e = 1\,357\,400 \text{ L/hr.}$$

Esta relación es particularmente importante ya que los gastos del sistema de enfriamiento y de las bombas del sistema de agitación pueden variarse en un amplio rango, lo que tendrá como consecuencia el que puedan manejarse diversos gastos a través de los enfriadores de primario EA-401 A/B. Es evidente que la iteración consiste en encontrar un flujo de primario, que al ser enfriado en el rango de temperatura especificado por el proveedor del primario (5°C), sea capaz de absorber el calor generado por bombeo, transferencia a través de paredes y superficie de los tanques de electrodepósito y derrame, paso de corriente eléctrica e inmersión de las carrocerías a diferente temperatura de la del baño.

Para iniciar el diseño de este sistema se evaluarán las cargas térmicas fijas, derivadas de los conceptos anteriormente señalados.

a) Calor transferido a través de la superficie de líquido en los tanques FB-101 y 102.

Esta carga térmica puede evaluarse a partir de la relación:

$$q_s = U_s A_s (T_a - T_b)$$

donde:

q_s = Calor transferido a través de la superficie del líquido; kcal/hr.

U_s = Coeficiente de transferencia de calor entre la superficie del líquido y el medio ambiente; $25 \text{ kcal/hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

A_s = Superficie del líquido en los tanques FB-101 y 102; m^2 .

T_a = Temperatura ambiente; 25°C .

T_b = Temperatura del primario en el baño; 27°C .

El valor del coeficiente de transferencia de calor se tomó de la literatura especializada, misma que recomienda el valor especificado para situaciones similares.

La superficie del líquido puede evaluarse a partir de las dimensiones de los tanques de electrodeposición y de crame (ver figuras IV.17 y IV.20).

$$A_s = (3.23\text{m}) (21.28\text{m} + 3.00\text{m}).$$

$$A_s = 78.42 \text{ m}^2.$$

$$q_s = (25 \text{ kcal/hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}) (78.42 \text{ m}^2) (25^\circ\text{C} - 27^\circ\text{C}).$$

$$q_s = -3921 \text{ kcal/hr.}$$

b) Calor transferido a través de la superficie de paredes y fondos de los tanques FB-101 y 102.

El cálculo de esta carga térmica es similar a la anterior

$$q_p = U_p A_p (T_a - T_b)$$

donde:

q_p = Calor transferido a través de paredes y fondos de tanques; kcal/hr.

U_p = Coeficiente de transferencia de calor entre la superficie de paredes y fondos, y el medio ambiente; 15 kcal/hr m^2 $^{\circ}C$.

A_p = Superficie de las paredes y fondos de los tanques FB-101 y 102; m^2 .

T_a = Temperatura ambiente; 25 $^{\circ}C$.

T_b = Temperatura del primario en el baño; 27 $^{\circ}C$.

El valor del coeficiente de transferencia de calor se tomó de la literatura especializada.

La superficie de las paredes y fondos puede calcularse de las dimensiones de los tanques FB-101 y 102 (ver figuras IV.17 y IV.20). Si se supone que el tanque de electrodepósito es un paralelepípedo:

$$A_p = (2)(1.99m)(21.28m) + (2)(3.23m)(1.99m) + (3.23m)(21.28m) + (2)(3m)(1.99m) + (2)(3.23m)(1.99m).$$

$$A_p = 191.08m^2.$$

$$q_p = (15 \text{ kcal/hr } m^2 \text{ } ^{\circ}C)(191.08m^2)(25^{\circ}C - 27^{\circ}C).$$

$$q_p = -5732.40 \text{ kcal/hr.}$$

c) Calor debido al paso de corriente en el circuito.

Esta carga se calculará en función de la potencia del rectificador.

$$qpc = KVA (1 - \eta_r)$$

donde:

qpc = Calor debido al paso de corriente eléctrica; kcal/hr.

KVA = Potencia conectada del rectificador; 1600 kilowatts.

η_r = Eficiencia del rectificador; 80%.

$$qpc = (1600 \text{ kilowatts}) (1 - 0.8) (864 \text{ kcal/hr})/\text{kilowatt.}$$

$$qpc = 276400 \text{ kcal/hr.}$$

d) Calor transferido por las carrocerías a recubrir

Esta carga térmica puede determinarse en función de la diferencia de temperaturas entre las partes a recubrir y el baño:

$$qpr = Wpr Cp (Tpr - Tb)$$

donde:

qpr = Calor transferido por las carrocerías a recubrir; kcal/hr.

Wpr = Masa de carrocerías recubiertas cada hora; kg/hr.

Cp = Calor específico de las partes a recubrir; 0.487 kcal/kg °C.

Tpr = Temperatura de las partes a recubrir; 30°C.

Tb = Temperatura del primario en el baño; 27°C.

El valor del Cp del metal a recubrir se tomó de la literatura especializada. Además:

$$Wpr = Upr Mc$$

donde:

U_m = Número máximo de unidades procesadas cada hora; 28 unidades/hr.

M_c = Peso unitario de las carrocerías; 820 kg/carrocería.

U_{pr} = (28 carrocerías/hr) (820 kg/carrocería).

U_{pr} = 22 960 kg/hr.

q_{pr} = (22 960 kg/hr) (0.107 kcal/kg °C) (30°C - 27°C).

q_{pr} = 7 370.16 kcal/hr.

e) Calor generado por bombeo

En general el calor generado por este concepto se evaluará a partir de la potencia requerida en el bombeo y la eficiencia mecánica de las bombas, suponiendo que la energía no transmitida mecánicamente al fluido se disipa en él en forma de calor:

$$q_b = H_p (1 - \eta)$$

donde:

q_b = Calor generado por bombeo en los sistemas de filtración, agitación o enfriamiento; kcal/hr.

H_p = Potencia de las bombas de filtración, agitación o enfriamiento; Hp.

η = Eficiencia mecánica de las bombas de filtración, agitación o enfriamiento; 75%.

Sistema de filtración

La potencia por bombeo requerida en este sistema es de 40 Hp.

$$q_{bf} = (40Hp) (1 - 0.75) (642 \text{ kcal/hr})/Hp$$

$$q_{bf} = 6 420 \text{ kcal/hr.}$$

Sistemas de enfriamiento y agitación

Para calcular la carga térmica generada por bombeo en estos sistemas se emplearán las siguientes relaciones:

$$i) \quad Q_{ag} + Q_e = 1357400 \text{ L/hr.}$$

donde:

Q_{ag} = Gasto volumétrico manejado por las bombas de agitación; L/hr.

Q_e = Gasto volumétrico del sistema de enfriamiento; L/hr.

$$ii) \quad bHp = \frac{\Delta P_b Q}{27390 \eta}$$

donde:

bHp = Potencia de las bombas de agitación o enfriamiento; Hp.

ΔP_b = ΔP de las bombas de agitación o enfriamiento; kg/cm^2 .

Q = Gasto volumétrico de primario de los sistemas de agitación o enfriamiento; L/hr.

η = Eficiencia mecánica de las bombas de agitación o enfriamiento; 75%.

$$iii) \quad \Delta P_b = P_d = P_{cd} + H + \Delta P_f$$

donde:

ΔP_b = ΔP de la bomba de agitación; kg/cm^2 .

P_d = Presión de descarga de la bomba de agitación; kg/cm^2 .

P_{cd} = Presión del cabezal de distribución; 2.5 kg/cm^2 .

H = Presión por cabeza estática; 0.2 kg/cm^2 .

ΔP_f = Caída de presión por fricción; 0.7 kg/cm^2 .

$$\Delta P_b = P_d = 2.5 \text{ kg/cm}^2 + 0.2 \text{ kg/cm}^2 + 0.7 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\Delta P_b = 3.4 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\text{iv) } \Delta P_b = P_d = P_{cd} + \Delta P_{cc} + H + \Delta P_f^{PI}$$

donde:

$$\Delta P_b = \Delta P \text{ de la bomba de enfriamiento; } \text{kg/cm}^2.$$

$$P_d = \text{Presión de descarga de la bomba de enfriamiento; } \text{kg/cm}^2.$$

$$P_{cd} = \text{Presión del cabezal de distribución; } 2.5 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\Delta P_{cc} = \text{Caída de presión en los enfriadores de primario; } 0.7 \text{ kg/cm}^2.$$

$$H = \text{Presión por cabeza estática; } 0.2 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\Delta P_f^{PI} = \text{Caída de presión por fricción; } 0.7 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\Delta P_b = P_d = 2.5 \text{ kg/cm}^2 + 0.7 \text{ kg/cm}^2 + 0.2 \text{ kg/cm}^2 + 0.7 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\Delta P_b = 4.1 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\text{v) } q_b = H_p (1 - \eta)$$

donde:

$$q_b = \text{Calor generado por bombeo en los sistemas de enfriamiento o a} \\ \text{gitación; kcal/hr.}$$

$$H_p = \text{Potencia de las bombas de enfriamiento o agitación; Hp.}$$

$$\eta = \text{Eficiencia mecánica de las bombas; } 75\%.$$

Como se explicó, la iteración consiste en fijar los gastos de los sistemas de enfriamiento y agitación (sin que la suma de éstos difiera de 1357400 L/hr), calcular la potencia requerida por bombeo en cada sistema, y determinar el calor generado por estos conceptos. Con esto, puede evaluarse la carga térmica total de los enfriadores de primario:

$$qt = qs + qp + qpc + qpr + qbf + qbag + qbe$$

donde:

qt = Carga térmica total a ser transferida en los enfriadores de primario; kcal/hr.

qs = Calor transferido a través de la superficie del líquido en los tanques; - 3921 kcal/hr.

qp = Calor transferido a través de la superficie de paredes y fondos de los tanques; - 5932.40 kcal/hr.

qpc = Calor debido al paso de corriente en el circuito; - 276480 kcal/hr.

qpr = Calor transferido por las carrocías a recubrir; - 7370.16 kcal/hr.

qbf = Calor generado por bombeo en el sistema de filtración; 6420 kcal/hr.

qbag = Calor generado por bombeo en el sistema de agitación; kcal/hr.

qbe = Calor generado por bombeo en el sistema de enfriamiento; kcal/hr.

De aquí, puede evaluarse el rango de enfriamiento del primario en los cambiadores, mismo que no debe exceder de 5°C tal como lo recomienda el proveedor del primario:

$$\Delta T_e = qt / W_e C_{pb}$$

donde:

ΔT_e = Rango de enfriamiento del primario en los enfriadores; $^{\circ}\text{C}$.

qt = Carga térmica total; kcal/hr.

W_e = Gasto másico de primario en el sistema de enfriamiento; kg/hr.

C_{pb} = Calor específico del primario; 0.923 kcal/kg $^{\circ}\text{C}$.

Si para el gasto supuesto del sistema de enfriamiento, el rango sobrepasa los 5°C , será necesario suponer otro y repetir los cálculos hasta cumplir con la condición anterior. Al efectuar este procedimiento se encuentra que el gasto de primario que se ajusta al rango de enfriamiento es de :

$$Q_e = 135\ 740\ \text{L/hr}$$

con esto, el gasto del sistema de agitación será:

$$Q_{ag} = 1\ 357\ 400\ \text{L/hr} - 135\ 740\ \text{L/hr.}$$

$$Q_{ag} = 1\ 221\ 600\ \text{L/hr.}$$

y las potencias de las bombas de enfriamiento y agitación:

$$\text{GA-401/R : } b\text{Hp} = 27.10 \quad \text{comercial } 30\ \text{Hp.}$$

$$\text{GA-501/R : } b\text{Hp} = 202.25 \quad \text{comercial } 250\ \text{Hp.}$$

El calor generado por bombeo en estos sistemas:

$$q_{be} = (30\text{Hp}) (1-0.75) (642\ \text{kcal/hr})/\text{Hp.}$$

$$q_{be} = 4\ 815\ \text{kcal/hr.}$$

$$q_{bag} = (250\text{Hp}) (1-0.75) (642\ \text{kcal/hr})/\text{Hp.}$$

$$q_{bag} = 40\ 125\ \text{kcal/hr.}$$

y la carga térmica total:

$$qt = 3\,921\text{ kcal/hr} + 5\,732.40\text{ kcal/hr} + 276\,480\text{ kcal/hr} + 7\,370.16\text{ kcal/hr} + 6\,420\text{ kcal/hr} + 4\,815\text{ kcal/hr} + 40\,125\text{ kcal/hr}.$$

$$qt = 325\,556.76\text{ kcal/hr}.$$

Por último el rango de enfriamiento será:

$$U_e = (135\,740\text{ L/hr}) (1.04\text{ kg/L}).$$

$$U_e = 141\,169.6\text{ kg/hr}.$$

$$\Delta T_b = (325\,556.76\text{ kcal/hr}) / ((141\,169.6\text{ kg/hr}) (0.9234\text{ kcal/kg}^\circ\text{C})).$$

$$\Delta T_b = 2.50^\circ\text{C}.$$

El cual se considera adecuado para ejercer un buen control sobre el sistema.

f) Enfriadores de primario (EA-401 A/B).

El cálculo de este equipo implica la determinación del área de transferencia de calor; suponiendo flujo a contra corriente en el cambiador:

$$A = qt / U_d \text{ LMTD}.$$

$$U_d = 1 / (1/U_c + R_d + R_{dc}).$$

$$\text{LMTD} = ((T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)) / \ln ((T_1 - t_2) / (T_2 - t_1)).$$

donde:

A = Área de transferencia de los enfriadores de primario;
m².

qt = Carga térmica total; 325 556.76 kcal/hr.

U_d = Coeficiente total de transferencia de calor;
kcal/hr m² °C.

LMTD = Diferencia media logarítmica de temperaturas; °C.

U_c = Coeficiente de transferencia de calor, limpio; $1000 \text{ kcal/hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.

R_{dt} = Factor de ensuciamiento lado tubos; $0.001 \text{ m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C/kcal}$.

R_{dc} = Factor de ensuciamiento lado coraza; $0.0006 \text{ m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C/kcal}$.

T_1 = Temperatura de entrada del primario a los enfriadores; 27°C .

T_2 = Temperatura de salida del primario de los enfriadores;
 $27^\circ\text{C} - 2.5^\circ\text{C} = 24.5^\circ\text{C}$.

t_1 = Temperatura de entrada del agua helada a los enfriadores de primario; 11°C .

t_2 = Temperatura de salida del agua helada de los enfriadores; 18°C .

$$LMTD = \frac{(27^\circ\text{C} - 18^\circ\text{C}) - (24.5^\circ\text{C} - 11^\circ\text{C})}{\ln \left[\frac{27^\circ\text{C} - 18^\circ\text{C}}{24.5^\circ\text{C} - 11^\circ\text{C}} \right]}$$

$$LMTD = 11.10^\circ\text{C}$$

$$U_d = (1/(1000 \text{ kcal/hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}) + 0.001 \text{ m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C/kcal} + 0.0006 \text{ m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C/kcal})^{-1}$$

$$A = (325556.76 \text{ kcal/hr}) / ((385 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr } ^\circ\text{C}) (11.10^\circ\text{C}))$$

$$A = 76 \text{ m}^2$$

Como se tienen dos cambiadores en paralelo el área por cambiador será:

$$76 \text{ m}^2 / 2 = 38 \text{ m}^2 / \text{unidad}$$

Considerando que cada enfriador debe ser capaz de absorber toda la carga térmica, se considerará un sobrediseño del 30%. En caso de falla de uno de los enfriadores deberá aumentarse el flujo de agua helada:

$$A = (1.30) (38 \text{ m}^2 / \text{unidad})$$

$$A = 49.4 \text{ m}^2 / \text{unidad} \approx 50 \text{ m}^2 / \text{unidad}$$

g) Consumo de agua helada

Este consumo se evaluará de la relación:

$$W_{ah} = qt/C_p (t_2 - t_1)$$

donde:

W_{ah} = Consumo de agua helada; kg/hr.

qt = Carga térmica total; 325 556.76 kcal/hr.

C_p = Calor específico del agua de enfriamiento;
1 kcal/kg °C.

t_2 = Temperatura de salida del agua helada de los enfriadores;
18°C.

t_1 = Temperatura de entrada del agua helada a los enfriadores;
11°C.

$$W_{ah} = (325 556.76 \text{ kcal/hr}) / ((1 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}) (18^\circ\text{C} - 11^\circ\text{C})).$$

$$W_{ah} = 46 508.11 \text{ kg/hr.}$$

4.3.5 Diseño del Sistema de Agitación (área 500).

a) Bombas de agitación (GA-501/R)

Como se especificó en el diseño del sistema de enfriamiento, las bombas para este sistema serán de 250 Hp manejando un gasto de 1 221 660 L/hr.

b) Cabezal de distribución y espreas para agitación

El gasto a manejar en el sistema de agitación es de 1 221 660 L/hr. Según el catálogo del fabricante Spring-Systems Co., para este tipo de servicio pueden emplearse espreas de cono lleno modelo 2 1/2 HH 301 200 con capacidad de

23 620 L/hr a 2.5 kg/cm^2 (presión del cabezal de distribución). Con esto el número requerido de espreas es de:

$$N_e = Q_{ag}/Q_e$$

donde:

N_e = Número de espreas.

Q_{ag} = Gasto volumétrico del sistema de agitación; 1221 660 L/hr.

Q_e = Gasto volumétrico por esprea; 23 620 L/hr esprea.

$$N_e = (1221\ 660 \text{ L/hr}) / (23\ 620 \text{ L/hr esprea}).$$

$$N_e = 51.72 \approx 52 \text{ espreas.}$$

Las espreas pueden distribuirse en 13 líneas a cada lado del tanque de electrodeposición cada una conteniendo dos espreas dirigidas en el sentido inverso del flujo de las carrocerías en el tanque. Para colocar las líneas pueden aprovecharse los 11 espacios libres entre cada par de ánodos y los espacios anterior y posterior al primero y último ánodos respectivamente. Las líneas partirán del cabezal de distribución.

4.3.6 Diseño del Sistema del Anolito (Area 600).

a) Celdas anódicas

Las dimensiones de las celdas anódicas serán las mismas que las de los ánodos (ver figura IV.10) excepto en el espesor, ya que la celda cuenta con un contenedor que permite almacenar momentáneamente el anolito generado, además de dos marcos que facilitan el ensamble y sujeción de los

componentes de la misma. Como se requieren materiales no-conductores en su fabricación, se sugiere el empleo de clo-ruzo de polivinilo para el efecto.

b) - Bomba de anolito (GA-601).

Gasto de anolito en el sistema

De acuerdo a la recomendación del proveedor del primario, el anolito generado deberá removerse a razón de 2 a 4 L/min. Considerando el caso máximo:

$$Q_{an} = 4 N_a$$

donde:

Q_{an} = Gasto volumétrico de anolito en el sistema; L/min.

N_a = Número total de ánodos; 24 ánodos.

$Q_{an} = (4 \text{ L/min ánodo}) (24 \text{ ánodos}) (60 \text{ min/hr})$.

$Q_{an} = 5670 \text{ L/hr.}$

Potencia de la bomba de anolito

Si la presión de succión de la bomba es la atmosférica (0 kg/cm^2)

$$\Delta P_b = P_d = \Delta P_f \leftarrow H$$

donde:

$\Delta P_b = \Delta P$ de la bomba del anolito; kg/cm^2 .

P_d = Presión de descarga de la bomba del anolito; kg/cm^2 .

ΔP_f = Caída de presión por fricciones; 0.7 kg/cm^2 .

H = Presión por cabeza estática; 0.3 kg/cm^2 .

$$\Delta P_b = 0.7 \text{ kg/cm}^2 + 0.3 \text{ kg/cm}^2$$

$$\Delta P_b = 1 \text{ kg/cm}^2$$

La potencia de la bomba será:

$$bHp = \Delta P_b Q_{an} / 27390 \eta$$

donde:

bHp = Potencia al freno de la bomba de anolito; Hp.

ΔP_b = ΔP de la bomba del anolito; 1 kg/cm^2 .

Q_{an} = Gasto volumétrico de anolito; 5670 L/hr .

η = Eficiencia mecánica de la bomba; 75% .

$$bHp = (1 \text{ kg/cm}^2) (5670 \text{ L/hr}) / (27390) (0.75)$$

$$bHp = 0.276; \text{ comercial } 1Hp.$$

c) Tanque de anolito (FB-601)

Volumen

Para definir el volumen del tanque de anolito se considerará un tiempo de residencia de 10 minutos. Este tiempo es suficiente para controlar el pH al adicionar agua desmineralizada y mezclarla uniformemente con el anolito. Adicionalmente se considerará un 50% de sobrediseño en el volu-

men para que el tanque sea capaz de absorber el aumento en el nivel debido a la adición de agua desmineralizada y la turbulencia creada por la agitación:

$$V = 1.5 Q_{an} t_r$$

donde:

V = Volumen del tanque de anólito; L.

Q_{an} = Gasto volumétrico de anólito; 5 670 L/hr.

t_r = Tiempo de residencia del tanque de anólito; 10 min.

$$V = (1.5) (5 670 \text{ L/hr}) (1 \text{ hr}/60 \text{ min}) (10 \text{ min}),$$

$$V = 1 417.5 \text{ L} \cong 1.42 \text{ m}^3.$$

Dimensiones

En este tanque no se requiere ninguna relación especial entre sus dimensiones por lo que se propone que su forma sea cúbica.

Con esto:

$$L = \sqrt[3]{V}$$

donde:

L = Largo, ancho o altura del tanque de anólito; m.

V = Volumen del tanque de anólito; 1.42 m³.

$$L = \sqrt[3]{1.42 \text{ m}^3}$$

$$L = 1.12 \text{ m.}$$

d) Consumo de agua desmineralizada

Para evaluar este consumo se considerará como caso crítico el inicio de las operaciones de la unidad. En estas circunstancias al no haberse generado suficiente anolito en las celdas, debe reflujarse agua desmineralizada en la misma cantidad que el anolito en condiciones de operación normal; con esto el consumo máximo de agua desmineralizada será de 5670 L/hr.

e) Agitador del tanque de anolito (GD-601)

Para agitar el contenido del tanque de anolito puede emplearse un agitador neumático similar al utilizado en el sistema de reposición de primario. Sus características son las siguientes (ver figura IV.27) :

Modelo : 902 - 893 (fabricante GRACO)

Tipo : Agitador axial.

Accionado por : Aire a 7 kg/cm² y 25°C.

Potencial : 1Hp.

Consumo de aire: 0.226 m³/min.

En este equipo el consumo de aire por día será:

$(0.226 \text{ m}^3/\text{min}) (60\text{min/hr}) (15\text{hr/día}) = 203.4 \text{ m}^3/\text{día}.$

4.3.7 Diseño del Sistema de Almacenamiento (Area 700).

a) Tanque de almacenamiento de primario (FB-701)

Volúmen

El tanque de almacenamiento deberá ser capaz de contener el total del primario en los tanques FB-101 y 102. Considerando un sobrediseño del 20% :

$$V \approx 1.2 V_p$$

donde:

V = Volúmen del tanque de almacenamiento; L.

V_p = Volúmen de primario en los tanques FB-101 y 102;
123 400 L.

$$V = (1.2) (123\,400 \text{ L})$$

$$V = 148\,080 \text{ L} \approx 148.1 \text{ m}^3$$

Dimensiones

Tomando una relación longitud-diámetro del tanque, igual a tres y descontando el volúmen de las cabezas :

$$D = \sqrt[3]{4V/3\pi}$$

donde:

V = Volúmen del tanque de almacenamiento; 148.1 m^3 .

D = Diámetro del tanque; m.

$$D = \sqrt[3]{(4)(148.1 \text{ m}^3) / (3)(3.1416)}$$

$$D = 3.97 \text{ m} \approx 4 \text{ m.}$$

como $L/D = 3$ (L=longitud del tanque).

$$L = 3D ; \quad L = (3)(4 \text{ m}) ; \quad L = 12 \text{ m.}$$

Diseño mecánico

El espesor de placa requerida en el cuerpo del tanque de almacenamiento puede determinarse empleando la relación:

$$t = PR / (SE - 0.6 P) + T$$

donde:

t = Espesor de placa; cm.

P = Presión de diseño; kg/cm^2 .

S = Esfuerzo máximo permisible del material del tanque; 2250 kg/cm^2 . (acero al carbón SA-515-70).

E = Eficiencia de las uniones soldadas; 0.85.

R = Radio interno del recipiente; 200 cm.

T = Tolerancia a la corrosión; 0.318 cm (1/8").

La presión de diseño será la debida a la columna hidrostática presente más un factor de seguridad:

$$P = H + 2.5$$

donde:

P = Presión de diseño; kg/cm^2 .

H = Presión por columna hidrostática; kg/cm^2 .

La presión hidrostática se puede calcular del nivel de primario en el tanque; como está lleno al 80% de su capacidad:

$$H = 0.8 D \rho_b$$

donde:

H = Presión por columna hidrostática; kg/cm^2 .

D = Diámetro interno del tanque de almacenamiento; 400 cm.

ρ_b = Densidad del primario; $1.04 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{cm}^3$.

$$H = (0.8) (400\text{cm}) (1.04 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{cm}^3).$$

$$H = 0.333 \text{ kg}/\text{cm}^2.$$

$$P = 0.333 \text{ kg}/\text{cm}^2 + 2.5 \text{ kg}/\text{cm}^2.$$

$$P = 2.8333 \text{ kg}/\text{cm}^2.$$

$$t = (2.833 \text{ kg}/\text{cm}^2) (200\text{cm}) / ((2.250 \text{ kg}/\text{cm}^2) (0.85) + (0.6) (2.8333 \text{ kg}/\text{cm}^2)) + 0.318 \text{ cm}.$$

$$t = 0.614 \text{ cm}.$$

El espesor comercial de placa más cercano es de 0.9525 cm (3/8"); para las cabezas del recipiente se empleará el mismo espesor de placa.

b) Bomba de retorno y agitación (GA-701)

Como existen dos casos operacionales para este equipo se considerará el más crítico para efectos de diseño. Este caso es el de retorno del primario a los tanques de electrodepósito y derrame; si la presión de succión de la bomba es la atmosférica:

$$\Delta P_b = P_d - P_{cd} + \Delta P_{cc} + H + \Delta P_f$$

donde:

ΔP_b = ΔP de la bomba de retorno y agitación; kg/cm^2 .

P_d = Presión de descarga de la bomba de retorno y agitación; kg/cm^2 .

P_{cd} = Presión del cabezal de distribución; 2.5 kg/cm^2 .

ΔP_{cc} = Caída de presión en los cambiadores de calor; 0.7 kg/cm^2 .

H = Presión por cabeza estática; 0.2 kg/cm^2 .

ΔP_f = Caída de presión por fricciones; 0.7 kg/cm^2 .

$$\Delta P_b = P_d = 2.5 \text{ kg/cm}^2 + 0.7 \text{ kg/cm}^2 + 0.2 \text{ kg/cm}^2 + 0.7 \text{ kg/cm}^2$$

$$\Delta P_b = 4.1 \text{ kg/cm}^2$$

El gasto a manejar por este equipo se calculará suponiendo que el tanque de almacenamiento debe vaciarse en un lapso de dos horas:

$$Q_{al} = V_p / 2$$

donde:

Q_{al} = Gasto volumétrico de la bomba de retorno y agitación; L/hr.

V_p = Volumen de primario en el tanque de almacenamiento; 123 400 L.

Q_{a1} = 123 400 L/2hr ; Q_{a1} = 61 700 L/hr.

La potencia de la bomba será:

$$bHp = \frac{\Delta P_b Q_{a1}}{27\,390 \eta}$$

donde:

bHp = Potencia al freno de la bomba de retorno de agitación; Hp.

ΔP_b = ΔP de la bomba de retorno y agitación; 4.1 kg/cm^2 .

Q_{a1} = Gasto volumétrico de la bomba de retorno y agitación;
61 700 L/hr.

η = Eficiencia mecánica; 75%.

$$bHp = \frac{(4.1 \text{ kg/cm}^2) (61\,700 \text{ L/hr})}{(27\,390) (0.75)}$$

$$bHp = 12.31 \text{ Hp} \quad ; \quad \text{comercial } 15 \text{ Hp.}$$

c) Espreas para agitación

El gasto que manejarán las espreas para agitar el tanque de almacenamiento será el mismo que el de la bomba de este sistema. Como la presión de descarga de la bomba es de 4.1 kg/cm^2 , puede suponerse que las espreas trabajarán a 3.5 kg/cm^2 ; en estas condiciones si se emplean espreas modelo 2 HH 30 350 (catálogo Spraying Sistemas, Co.), el número requerido será:

$$N_e = Q_{a1}/Q_e$$

donde:

N_e = Número de espreas;

Q_{al} = Gasto volumétrico de la bomba de retorno de agitación;
61 700 L/hr.

Q_e = Gasto volumétrico por esprea; 7 950 L/hr esprea.

N_e = (61 700 L/hr) / (7 950 L/hr esprea).

N_e = 7.76 \approx 8 espreas.

mismas que se distribuirán uniformemente en la parte inferior del tanque de almacenamiento.

4.3.8 Diseño de Sistema Cerrado de Enjuagues (Area 800)

a) Etapa de enjuague con permeato

Gasto de permeato

De acuerdo a la recomendación del proveedor del primario se requieren 8 L para enjuagar cada $10m^2$ de superficie recubierta.

$$Q_p = 0.8 \cdot S_c \cdot U_m$$

donde:

Q_p = Gasto volumétrico de permeato; L/hr.

S_c = Superficie unitaria de las carrocerías; $95m^2$ /unidad.

U_m = Máximo número de carrocerías procesadas cada hora;
28 unidades/hr.

$$Q_p = (0.8 L/m^2) (95m^2/unidad) (28 unidades/hr)$$

$$Q_p = 2 128 L/hr.$$

Bomba de permeato (GA-802)

$$\Delta P_b = P_d = P_{ep} + H + \Delta P_f$$

donde:

$$\Delta P_b = \Delta P \text{ de la bomba de permeato; } \text{kg/cm}^2.$$

$$P_d = \text{Presión de descarga de la bomba de permeato; } \text{kg/cm}^2.$$

$$P_{ep} = \text{Presión de las espumas de enjuague con permeato; } 4.5 \text{ kg/cm}^2.$$

$$H = \text{Presión por cabeza estática; } 0.2 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\Delta P_f = \text{Caída de presión por fricción; } 0.7 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\Delta P_b = 4.5 \text{ kg/cm}^2 + 0.2 \text{ kg/cm}^2 + 0.7 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\Delta P_b = 5.4 \text{ kg/cm}^2.$$

$$bHp = \frac{\Delta P_b Q_p}{27\,390 \eta}$$

donde:

$$bHp = \text{Potencia de freno de la bomba de permeato; Hp.}$$

$$\Delta P_b = \Delta P \text{ de la bomba de permeato; } 5.4 \text{ kg/cm}^2.$$

$$Q_p = \text{Gasto de permeato; } 2\,128 \text{ L/hr.}$$

$$\eta = \text{Eficiencia mecánica de la bomba; } 75\%.$$

$$bHp = (5.4 \text{ kg/cm}^2) (2\,128 \text{ L/hr}) / (27\,390) (0.75).$$

$$bHp = 0.56 \text{ Hp} ; \text{ comercial } 1 \text{ Hp.}$$

Tanque de permeato (FB = 801)

El volumen de este recipiente se determinará suponiendo que se requiere almacenar la cantidad de permeato suficiente para enjuagar cuatro carrocerías.

$$V = (0.8) (4) (Sc)$$

donde:

V = Volumen del tanque de permeato; m^3 .

Sc = Superficie unitaria de las carrocerías; $95m^2$ /unidad.

$$V = (0.8 \text{ L/m}^2) (4 \text{ unidades}) (95 \text{ m}^2/\text{unidad}) = 304 \text{ L} = 0.304 \text{ m}^3.$$

si se considera que el tanque está normalmente lleno al 80% de su capacidad.

$$V = 0.304 \text{ m}^3 / 0.8 \quad ; \quad V = 0.380 \text{ m}^3$$

como no se tiene ningún requerimiento especial para las dimensiones de este tanque se supondrá de forma cúbica.

$$L = \sqrt[3]{V}$$

donde:

L = Largo, ancho o altura del tanque de permeato; m.

V = Volumen del tanque de permeato; 0.380 m^3 .

$$L = \sqrt[3]{0.380 \text{ m}^3}$$

$$L = 0.72 \text{ m} \approx 0.75 \text{ m}.$$

Espreas de enjuague con permeato

De acuerdo al catálogo del fabricante Spraying Systems, Co., para este servicio pueden emplearse espreas modelo 1/8 GG 8W con capacidad de 364 L/hr a 4.5 kg/cm². El número requerido de espreas será:

$$N_e = Q_p / Q_e$$

donde:

N_e = Número de espreas.

Q_p = Gasto volumétrico de permeato; 2 128 L/hr.

Q_e = Gasto volumétrico por esprea; 364 L/hr esprea.

$N_e = (2\ 128\ \text{L/hr}) / (364\ \text{L/hr esprea})$.

$N_e = 5.85 \approx 6$ espreas

Ultrafiltros (FG-801 A/B)

Para la especificación de estos equipos se empleará la recomendación del proveedor del primario de emplear un flujo de 60 L/hr m²; del catálogo del fabricante ROMICON y para el % de sólidos del primario empleado se obtiene que el gasto a recircular, de primario concentrado, es de 145 200 L/hr (ver figura IV.28). Con esto, el gasto total que deberá alimentarse a los ultrafiltros es de :

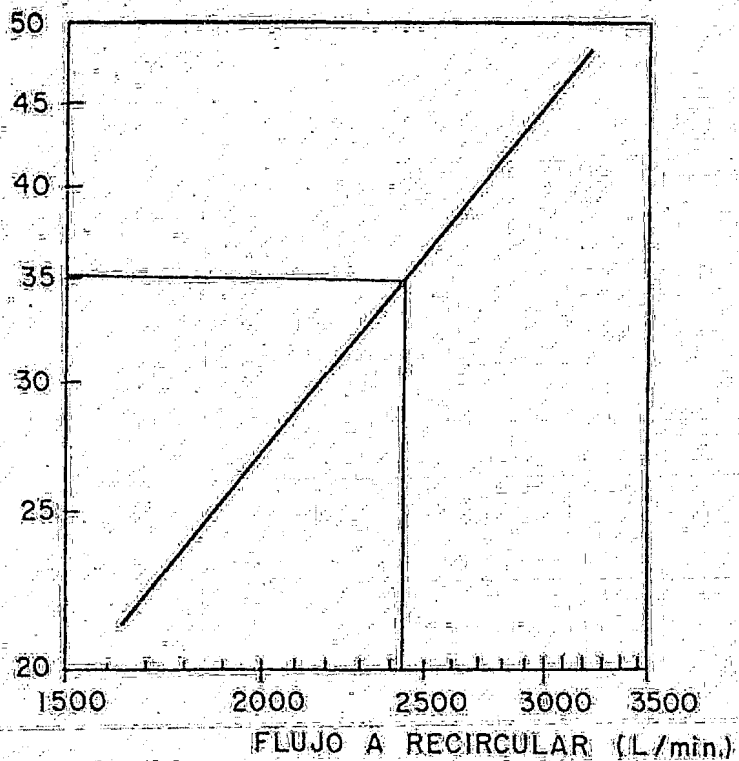
$$Q_{uf} = Q_{bc} + Q_p$$

donde:

Q_{uf} = Gasto volumétrico de alimentación a ultrafiltros; L/hr.

Q_{bc} = Gasto volumétrico recirculado de primario concentrado; 145 200 L/hr.

FLUJO DE ULTRAFILTRADO
GAL/ FT² DIA



GRAFICA VALIDA
PARA 20% DE SOLIDOS.

REF.: CATALOGO DE FABRICANTE ROMICON

TESIS PROFESIONAL, S.S.S.

DIAGRAMA PARA ESPECIFICACION
DE ULTRAFILTROS.

FIGURA IV.28

$Q_p =$ Gasto volumétrico de permeato; 2 128 L/hr.

$Q_{uf} = 145\ 200\ \text{L/hr} + 2\ 128\ \text{L/hr}$ $Q_{uf} = 147\ 328\ \text{L/hr}$.

Adicionalmente el fabricante ROMICON indica que cada cartucho para ultrafiltración tiene un área activa de $1.4\ \text{m}^2$, por lo que el número de cartuchos requeridos para esta operación será:

$$Nu = Q_p / 1.4 Q_{up}$$

donde:

$Nu =$ Número de cartuchos requeridos para la ultrafiltración;

$Q_p =$ Gasto volumétrico de permeato; 2 128 L/hr.

$Q_{up} =$ Gasto volumétrico de permeato por unidad de superficie de membrana para ultrafiltración; $60\ \text{L/hr m}^2$.

$Nu = (2\ 128\ \text{L/hr}) / (1.4\ \text{m}^2/\text{cartucho}) (60\ \text{L/hr m}^2)$

$Nu = 25.35 \cong 26$ cartuchos

De acuerdo con el fabricante ROMICON, pueden emplearse cartuchos modelo HF/5-45-CXM.

Bombas de los ultrafiltros (GA-801/R)

$$\Delta P_b = P_d = \Delta P_{uf} + H + \Delta P_f$$

donde:

$\Delta P_b =$ ΔP de las bombas de los ultrafiltros; kg/cm^2 .

$H =$ Presión por cabeza estática; $0.2\ \text{kg/cm}^2$.

$$\Delta P_f = \text{Caída de presión por fricción; } 0.7 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\Delta P_{uf} = \text{Caída de presión en los ultrafiltros; } 2 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\Delta P_b = 2 \text{ kg/cm}^2 + 0.2 \text{ kg/cm}^2 + 0.7 \text{ kg/cm}^2.$$

$$\Delta P_b = 2.9 \text{ kg/cm}^2.$$

Además:

$$bHp = \Delta P_b Q_{uf} / 27390 \eta$$

donde:

bHp = Potencia al freno de la bomba de los ultrafiltros;
Hp.

ΔP_b = ΔP de las bombas de los ultrafiltros; 2.9 kg/cm^2 .

Q_{uf} = Gasto volumétrico de alimentación a ultrafiltros; 147328 L/hr.

η = Eficiencia mecánica de la bomba; 75%.

$$bHp = (2.9 \text{ kg/cm}^2) (147328 \text{ L/hr}) / (27390) (0.75).$$

$$bHp = 19.51 \text{ Hp} \quad \text{comercial } 20 \text{ Hp.}$$

b) Segunda etapa de enjuague recirculado

Gasto volumétrico de la segunda etapa de enjuague recirculado:

De acuerdo con la recomendación del proveedor del primario se requieren 20 L para enjuagar cada 10 m^2 de superficie recubierta. Además, se considerará un 25% adicional para agitar el contenido del tanque FB-803.

$$Q_{e2} = 1.25 \times 20 \text{ Sc Um}$$

donde:

Q_{e2} = Gasto volumétrico de la segunda etapa de enjuague recirculado; L/hr.

S_c = Superficie unitaria de las carrocerías; $95 \text{ m}^2/\text{unidad}$.

U_m = Máximo número de carrocerías procesadas cada hora; 28 unidades/hr.

$Q_{e2} = (1.25) (20 \text{ L/m}^2) (95 \text{ m}^2/\text{unidad}) (28 \text{ unidades/hr})$,

$Q_{e2} = 66500 \text{ L/hr}$.

Bomba de la segunda etapa de enjuague recirculado; (GA-803)

$$\Delta P_b = P_d = P_{e2} + H + \Delta P_f$$

donde:

ΔP_b = ΔP de la bomba de la segunda etapa de enjuague recirculado; kg/cm^2 .

P_d = Presión de descarga de la bomba de la segunda etapa de enjuague recirculado; kg/cm^2 .

P_{e2} = Presión de las espesas de la segunda etapa para enjuague recirculado; 3 kg/cm^2 .

H = Presión por cabeza estática; 0.2 kg/cm^2 .

ΔP_f = Caída de presión por fricción; 0.7 kg/cm^2 .

$$\Delta P_b = 3 \text{ kg/cm}^2 + 0.2 \text{ kg/cm}^2 + 0.7 \text{ kg/cm}^2$$

$$\Delta P_b = 3.9 \text{ kg/cm}^2$$

además

$$bHp = \Delta P_b Q_{e2} / 27390 \eta$$

donde:

bHp = Potencia al freno de la bomba GA-803; Hp.

ΔP_b = ΔP de la bomba GA-803; 3.9 kg/cm^2 .

Q_{e2} = Gasto volumétrico de la segunda etapa de enjuague recirculado; 66 500 L/hr.

η = Eficiencia mecánica de la bomba; 75%.

$$bHp = (3.9 \text{ kg/cm}^2) (66 500 \text{ L/hr}) / (27 390) (0.75)$$

bHp = 12.62 Hp; comercial 15 Hp.

Espreas para enjuague de la segunda etapa de enjuague recirculado.

El gasto que manejarán estas espreas es el total de la segunda etapa de enjuague menos un 25%.

$$Q'_{e2} = Q_{e2} / 1.25$$

donde:

Q'_{e2} = Gasto volumétrico de las espreas de la segunda etapa de enjuague recirculado; L/hr.

Q_{e2} = Gasto volumétrico de la segunda etapa de enjuague recirculado; 66 500 L/hr.

$$Q'_{e2} = (66 500 \text{ L/hr}) / 1.25$$

Q_{e2} = 53 200 L/hr.

Según el catálogo del fabricante Spraying Systems, Co., para este servicio pueden emplearse espreas de cono lleno modelo 1 1/4 H16W con capacidad de 7 722 L/hr a 3 kg/cm².

Con ésto, el número requerido de espreas es de:

$$N_e = Q'_{e2} / Q_e$$

dónde:

N_e = Número de espreas.

Q'_{e2} = Gasto volumétrico de las espreas de la segunda etapa de enjuague recirculado; 53 200 L/hr.

Q_e = Gasto volumétrico por esprea; 7 722 L/hr esprea.

$$N_e = (53\ 200\ \text{L/hr}) / (7\ 722\ \text{L/hr esprea})$$

$$N_e = 6.45 \approx 7\ \text{espreas.}$$

Las cuales se distribuirán uniformemente en el cabezal para enjuague.

Espreas para agitación del tanque FB-803

El gasto que manejarán estas espreas es el 25% del manejado en las espreas de enjuague:

$$Q_{a2} = 0.25\ Q'_{e2}$$

dónde:

Q_{a2} = Gasto volumétrico de las espreas para agitación del tanque FB-803; L/hr.

Q'_{e2} = Gasto volumétrico de la segunda etapa de enjuague recirculado; 53 200 L/hr.

$$Q_{a2} = (0.25) (53\ 200\ \text{L/hr}).$$

$$Q_{a2} = 13\ 300\ \text{L/hr}.$$

De acuerdo con el catálogo del fabricante Spryng Systems Co., para este servicio pueden emplearse espreas modelo 1HH-3070 con capacidad de 1953 L/hr a $3.5\ \text{kg/cm}^2$, por lo que el número requerido de espreas es de :

$$N_e = Q_{a2}/Q_e$$

donde :

N_e = Número de espreas.

Q_{a2} = Gasto volumétrico de las espreas de agitación del tanque FB-803; 13 300 L/hr.

Q_e = Gasto volumétrico por esprea; 1953 L/hr esprea.

$$N_e = (13\ 300\ \text{L/hr}) / (1\ 953\ \text{L/hr esprea}).$$

$$N_e = 6.81 \approx 7\ \text{espreas}.$$

Las cuales se distribuirán uniformemente en el fondo del tanque FB-803.

b) Primera etapa de enjuague recirculado y retorno del sistema cerrado de enjuagues.

Gasto volumétrico de enjuague recirculado

El flujo a manejar en esta etapa de enjuagues será el requerido para enjuague y agitación más el manejado en el retorno del sistema cerrado de enjuagues. Debe recordarse

que en esta etapa se requiere, para enjuague, el mismo volumen que en la segunda etapa, y que el flujo manejado por el retorno del sistema es el mismo que el de permeato; lo anterior permite que el sistema de enjuagues opere ininterrumpidamente a régimen permanente:

$$Q_{e1} = Q_{e2} + Q_p$$

donde:

Q_{e1} = Gasto volumétrico de la primera etapa de enjuague-recirculado; L/hr.

Q_{e2} = Gasto volumétrico de la segunda etapa de enjuague-recirculado; 66 500 L/hr.

Q_p = Gasto de permeato; 2 128 L/hr.

$$Q_{e1} = 66\,500 \text{ L/hr} + 2\,128 \text{ L/hr.}$$

$$Q_{e1} = 68\,628 \text{ L/hr.}$$

Bomba de la primera etapa de enjuague recirculado (GA-804).

La ΔP de esta bomba es la misma que la de la segunda etapa, por lo que;

$$bHp = \Delta P_b Q_{e1} / 27\,390 \text{ fl.}$$

donde:

bHp = Potencia al freno de la bomba GA-804; Hp.

ΔP_b = ΔP de la bomba GA-804; 3.9 kg/cm^2 .

Q_{e1} = Gasto volumétrico de la primera etapa de enjuague-recirculado; 68 628 L/hr.

η = Eficiencia mecánica de la bomba; 75%.

$$bHp = (3.9 \text{ kg/cm}^2) (68.628 \text{ L/hr}) / (27.390) (0.75).$$

$$bHp = 13.03 \text{ Hp} ; \text{ comercial } 15 \text{ Hp.}$$

Espreas para agitación del tanque FB-802 y enjuague en la segunda etapa de enjuague recirculado.

El diseño de estas espreas es completamente equivalente al de la segunda etapa de enjuague por lo tanto se requerirán:

	Número	Modelo
Enjuague	7	1 1/4 H 16 W
Agitación	7	1 HH 3 070

Espreas de enjuague en el retorno del sistema

Dado que esta etapa de enjuague es similar a la de permeato, se requerirán seis espreas modelo 1/8 GG8W.

Acumuladores de la primera y segunda etapa de enjuague recirculado (FB-802 y 803).

Para el dimensionamiento de estos recipientes se considerará que deberán ser capaces de almacenar la cantidad de líquido suficiente para el enjuague de cuatro carrocerías; tomando como base el flujo total manejado por la bomba de la primera etapa de enjuague recirculado, el cual incluye el líquido de enjuague y agitación de la primera etapa y de enjuague del retorno:

$$V = 4 Qe1/U_m$$

donde:

$V =$ Volumen del acumulador de la primera o segunda etapa de enjuague recirculado; L.

$Q_{e1} =$ Gasto volumétrico de la primera etapa de enjuague-recirculado; 68 628 L/hr.

$U_m =$ Número máximo de carrocerías procesada cada hora; 28 unidades/hr.

$V = (4 \text{ unidades}) (68 628 \text{ L/hr}) / (28 \text{ unidades/hr}).$

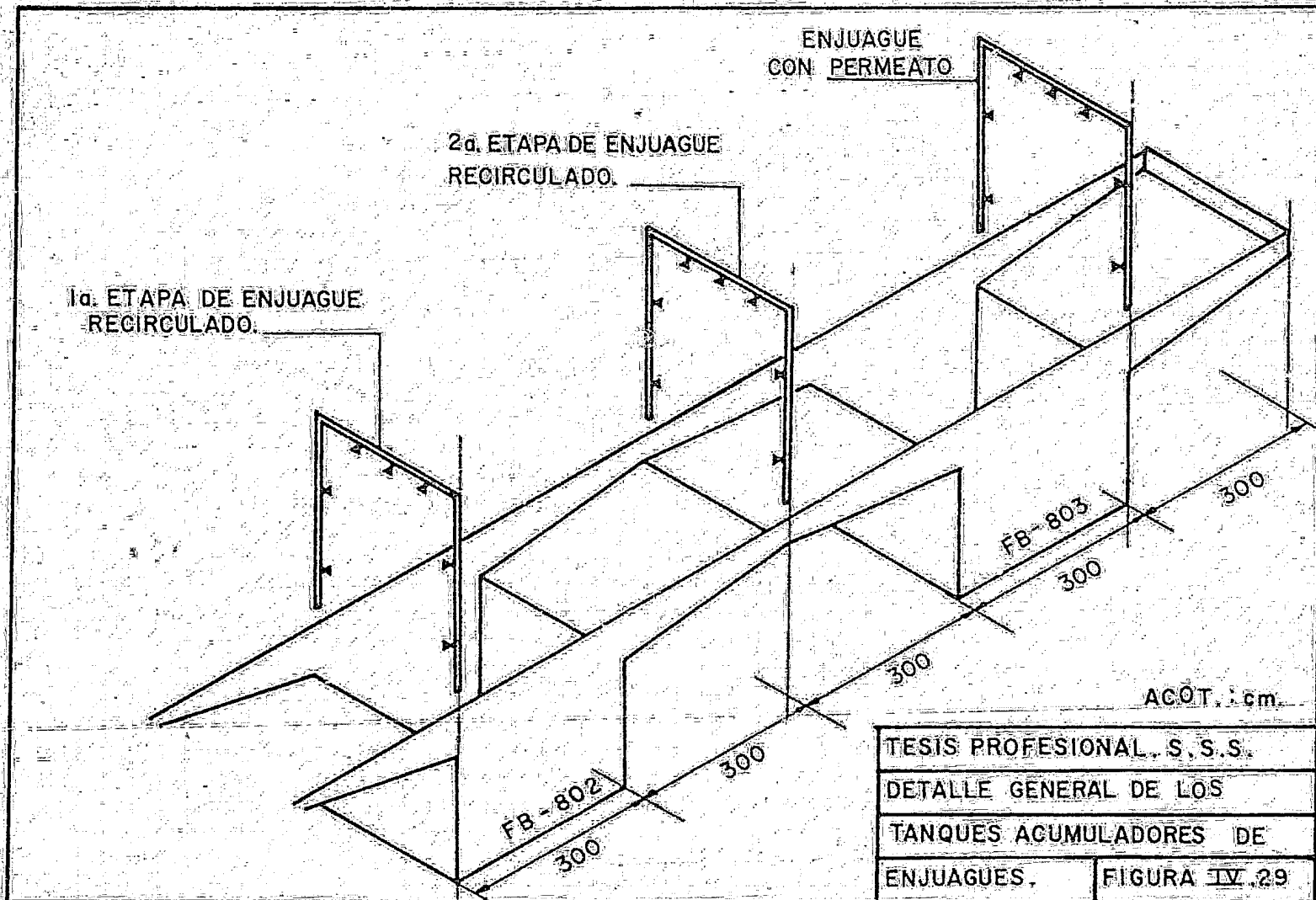
$V = 9 804 \text{ L}.$

Suponiendo que los recipientes se encuentran llenos al 80% de su capacidad.

$$V = 9 804 \text{ L} / 0.8$$

$$V = 12 255 \text{ L} \approx 12.3 \text{ m}^3$$

El ancho de estos tanques deberá ser el mismo que el de los tanques de electrodepósito y derrame, ya que por la parte superior de aquéllos deberán circular las carrocerías. En cuanto a la longitud y altura de los acumuladores de enjuague, para definir su valor, puede partir de la misma base empleada para dimensionar el tanque de derrame FB-102 y la primera plataforma de escurrido. Debe recordarse que el criterio empleado se refería a que la mitad del tiempo de escurrido, 1.5 min, transcurre sobre uno u otro de los acumuladores de enjuague y la otra mitad sobre las plataformas de escurrido. Si adicionalmente se considera que las espreas para enjuague se localizan tal como se muestra en la figura IV.29, la longitud de los acumuladores y de las plataformas de escurrido será exactamente igual a la del tanque FB-102 y la primera plataforma de



escurrido (ver figura IV.20). Con ésto, la altura de los acumuladores será:

$$H = V/LA$$

donde:

H = Altura del acumulador de la primera o segunda etapa de enjuague recirculado; m.

V = Volúmen del acumulador de la primera o segunda etapa de enjuague recirculado; 12.3 m^3 .

L = Longitud del acumulador de la primera o segunda etapa de enjuague recirculado; 3m.

A = Ancho del tanque de electrodepósito; 3.23 m.

$$H = (12.3 \text{ m}^3) / (3\text{m}) (3.23\text{m})$$

$$H = 1.27 \text{ m}$$

4.3.9. Diseño Mecánico de Tanques

Para efectuar el diseño mecánico de los diferentes tanques requeridos en el proceso cuya forma no es cilíndrica (FB-101, 102, 601, 801, 802 y 803), se presenta la siguiente secuencia de cálculo; debido a la magnitud de la secuencia ésta se desarrolla en forma general, reportándose al final de la misma los resultados obtenidos para cada tanque.

a) Consideraciones generales

Material: Acero al carbón SA-515-70.

Esfuerzo máximo permisible: $2\ 250\ \text{kg/cm}^2$.

Módulo de young: $2\ 109\ 705\ \text{kg/cm}^2$.

Densidad del acero: $7.868\ \text{g/cm}^3$.

Todos los tanques están soportados en sus extremos.

b) Cálculo del espesor de placa

$$t^r = 2.45 L \sqrt{\frac{0.4HG(0.0010)}{S}} + 0.3175$$

donde:

t^r = Espesor de placa; cm.

L = Máxima dimensión longitud o ancho; cm.

H = Altura del tanque; cm.

G = Gravedad específica; adim.

S = Esfuerzo máximo permisible; $2\ 250\ \text{kg/cm}^2$.

α = Factor de la longitud y altura del tanque (H/L);
adim. (figura IV.30).

0.3175 = Espesor por corrosión.

c) Selección del espesor comercial (t).

En base al espesor calculado, seleccionar un espesor comercial, considerando que éstos varían de 0.3175 cm. en 0.3175 cm.

d) Cálculo de la deflexión máxima

En base a la selección del espesor comercial:

$$\Delta_{\max} = \frac{(0.0010) HG L^4 \alpha}{E t^3}$$

donde:

Δ_{\max} = Deflexión máxima; cm.

H = Altura del tanque; cm.

G = Gravedad específica; adim.

L = Máxima dimensión (longitud o ancho del tanque);
cm.

α = Factor dependiente de la longitud y altura del tanque (H/L); adim. (ver figura IV.31).

E = Módulo de young; Kg/cm^2 .

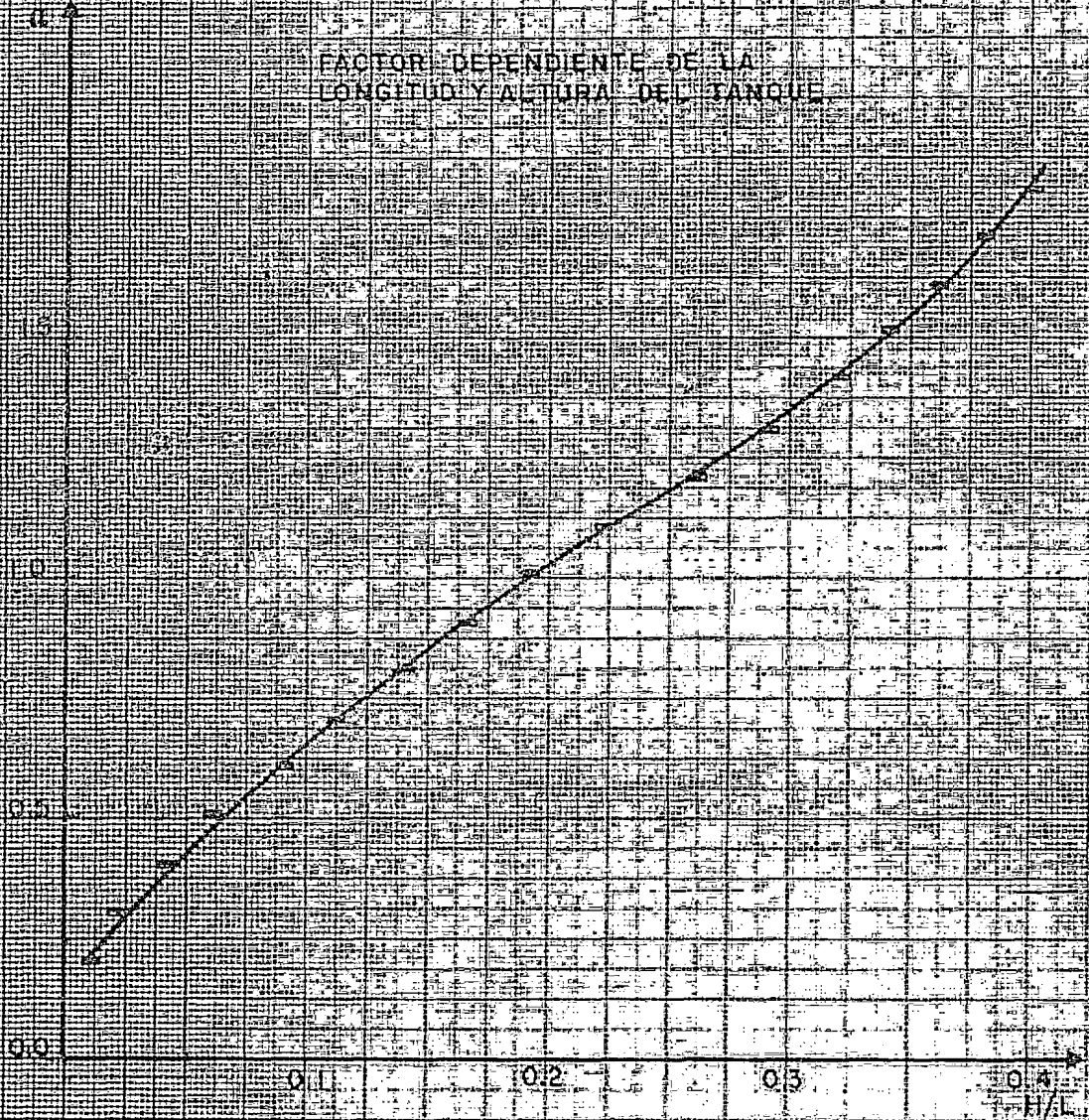
t = Espesor comercial de la placa; cm.

e) Cálculo de la deflexión máxima permisible

$$\Delta^{\text{f}}_{\max} = \frac{L}{500}$$

CURVA
Q VS H/L

FACTOR DEPENDIENTE DE LA
LONGITUD Y ALTURA DEL TANQUE

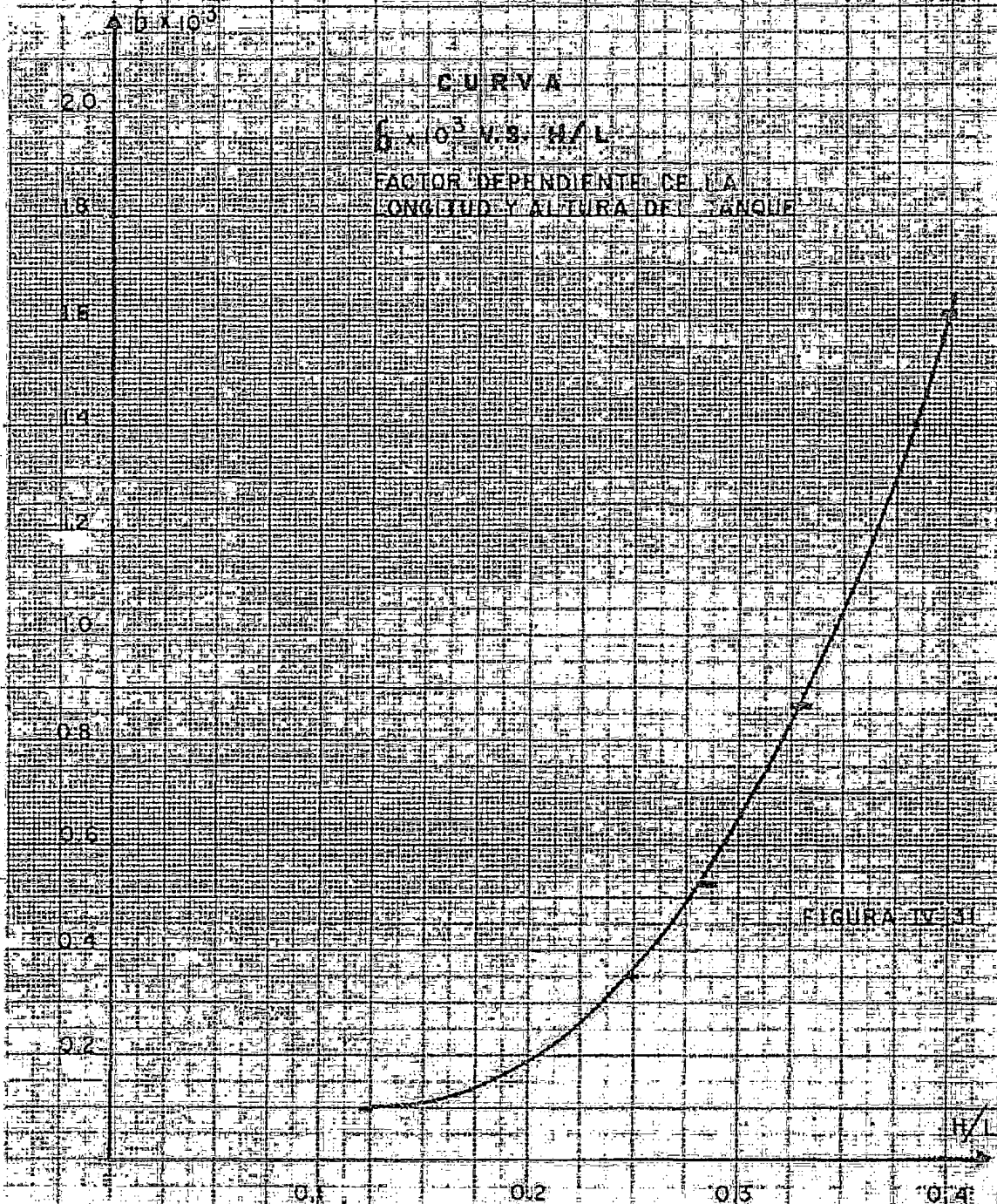


RE MOYSEY, F. EUGENE

FIGURA IV 50

PRESSURE VESSEL HANDBOOK

TESIS PROFESIONAL S.S.S.



CURVA
 $\phi \times 10^3$ V.S. h/L
FACTOR DEPENDIENTE DE LA
LONGITUD Y ALTURA DEL CANGUJE

FIGURA IV-31

Δ' max = Deflexión máxima permisible; cm.

L = Máxima dimensión (longitud o ancho del tanque);
- cm.

f) - Comparar la deflexión máxima permisible con la calculada:

Si la permisible es mayor que la calculada, se concluye el diseño, si no, es necesario considerar atezadores horizontales (ver figura IV.32). Además, cuando la longitud del tanque excede los cinco metros es necesario considerar refuerzos en la parte inferior del tanque, independientemente de los soportes en los extremos.

g) Cálculo de la distancia para los refuerzos.

$$l = 1.254 \cdot t \sqrt{\frac{S}{(0.001)HG}}$$

dónde:

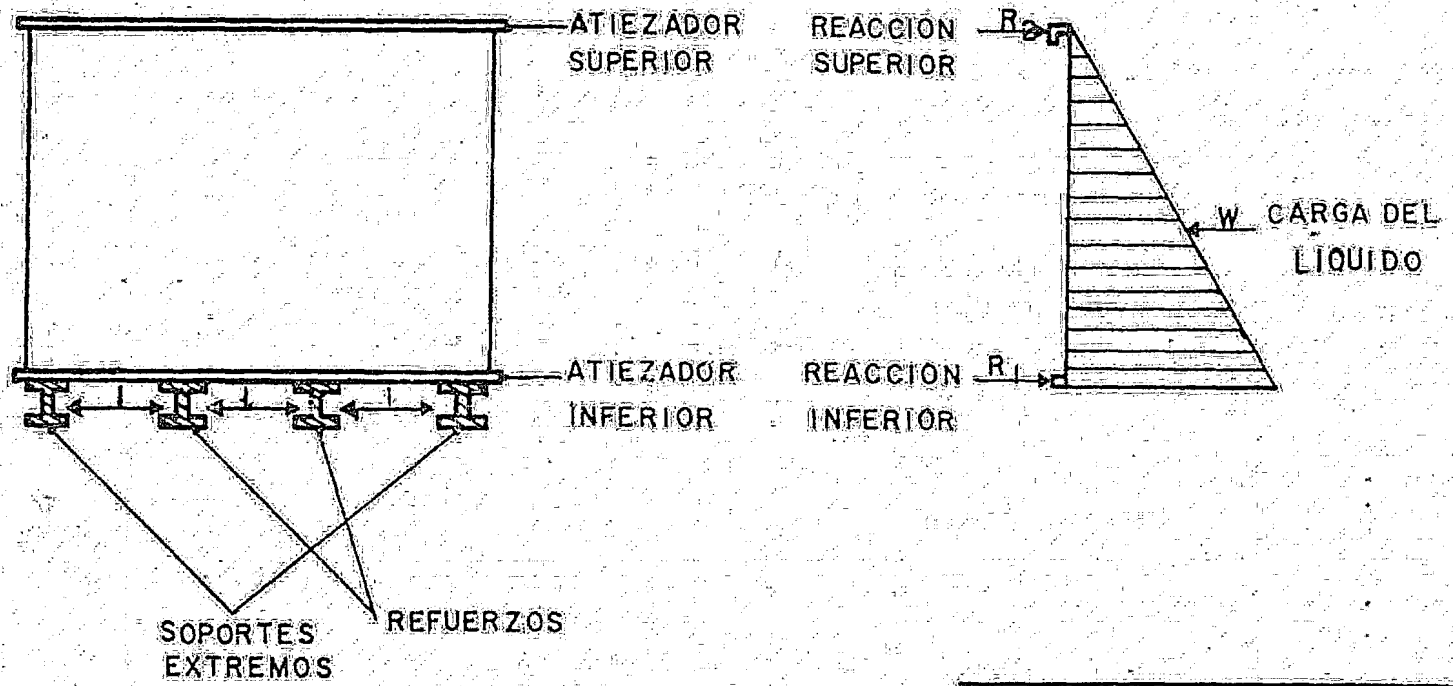
l = Separación entre refuerzo y refuerzo; cm.

t = Espesor comercial de placa; cm.

S = Esfuerzo máximo permisible; kg/cm².

H = Altura del tanque; cm.

G = Gravedad específica; adim.



234

TESIS PROFESIONAL, S. S. S.	
ATIEZADORES, REACCIONES, SC-	
PORTES Y REFUERZOS EN	
TANQUES.	FIGURA IV-32

(hr) Cálculo de atezadores (Figura IV.32).

Cálculo de la carga de líquido

$$W = 4.987 \times 10^{-4} G H^2$$

donde:

W = Carga del líquido sobre la pared; kg/cm.

G = Gravedad específica; adim.

H = Altura del tanque; cm.

Cálculo de las reacciones de los atezadores

$$R_1 = (0.7) W,$$

$$R_2 = (0.3) W,$$

donde:

R_1 = Reacción inferior; kg/cm.

R_2 = Reacción superior; kg/cm.

W = Carga del líquido sobre la pared; kg/cm.

Cálculo del momento de inercia mínimo superior e inferior.

$$I_{\min} = \frac{1.25 \times R L^3}{E}$$

donde:

I_{\min} : Momento de inercia mínimo; cm^4 .

R : Reacción inferior o superior; kg/cm .

L : Máxima dimensión (longitud o ancho del tanque); cm .

E : Módulo de young; kg/cm^2 .

Los atizadores deberán cumplir con el momento de inercia mínimo.

1) Peso del tanque

Volumen total de placa

$$V = t \times A_{tp}$$

donde:

V = Volumen total de placas; m^3 .

t = Espesor comercial de placa; m .

A_{tp} = Área total de placas; m^2 .

Peso de placas del tanque

$$M = e \times V$$

donde:

M = Peso de las placas del tanque; kg .

e = Densidad del acero; kg/m^3 .

V = Volumen total de placas; m^3 .

RESULTADOS DEL DISEÑO MECÁNICO DE LOS TANQUES REQUERIDOS EN EL PROCESO

CLAVE DEL TANQUE	FB-101	FB-102	FB-601	FB-801	FB-802	FB-803
DATOS GENERALES						
Gravedad específica; G	1.04	1.04	1.00	1.00	1.00	1.00
Longitud o ancho; L; cm	1762	323	112	75	323	323
Altura (H); cm	224	224	112	75	127	127
H/L	0.171	0.368	1	1	0.393	0.393
α	0.0005	0.0033	0.019	0.019	0.004	0.004
Espesor (t'); cm	0.9804	0.3371	0.5844	0.4635	0.6935	0.6935
Espesor comercial (t); cm	1.5875	0.7938	0.6350	0.4763	0.7938	0.7938
δ	0.0001	0.0012	0.022	0.022	0.0017	0.0017
Deflexión (Δ); cm	26.57	1.53	0.7177	0.229	2.227	2.227
Deflexión permisible (Δ); cm	3.52	0.646	0.224	0.15	0.646	0.646
Distancia entre refuerzos (l); cm	195.6	-	-	-	-	-
Número de soportes	9	-	-	-	-	-
Carga de líquido (W); kg/cm	26	7.34	6.26	2.8	8.04	8.04
Reacción inferior (R_1); kg/cm	18.2	5.14	4.379	1.96	5.63	5.63
Reacción superior (R_2); kg/cm	7.6	2.2	1.897	0.84	2.41	2.41
Momento de inercia mínimo inferior (I_1); cm ⁴	59010	102.60	3.64	0.49	112.4	112.4
Momento de inercia mínimo superior (I_2); cm ⁴	25290	43.93	1.56	0.21	48.18	48.18
Area de placas totales (Atp); m ²	150.29	24.52	6.272	2.813	25.51	25.51
Volumen de placa total (Vtp); m ³	2.38	0.195	0.040	0.476	0.2026	0.2026
Peso de tanque (M); kg	17.50X 10 ³	1.53X 10 ³	3.17X 10 ²	1.054X 10 ²	1.59X 10 ³	1.59X 10 ³

C A P I T U L O V

EVALUACION ECONOMICA

5.1 INTRODUCCION A LA EVALUACION ECONOMICA.

5.2 EVALUACION DE LA INVERSION.

5.3 EVALUACION DE LOS COSTOS DE PRODUCCION Y EL COSTO
UNITARIO.

5.1 INTRODUCCION A LA EVALUACION ECONOMICA

Como parte complementaria al diseño, a continuación se presenta la evaluación económica de la unidad. Esta evaluación se divide en dos partes:

En la primera se establece la inversión requerida para el montaje e inicio de operaciones de la unidad: el cálculo de la inversión se hará empleando el método de porcentajes, por lo que puede anticiparse que el resultado obtenido será de orden de magnitud.

En segundo lugar se determinarán los costos totales anuales de la unidad, derivándose de aquí el costo unitario de aplicación del primario.

5.2 EVALUACION DE LA INVERSION

5.2.1 Costos de Equipo

Todos los costos de equipo, excepto los de espreas, se obtuvieron del Departamento de Estimación y Control de Costos del Instituto Mexicano del Petróleo. Los de espreas fueron proporcionados por Comercial Arce (Representante en México de Spraying Systems, Co.).

Todos los costo son L.A.B. la unidad de aplicación del recubrimiento anticorrosivo y se refieren a marzo de 1983.

a) Bombas

Bomba	Potencia (Hp)	Costo Unitario	Costo Total
GA-201	40	\$ 368,000.00	\$ 368,000.00
GA-301/R	1	\$ 60,000.00	\$ 120,000.00
GA-401/R	30	\$ 309,000.00	\$ 618,000.00
GA-501/R	250	\$ 2,200,000.00	\$ 4,400,000.00
GA-601	1	\$ 60,000.00	\$ 60,000.00
GA-701	15	\$ 255,000.00	\$ 255,000.00
GA-801/R	20	\$ 280,000.00	\$ 560,000.00
GA-802	1	\$ 60,000.00	\$ 60,000.00
GA-803	15	\$ 255,000.00	\$ 255,000.00
GA-804	15	\$ 255,000.00	\$ 255,000.00

TOTAL \$ 6,951,000.00

b) Motores eléctricos para bombas (3 600 rpm)

Bomba	Potencia (Hp)	Costo Unitario	Costo Total
GA-201	40	\$ 312,000.00	\$ 312,000.00
GA-401/R	30	\$ 250,000.00	\$ 500,000.00
GA-501/R	250	\$ 1,300,000.00	\$ 2,600,000.00
GA-601	1	\$ 18,000.00	\$ 18,000.00
GA-701	15	\$ 146,000.00	\$ 146,000.00
GA-801/R	20	\$ 183,000.00	\$ 366,000.00
GA-802	1	\$ 18,000.00	\$ 18,000.00
GA-803	15	\$ 146,000.00	\$ 146,000.00
GA-804	15	\$ 146,000.00	\$ 146,000.00
TOTAL			\$ 4,252,000.00

c) Tanque

Tanque	Peso de Acero (Ton)	Costo Total
FB-101	17.50	\$ 5,410,000.00
FB-102	1.50	\$ 880,000.00
FB-601	0.32	\$ 260,000.00
FB-701	13.20	\$ 4,410,000.00
FB-801	0.11	\$ 95,000.00
FB-802	1.6	\$ 940,000.00
FB-803	1.6	\$ 940,000.00
TOTAL		\$12,935,000.00

d) Cambiadores de calor

Cambiador	Superficie (m ²)	Costo Unitario	Costo Total
EA-401 A/B	50	\$ 1,990,000.00	\$ 3,980,000.00
TOTAL			\$ 3,980,000.00

e) Filtros

Filtro	Flujo Volumétrico L/hr.	Costo Unitario	Costo Total
FG-201 A/B	123,400	\$ 499,000.00	\$ 998,000.00
FG-202 A/B	123,400	\$ 580,000.00	\$ 1,160,000.00
TOTAL			\$ 2,158,000.00

f) Ultrafiltros

Filtro	No. Cartuchos	Costo/Cartucho	Costo Unitario	Costo Total
FG-801 A/B	26	\$ 21,000.00	\$ 546,000.00	\$ 1,092,000.00
TOTAL				\$ 1,092,000.00

g) Rectificador

Potencia (KVA)	Costo Unitario	Costo Total
1600	\$ 3,500,000.00	\$ 3,500,000.00
TOTAL		\$ 3,500,000.00

h) Agitadores

Equipo	Potencia (Hp)	Costo Unitario	Costo Total
GD-301/R	1	\$ 170,000.00	\$ 340,000.00
GD-601	1	\$ 170,000.00	\$ 170,000.00
TOTAL			\$ 510,000.00

i) Anodos

No. de Anodos	Costo Unitario	Costo Total
24	\$ 20,000.00	\$ 480,000.00
TOTAL		\$ 480,000.00

j) Celdas anódicas

No. de Celdas	Costo Unitario	Costo Total
24	\$ 15,000.00	\$ 360,000.00
TOTAL		\$ 360,000.00

k) Espreas

Sistema	No.	Modelo	Costo Unitario	Costo Total
Agitación	52	2 1/2 HH 301200	\$ 3,638.00	\$ 189,176.00
Almacenamiento	8	2 HH 30350	\$ 17,722.00	\$ 141,776.00
Enjuague	12	1/8 GG 8 W	\$ 1,384.00	\$ 16,608.00
Enjuague	14	1 1/4 H 16 W	\$ 4,282.00	\$ 59,948.00
Enjuague	14	1 HH 3070	\$ 6,152.00	\$ 86,128.00
TOTAL				\$ 493,636.00

Costo Total de Equipo: \$36,711,636.00 ÷ \$ 36,712,000.00

5.2.2 Evaluación de los Costos de Inversión

Costos Directos de Inversión

		%	
a)	Equipo	100	\$ 36,712,000.00
b)	Instalación de equipo	40	\$ 14,684,800.00
c)	2 Instrumentación	15	\$ 5,506,800.00
d)	2 Instalaciones Eléctricas	15	\$ 5,506,800.00
e)	2 Tubería	25	\$ 9,178,000.00
f)	3 Instalaciones auxiliares	20	\$ 7,342,400.00
g)	2 Servicios auxiliares	55	\$ 20,191,600.00
h)	4 Terreno	5	\$ 1,835,600.00
i)	1 Primario para llenado inicial de los tanques	--	\$ 122,560,880.00
TOTAL DE COSTOS DIRECTOS DE INVERSION			\$ 223,518,880.00

Costos Indirectos de Inversión

		%	
a)	Ingeniería y supervisión	32	\$ 11,747,840.00
b)	Indirectos de construcción	35	\$ 12,849,200.00
TOTAL DE COSTOS INDIRECTOS DE INVERSION			\$ 24,597,040.00

TOTAL DE DIRECTOS E INDIRECTOS \$ 248,115,920.00

5.2.2 Evaluación de los Costos de Inversión

Costos Directos de Inversión

		%	
a)	Equipo	100	\$ 36,712,000.00
b)	Instalación de equipo	40	\$ 14,684,800.00
c)	2 Instrumentación	15	\$ 5,506,800.00
d)	2 Instalaciones Eléctricas	15	\$ 5,506,800.00
e)	2 Tubería	25	\$ 9,178,000.00
f)	3 Instalaciones auxiliares	20	\$ 7,342,400.00
g)	2 Servicios auxiliares	55	\$ 20,191,600.00
h)	4 Terreno	5	\$ 1,835,600.00
i)	1 Primario para llenado inicial de los tanques	--	\$ 122,560,880.00
TOTAL DE COSTOS DIRECTOS DE INVERSION			\$ 223,518,880.00

Costos Indirectos de Inversión

		%	
a)	Ingeniería y supervisión	32	\$ 11,747,840.00
b)	Indirectos de construcción	35	\$ 12,849,200.00
TOTAL DE COSTOS INDIRECTOS DE INVERSION			\$ 24,597,040.00

TOTAL DE DIRECTOS E INDIRECTOS \$ 248,115,920.00

Otros costos

	%	
a) Honorarios al contratista	18	\$ 6,608,160.00
b) Contingencias	35	\$ 12,849,200.00
TOTAL DE OTROS COSTOS		<u>\$ 19,457,360.00</u>
COSTO TOTAL DE INVERSION		<u>\$ 267,573,280.00</u>

NOTAS:

- 1 Todos los porcentajes se refieren al costo de equipo, excepto en el caso del costo del primario para llenado inicial, el cual está evaluado considerando las capacidades del tanque de electrodepósito (FB-101) y el tanque de derrame (FB-102), cuyo valor es 128 340 kgs con un costo de \$955.00 / kg.
- 2 Incluye instalación.
- 3 Incluye servicios.
- 4 Sólo se considera acondicionamiento del existente.

5.3 EVALUACION DE LOS COSTOS DE PRODUCCION Y EL COSTO UNITARIO

Costos directos (todos referidos a marzo de 1983)

a) Materias primas (1)

Primario

Consumo	Costo Unitario	Costo Total
900 ton/año	\$955,000.00 / ton	<u>\$895,500,000.00/ año</u>

b) Servicios auxiliares (2)

Agua desmineralizada

Consumo	Costo Unitario	Costo Total
21 263 m ³ /año	\$ 30.00/m ³	\$ 637,890.00/año.

Aire de planta (7 kg/cm² 25^oC)

Consumo	Costo Unitario	Costo Total
164 370 m ³ /año	\$ 6.00 / m ³	\$ 986,220.00 / año.

Agua helada

Consumo	Costo Unitario	Costo Total
174 405 m ³ /año	\$ 5.00/ m ³	\$ 872,025.00 / año.

Electricidad

Consumo	Costo Unitario	Costo Total
7052 200 kw-hr/año	\$ 3.00/kw - hr	\$ 21,156,600.00/año.

TOTAL DE SERVICIOS AUXILIARES \$ 23,652,735.00/año.

5.3 EVALUACION DE LOS COSTOS DE PRODUCCION Y EL COSTO UNITARIO

Costos directos (todos referidos a marzo de 1983).

a) Materias primas (1)

- Primario

Consumo	Costo Unitario	Costo Total
900 ton/año	\$955,000.00 / ton	<u>\$895,500,000.00/ año</u>

b) Servicios auxiliares (2)

- Agua desmineralizada

Consumo	Costo Unitario	Costo Total
21 263 m ³ /año	\$ 30.00/m ³	\$ 637,890.00/año.

- Aire de planta (7 kg/cm² 25^oC)

Consumo	Costo Unitario	Costo Total
164 370 m ³ /año	\$ 6.00 / m ³	\$ 986,220.00 / año.

- Agua helada

Consumo	Costo Unitario	Costo Total
174 405 m ³ /año	\$ 5.00/ m ³	\$ 872,025.00 / año.

- Electricidad

Consumo	Costo Unitario	Costo Total
7052 200 kw-hr/año	\$ 3.00/kw - hr	\$ 21,156,600.00/año.

TOTAL DE SERVICIOS AUXILIARES

\$ 23 652 735.00/año.

c) Mano de obra (3)

Consumo	Costo Unitario	Costo Total
1 supervisor/turno	\$ 720,000.00/año sup.	\$ 1,440,000.00/año
6 operadores/turno	\$ 480,000.00/año op.	\$ 5,760,000.00/año
TOTAL DE MANO DE OBRA		<u>\$ 7,200,000.00/año</u>

d) Nómina de costos indirectos (incluye: compensaciones, pensiones, seguros de grupo, vacaciones, previsión social, etc.).

30% de mano de obra \$ 2,160,000.00/año

e) Mantenimiento

2% de la inversión, por año \$ 5,352,000.00/año

f) Insumos de operación

1% de la inversión, por año \$ 2,676,000.00/año

Subtotal de costos directos \$ 936,540,735.00/año

Imprevistos, 5% \$ 46,827,000.00/año

TOTAL DE COSTOS DIRECTOS \$ 983,367,735.00/año

NOTAS:

1. Proporcionado por el Departamento de Estimación y Control de Costos del Instituto Mexicano del Petróleo.
2. Proporcionado por Pinturas Pittsburgh de México.
3. Proporcionado por Ford Motor Company de México.

Costos y gastos indirectos

a) Depreciación de equipo (D)

Método: Lineal.

Costo de adquisición del equipo: \$ 36,712,000.00

Valor de rescate: \$ 3,671,200.00 (10% del costo).

Vida útil del equipo: 10 años.

$$D = (\$36,712,000.00 - \$ 3,671,200.00)/10 \text{ años.}$$

$$D = \underline{\$ 3,304,080.00/\text{año}}$$

b) Impuestos (de propiedad).

$$4\% \text{ de la inversión, por año} = \underline{\$10,703,000.00/\text{año}}$$

c) Intereses

Sobre el 50% de la inversión con una tasa preferencial del 45% anual

$$\underline{\$60,204,000.00/\text{año}}$$

d) Seguros

$$2\% \text{ de inversión, por año} = \underline{\$ 5,352,000.00/\text{año}}$$

e) Overhead

$$50\% \text{ de la mano de obra} = \underline{\$ 3,600,000.00/\text{año}}$$

TOTAL DE COSTOS INDIRECTOS \$83,163,080.00/año

TOTAL DE COSTOS Y GASTOS \$ 1,066,530,815.00/año

Costo Unitario

Base: 105 000 unidades/ año y 95 m²/unidad

\$ 107.00/m² de superficie re
cubierta.

C A P I T U L O . . V I

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Del desarrollo del presente trabajo pueden plantearse las siguientes conclusiones:

- a) El estudio de la corrosión es importante dado que el daño que ocasiona en una gran cantidad de implementos metálicos útiles al hombre es irreversible, generando pérdidas económicas considerables y reducciones en las reservas de recursos naturales no renovables como son los metales. Lo anterior justifica el desarrollo de medidas eficaces para el control de la corrosión.
- b) Existen diversos métodos de protección anticorrosiva, cada uno de los cuales se ha desarrollado y perfeccionado en función de los diferentes ambientes corrosivos que pueden presentarse. Así la forma de protección que más se adecúa a las condiciones de empleo del automóvil es la aplicación de recubrimientos anticorrosivos.
- c) Los recubrimientos anticorrosivos deben formularse de tal manera que al ser aplicados y curados sean capaces de impedir la permeación de humedad, de minimizar la acción destructiva de los rayos ultravioleta y de actuar como inhibidores de la corrosión; todo esto se logra con la mezcla, en proporciones convenientes, de resinas y pigmentos que generen en el recubrimiento las propiedades deseadas.
- d) Existen diversas formas para la aplicación de recubrimientos anticorrosivos.

En la actualidad el espreado es la forma más utilizada en la industria automotriz ya que permite recubrir grandes áreas en tiempos razonables, con un control adecuado del espesor de la película de recubrimiento. Sin embargo, la carrocería del automóvil es una estructura metálica sumamente intrincada en la que existen un número considerable

de sitios que, aun empleando el espreado, no pueden ser cubiertos satisfactoriamente. Esto generó el desarrollo del proceso de electrodepósito como medio de aplicación de recubrimientos anticorrosivos.

Este proceso ofrece como principales ventajas: espesor uniforme de la película depositada, cobertura en zonas de difícil acceso, baja porosidad y alto contenido de sólidos del depósito, y alta utilización del recubrimiento, siendo sus desventajas: alta inversión inicial, costos directos elevados, y limitación en el espesor de la película y en las formulaciones empleadas.

- e) Pueden producirse recubrimientos anticorrosivos (primarios) para aplicación catódica o anódica. Se prefiere el empleo de los llamados primarios catódicos ya que en el proceso de aplicación de los anódicos existe la posibilidad de disolución de la pieza que se recubre, ya que forma el ánodo en el circuito, y de descomposición del recubrimiento recién depositado por la presencia de oxígeno naciente.
- f) El modelo cinético propuesto para el electrodepósito a voltaje constante derivado de la 1a ley de Faraday y la ley de Ohm, se comprueba satisfactoriamente a nivel experimental. Además, los valores obtenidos de conductividad eléctrica de la película y de eficiencia coulombica se aproximan a los valores reportados en la literatura para primarios similares al empleado en el experimento.
- g) Para el diseño de la unidad de aplicación del recubrimiento anticorrosivo sobre carrocerías, vía electrodepósito, resulta importante contar con los criterios de diseño proporcionados por el proveedor del primario, ya que se han derivado de la proyección, construcción, operación y mantenimiento de un número considerable de establecimientos industriales. Puede verse, en el desarrollo del diseño,

que si no se hubiera contado con esta información, algunas determinaciones hubieran requerido de investigación, incluso a nivel experimental.

h) La inversión requerida para el montaje e inicio de operaciones de la unidad es elevada, no por los requerimientos de equipo en el proceso, sino por la cantidad y costo del primario para el llenado inicial de los tanques. Este costo representa al 50% de la inversión y es necesario considerarlo en estimaciones de inversión de plantas similares para no desvirtuar la evaluación.

i) El elevado costo directo debido al primario para reposición de material depositado, justifica el empleo del sistema cerrado de enjuagues el cual minimiza el desperdicio de primario al emplear la porción líquida de éste como medio de enjuague. Como se indicó las carrocerías recién recubiertas arrastran mecánicamente una cantidad considerable de material no depositado que, por la forma en que se especificó y diseñó el sistema cerrado de enjuagues, puede ser retornado al tanque de electrodeposición.

j) Aunque los costos totales anuales son elevados, si se considera la máxima capacidad de la unidad (105,000 automóviles por año) y un costo de venta de \$1,000,000.00/automóvil, el costo de aplicación del recubrimiento anticorrosivo representa aproximadamente el 1% del costo de venta. Esto puede considerarse como un criterio aproximado de rentabilidad de la unidad, la cual, en este caso, representa uno de los pasos a seguir en el proceso de fabricación del automóvil.

En base a las conclusiones planteadas, pueden establecerse las siguientes recomendaciones:

- a) El electrodepósito de recubrimientos anticorrosivos es un procedimiento relativamente nuevo y aunque se conoce su mecanismo y se han desarrollado primarios para aplicación por este medio, existe un gran campo de acción en la formulación de nuevos primarios. Esto se debe principalmente a la gran cantidad de resinas y pigmentos existentes, y es particularmente importante en el caso de México ya que en la actualidad se importa la totalidad de los primarios para aplicación por electrodepósito que se requieren en la industria automotriz y en otras industrias que los emplean.

Por lo anterior se recomienda el estudio detallado de los materiales requeridos en los primarios para aplicación por electrodepósito, así como el desarrollo de formulaciones y procesos adecuados para su fabricación empleando tecnologías y materiales nacionales.

- b) La operación de las unidades de aplicación por electrodepósito del recubrimiento anticorrosivo es sumamente delicada. Se requiere un estricto control de las variables del proceso para garantizar las propiedades terminales de la película depositada. El diseño planteado en este trabajo pretende definir exclusivamente las características básicas del equipo empleado en el proceso, por lo que es necesario que para la proyección, construcción y operación de unidades similares se desarrolle la ingeniería de detalle correspondiente en apego a las recomendaciones de diseño establecidas por el proveedor del primario.

- c) En caso de establecimientos industriales diferentes a los de ensamble automotriz, en los que pueda emplearse el

electrodepósito como medio de aplicación del recubrimiento anticorrosivo, es necesario hacer un cuidadoso análisis de costos; dado el alto valor de venta del automóvil, el costo de aplicación del recubrimiento anticorrosivo resulta proporcionalmente bajo; esta situación puede no ser similar en otro tipo de artículos.

C A P I T U L O V I I

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

7.1 LIBROS.

7.2 REVISTAS.

7.3 REFERENCIAS DIVERSAS.

7.1 LIBROS

- i) Brodgett, Omer W.
Design of Welded Structures.
The James F. Lincoln ARC Welding Foundation.
Cuarta Edición.
1968
- ii) Burns R, M.
Protective Coatings for Metal.
Reinhold Publishing Corporation.
Segunda Edición.
1959.
- iii) Graham, A. Kenneth.
Electroplating Engineering Handbook.
Van Nostrand Reinhold Company.
Tercera Edición.
1971.
- iv) Kaufman, Mervin.
Un Automóvil para las Masas.
Tomo VI Enciclopedia de Historia Universal en sus Mo-
mentos Cruciales.
Ediciones Aguilar.
Segunda Edición.
1972.

-
- v) Martenes, Charles:
Emulsión and Water-Soluble Paints and Coatings.
Reinhold Publishing Corporation.
Primera Edición.
1964.
- vi) Megyesy, F. Eugene.
Pressure Vessel Handbook.
Publishing, Inc.
Cuarta Edición.
1977.
- vii) Myers, Raymond R.
Film-Forming Compositions.
Vol. I.
Parte I.
Marcel Pekker, Inc.
Primera Edición.
1967.
-
- viii) Parker, Dean H.
Tecnología de los Recubrimientos de Superficies.
Tomo VII Enciclopedia de la Química Industrial.
Ediciones Urmo.
Segunda Edición.
1965.
-
- ix) Perry, Robert H.
Chemical Engineer's Handbook.
Mc. Graw Hill.
Quinta Edición.
1973.

- x) Peters, Max S.
Plant Design and Economics for Chemical Engineers.
Mc. Graw - Hill.
Tercera Edición
1980.

- xi) Rose, Howard F.
Project Engineering.
Wiley.
Primera Edición.
1957.

- xii) Shaw, Duncan J.
Introducción a la Química de Superficies y Coloides.
Alhambra.
Segunda Edición.
1977.

- xiii) Shreve, R. Norris.
The Chemical Process Industries.
Mc. Graw Hill.
Segunda Edición.
1956.

- xiv) Uhlig, Herbert H.
Corrosión y Control de Corrosión.
Urno, S. A.
Primera Edición.
1975.

7.2 REVISTAS

- xv) Brewer F. George.
Agitacional Stability of Bath.
Journal of Paint Technology.
Vol. 38, No. 499, Agosto 1966.
- xvi) Brewer F. George.
The Determination of the Throwing Power of Electrophoretic
Coating Compositions.
Journal of Paint Technology.
Vol. 38, No. 499, Agosto 1966.
- xvii) Burnside E. L.
Ford Electrocoating Process.
Journal of Paint Technology.
Vol. 38, No. 493, Febrero 1966.
- xviii) Burnside E. L.
Prediction of Current Requirements.
Journal of Paint Technology.
Vol. 38, No. 493, Febrero 1966.
- xix) Harzbecher, Martin.
Aplicación de Pinturas por Electroforesis.
Revista del Instituto Mexicano de Ingenieros Quimicos.
Mayo 1970.

xx) Pierce, Percy E.
The Physical Chemistry of the Cathodic Electrodeposition
Process.
Journal of Coatings Technology.
Vol. 53, No. 672, Enero 1982.

xxi) Pierce, Percy E.
Cathodic Electrodeposition.
Journal of Coatings Technology.
Vol. 54, No. 688, Mayo 1982.

xxii) Schenck, H. D.
Electrodeposition: Anodic Versus Cathodic.
II Col. Chem. Assoc. 1980, 63, 482 - 491.

7.3 REFERENCIAS DIVERSAS

xxiii) Apuntes del Curso Regional sobre Corrosión, su Prevención y Control.

Instituto Mexicano del Petróleo.

Noviembre de 1982.

xxiv) Espinosa Delgado, Carlos Mario.

Elaboración de un Recubrimiento Epóxico para la Protección de Tanques de Almacenamiento en Ambientes Marinos.

Tesis Profesional.

Facultad de Química.

1979.

xxv) Meza Gómez Palacio, Alejandro.

Pinturas por Electrodeposición de partes de Automotrices.

Tesis Profesional.

Facultad de Química.

1970.

xxvi) Villegas Pacheco, Gerardo.

Estudio Comparativo de algunos Pigmentos Inhibidores de la Corrosión utilizados en Primarios para la Industria Automotriz.

Testis Profesional.

Facultad de Química.

1970.

xxvii) Catálogos de Fabricante.

Spaying Systems, Co.

Tate Elliot, Co.

Gaf.

Graco.

Romicon.