

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y TEXTIL



“ESTUDIO DEL ALÓE VERA COMO INHIBIDOR DE  
DECAPADO”

## TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTADO POR:

FELICITA LISET MORENO SANDOVAL  
FERNANDO PERCY SILVA PAUCAR

LIMA – PERÚ

2011

**Digitalizado por:**

Consortio Digital del  
Conocimiento MebLatam,  
Hemisferio y Dalse

**ESTUDIO DEL ALÓE VERA COMO INHIBIDOR DE  
DECAPADO**

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a Dios mi padre por su infinito amor, por ser quien ha estado a mi lado en todo momento dándome las palabras necesarias para continuar esforzándome día tras día, y porque siempre estará conmigo.

## **AGRADECIMIENTO**

### **FELICITA LISET MORENO SANDOVAL**

Agradezco a la persona mas importante en mi vida, a Dios, mi padre Celestial, *quien me ha dado la vida, fortaleza y sabiduría para terminar esta tesis, gracias a El soy lo que soy.*

Agradezco a mis padres, por su apoyo incondicional en todo este tiempo y por su paciencia son la bendición mas grande de Dios, y a mis hermanos que son un ejemplo para mi, gracias porque se que siempre puedo contar con ustedes.

Un agradecimiento especial a nuestro asesor Ingeniero Pedro Pizarro Solís por su dirección y apoyo constante que han permitido lograr los objetivos que se trazaron para la realización del presente trabajo, así como al Ingeniero Abel Vergara Sotomayor y Karín Maria Paucar Cuba que estuvieron siempre dispuestos a ayudarnos y a contribuir con este logro.

## **AGRADECIMIENTO**

### **FERNANDO PERCY SILVA PAUCAR**

En primer lugar quiero agradecer a Dios por bendecirme para llegar hasta donde he llegado. Agradezco mi madre que se encuentra a lado de Dios, que me ha enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la voluntad ni desfallecer en el intento. Me ha dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con un gran amor y sin pedir nunca nada a cambio. Agradezco también a mi padre, hermano y a toda mi familia por brindarme todo su comprensión y apoyo.

Deseo expresar mi especial agradecimiento al Ingeniero Pedro Pizarro Solís de la Facultad de Química y Textil de la Universidad Nacional de Ingeniería, Profesor asesor de esta tesis quien dedicó una parte importante de su tiempo para guiarme durante el desarrollo del presente trabajo.

Finalmente quiero agradecer a todas aquellas personas que de alguna manera hicieron posible la terminación de este trabajo de tesis y que no las mencione, gracias a todos.

## RESUMEN

Los inhibidores usados actualmente en la industria involucran no solo un alto costo sino además pueden causar efectos adversos en la salud y el medio ambiente, presentamos como nueva alternativa ecológica aceptable, disponible y económica el empleo del Alóe Vera como inhibidor de corrosión en ácido clorhídrico acuoso. Esta planta permitiría evitar el uso de productos químicos volátiles y cancerígenos utilizados actualmente para inhibir la corrosión en ambientes industriales.

En este trabajo se reportan los resultados obtenidos de la evaluación del Alóe Vera como inhibidor de decapado, utilizando el método gravimétrico y por medio de técnicas electroquímicas de curvas de polarización, método de resistencia de polarización y de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE). Las pruebas se realizaron utilizando placas de acero en una solución de 3 %, 7 % y 10 % de ácido clorhídrico, en presencia del inhibidor de Alóe Vera evaluado a 4 concentraciones diferentes 5 %, 15 %, 25 % y 40 %, para determinar si tiene propiedades inhibidoras de la corrosión en medio ácido, los resultados obtenidos fueron comparados con otros inhibidores comerciales utilizados en la industria de decapado. Se encontró que la máxima eficiencia como inhibidor fue de aproximadamente 64 % lo cual se obtuvo con una concentración de 40 % de Alóe Vera en una solución de 3 % ácido clorhídrico acuoso, quedando demostrado que es capaz de alterar las propiedades de la interfase metal medio agresivo para conferir un grado de protección a la capa base luego de eliminar los productos de corrosión de la superficie del acero, asimismo, de las pruebas electroquímicas se determinó que la velocidad de corrosión disminuye con la adición del inhibidor y al modificar las densidades de corriente tanto en la rama catódica como anódica de las curvas de polarización se puede clasificar al Alóe Vera como inhibidor de decapado de tipo mixto.

## INDICE DE TESIS

	<b>Pag.</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
INTRODUCCIÓN.	
1.1 Justificación e importancia	3
<b>CAPITULO II</b>	
CONTEXTO HISTORICO.	
2.1 Inhibidores de corrosión	4
2.1.1 Clasificación de los inhibidores	5
2.1.2 Mecanismo de acción	7
2.2 Inhibidores de decapado.	
2.2.1 Tipos de inhibidores de decapado	14
2.2.2 Mecanismo de acción en medio ácido	16
2.2.3 Rendimiento	22
2.2.4 Inhibidores de decapado conocidos	23
2.2.5 Inhibidores de decapado comerciales	29
2.3 Decapado.	
2.3.1 Aplicación industrial del decapado químico	36
2.3.2 Estadística de consumo	45
2.4 Alóe Vera.	
2.4.1 Descripción general del Alóe Vera	47
2.4.2 Métodos de extracción del Alóe Vera	50
2.4.3 Métodos de obtención del polvo de Alóe Vera	54

## CAPÍTULO III

### DESARROLLO EXPERIMENTAL.

3.1 Obtención del producto.	
3.1.1 Obtención del gel de Alóe Vera	56
3.1.2 Obtención del polvo de Alóe Vera	58
A Factores que influyen en la conservación del gel de Alóe Vera	58
B Selección del método de obtención del polvo de Alóe Vera	58
C Proceso de deshidratación a nivel laboratorio (equipo de secado por atomización)	59
D Resultados	60
3.1.3 Ventajas y desventajas de los productos gel de Alóe Vera y polvo de Alóe Vera	63
3.1.4 Conclusiones	63
3.2 Evaluación del Alóe Vera como inhibidor de decapado.	
3.2.1 Diseño experimental: aplicación del método ortogonal para establecer el conjunto de experimentos	64
3.2.2 Determinación de las principales variables que influyen en el proceso de decapado	75
3.2.3 Experimentos para establecer la calidad del inhibidor.	
A Ensayos experimentales:	
A.1 Método gravimétrico	79
A.2 Método electroquímico	92
A.3 Método de impedancia electroquímica	97
3.2.4 Discusión de resultados	102

<b>CAPÍTULO IV</b>	
EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL ALÓE VERA COMO INHIBIDOR	107
<b>CAPÍTULO V</b>	
CONCLUSIONES	115
<b>CAPÍTULO VI</b>	
RECOMENDACIONES	116
<b>CAPÍTULO VII</b>	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
APÉNDICE A	118
APÉNDICE B	120

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

El control de la corrosión puede lograrse por varios métodos. Sin embargo, la aplicación de inhibidores es una de las alternativas más efectivas y utilizadas para la protección de las superficies metálicas contra la corrosión en la industria. Este trabajo está dirigido al estudio de un proceso eficaz de limpieza de materiales en la industria en medio ácido; un proceso controlado por medio del uso del Alóe Vera como inhibidor de la corrosión, disminuyendo la agresividad del medio ácido sobre el material; reduciendo así, la probabilidad de que la capa base sea atacada luego de limpiar el material o reduciendo la velocidad del ataque.

Se propone realizar diferentes metodologías de evaluación del Alóe Vera para su extracción, caracterización composición química y sus propiedades.

Para establecer el conjunto de experimentos, que se realizarán para el proceso de decapado ácido metálico, aplicaremos el método ortogonal, lo que nos permitirá determinar cómo influyen las principales variables en el proceso de decapado; la concentración del Alóe Vera, la concentración del  $HCl$ , el tiempo de decapado, encontrando así las condiciones apropiadas del proceso.

El Alóe Vera, fue evaluado como inhibidor de la corrosión del acero en una solución de  $HCl$  a diferentes concentraciones 3 %, 7 % y 10 %, por técnicas gravimétricas a concentraciones que varían de 5 % hasta 40 % de Alóe Vera.

Los resultados gravimétricos mostraron que la eficiencia del gel Alóe Vera para prevenir la corrosión del acero en  $HCl$  es función de su concentración.

Viendo la necesidad de conservar el producto, se optó por convertir el gel de Alóe Vera en polvo, utilizando el equipo de secado por atomización, indicando sus ventajas, desventajas y aplicación a nivel industrial.

Se evaluó el Alóe Vera como inhibidor de la corrosión por métodos electroquímicos; las curvas de polarización, indicaron que los compuestos bloquean las áreas activas de las reacciones anódicas y catódicas de la superficie del metal, actuando como inhibidor de tipo mixto, debido a los

cambios en los valores de las constantes de Tafel en presencia de inhibidor, así como por el desplazamiento del potencial de corrosión.

Se presenta un detallado, análisis comparativo de la eficiencia del polvo de Alóe Vera con inhibidores comerciales, utilizados en la industria de decapado, como son Urotropina, Kleen AC 9504 y Tenso Quat CI 44, para eliminar los productos de corrosión y capa de laminación de la superficie del metal.

A lo largo del trabajo y tras una etapa previa dirigida a la evaluación de la viabilidad técnica del inhibidor, se hará una evaluación económica del uso del Alóe Vera como inhibidor en medio ácido con la finalidad de hacer más atractiva su aplicación.

## 1.1 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad para procesos de limpieza de materiales en la industria se usan ácidos, y para el control de la corrosión en este medio, se usan diferentes inhibidores, que en el proceso al reaccionar con el ácido generan productos secundarios como el éter clorometil y éter biclorometil, muchos de ellos volátiles y cancerígenos; por lo que buscamos reemplazar, el uso de estos inhibidores por inhibidores ecológicamente aceptables en el proceso; una de las alternativas mas aceptables y tema de nuestro estudio, es el uso del gel Alóe Vera como inhibidor de la corrosión, una planta natural que empleada como inhibidor, no produce efectos secundarios perjudiciales para la salud ni el medio ambiente.

## CAPÍTULO II CONTEXTO HISTÓRICO

### 2.1 INHIBIDORES DE CORROSIÓN

Un inhibidor de corrosión es una sustancia que añadida a un determinado medio, reduce de manera significativa la velocidad de corrosión. Las sustancias utilizadas dependen tanto del metal a proteger como del medio en el que se encuentran; un inhibidor que funciona bien en un determinado sistema puede incluso acelerar la corrosión en otro sistema. Los inhibidores de corrosión, son productos que actúan ya sea formando películas sobre la superficie metálica, tales como los molibdatos o fosfatos, o bien entregando sus electrones al medio. Por lo general los inhibidores de este tipo son azoles modificados que actúan sinérgicamente con otros inhibidores tales como nitritos, fosfatos y silicatos. Es decir, la inhibición que resulta de la adición de dos o más inhibidores es más efectiva que la suma de los efectos protectores de cada compuesto actuando de forma individual.

Cuando se trabaja en ambiente cerrado (por ejemplo, un circuito cerrado de agua), se pueden dominar los parámetros que influyen en la corrosión; composición química (particularmente la acidez), temperatura, presión y se pueden agregar inhibidores de corrosión; sin embargo, este tipo de solución es inaplicable cuando se trabaja en medio abierto (atmósfera, mar, cuenca en contacto con el medio natural, circuito abierto, etc.).

Es también conveniente mencionar que un inhibidor de corrosión deberá especificarse sobre que tipo de corrosión va a inhibir dada la gran diversidad de tipos y formas de corrosión dependiendo principalmente de las condiciones del medio donde se está llevando a cabo.

En un medio corrosivo un inhibidor pueden actuar de las siguientes maneras:

- a) Adsorción de una película delgada sobre la superficie del metal.
- b) Formación de una capa pasivante, a veces de naturaleza desconocida y tan delgada que resulta inapreciable.
- c) Formación, por conversión, de una capa de productos de corrosión

apreciable a simple vista.

- d) Modificación de las características corrosivas del medio, por formación de precipitados protectores que lo separan del metal, o bien eliminando o desactivando el constituyente corrosivo del mismo.

La eficiencia de un inhibidor esta en función de la capacidad de alcanzar la superficie metálica; la velocidad de transferencia de sus moléculas, la distancia entre la fuente del inhibidor y el metal a proteger y la geometría del metal a proteger.

Los principales factores que deben tomarse en cuenta para la elección de un inhibidor son los siguientes:

- La naturaleza del metal.
- La naturaleza y composición del medio.
- El ambiente global en el que se encuentra el metal, principalmente los materiales que formarán el circuito eléctrico de corrosión y aún los que no están en contacto con el metal.
- El diseño de la instalación y sus condiciones de uso.
- La temperatura y su variación en función del tiempo.
- La acción del inhibidor sobre todos los materiales que constituyen la instalación.
- El costo de protección comparado con el costo de la corrosión.

### **2.1.1 CLASIFICACIÓN DE LOS INHIBIDORES.**

En la actualidad existe un número muy amplio de sustancias capaces de actuar como inhibidor, inicialmente solían ser sustancias químicas naturales luego se comprobaron que varios grupos funcionales de la química orgánica poseían propiedades inhibidoras y dado que es frecuente que exista una relación entre la estructura y las características inhibidoras, es posible recurrir a la utilización de productos químicos sintéticos.

Los inhibidores de corrosión se pueden clasificar según diversos criterios; el cuadro 2.1, nos muestra algunas clasificaciones:

**Cuadro 2.1** Clasificación de los inhibidores de corrosión

Por su composición	Por su mecanismo	Por su aplicación	Por el proceso parcial que interfieren
Aniones inorgánicos: $CrO_4^-$ , $NO_2^-$	Inhibidores interfase	Inhibidores de la corrosión atmosférica (V, P, I inhibidores en fase vapor).	Inhibidores anódicos
Cationes inorgánicos: $Sb^{3+}$ , $Zn^{2+}$ , $Ca^{2+}$	Inhibidores de membrana	Inhibidores de la corrosión para soluciones acuosas	Inhibidores catódicos
Moléculas inorgánicas: $Na_2SO_3$ , $FeSO_4$	Inhibidores de capa difusa	Inhibidores de decapado	Inhibidores mixtos
Moléculas orgánicas: Aminas, alcoholes acetilénicos, mercaptanos, benzotriazol	Inhibidores pasivantes	Inhibidores para soluciones alcalinas	
	Neutralizadores		
	Captadores de oxígeno	Inhibidores para medios no acuosos	
	Muchos incluyen aquí anódicos, catódicos y mixtos		

### 2.1.2 MECANISMO DE ACCIÓN

El principal mecanismo de inhibición de la corrosión es la formación de complejos entre el inhibidor y el metal base, razón por la cual la mayoría de los inhibidores presentan átomos de los grupos VA y VIA con pares de electrones libres. Las sustancias inhibidoras activas son generalmente compuestos nitrogenados, alcoholes acetilénicos y compuestos sulfurados. Los compuestos superficiales activos pueden pertenecer al grupo de sustancias aniónicas, como por ejemplo alquil o alquilfenilsulfonatos o alquilsulfatos con  $C_{10} - C_{18}$  cadenas alquílicas, o de grupos no iónicos como son los derivados etoxilados o alcoholes superiores, fenoles o alquilfenoles. Así por ejemplo existe un alto número de publicaciones sobre el empleo de productos orgánicos con grupos nitrógeno dadores como inhibidores de la corrosión.

Entre las familias de compuestos nitrógeno dadores, una de las más importantes por su aplicación industrial es el de las aminas, como por ejemplo: dodecilamina, dietanolamina, 3 -amino- 1 - propanol, 2 dimetiletamina, cicloxilamina.

Otro grupo importante de compuestos nitrógeno dadores son los azoles, como por ejemplo imidazolinas, imidazoles o triazoles (benzotriazol, bitriazol, aminotriazol) y las piperidonas. Según su mecanismo se clasifican:

#### A.- Inhibidores de interfase

Son aquellos que forman una capa monomolecular por adsorción sobre la superficie metálica, es el caso de numerosos compuestos orgánicos como las aminas.

La química orgánica constituye la fuente de la mayoría de estos inhibidores empleados; casi todos ellos son compuestos con al menos una función polar con átomos de nitrógeno, azufre, oxígeno y en algunos casos selenio o fósforo. La función polar se considera como el centro de reacción para los procesos de quimisorción, por ello la fuerza del enlace resulta determinada por la densidad de electrones del átomo que actúa como centro de la reacción y la polarizabilidad de la función.

La eficiencia con respecto al proceso de adsorción cuando las estabildades de los compuestos son iguales, varía dependiendo de la naturaleza del átomo del grupo funcional:

Selenio > Azufre > Nitrógeno > Oxígeno.

También pueden actuar selectivamente cubriendo únicamente zonas catódicas o anódicas, es decir se adsorben en las zonas activas de la superficie del metal.

En el caso de los compuestos disociados en solución también se adsorben en forma iónica.

El fenómeno de adsorción, ocurre cuando un inhibidor de corrosión se agrega al sistema y se desarrolla en la interface metal-solución, cambiando la composición y estructura de la doble capa electroquímica. Cuando una molécula orgánica se aproxima a la interfase metal-electrolito y se adsorbe en la superficie metálica, un número de moléculas de agua inicialmente adsorbidas en el mismo lugar serán desplazadas.

La adsorción de un inhibidor en el metal se lleva a cabo porque la energía de interacción entre el metal y el inhibidor se ve más favorecida que la energía entre el metal y las moléculas de agua.

Por la naturaleza del enlace entre las moléculas unidas a la superficie la adsorción puede llevarse a cabo de dos maneras: adsorción física o electrostática y quimisorción. Estos dos tipos de adsorción son influenciados por la naturaleza y la carga de metal, la estructura química del producto orgánico, y el tipo de electrólito. La primera se debe a una atracción electrostática entre los iones o dipolos formados del inhibidor y la superficie metálica cargada eléctricamente.

Las fuerzas electrostáticas aquí son muy débiles por lo que son fácilmente removidas (desorbidas), además su energía de adsorción ( $-G_{ads}$ ) es baja y relativamente independiente de la temperatura. En cambio, el proceso de quimisorción se lleva a cabo con mayor lentitud que el de la adsorción física y se logran valores altos en la energía de adsorción; la quimisorción es un fenómeno irreversible y específico para cada metal. La diferencia fundamental entre ambos es que en el caso de la fisorción la molécula de inhibidor adsorbida (fisorbida) conserva su naturaleza química, mientras que en la quimisorción la molécula adsorbida (quimisorbida) forma enlaces de coordinación.

### B.- Inhibidores de membrana.

Son aquellos en los cuales, el recubrimiento de la superficie por el inhibidor no se limita a una capa monomolecular sino que se desarrolla en espesor para formar una capa polimolecular de moléculas adsorbidas, o un verdadero compuesto por reacción entre el inhibidor y los iones metálicos. Son los inhibidores que producen capas de conversión superficial.

### C.- Inhibidores de capa difusa.

Son aquellos inhibidores que depositan una capa protectora sobre el metal, a partir de una reacción que se desarrolla a cierta distancia del electrodo, en la capa líquida de difusión, es el caso de la precipitación de los hidróxidos solubles como por ejemplo:  $Ca(OH)_2$ .

### D.- Inhibidores pasivantes.

Se encuentran aquellos inhibidores que actúan formando una capa protectora de óxido sobre la superficie metálica o complementando la que ya existe naturalmente. Se considera como inhibidor pasivante a los inhibidores anódicos, estos inhibidores se encuentran entre los más eficaces y por consiguiente los más usados; pero se debe dosificar en concentraciones suficientes para promover una reacción catódica suficientemente activa en todos los lugares de la superficie metálica para que supere la  $i_{cp}$  y quede asegurada la estabilidad del estado pasivo y no se produzcan fenómenos de corrosión localizada por picadura; con adiciones insuficientes de inhibidor puede presentarse una pasividad inestable con riesgo de corrosión por picadura o un ataque en estado pasivo, tienden a oponerse a la reacción anódica, dando lugar a la formación de una capa pasiva.



La capa pasiva que forman estos productos sobre el metal puede ser un óxido, fosfato, silicato, etc. de acuerdo con la naturaleza del inhibidor y de las condiciones termodinámicas que hacen que se formen, en cada caso, el compuesto químico más estable.

Estas capas pasivas son perturbadas cuando coexisten algunas sales como los cloruros y sulfatos que sobrepasando un cierto umbral, impiden la total

pasivación del material metálico, formando picaduras en aquellos puntos que no se consiguió la pasivación del metal.

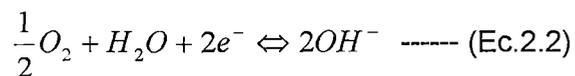
La inhibición anódica se caracteriza por el incremento de la polarización anódica, que provoca a su vez un aumento del potencial. La acción de los inhibidores pasivadores así como sus peligros, los podemos ver mejor en el diagrama de Evans.

Existen dos tipos de inhibidores pasivantes:

- I. Inhibidores pasivantes oxidantes
- II. Inhibidores pasivantes no oxidantes.

- I. Los inhibidores pasivantes oxidantes son aquellos, que contienen aniones oxidantes, que pueden pasivar el acero en ausencia de oxígeno, tales como el cromato ( $CrO_4^-$ ), el nitrito ( $NO_2^-$ ) y el nitrato ( $NO_3^-$ ), que reaccionan con la superficie del metal incorporándose a la película pasiva, con la finalidad de: reforzarla, completarla, repararla y prevenir la adsorción de cloro. El problema de estos inhibidores es que son muy tóxicos y contaminantes.

Los inhibidores anódicos, oxidantes pueden detener la reacción anódica del proceso de corrosión y favorecer la reacción catódica, precisamente por aportar el oxígeno necesario para dicho proceso:



La acción podrá ser muy distinta según prevalezca el inhibidor anódico o la activación catódica.

A concentraciones bajas pueden por una parte no bloquear todos los puntos anódicos del metal y por otra favorecer la reacción catódica; con lo cual y a pesar de que el ataque global se haya reducido se dará lugar a una intensa corrosión localizada.

La pasivación del acero se produce por una combinación de adsorción y formación de óxido sobre la superficie del acero. La adsorción ayuda a elevar el potencial hasta que se pueda formar una película delgada de

óxido férrico hidratado. En caso del cromato, la película de óxido es una mezcla de óxido férrico y óxido crómico.

Los cromatos a bajas concentraciones son aceleradores de la corrosión, ya que son buenos despolarizadores catódicos, por otro lado la película de óxido pasiva es conductora y catódica al acero; esto significa que cuando la película sufre un raspado o disolución se crea un área anódica muy pequeña en un cátodo grande originando una fuerte corrosión localizada.

Mecanismos similares se cree que se aplican a los nitritos y nitratos.

No es práctico pasivar el acero en soluciones acuosas que contengan:

- a. Sustancias fácilmente oxidables (por ejemplo sulfuro de hidrógeno), ya que se malgasta el inhibidor oxidando el  $H_2S$  a azufre libre.
- b. Altas concentraciones de cloruros. Ya que estos compiten con los cromatos en la adsorción (disminuyendo la polarización en los ánodos) y además evita la formación de óxidos protectores por formación de un complejo con el hierro que es soluble.

La concentración del inhibidor tiene que mantenerse por encima de un valor crítico, que viene condicionado por factores como: temperatura, pH y presencia de aquellas sales que tienden a perturbar la estabilidad de la capa pasiva.

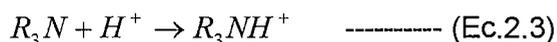
- II. Inhibidores Pasivadores no oxidantes; son aquellos que requieren la presencia de oxígeno para pasivar el acero y que contienen aniones tales como el fosfato, el tungstato y el molibdato. Los inhibidores pasivadores no oxidantes tales como el benzoato, polifosfato y el cinamato de sodio, no inhiben la corrosión en ausencia de oxígeno, ellos parecen actuar promoviendo la adsorción de oxígeno en los ánodos, que es la especie que hace que la aleación se pasive, causando la polarización hasta la región pasiva. Mediante su acción tiene lugar la formación de una película sobre la superficie del metal. Son eficaces en un rango de concentración determinado. Por encima o por debajo de dicha concentración pueden provocar que la aleación se corra por picaduras, solo son eficaces en disoluciones aireadas.

Las sales inorgánicas alcalinas como NaOH, Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub>. y compuestos orgánicos: Benzoatos, cinamato sódico, son menos eficaces que los oxidantes, pero no presentan el riesgo de provocar corrosión por picaduras.

#### E.- Inhibidores neutralizadores.

Se definen conjuntamente como desactivadores o desestimuladores por que modifican el medio reduciendo su agresividad. Los neutralizadores se emplean en medios débilmente ácidos, en los que la reacción catódica principal es la reducción de protones, debido a una desaireación más o menos completa como sucede con las aguas de calderas.

Se suelen emplear morfina, la ciclohexalamina y el amoniaco entre otras sustancias. El mecanismo de actuación de estos productos tiene lugar de acuerdo con la ecuación general:



R: representa un radical o protón.

El resultado es la aparición de bases débiles que no provocan altas concentraciones de OH<sup>-</sup>.

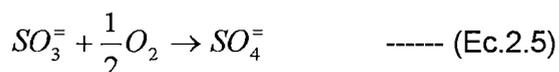
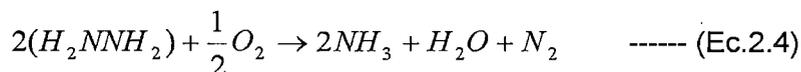
#### F.- Captadores de oxígeno.

Los captadores de oxígeno o secuestrantes, se utilizan mucho como complementos de una desaireación térmica o mecánica; también en las instalaciones generadoras de vapor; donde se intenta eliminar la corrosión a través de la anulación del proceso parcial catódico, es por esto que se les considera como inhibidores catódicos.

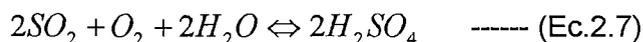
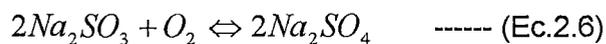
El mecanismo de actuación de estas sustancias se basa en una simple reacción química con el oxígeno, de forma que éste pase a formar parte de un producto no corrosivo o se convierta en agua. Los secuestrantes de oxígeno ayudan a inhibir la corrosión impidiendo la despolarización catódica causada por el oxígeno.

Los inhibidores más comunes de este tipo son la hidracina, los sulfitos. A altas temperaturas hidrazina es usado para secuestrar el oxígeno. Se utiliza por ejemplo:

La hidrazina en los calderos de alta presión; actúan de acuerdo con las siguientes reacciones:



El secuestrante de oxígeno más comúnmente utilizado a temperatura ambiente son el sulfito sódico ( $Na_2SO_3$ ), y el dióxido de azufre ( $SO_2$ ):



## 2.2 INHIBIDORES DE DECAPADO

El uso de inhibidores es uno de los métodos más prácticos de protección contra la corrosión, especialmente en medio ácido. Las soluciones ácidas son utilizadas en muchas ocasiones para eliminar incrustaciones y suciedad en distintos procesos industriales; los inhibidores se utilizan en estos procesos para evitar la disolución del metal. Muchos de los inhibidores en medio ácido más conocidos son compuestos orgánicos que contienen nitrógeno, azufre y/u oxígeno.

La influencia de estos compuestos orgánicos, como algunas aminas y compuestos heterocíclicos, en la corrosión del acero en disoluciones ácidas, han sido extensamente estudiadas.

## 2.2.1 TIPOS DE INHIBIDORES DE DECAPADO.

Composición Elemental	Composición	Aplicaciones
C,H,O	Aldehídos(furfural)	Ácidos y H <sub>2</sub> S Al en <i>HCl</i>
	Alcohol acetilénicos y alcoholes alénicos	Varios ácidos y metales
	Ácidos orgánicos	Acero en <i>HCl</i>
	Sales de prilo	Fe y Ni en <i>HCl</i>
	Polímeros olefínicos	Fe en <i>HCl</i>
C,H,N	Quinoleína, piridinas	Ácidos y H <sub>2</sub> S, Al en <i>HCl</i>
	Polimetilenimas	varios ácidos y metales
	lonos onio	Acero en <i>HCl</i>
	Aminas alifáticas	Fe y Ni en <i>HCl</i>
	Anilinas	Fe en <i>HCl</i>
	Anillos nitrogenados, saturados y parcialmente saturados con piperidina, pirrolidina y pirimidina	Acero en varios ácidos
	Productos de condensación aldehído - amina	Acero medio en ácido clorhídrico
	Aminas cianoetiladas	Fe en H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
	Polímeros vinilpiridina	Fe en <i>HCl</i>
	Estearilamina	Fe en ácidos
Propargilbencilamina	Fe en <i>HCl</i>	
C,H,S	Sulfuros orgánicos	Fe en H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
	Compuestos sulfonados	Fe en varios ácidos
C,H,S,O	Dibenil sulfóxido	Fe en ácidos
	Xantatos	Fe en ácidos
	Aril y aquil sulfóxidos	Fe en ácidos
	Ácidos sulfónicos	Fe en ácidos

Sigue

Viene

Composición Elemental	Composición	Aplicaciones
C,H,N,O	Derivados aminofenólicos Aductos de abietilamina	<i>HCl</i> Varios ácidos
	óxido de etileno Quinolinoles	Fe en <i>HCl</i>
	N – 2 - propinilmorfolina	Fe en ácidos
	Polímeros de la 4 - hidroxi – piperidina	Fe en ácidos
	Cetoaminas cíclicas y heterocíclicas	Fe en ácidos
	C,H,S,N,O	Tiazoles, tiazinas y aductos de tioúreas y óxidos de propileno
Xantato de dodecilpiridina		Fe en <i>HCl</i> y ácido cítrico
Tiomorfolina, fenotiazina y derivados		Fe en <i>HCl</i>
Imidazolinias sulfonadas, sulfoximinas		Fe en H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> / Fe en <i>HCl</i>
Compuestos orgánicos de fósforo	Compuestos orgánicos de fósforo	Fe en <i>HCl</i>
	Ácidos orgánicos	Al en <i>HCl</i>
Compuestos orgánicos de P y Se	O,O,O – triethylselenofosfato	Fe en <i>HCl</i>
Haluros Orgánicos	Aminas cloradas Aromáticos halogenados	Fe en ácidos Fe en ácidos

### 2.2.2 MECANISMO DE ACCIÓN EN MEDIO ÁCIDO

La corrosión de metales en soluciones ácidas puede estar inhibida por una gran variedad de sustancias, los inhibidores más utilizados son de naturaleza orgánica, especialmente aquellas sustancias que tienen en su molécula elementos de los grupos VA y VIA (N, P, O, S) sobretodo azufre y nitrógeno. Se tiene la tiourea, quinoleína, urotropina tan empleada con ácido clorhídrico; aminas aromáticas y sales de amonio cuaternaria, la presencia de enlaces triples tiene también efectos favorables obteniéndose buenos resultados con los alcoholes acetilénicos.

También son eficaces las sales inorgánicas de arsénico y antimonio, metales que se adsorben en forma iónica y retardan especialmente el desprendimiento de hidrógeno sobre el cátodo, actuando como venenos de la recombinación de protones a hidrógeno molecular ( $H_2$ ), en consecuencia estos compuestos son muy eficaces en soluciones ácidas, pero inútiles en otros medios donde el proceso catódico lo constituyen otras reacciones, como la reducción del oxígeno disuelto.

El primer paso de acción de los inhibidores en soluciones ácidas es generalmente adsorción encima de la superficie de metal, lo cual es usualmente libre de óxido en soluciones ácidas. El inhibidor adsorbido entonces actúa como un retardador del proceso de corrosión electroquímica sea catódico y/o anódico.

#### A.- Adsorción de los inhibidores de corrosión sobre metales

La eficiencia de la inhibición es usualmente proporcional a la fracción de área cubierta con el inhibidor. A veces, con un área de cubierta pequeña ( $\theta < 0,1$ ), la efectividad de la adsorción es retardada por las reacciones de corrosión presentes sobre la gran parte de superficie cubierta. La adsorción de los inhibidores en la superficie de un metal es influenciado por los siguientes factores:

##### A.1. Superficie de carga sobre el metal.

La adsorción puede deberse a la interacción entre las fuerzas electrostáticas entre las cargas iónicas o dipolos presentes en las especies adsorbidas y las cargas eléctricas en la interfase metal/solución. En la solución, la carga sobre el metal puede ser expresado por su potencial con respecto al potencial de carga cero ( $E_0$ ).

Cuando el potencial de corrosión de este metal tiene más bajo valor que  $E_0$ , la adsorción de los cationes se ve favorecido. Los aniones son cómodamente adsorbidos cuando el potencial de corrosión del metal está en la región de potencial positivo en relación a  $E_0$ . El potencial de corrosión controla las interacciones electrostáticas del metal con los dipolos de las moléculas adsorbidas, así como la orientación de los dipolos y las moléculas adsorbidas, para diferentes metales con el mismo potencial, las interacciones electrostáticas deben ser independientes de la naturaleza del metal.

#### A.2. El grupo funcional y la estructura del inhibidor.

Los inhibidores también pueden adherirse a superficies del metal por la transferencia de electrones para formar un enlace con el metal de tipo coordinado. Este proceso es favorecido por la presencia en el metal de vacancia de electrones de orbitales de baja energía, algo semejante como ocurre en los metales de transición. En compuestos orgánicos el par de electrones para formar el enlace coordinado, se presenta en los elementos del grupo V y VI de la Tabla Periódica, la tendencia de formar mas fuerte el enlace aumenta conforme decrece su electronegatividad  $O < N < S < Se$ , así como de la naturaleza del grupo funcional que contiene este elemento.

#### A.3. Interacción del inhibidor con moléculas de agua

La adsorción de moléculas del inhibidor es a menudo una reacción de desplazamiento implicando extracción de moléculas adsorbidas de agua de la superficie. Durante la adsorción de una molécula, el cambio en la energía de interacción con moléculas de agua ocurre desde lo disuelto, para que la condición adsorbida forme una parte importante del cambio libre de energía en la adsorción. Esto es, un incremento en la energía de solvatación de las especies que adsorbe, la cual aumenta al aumentar el tamaño de la cadena del hidrocarburo de una molécula orgánica.

Así el aumento de tamaño conduce a la disminución de la solubilidad y aun aumento del poder adsorbente, observándose un incremento en la eficiencia de la inhibición a concentración constante conforme aumenta el tamaño de la molécula.

#### A.4. Interacción sobre la adsorción de especies inhibidoras

La información de la adsorción del inhibidor, deriva de las medidas directas y de la eficiencia inhibidora considerada en conjunto como el conocimiento general de

adsorción en solución, las interacciones laterales pueden ser atractivas o repulsivas, las interacciones atractivas se dan entre moléculas que contienen largas cadenas de hidrocarburo (cadenas N-alkyl). Como el largo de la cadena aumenta, la fuerza atractiva Van der Waals es creciente entre moléculas adyacentes, lo que conduce a la adsorción más fuerte. Interacciones repulsivas ocurren entre iones o moléculas que contienen dipolos.

#### A.5. Reacción de la adsorción de inhibidores.

En algunos casos, la adsorción del inhibidor de corrosión puede reaccionar, usualmente por reducción electroquímica, para formar un producto que debe también ser inhibido. La inhibición debido a la sustancia añadida ha sido llamada inhibición primaria, y debido al producto de reacción, inhibición secundaria.

En tales casos la eficiencia de inhibición puede aumentar o decrecer con el tiempo si la inhibición secundaria es más o menos efectiva que la inhibición primaria. Un ejemplo de inhibidores que dan inhibición secundaria es la tioúrea que puede ser reducido para producir iones  $\text{HS}^-$ , el cual actúa como estimulador de la corrosión.

#### B.- Efecto de los inhibidores sobre los procesos de corrosión.

En soluciones ácidas los procesos de corrosión son el paso de los iones del metal desde el óxido a la superficie libre del metal dentro de la solución y el principal proceso catódico es la descarga de iones hidrógeno para producir hidrógeno gaseoso. Dentro de soluciones ácidas con aire saturado, la reducción catódica de oxígeno disuelto también ocurre, pero para aceros el ratio (la velocidad) no es significativo comparado con la velocidad para la descarga del ión hidrógeno hasta un pH que excede el valor de 3.

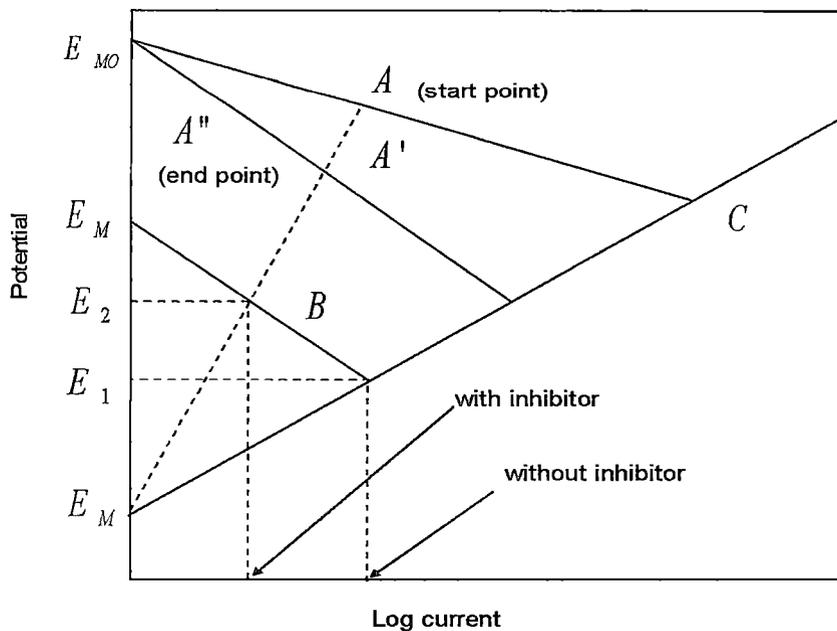
Un inhibidor puede decrecer la velocidad de un proceso anódico, el proceso catódico o ambos procesos. Estudios electroquímicos, muestran que los inhibidores en soluciones ácidas pueden afectar las reacciones de corrosión de metales en las siguientes formas:

##### B.1. Formación de una barrera de difusión

El inhibidor adsorbido puede formar una película en la superficie actuando como una barrera física para restringir la difusión de iones o moléculas para o del metal pulido y así también inhibe las reacciones de corrosión. Este efecto ocurre

particularmente cuando las especies del inhibidor son moléculas grandes (proteínas, gelatina como agar agar, los polisacáridos, como dextrina).

Las películas de la superficie de estos tipos de inhibidores dan lugar a la polarización de resistencia y también a la polarización de concentración afectando ambas reacciones anódicas y catódicas.



**Figura 2.1** El efecto de un inhibidor anódico sobre la disolución en el ratio de acero y óxido de acero.

### B.2. Bloqueo en los sitios de reacción.

El simple bloqueo decrece el número de átomos de metal en la superficie como también las reacciones que puedan ocurrir. Los mecanismos de las reacciones no son afectadas y las pendientes de Tafel de las curvas de polarización permanecen sin cambios. El proceso de disolución anódica de iones de metales ocurre por pasos o dislocaciones emergentes en la superficie del metal, donde los átomos del metal no están firmemente sujetos a la superficie del metal. Esto favorece los sitios ocupados en una menor proporción relativa a la superficie del metal.

### B.3. Participación en las reacciones del electrodo.

Las reacciones de corrosión a menudo implican la formación de intermedios metálicos adsorbidos con átomos de metal en la superficie. En estos procesos el

inhibidor actúa sin ser modificado, su participación es generalmente caracterizado por un cambio en la pendiente de Tafel. Especies adsorbidas pueden acelerar la velocidad de disoluciones anódicas de los metales lo cual se indica por una disminución en la pendiente de Tafel, la presencia de sulfuro de hidrógeno estimula la corrosión del fierro; otros inhibidores pueden retardar la velocidad de formación de hidrógeno en el metal, afectando el mecanismo de reacción lo cual se indica por el incremento en la pendiente de Tafel de las curvas de polarización catódica.

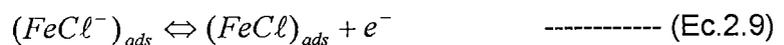
El paso determinante para la velocidad de formación de hidrógeno en soluciones ácidas (pH menor que 2), es la recombinación de átomos de hidrógeno para formar la molécula de hidrógeno, inhibidores como anilinas, benzaldehídos en medio ácido, tienden a retardar la formación de estos iones para la formación de átomos de hidrógenos adsorbidos en hierro, teniendo un control de las reacciones del hidrógeno.

#### B.4. Alteración de la doble capa eléctrica.

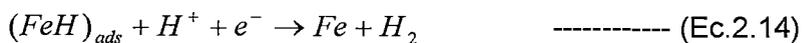
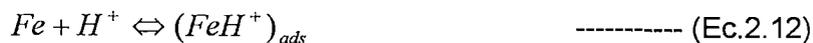
La adsorción de especies iónicas puede formar iones en la superficie del metal, con el cambio de la doble capa eléctrica en la interfase metal solución y a su turno afectar la velocidad de las reacciones electroquímicas. La adsorción de cationes, como el ión amonio cuaternario y aminas protonadas, hacen al potencial más positivo en el plano de acercamiento para los iones del metal en la solución. Este desplazamiento de potencial positivo retarda la descarga del ion hidrógeno positivamente formado. Así mismo, la adsorción de aniones hace el potencial mas negativo y acelera la velocidad de descarga de iones hidrógeno.

Sobre la cinética de la disolución del hierro y del acero en  $HCl$ , se han propuesto varios mecanismos sin embargo, el mecanismo más aceptado es el descrito por las siguientes ecuaciones:

Para la reacción anódica:



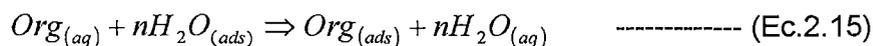
Mientras que la reacción catódica:



### Inhibidores Orgánicos en medio ácido

En ambientes ácidos, los inhibidores usados frecuentemente son las moléculas de tipo orgánico. Estos inhibidores actúan por adsorción en la superficie del metal, intervienen en las reacciones de los procesos de corrosión para disminuir la velocidad.

En las soluciones acuosas, debido a su carácter polar, las moléculas son adsorbidas en la superficie del metal. La adsorción de una sustancia orgánica puede describirse por la reacción siguiente:



Este "n" es el número de moléculas de agua que se desplazan a partir de la superficie por cada molécula orgánica que se ha adsorbido. El número "n" es independiente de la recuperación y la carga de metal, pero depende del área geométrica de la molécula orgánica con relación a la del agua; la adsorción de la molécula orgánica ocurre por la interacción de la energía entre la superficie del metal y las moléculas de agua.

El fenómeno de adsorción a la superficie de metal puede ponerse en la evidencia por:

- El estudio de las isotermas de adsorción.
- El examen de la superficie por medio de las técnicas específicas como la microscopía electrónica de barrido espectroscópico de fotoelectrones.

El conocimiento de los factores que influyen en el fenómeno de adsorción del inhibidor, es indispensable para entender mejor el mecanismo de inhibición de éstas.

Ambos efectos anódicos y catódicos son algunas veces observados en presencia de inhibidores orgánicos, pero por regla general, los inhibidores

orgánicos afectan la superficie entera de un metal corroído cuando está presente en suficiente concentración.

Los inhibidores orgánicos son adsorbidos según la carga iónica del inhibidor y la carga en la superficie. Inhibidores catódicos, como aminas; o inhibidores aniónicos, como sulfonatos, son adsorbidos preferentemente según el metal se carga negativa o positivamente.

Estos materiales edifican una película protectora de moléculas adsorbidas en la superficie de metal, lo cual provee una barrera para la disolución del metal en el electrolito.

Se constituye una amplia gama de inhibidores que pueden tener efectos en las reacciones anódicas, catódicas y producir caída óhmica.

### 2.2.3 RENDIMIENTO

El rendimiento de los inhibidores de decapado, se debe a ciertas características que deben cumplir para realizar un buen trabajo de decapado, las cuales son las siguientes:

- Inhibir la disolución del metal.
- No sobredecapar en presencia de una elevada concentración de acero disuelto.
- En el proceso de inhibir no debe demorar el proceso de decapado.
- Ser efectivo a bajas concentraciones y a elevadas temperaturas.
- Tener estabilidad térmica y química.
- Inhibir la adsorción de hidrógeno en el metal.
- Presentar buenas propiedades surfactantes y espumantes.

Una vez que el inhibidor cumpla estas características, se calcula su rendimiento mediante una valoración en función de las pérdidas de peso, para ello se aplica la siguiente fórmula:

$$\xi = \frac{P_0 - P_i}{P_0} * 100$$

Donde:

$P_0$  : Es el peso perdido de placa al ser expuesta al medio corrosivo para ser decapado.

$P_i$  : Es el peso perdido de la placa al ser expuesto al medio corrosivo con inhibidor.

$\xi$  : Es la eficiencia obtenida.

#### 2.2.4 INHIBIDORES DE DECAPADO CONOCIDOS

Los principales tipos de inhibidores conocidos están constituidos por las aminas grasas y sus derivados, las sales amónicas cuaternarias, las amido aminas, las etanolaminas, los aldehídos, los alcoholes. Algunos compuestos que contiene uno o varios enlaces triples carbono-carbono poseen una buena acción inhibidora. Para que sea eficaz, el inhibidor debe ser soluble y la solubilidad disminuye con la longitud de la cadena. Los inhibidores en fase vapor son sustancias orgánicas de presión de vapor alta, capaces de evaporarse y condensarse en la superficie del metal a proteger, para aumentar la presión de vapor se inyectan iones como  $NO_2^-$  o  $NH_2^-$ ; en general aumentan la resistencia a la corrosión en superficies como en el caso de los aceros.

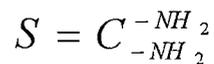
Los inhibidores volátiles son generalmente nitritos o carbonatos orgánicos, por ejemplo nitrito de diisopropilamina, de dicitclohexilamina. La benzilamina y la ciclohexilamina son buenos inhibidores, pero son demasiados volátiles para utilizarlos en la práctica; los recintos en que los inhibidores deben actuar generalmente no son estancos, de manera que las sustancias demasiado volátiles son eliminadas rápidamente, debiendo usarse una cantidad muy elevada si se quiere conseguir un efecto duradero. Estos compuestos pueden ser minerales, líquidos o sólidos que, situados en un recinto cerrado, pueden vaporizarse y entrar en contacto con el metal a proteger; son sustancias que actúan a distancia en medio gaseoso, y son de gran interés para las empresas, por sus características. Los inhibidores proporcionan una solución al problema de la corrosión; sin embargo, hay que utilizarlos con mucha prudencia, dado el gran número de factores que intervienen en los fenómenos de corrosión.

Algunos inhibidores de decapado conocidos son:

### Tiourea

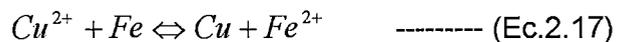
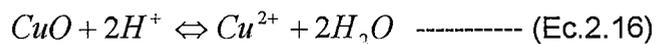
Es un inhibidor de corrosión de alta eficiencia debido a que esta formado en su molécula del elemento nitrógeno lo que le favorece para inhibir, en esta estructura química los dos átomos de nitrógeno están unidos con el átomo de carbono, estos átomos de nitrógeno comparten cinco electrones, de los cuales tres forman enlace covalente, dos con hidrógeno y uno con carbono.

Molécula de Tiourea

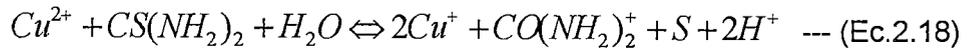


La Tiourea y sus derivados como inhibidor de corrosión son útiles para remover el cobre metálico y el óxido de las calderas, esto se lleva a cabo cuando este equipo tiene presencia de cobre. Formándose así en su interior una corrosión galvánica, a partir de orificios severos que hay debajo de la placa metálica de cobre, lo cual se hace muy notorio.

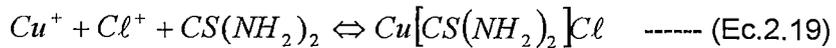
Mecanismo de función de la Tiourea.- Es un secuestrante de los iones cobre y también reduce al hierro, todo ello ocurre en una solución de ácido clorhídrico. Cuando se agrega el ácido clorhídrico para disolver el óxido de cobre, inmediatamente el cobre se reduce y se desplaza a la superficie de acero, en este instante se esta solubilizando un cantidad de equivalente de hierro.



La reacción (Ec.2.17) se puede bloquear agregando Tiourea a la solución de ácido clorhídrico, donde se reduce el cobre a ión cuproso, entrando en una serie de coordinación de complejos con el exceso de Tiourea. Debido a que tiene dos grupos aminas, esto es más básico que una tioamida común, lo cual favorece a la formación de complejos que dan una capa protectora de mono sales con ciertos cationes metálicos. Se usa Tiourea para iones complejos cuprosos, esto es esencialmente para prevenir la precipitación de sal insoluble de mono clorhídrico. La posible reacción con el ión de cobre es la siguiente:



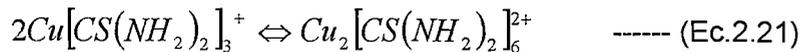
Precipitación de insoluble Tiourea mono sales:



La formación de complejo soluble monómero:



Dimerización del monómero:



En la ecuación de formación de complejos monómeros solubles de tres moles de Tiourea debe provenir de un porcentaje de moles de ion cuproso para mantener esta solución.

Aplicaciones.- La Tiourea se ha estudiado por más de cuatro décadas, ya que inhibe la corrosión de aceros y su efecto inhibitor es superior a los inhibidores amina en medios ácidos. La efectividad de la Tiourea como el inhibidor de corrosión depende de la estructura del compuesto orgánico, donde la adsorción de la Tiourea en la superficie del metal puede ocurrir a través de la interacción entre solo el par de electrones de nitrógeno y azufre, o la interacción entre los  $\delta$ -electrones de S=N y la superficie de metal, adsorbiendo en los sitios activos de la superficie del metal, ellos controlan la reacción anódica y/o reacciones catódicas durante el proceso de corrosión. Por otro lado, esta protección produce un efecto de reducción de la velocidad por la formación de depósitos de  $FeCO_3$  debido a las cantidades menores de especies iónicas disponibles para generar este producto. En esta solución se realizaron pruebas de Tiourea; dando como resultado lo siguiente:

- Tiourea es un inhibidor de corrosión excelente en solución salina saturada con  $CO_2$ .
- Tiourea inhibe la corrosión de acero de X70 en solución salina saturada con  $CO_2$  por el mecanismo de adsorción.
- Tiourea se comporta como inhibidor del tipo mixto que principalmente refrena el proceso anódico.

La Tiourea actualmente es sustituida por los productos tiomorfolina y fenoltiezina. Una típica formulación para remover el cobre puede ser con una combinación de 5 % de ácido clorhídrico, 2 % de Tiourea. La Tiourea es un material cristalino incoloro. Se utiliza en fotografía y en la fabricación de productos farmacéuticos y pesticidas, como también en productos químicos para la industria textil.

### **Urotropina**

Es un inhibidor comercial base amina secundaria y un inhibidor comercial base amina terciaria. Otros nombres comunes de la urotropina son: Hexa, Hexamina, HMTA, Formin, Aminoformo, Metenamina, Cistamina, Cistógeno. Donde su fórmula química es  $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ , ello proviene de la reacción de formaldehído con amoniaco. Esta sustancia sólida que se prepara mezclando formalina (solución acuosa de formol en agua al 37 %) con una solución diluida de hidróxido de amonio.

Su aplicación es en el baño de decapado para que una vez se haya eliminado el óxido y la cascarilla de la pieza no se produzca el ataque del ácido a su superficie (sobredcapado), así como para evitar un consumo excesivo de ácido. Con una disolución acuosa de ácido clorhídrico al 15 % y con un inhibidor a 100 ppm de hexametilentetramina, a 35 °C durante 2 horas. En otro caso, de decapados en una solución de *HCl* del 50 %, con 4 g/L hexametilentetramina, lavados a fondo en agua destilada y secados inmediatamente con aire a presión. El empleo de estos productos puede suponer una dificultad añadida a la hora de valorizar los baños de decapado agotados.

### **Quinoleína**

La quinoleína es un compuesto orgánico heterocíclico, compuesto por la unión de un núcleo bencénico y un núcleo pirídico, que posee un isómero: la isoquinoleína. Ambos derivan de la naftalina, por sustitución de un átomo de nitrógeno por un grupo CH. La fórmula de la quinoleína más sencilla es  $\text{C}_9\text{H}_7\text{N}$ .

La quinoleína se prepara actualmente por síntesis, según un procedimiento inventado por el austriaco Skraup que consiste en oxidar con nitrobenzeno una mezcla de anilina, glicerina y ácido sulfúrico.

La quinoleína y otros compuestos heterocíclicos, como la morfolina, el mercaptobenzotiazol, la piperazina, el 1, 2, 3 benzotriazol, actúan como inhibidor de la corrosión en el tratamiento de aguas industriales y del cobre. El

mercaptobenzotiazol es también un inhibidor de la corrosión para aceites de corte y productos derivados del petróleo y aditivo de presión extrema en lubricante.

### Aminas

Se producen al sustituir uno o más átomos de hidrógeno del amoníaco por uno, dos o tres grupos alquil o alcanol. Mientras que las aminas alifáticas inferiores son gases como el amoníaco y solubles en agua, las superiores son insolubles en agua. Las aminas alifáticas son disoluciones básicas y forman sales, que son sólidos no volátiles, inodoros y solubles en agua.

El enlace de las aminas a la superficie del metal es a través de los átomos de nitrógeno. En las aminas cíclicas saturadas, la eficiencia del inhibidor aumenta conforme aumenta el número de átomos de carbono en el anillo por lo menos hasta 10. Las aminas primarias son más eficientes inhibidores cuanto más aumenta la longitud de la cadena. Así por ejemplo, la n-decilamina es más eficiente que la n-hexilamina. La utilización de la octadecilamina como inhibidor de corrosión filmante en los sistemas de vapor / condensados es bien conocido. Una gama de aminas volátiles, en especial la morfolina y la ciclohexilamina, ha sido utilizada durante muchos años para neutralizar el ácido carbónico y aumentar el pH de los condensados. En general los inhibidores de aminas polimerizadas y de precipitado son conocidos para inhibir en soluciones ácidas concentradas, además estas soluciones pueden ser almacenadas para luego usarlas. Los compuestos orgánicos empleados como inhibidores de corrosión en medio ácido se muestran en el punto 2.2.1 (página 14).

- Oxalic N-Phenylhydrazide (OPHPT)

El Oxalic N-phenylhydrazide N-phenylthiosemicarbazide (OPHPT), es un inhibidor de corrosión aplicado en el acero en medio  $HCl$ . Este es un buen inhibidor para la corrosión del acero en 1 mol/L  $HCl$  donde se ha demostrado que su eficacia del inhibidor aumenta con su concentración, logrando hasta un 93 % aproximadamente de eficiencia en  $5 \times 10^{-4}$  mol/L. Las curvas de polarización indican que el OPHPT actúa como un inhibidor del tipo mixto al ser adsorbido en la superficie de acero y bloqueando los sitios activos. El efecto de la inhibición crece con el incremento de la temperatura del medio de corrosión.

- Benzotriazol(BTA)

Es inhibidor de la corrosión de cobre o aleaciones de cobre. Su fórmula:  $C_6H_5N_3$ . Sus nombres comunes son: 1, 2, 3-benzotriazol; 1H-benzotriazol; BTA; aziminobenzeno; benzisotriazol. Es un derivado heterocíclico del nitrógeno, es un polvo que funde entre 98 °C a 100 °C. Bastante soluble en agua. Punto de fusión de: 98 °C a 100 °C; punto de ebullición de 201 °C a 204 °C. Soluble en etanol, benceno, cloroformo, dimetilformamida, tolueno, ligeramente soluble en agua. Habitualmente, en las operaciones de limpieza y decapado del cobre en medio ácido se utiliza el Benzotriazol (BTA) como inhibidor de la corrosión. Se da la paradoja de que a pesar de que el BTA es el compuesto más utilizado en la inhibición de la corrosión del cobre y sus aleaciones, no existe una teoría universalmente aceptada acerca de su mecanismo de inhibición, dicho compuesto es nocivo para la salud y presenta propiedades cancerígenas.

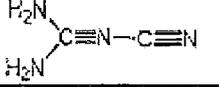
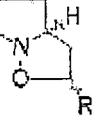
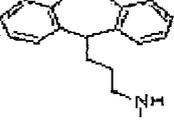
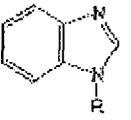
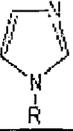
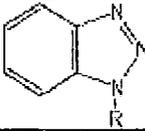
- Los Furfural hidrazone

Los derivados de furfural hidrazina son bastantes eficaces como inhibidores de corrosión en solución de acero al carbono en  $H_3PO_4$ . La eficacia de inhibición en porcentaje es aumentada por la presencia de KI, y KSCN debido al efecto sinérgico, pero la eficacia de estos compuestos investigados disminuye con el aumento de temperatura. Finalmente actúan como un inhibidor mixto sin modificar el mecanismo de evolución de hidrógeno.

- 1-(2-hidroxietil)-2-alkil-imidazolinas

La eficiencia de inhibir de la corrosión con el 1-(2-hidroxietil)-2-alkil-imidazolinas y sus correspondientes precursores amídicos en ambientes de ácido sulfhídrico característicos en la industria petrolera depende de la longitud del grupo alquilo. Las 1-(2-hidroxietil)-2-alkil-imidazolinas son mejores inhibidores de corrosión que sus correspondientes precursores amídicos, por lo cual la eficiencia de inhibición a la corrosión depende de factores electrónicos o de la estructura del inhibidor. En la molécula del 1-(2-hidroxietil)-2-alkil-imidazolinas el nitrógeno imínico ( $N_3$ ) es el que interactúa (coordina) con la superficie de sulfuro de hierro, mientras que en los precursores amídicos el nitrógeno amínico ( $N_2$ ) es el que realiza esta función. La película protectora que forman las 1-(2-hidroxietil)-2-heptilimidazolinas sobre la superficie de sulfuro de hierro es más resistente a la que forman sus correspondientes precursores amídicos.

**Cuadro 2.2** Compuestos orgánicos empleados como Inhibidores de Corrosión en *HCl*.

	$R-NH_2$	$R^1-N-R^2$	$R^1R^2R^3N$
Dicianodimida	Aminas primarias	Aminas secundarias	Aminas terciarias
	$R-N-R_2$		
Isoxazolidinas	Alquilaminas	Protriptalina	Benzimidazoles
			
Imidazoles	Triazoles	Benzotriazoles	Tetrazoles
$R-NO_2$	$R-SH$	$R^1-S-R^2$	$R^1-S(=O)-R^2$
Nitrocompuestos	Mercaptanos	Tioeteres	Sulfoxidos

### 2.2.5 INHIBIDORES DE DECAPADO COMERCIALES.

Los inhibidores comerciales son generalmente mezclas de otros, algunos de estos productos de manufactura contiene un gran número de ingredientes activos, la aplicación de cada uno de estos son necesariamente empíricos; además contienen otros aditivos que son empleados en estas formulaciones comerciales que son los inhibidores surfactante y los inhibidores de fase vapor.

En el caso del primer tipo de inhibidor, éste genera un incremento de la humectabilidad en la superficie del metal debido a la baja tensión superficial, lo cual produce una facilidad a la orientación general de la adsorción de este tipo de inhibidor. En el caso del inhibidor de fase vapor, un ejemplo de estos inhibidores es la clohexylamina, donde el proceso de acción de este inhibidor empieza por su característica principal, que es su presión de vapor, ya que se volatiliza desde una solución caliente de limpieza. Este se va a condensar sobre la parte del metal no protegido dentro de la solución, donde el vapor del ácido promueve el ataque al metal. Esto se puede ver como un método inexacto de inhibición, pero estos inhibidores son viables ya que pueden adecuarse para

un control de la corrosión, se puede utilizar este método aún si se tratase de un proceso drástico como la alimentación de ácido clorhídrico.

También cabe resaltar que, un excesivo incremento de la temperatura, produce que algunos inhibidores cambien su estructura, se descompongan, o son de otra manera alterados, ello conduce a la pérdida de su eficiencia, por esta razón se debe especificar las condiciones de uso de cada inhibidor ya que también podrían ser afectados con el aumento de la velocidad de recirculación ( $> 0,61$  m/s) del ácido de la solución de limpieza generando la presencia de corrosión. Finalmente la proporción de corrosión en el hierro dependerá del incremento del contenido de carbono que presenta este material, esto se da a partir de 0,3 % más de carbono que conforma el metal (acero al carbono), produciendo muchas dificultades a estos inhibidores.

Hay que resaltar que el volumen del inhibidor para la solución de limpieza debe ser el doble del volumen recomendado por el proveedor, para limpiar el acero al carbono o hierro, en el caso del ácido clorhídrico éste puede ser inhibido hasta cuatro veces del volumen recomendado. Algunos inhibidores tiñen la solución de limpieza para mostrar su presencia.

Empresas como Industrias Químicas Sepmont S.A. DE C.V, Servical Mexicana, CIMCOOL, ALVESA, producen inhibidores de corrosión a nivel industrial.

En el mercado se presentan los inhibidores de la siguiente manera:

- Inhibidores de corrosión volátiles
- Inhibidores de corrosión en polvo y en pastillas
- Inhibidores de corrosión resistentes a altas temperaturas
- Inhibidores de corrosión para circuitos de agua

Cuadro 2.3 Lista de inhibidores de decapado comerciales

NOMBRE COMERCIAL	DESCRIPCIÓN						
KLEEN AC 9504	<p>Kleen AC 9504 es un inhibidor de corrosión para las soluciones ácidas usadas en la limpieza de superficies metálicas. Kleen AC 9504 presenta alto grado de dispersabilidad en soluciones ácidas, ofreciendo excelente protección en las concentraciones normales de ácido clorhídrico empleadas en limpiezas industriales. Kleen AC 9504 es un inhibidor filmico basado en compuestos orgánicos no saturados nitrogenados.</p> <p>Dosis depende principalmente de las condiciones operacionales</p> <p>Dosificación orientativa: 0,1 % al 0,5 % en una solución de ácido clorhídrico</p>						
TENSO QUAT CI 44	<p>El Tenso quat CI 44, se utiliza en el baño de decapado a una concentración 0,1 % de solución, por lo general se trabaja de 40 g/L a 180 g/L de <i>HCl</i> para el baño de decapado.</p>						
INIBEX 500	<p>Es un compuesto orgánico formulado como aditivo inhibidor de corrosión en baños de decapado con ácido clorhídrico o ácido sulfúrico, cuya función es inhibir el ataque químico e hidrogenación sobre todos los metales especialmente el hierro, sin reducir el efecto desoxidante dando lugar a piezas libres de carbón, poros y picaduras durante el Decapado.</p> <p>El baño de decapado de clorhídrico presenta:</p> <table data-bbox="646 1289 1045 1388"> <tr> <td>Ácido Clorhídrico</td> <td>50 % V/V</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>50 % V/V</td> </tr> <tr> <td>Inibex 500</td> <td>5 mL/L</td> </tr> </table> <p>Temperatura ambiente</p>	Ácido Clorhídrico	50 % V/V	Agua	50 % V/V	Inibex 500	5 mL/L
Ácido Clorhídrico	50 % V/V						
Agua	50 % V/V						
Inibex 500	5 mL/L						
POLISID 100	<p>Es un inhibidor total para baños de decapado. Su poder inhibidor permite trabajar en cubas de acero sin revestimiento antiácido y elimina todo riesgo de fragilidad sobre las piezas. Este nuevo inhibidor elimina todo riesgo de ataque por escurridos imprevistos y ofrece una eficacia máxima a muy bajas concentraciones.</p> <p>Concentración:</p> <p>La concentración ideal de uso de este compuesto para trabajo en cubas de acero no revestido: 3 L por 1000 L de baño/ equivalentes a 2 % ó 4 % sobre la concentración en <i>HCl</i></p>						

Sigue

Cuadro 2.3 Lista de inhibidores de decapado comerciales

Viene

NOMBRE COMERCIAL	DESCRIPCIÓN
BYC OXA S	<p>Es un producto ácido desarrollado para el decapado de metales ferrosos, eliminando en forma rápida los óxidos sin atacar el metal base, debido a los inhibidores que contiene.</p> <p>Propiedades</p> <p>Aspecto :líquido incoloro</p> <p>Estado físico :líquido</p> <p>Color :incoloro</p> <p>Peso específico :1,2 N/m<sup>3</sup> – 1,4 N/m<sup>3</sup></p> <p>Solubilidad en agua : completa</p> <p>Naturaleza química: ácido</p>
POLISID C – 30	<p>Son productos líquidos formados por compuestos que reducen el ataque del ácido sobre el metal base en líneas pretratamiento previo a pintura, favoreciendo la disolución de los óxidos, calaminas y herrumbres en función del ácido empleado, concentración, temperatura y tiempo de decapado.</p> <p>Usado antes de aplicar cualquier tipo de acabado (fosfatación, tratamientos galvánicos, galvanizado en caliente, etc.), mediante un baño de decapado, normalmente ácido clorhídrico (50 % en volumen y temperatura ambiente).</p> <p>El ácido tiene tendencia a reaccionar y disolver la capa exterior formada por óxidos ricos en oxígeno Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> que son poco solubles, penetrando a los poros y herrumbres del metal base, disolviéndolos fácilmente.</p> <p>Condiciones de operación</p> <p>POLISID C-30 de 5 mL/kg a 10 mL/kg de ácido concentrado <i>HCl</i></p> <p>Temperatura de aplicación : 25 °C a 30 °C</p>

Sigue

**Cuadro 2.3** Lista de inhibidores de decapado comerciales

Viene

NOMBRE COMERCIAL	DESCRIPCIÓN
POLISID C – 3	<p>Son productos líquidos formados por compuestos que reducen el ataque del ácido sobre el metal base, favoreciendo la disolución de los óxidos, calaminas y herrumbres en función del ácido empleado, concentración, temperatura y tiempo de decapado. Al emplear en los baños de decapado, se tienen las siguientes ventajas:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduce la emanación de gases o vapores producidos a la atmósfera que afectan la salud de los operadores y los equipos o estructuras metálicas cercanas al baño de decapado.</li> <li>• Modera el ataque del ácido sobre el metal sin reducir la acción.</li> <li>• Desoxidante, evitando la hidrogenación y fragilidad posterior del metal base.</li> <li>• Se utiliza únicamente en decapados con ácido clorhídrico</li> <li>• POLISID C-30 de 5 mL/ kg a 10 mL/ kg de ácido concentrado</li> <li>• Temperatura : 25 °C a 30 °C</li> </ul>
BYCLEN B- 22	<p>Es un inhibidor que adicionado a los decapados convencionales y por acción de los tensoactivos incorporados en su formulación imprime a las piezas un alto poder desengrasante, además de los óxidos, calaminas y herrumbres del material con el tratado previo a los procesos electrolíticos, galvanizado en caliente, pintura, esmaltado y fosfatado.</p> <p>Decapado hierro y acero (acción media)</p> <p>Agua 45 % v/v  Ácido clorhídrico 45 % v/v  BYCLEN B- 22 10 % v/v  Temperatura ambiente</p>

### 2.3 DECAPADO.

El decapado es un método cuyo objetivo es eliminar los óxidos, cascarillas o depósitos de impurezas presentes en la superficie de un material. Los medios decapantes consisten en ácidos puros o mezclados disueltos en agua con aditivos,

Tipos de decapado:

- Decapado químico.
- Decapado eletrolítico.
- Decapado mecánico.

Decapado químico.- Es el proceso en el cual se retira cascarillas, óxidos y otros materiales extraños al metal mediante disoluciones acidas.

Este método se basa en el empleo de diferentes ácidos y sus mezclas. Algunos de los ácidos que se utilizan frecuentemente para el proceso de decapado son ácido clorhídrico  $HCl$ , ácido sulfúrico  $H_2SO_4$ , ácido nítrico  $HNO_3$  y ácido fluorhídrico  $HF$ ; para superficies de hierro, acero inoxidable, acero no aleado, aluminio, cobre y fundiciones.

El decapado con ácido clorhídrico  $HCl$  es el mas empleado; fundamentalmente para hierro y acero inoxidable, el decapado con ácido sulfúrico  $H_2SO_4$  se utiliza también para hierro, acero y en menor grado para el aluminio.

Los ácidos sulfúrico, clorhídrico, fosfórico y nítrico pueden desprender nieblas extremadamente corrosivas. Por otro lado el proceso de reacción de metal permite la liberación de hidrógeno. En el caso del ácido nítrico produce un desprendimiento de vapores de dióxido de nitrógeno (altamente tóxico). En el proceso de decapado químico, principalmente se utilizan los inhibidores de decapado.

Decapado electrolítico.- El decapado electrolítico es cuando el metal actúa como ánodo o como cátodo en una solución de un ácido o de una sal neutra. El decapado anódico es el preferible, pues se evita el peligro de que el material adsorba hidrógeno y adquiera la característica fragilidad debida al no desprenderse este elemento en el ánodo, lo cual es de temer cuando el decapado se efectúa en el cátodo. Generalmente se usa como electrolito, ácido sulfúrico diluido, siendo la densidad de corriente de 2 a 10 amperios por decímetro cuadrado. Las dificultades de aplicar la corriente y la duda de saber si

los resultados justifican el empleo de un equipo relativamente complicado han limitado la aplicación general del sistema. El metal decapado por este procedimiento está sujeto a la fragilidad debida al hidrógeno, pero ello puede remediarse.

Decapado mecánico.- Este proceso también llamado decapado granallado se realiza por dos procedimientos:

- El primero es mediante el empleo de abrasivo granulado dentro de una corriente de aire comprimido a gran velocidad.
- El segundo método es puramente mecánico, por centrifugado, donde el abrasivo simplemente esta dotado de gran velocidad.

En el cuadro 2.4 se señalan las ventajas y desventajas de los tipos de decapado:

**Cuadro 2.4** Ventajas y Desventajas de los tipos de decapado

	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
<b>DECAPADO QUÍMICO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buen acabado superficial (liso y uniforme).</li> <li>• Buen ataque del ácido prácticamente es independiente de la forma de la pieza a decapar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manejo de productos tóxicos.</li> <li>• Formación de vapores corrosivos que repercuten en el ambiente de trabajo.</li> <li>• Necesidad de tratar los efluentes previamente a su vertido.</li> <li>• Necesidad de gestionar adecuadamente un elevado volumen de residuos (baños agotados).</li> </ul>
<b>DECAPADO ELECTROLÍTICO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Permite una rápida limpieza mediante un tratamiento anódico en soda cáustica.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El metal decapado por este procedimiento está sujeto a la fragilidad debida al hidrógeno, pero ello puede remediarse.</li> </ul>
<b>DECAPADO MECÁNICO (GRANALLADO)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No requiere la utilización de productos químicos tóxicos.</li> <li>• El volumen y toxicidad de los residuos generados es mínimo.</li> <li>• El ambiente de trabajo se mantiene a las condiciones adecuadas y más limpias para realizar esta actividad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalaciones más complejas (requiere un diseño específico según el tipo de piezas a tratar).</li> <li>• No se realiza una aplicación total de la pieza debido al acceso de la granalla en las concavidades.</li> <li>• Necesidad de realizar un mantenimiento adecuado de las boquillas.</li> </ul>

### 2.3.1 APLICACIÓN INDUSTRIAL DEL DECAPADO QUÍMICO.

El decapado químico es un procedimiento industrial usado para eliminar la capa superficial de óxidos de hierro que se forma en los productos siderúrgicos expuestos a la oxidación atmosférica o en las distintas etapas de los procesos siderúrgicos de obtención del hierro en bandas. En el primer caso, es tratamiento previo obligado para su protección frente a la corrosión mediante recubrimientos de superficie, particularmente por pinturas. En cuanto al trabajado del hierro en los trenes de laminación, se producen distintos tipos de óxidos que constituyen las denominadas ‘cascarillas’ que reducen la resistencia de las estructuras de hierro. Tres son los ácidos utilizados normalmente para el tratamiento de superficies: sulfúrico, clorhídrico y fosfórico, éste último puede ser considerado como un tratamiento decapante pasivante ya que remueve solo la herrumbre y provee de una protección adicional de corta duración al sustrato.

Los ácidos sulfúrico y clorhídrico, actúan tanto sobre la herrumbre como sobre la calamina y su mecanismo de acción varía de acuerdo con la composición relativa de los óxidos presentes en la escama de laminación.

Los factores más importantes que influyen a la hora de mantener el baño de decapado son: la concentración de ácido, la temperatura del baño, y la duración del tratamiento.

El proceso de decapado en la industria se utiliza principalmente para:

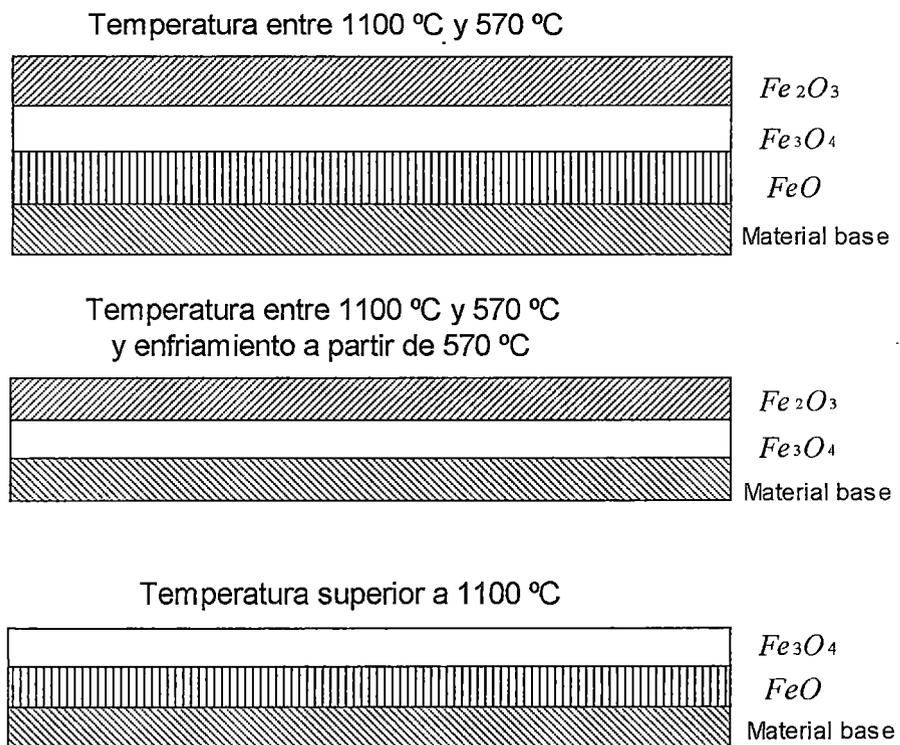
#### **A.- Eliminar capas de laminación**

Durante el proceso siderúrgico de laminado para preparar el hierro en bandas aparecen en su superficie distintas capas de óxidos en las diferentes etapas del proceso. Estas capas de óxidos se conocen con el nombre de cascarilla de laminación o calamina y es necesario eliminarla para que el material tenga una aplicación posterior.

Las capas de cascarilla en las superficies del acero presentan, según su formación, varias zonas con distinta composición, espesor y densidad. En general son las siguientes capas:

- 1.- Material base, Fe.
- 2.- Wustita, FeO.
- 3.- Magnetita, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.
- 4.- Hematita, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Dependiendo de la temperatura de recocido o de la temperatura final de laminación y de las correspondientes velocidades de enfriamiento, puede presentarse el caso de que algunas de las citadas capas no se produzcan. Así, en función de las condiciones de obtención de la banda, se pueden observar los distintos tipos de cascarilla que se forman (figura 2.2).



**Figura 2.2** Capas de óxidos que forman la cascarilla del acero en bandas en función de la temperatura de operación

Para la eliminación de la cascarilla superficial se utilizan procesos físicos y químicos. Los procesos físicos consisten en una limpieza mecánica mediante un raspado superficial, de esta manera se consigue una eliminación parcial de la cascarilla, este tratamiento no es suficiente para la eliminación total de la cascarilla siendo necesario un tratamiento posterior por vía química conocido con el nombre de decapado químico.

La composición de la cascarilla tiene gran influencia sobre la velocidad de trabajo durante la preparación de superficies, sobre todo cuando ésta se realiza mediante el decapado químico en baños de ácido.

El decapado químico consiste en la disolución de los óxidos que constituyen la cascarilla por inmersión del metal en una disolución ácida, es una operación previa al revestimiento de superficies (pintado, galvanizado, etc.), necesaria para garantizar la buena adherencia del recubrimiento sobre la superficie del metal.

Los óxidos superiores o de mayor contenido en oxígeno son poco solubles en los ácidos utilizados en el decapado, mientras que el óxido ferroso se disuelve rápidamente; en este último caso, la porosidad de la cascarilla beneficia el proceso ya que el ácido penetra a través de los poros disolviendo el óxido ferroso y produciendo la separación y posterior depósito de los restantes en el fondo de la cuba.

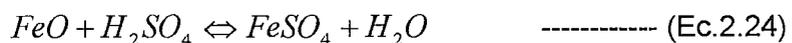
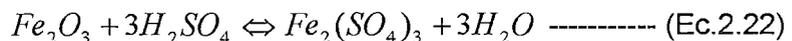
Los ácidos utilizados normalmente para el tratamiento de superficies son: el sulfúrico, el clorhídrico y el fosfórico; sin embargo, también son utilizados, aunque mucho menos, el ácido nítrico y el ácido fluorhídrico.

A.1.- Decapado con disoluciones de ácido sulfúrico.

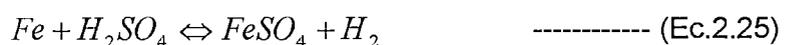
El ácido sulfúrico se utiliza en concentraciones que varían entre el 5 % y el 25 %, aumentando la velocidad de ataque con la concentración.

Por encima de 25 %, la velocidad de reacción disminuye, mientras que el parámetro temperatura influye de tal manera que el tiempo de decapado disminuye a la mitad por cada 10 °C de aumento de la temperatura entre 65 °C y 85 °C, cuando se mantiene constante la concentración de ácido.

Los óxidos de hierro que constituyen la cascarilla se disuelven según las reacciones:



Llegándose hasta la reacción con el metal base:



La velocidad aumenta desde las primeras reacciones hasta las últimas. Durante el tiempo que dure el decapado debe controlarse la relación ácido/óxido dentro del baño, controlándose por métodos físicos (densidad) o químicos (análisis) el contenido de materia activa de la solución y reponiendo el ácido consumido.

Las ventajas que presenta el decapado con disoluciones sulfúricas son las siguientes:

- Bajo coste del líquido decapante.
- Menor desprendimiento de vapores que con otros ácidos.
- No es necesario manejar grandes volúmenes de ácido.

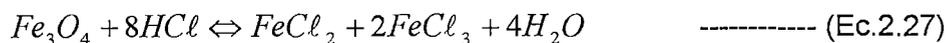
Sin embargo, es preciso resaltar los siguientes inconvenientes frente a otros ácidos:

- La producción de superficies oscuras sobre acero de alto contenido en carbono.
- El gran efecto inhibitor sobre el ácido de las sales de hierro en el baño.
- El alto coste energético, ya que se necesita operar a altas temperaturas.

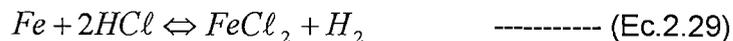
#### A.2.- Decapado con disoluciones de ácido clorhídrico.

Se utiliza en todos aquellos casos en que el ácido sulfúrico es poco efectivo, ya que forma rápidamente cloruros con todos los metales presentes, más solubles que los correspondiente sulfatos, penetrando además con mayor rapidez a través de los poros de la calamina; es por ello que puede ser utilizado a temperatura ambiente o con calentamiento hasta un máximo de 40 °C, ya que por encima de esta temperatura, desprende cloruro de hidrógeno altamente corrosivo y que tiene una mayor tendencia que el sulfúrico a producir corrosión localizada.

Los óxidos de hierro que forman la cascarilla se disuelven con ácido clorhídrico siguiendo las reacciones:



Y la reacción de ataque al metal base:



Las disoluciones de ácido clorhídrico se utilizan en caso de formación de óxidos en atmósferas altamente corrosivas si han sufrido algún tipo de deshidratación previa al decapado o cuando se desarrollan productos de corrosión sobre superficies recubiertas con aceites o grasas anticorrosivas de protección temporal con una larga exposición a la intemperie.

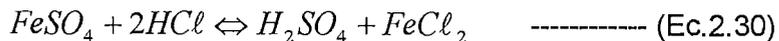
La concentración empleada generalmente es una parte de ácido clorhídrico comercial diluido en tres partes de agua; o partes iguales en volumen de ácido y agua.

El contenido de las soluciones de decapado varía corrientemente entre un 5 % y un 10 % de ácido, y una vez decidido sobre la concentración conveniente, deben efectuarse diariamente adiciones de ácido al baño para mantener la fuerza del mismo. El ácido clorhídrico ofrece las siguientes ventajas frente al ácido sulfúrico y otros ácidos:

- Proporciona superficies brillantes y lisas.
- Existe menor posibilidad de corrosión localizada (picado) que con otros ácidos.
- Fáciles lavados debido a la alta solubilidad de los cloruros.
- Las capas galvanizadas se adhieren mejor al metal, con mayor facilidad y son más uniformes.
- Menor coste energético, debido a que la temperatura requerida es más baja.
- La disponibilidad de inhibidores efectivos que no interfieren en el proceso de decapado.

Los principales inconvenientes se justifican por el alto coste y la necesidad de instalar sistemas de control de vapores.

A veces se practica la adición de ácido clorhídrico al ácido sulfúrico. Con tales adiciones se acelera el decapado, y la mayor solubilidad del cloruro ferroso hace posible usar la solución mucho más tiempo, se pretende que todo el decapado se lleva a cabo por el ácido sulfúrico; el ácido clorhídrico sirve solamente para regenerar el ácido sulfúrico de acuerdo con la siguiente reacción:



Siendo desplazado el equilibrio hacia la derecha. Cuando se alcanza una concentración de 350 gramos de sulfato ferroso por litro, se hace cristalizar por enfriamiento y se separan los cristales por centrifugación, recuperándose el óxido férrico y el ácido sulfúrico por tostación de la sal seca.

A.3.- Decapado con disoluciones de ácido fosfórico.

Se utiliza como agente decapante para el tratamiento de piezas moderadamente oxidadas, sin cascarilla.

Se trata de un ácido relativamente débil, si se compara con el sulfúrico o el clorhídrico, tiene la ventaja de no dejar residuos potencialmente peligrosos sobre el metal, ya que en los huecos y poros se suele depositar una capa de fosfatos de hierro complejos que no tienen influencia sobre la película de recubrimiento debido a su gran estabilidad.

De los tres ácidos considerados, es el que tiene menor tendencia a producir corrosión localizada. Se suele utilizar a temperatura ambiente y en concentraciones que varían entre el 5 % y 15 %, de acuerdo con la cantidad de óxido que tenga adherida a la superficie.

#### **B.- Limpieza de Herrumbre.**

La herrumbre formada sobre el acero por acción oxidante del aire o altas temperaturas ha sido estudiada muy a fondo. En el caso de ciertos metales, tales como el hierro, cobre, plomo y aluminio, el volumen de óxido producido es mayor que el del metal originario; por ello, éste óxido tiende a proteger el metal de una ulterior oxidación a alta temperatura; no obstante, en la práctica, ocurren roturas de la capa de óxido que dan lugar a que el espesor de la película aumente; con esto tiende a descascarillarse y aumenta la velocidad de oxidación.

En presencia de oxígeno y humedad los óxidos de las capas inferiores se transforman en formas más estables ( $Fe_2O_3$ , oxihidróxidos, etc.) y, con el tiempo, la capa de laminación quebradiza tiende a desprenderse de manera irregular, dejando zonas de acero al descubierto.

El resultado final es una superficie heterogénea compuesta de cascarilla intacta, cascarilla resquebrajada y parcialmente desprendida, herrumbre con humedad absorbida, polvo, suciedad en general, contaminantes salina, etc.

Para la preparación de la superficie de acero provista de herrumbre y cascarilla existen diversas alternativas. Desde el simple cepillado con cepillos de alambres o neumáticos a tratamientos más sofisticados, que dejan la superficie con un mejor grado de limpieza, ya que la presencia de herrumbre en la capa base del metal constituye un riesgo para cualquier sistema como ejemplo el de pintura. El decapado mecánico y el decapado químico son los procedimientos más efectivos y seguros para suprimir la cascarilla y herrumbre de la superficie metálica, realizándose mejor la operación antes de que el acero se haya corroído apreciablemente. En realidad, cualquiera de los métodos de preparación superficial se emplean de acuerdo a las dificultades y el costo de la operación aumenta conforme se deja progresar la formación de herrumbre más allá del punto necesario para aflojar o soltar la cascarilla.

### **C.- Preparación de la superficie en la Industria de Galvanizado.**

El proceso de galvanizado consiste en el recubrimiento obtenido por inmersión de un material ferroso en zinc fundido. En las empresas de galvanizados por inmersión; una condición necesaria para un correcto galvanizado es que las piezas queden químicamente limpias, es decir libres de óxidos metálicos, óxido de recocido y cascarillas; para lograr este objetivo, se realiza el proceso de decapado.

El objetivo del decapado es la eliminación de la cascarilla sin que se llegue a atacar la superficie del acero. Para ello es necesaria la adición de inhibidores que protejan al metal base del ataque del ácido.

En los procesos de galvanizado se utilizan fundamentalmente como ácidos de decapado el ácido clorhídrico ( $HCl$ ) y en muchas menor proporción el ácido sulfúrico  $H_2SO_4$ .

#### **C.1. Ácido Clorhídrico**

El ácido clorhídrico interviene en el decapado de los metales féreos con gran efectividad en razón de obtener velocidades de reacción relativamente altas. Se aplica en frío y a elevada concentración; no se recomienda su uso en caliente a más de 40 °C por desprender cloruro de hidrógeno gaseoso que además de ser tóxico es corrosivo.

Las concentraciones de ácido clorhídrico en las cubas de decapado, varían de 5 % a 16 % en peso, dependiendo de las piezas a galvanizar, algunas empresas utilizan altas concentraciones, a fin de disminuir el tiempo de decapado.

Debido a la poca uniformidad de los materiales que se envían a galvanizar, no existe tiempo exacto de decapado ya que ni la concentración de las cubas, ni la cantidad de óxido que traen los materiales son uniformes. Como consecuencia se utiliza la inspección visual como método más adecuado para controlar el estado de decapado de los materiales.

El responsable del decapado, debe comprobar que los materiales, al extraerlos después de un tiempo determinado casi siempre por el ritmo productivo, tengan un aspecto visual conforme a lo indicado y establecido en la industria. En caso de que el decapado del material no sea correcto, se volverá a sumergir el material en la cuba hasta que se encuentre dentro de lo establecido y alcance el grado de limpieza requerido.

El tiempo de permanencia de las piezas en el baño de decapado, depende del grosor y del tamaño de la pieza a decapar, el cual es el mínimo posible, generalmente se encuentra establecido para cada baño.

Para evitar que las superficies de las piezas como el acero siga decapándose una vez eliminado el óxido y la cascarilla, se utilizan inhibidores, que no afecten a la velocidad del decapado. En las empresas de galvanizado por inmersión se emplean normalmente inhibidores de decapado a base de hexametilentetramina (urotropina), la erosión de material puede reducirse de esta forma hasta en un 98 %, mientras que el ahorro en ácido debido al empleo de inhibidores del decapado dependerá en gran medida del grado de oxidación y de la formación de cascarilla que presenten las piezas.

La utilización de inhibidores de corrosión no modifica sensiblemente las características físico-químicas del agua, ya que actúan a dosis muy débiles. Cuando el inhibidor es "filmógeno" se fija sobre el metal formando una barrera compacta entre éste y el agua, con lo cual queda protegido. Actualmente se utilizan inhibidores comerciales en base de: Piridina, quinoleína, aminas, decilamina, dibencilsufóxidos, feniltioúrea.

### C.2. Ácido Sulfúrico

Se utiliza en muy distintas concentraciones que podríamos estimar entre el 5 % y el 20 % y temperaturas que oscilan entre los 50 °C y los 70 °C. El tiempo del

tratamiento está regulado por distintos factores, siendo los más importantes: la composición del metal a decapar, la proporción del ácido y la temperatura del baño. Se utilizan inhibidores comerciales en base de: feniltioúrea, diortotolilúrea, mercaptanos, sulfuros.

Estas reacciones son en general aceleradas por un aumento en la concentración del ácido, temperatura, o agitación y disminuyen en velocidad según la solución se vuelve más concentrada en el metal que se disuelve.

Cuando la capa de óxido es uniforme y todas las superficie es han estado igualmente expuesta al ácido, la pieza puede ser extraída tan pronto esté libre de la capa de óxido, evitando de este modo cualquier ataque serio al metal. Cuando la acción decapante no es pareja, debido a que la capa de óxido no es uniforme o por otros factores, con frecuencia hay exceso de ataque en algún área. Esto produce una superficie extremadamente áspera e inutiliza la pieza para muchas aplicaciones. Para evitar esto se le agregan al baño decapado inhibidores para reducir el grado de ataque en el metal.

Para el caso de decapado con ácido sulfúrico la concentración de ácido y la temperatura por seleccionar están relacionadas con el factor económico. El rendimiento óptimo de decapado se considera empleando una concentración de un 7 % a 9 %, una temperatura entre 60 °C a 80 °C, de esta forma se minimiza el sobrecapado. Durante el proceso la concentración de ácido disminuye gradualmente a medida que el contenido de sales de hierro aumenta. En todo decapado, la agitación de la solución ácida es ventajosa, ya que aumenta la acción del ácido y la mantiene uniformemente sobre la superficie de trabajo.

#### **D.- Desgalvanizado.**

Las piezas mal galvanizadas o aquellas cuyo recubrimiento debe ser renovado es necesario que previamente a su introducción en el baño, su superficie metálica esté brillante, por lo que será necesario eliminar esta capa en el baño de decapado. Por lo general, las piezas galvanizadas que son rechazadas, se envían para su decapado en la cuba más agotada ya que en ocasiones, estas piezas únicamente necesitan un ligero decapado.

Algunas empresas disponen de cubas separadas para la realización del decapado, por una parte para las piezas normales de producción, y por otra, para aquellas piezas mal galvanizadas o que por envejecimiento del recubrimiento sea necesario eliminarlo para volver a galvanizarlas.

Los baños de decapado agotados deben ser retirados por un gestor autorizado para su tratamiento, el cual suele consistir en un tratamiento físico-químico de precipitación y neutralización, sobre todo en el caso de aquellos baños cuyo contenido en cinc supere los límites. En caso de que la concentración de cinc no sea un parámetro limitante, otro tipo de gestión posible sería su utilización para la producción de  $\text{FeCl}_3$ , producto utilizado como coagulante en las depuradoras, sin embargo esta gestión no suele ser habitual ya que la mayor parte de las veces las cantidades de cinc presentes en los baños son bastante elevadas.

### 2.3.2 ESTADÍSTICA DE CONSUMO.

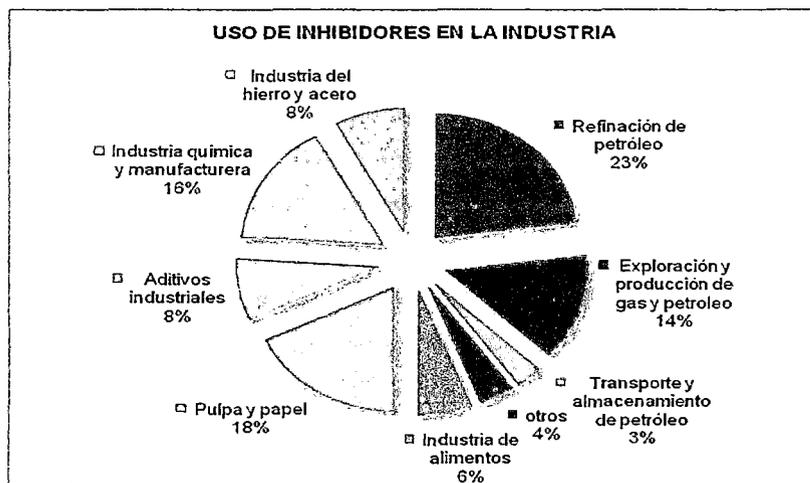
En general los costos por corrosión en la mayoría de los países implica cuantiosas pérdidas económicas, por tal motivo se han desarrollado diferentes métodos para el control de la corrosión, entre los que se tienen, el uso de capas protectoras epóxicas y de polímeros, metales y aleaciones más resistentes, protección anódica y catódica, inhibidores de corrosión entre otros.

Entre los diversos procedimientos que se emplean para evitar el deterioro metálico, los inhibidores constituyen uno de los más prácticos y económicos empleados en la industria, ya que se utilizan en disolución acuosa; pero también, según datos pueden utilizarse en medios no acuosos o en fase gaseosa, lo que los sitúa en el tercer puesto de los métodos de protección por su difusión, después de las pinturas y las aleaciones resistentes a la corrosión. (Fuente CC Technologies & NACE international study shows the cost of corrosion in the U.SA.).

**Cuadro 2.5** Métodos de protección utilizados contra la corrosión

MÉTODOS DE PROTECCIÓN	%
*Protección por recubrimientos	
-Recubrimientos Orgánicos	88,30 %
-Recubrimientos Metálicos	1,20 %
*Metales y Aleaciones resistentes	6,30 %
*Inhibidores de Corrosión	0,90 %
*Protección anódica y catódica	0,80 %
*Otros tipos de protección	2,50 %

Durante los últimos años el uso de inhibidores de corrosión se ha incrementado significativamente, se ha proyectado que el consumo de inhibidores de corrosión a nivel mundial, se incrementará en 2,4 % durante el año 2010 al 2013; una de las causas se debe a su bajo precio en comparación con otros métodos de protección y su fácil aplicación sin la interrupción del proceso. Las principales industrias que se benefician con el uso de los inhibidores son las industrias de extracción y producción de gas, refinación del petróleo, industria química, y aditivos industriales.



**Figura 2.3** Consumo de inhibidores de corrosión a nivel industrial

Aparte de los beneficios indirectos que se pueden derivar del correcto empleo de los inhibidores, se destacan como principales beneficios directos:

- Reducción sustancial de las pérdidas por corrosión.
- En ocasiones, permite el empleo de aleaciones de bajo costo.
- Aumento de la vida útil en servicio de las instalaciones y equipos.

## 2.4 ALÓE VERA.

### 2.4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ALÓE VERA.

Desde épocas muy antiguas ya se tenía conocimiento del Alóe Vera L. o Alóe *Barbadensis* (La llamada sábila). Esta planta ha sido usada a lo largo de la historia de la humanidad, tanto en el campo de la medicina "formal" antigua como en el ámbito familiar, hasta que el uso generalizado de fármacos modernos la relegó al olvido como a la mayoría de plantas medicinales.

Sin embargo, no es frecuente que en la actualidad se haga referencia a sus propiedades y se la use en medicina popular.

También vemos, que algunos productos de belleza contienen extractos de este vegetal, ya que se le está revalidando como un elemento útil en cosmetología y existen ya algunos trabajos que confirman este conocimiento medicinal.

#### A.- Referencias botánicas y características generales.

Las plantas que pertenecen al género Alóe de la familia de las Liliáceas han sido usadas en muchos países durante miles de años y en diversas culturas antiguas, principalmente en medicina popular por sus propiedades.

Los Aloes se distribuyen en áreas cálidas y áridas de todo el mundo, Mar mediterráneo, Oriente medio, África, China, Japón, México y Sur de Estados Unidos.

Existen unas 350 especies de Alóe que crecen por todo el mundo; entre ellas las más conocidas son: *Alóe Arborescents Mill*, *Alóe Barbadensis Mill* (Alóe Vera L), *Alóe Feroz Mill*, *Alkoe Saponaria Haw*, *Alóe Vahombe*, entre otras.

El Alóe Vera pertenece el reino vegetal.

- División: magnolio *phyta*.
- Clase : *uliopsido*.
- Orden : *liliales*.
- Familia : *liliaceas*.
- Genero: *Alóe*.
- Especie: *Alóe barbadensis*.

Desde 1910, la denominación de "Alóe Vera" se utiliza solo comercialmente aludiendo a dos especies: *Alóe Barbadensis* y el *Alóe Arborecens*, que son los tipos más empleados actualmente. El *Alóe Barbadensis* se cultiva abundantemente en Norte y Sud América, y el *Alóe Arborecens* se cultiva preferentemente en el lejano Oriente.

El *Alóe Barbadosensis* es una de las 350 especies que se han clasificado dentro del género Alóe, en la familia de las *Liliáceas* y es la que destaca por sus propiedades terapéuticas.

Su centro de origen se ubica en África, (Reynolds en 1966 la consideró un miembro endémico de la flora de Cabo Verde y las Islas Canarias) de allí se distribuyó por todo el mundo, a América llegó con los españoles y a España fue llevada por los moros.

El término Alóe que denomina al género, deriva del griego "Als" o "Alos" que significa sal, tal vez por el sabor acre que presenta el zumo o acíbar y la especie recibe el nombre de "*barbadosensis*" por haber sido llevada a la isla de Barbados en las Antillas y al resto de islas del Caribe desde las costas nororientales de África.

Su hábitat típico son las zonas áridas y desérticas, encontrándosele a pleno sol o a media sombra. Se trata de una planta suculenta, perenne, que alcanza una altura de 60 cm a 70 cm y que se reproduce por hijuelos. Las hojas son sésiles, carnosas, de forma lanceolada con la base ensanchada y los bordes dentados, terminadas en punta recia y provistas de una fuerte cutícula, usualmente tienen espinas mas pequeñas en los márgenes, se reúnen en una roseta que puede ser basal o encontrarse en el ápice de un tallo de hasta 6 m, en este caso la planta toma porte aéreo.

Cuando la planta es pequeña las hojas presentan manchas blancas que desaparecen conforme crece y ya en estado adulto tiene un color verde uniforme.

En la primavera, cuando la planta tiene dos o tres años, presenta una *inflorescencia terminal lateral, simple o ramificada, de flores amarillas con listas verdosas dirigidas hacia abajo.*

Las hojas adultas que llegan a tener una longitud de 50 cm a 60 cm, contienen un líquido gelatinoso de color amarillo verdoso, de sabor algo amargo.

#### **B.- Características:**

Cuando se estudia una planta de manera general, lo que se hace es identificar y aislar uno de sus componentes, casi siempre el que esta presente en mayor cantidad, para facilitar la investigación; sin embargo este no es el caso del Alóe ya que hoy se sabe que contiene más de 160 componentes entre los que se han identificado en la hoja (la aloína) y los identificados en el gel que está dentro de

la hoja. Al realizar un corte transversal de la hoja de Alóe Vera se distinguen claramente 2 partes; una corteza externa gruesa de color verde (piel) seguida de una capa fibrosa debajo de esta donde se concentra la aloína y una abundante pulpa interna llamada gel.

De sus hojas se obtienen básicamente 2 productos:

#### B.1 Acíbar:

Es una sabia contenida en las células situadas inmediatamente por debajo de la cutícula (célula del periciclo de la hoja). El acíbar se obtiene al dejar escurrir las hojas que han sido cortadas transversalmente y que dejado al sol en un recipiente se seca y queda una sustancia de cola rojizo con sabor algo amargo.

*La aloína* o *barbaloina*, es su principal componente, es una especie antraquinona de color amarillo que la planta segrega como defensa para alejar a posibles depredadores por su olor y sabor desagradables. También parece intervenir en el proceso de control de la evapotranspiración en condiciones de elevada insolación y sequía se obtiene principalmente del Alóe ferox y Alóe *barbadensis*.

#### B.2 Gel de alóe:

Es una sustancia clara y gelatinosa de color blanco amarillento que proceden de las células mucilaginosas del parénquima central de la hoja, está constituida mayoritariamente de agua ya que la materia sólida solo representa un 0,5 %.

El gel Alóe Vera se obtiene sobre todo del A. *Barbadensis* (Alóe Vera).

### C.- Composición General

En función de la especie de áloe y de determinadas condiciones como la época de recolección de las hojas, la edad de las mismas, el riego y su almacenamiento, así como la forma de obtención del gel y el almacenamiento del mismo, influyen en su composición o en sus propiedades físico-químicas y farmacológicas.

El gel de Alóe Vera contiene alrededor del 99,4 % de agua en peso, en función del proceso al que se someten las hojas para extraer el gel, más del 60 % de los sólidos totales son carbohidratos, principalmente mucílagos. Los azúcares encontrados son glucosa y manosa y cantidades menores de ramnosa, xilosa, arabinosa, galactosa y ácidos urónicos. El mucílago mayoritariamente está compuesto de polisacáridos neutros que suelen ser b-(174)-glucomananos, b-D-mananos, galactanos, arabinogalactanos, etc. en general, metilados y acetilados. Destaca el acemanano aislado del extracto etanólico del gel de Alóe

Vera. El acemanano es un polisacárido parcialmente acetilado, que consiste en unidades lineales de (1/4)-D-manoiranosil. Los azúcares neutros que se unen en cadena a través de enlaces (1/6) son galactopiranosas en una proporción 1 por cada 20 azúcares.

El mucílago contiene también polisacáridos ácidos con diferentes proporciones de ácido galacturónico.

El resto de los sólidos que componen el gel son ácidos y sales orgánicas (ácido málico, salicílico, cítrico y lactato magnésico, oxalato cálcico, etc.), enzimas (celulasa, carboxipeptidasa, bradikininasa, catalasa, amilasa, oxidasa, tirosinasa), saponinas, taninos, heteróxidos antracénicos (impurificando el gel), esteroides, triglicéridos, aminoácidos (lisina, histidina, glutamina, arginina, ácido aspártico, asparagina, treonina, serina, ácido glutámico, glicina, alanina, valina, metionina, isoleucina, leucina, tirosina, fenilalanina y triptófano), RNA, trazas de alcaloides, vitaminas (Betacaroteno, B1, B2, B3, B6, C, E, colina, ácido fólico) y minerales (Al, B, Ba, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, P, Sr, Si), variando en función de la lluvia, el terreno y la época de recolección.

Químicamente se caracteriza por la presencia de constituyentes fenólicos que son generalmente clasificados en 2 principales grupos, cromonas como la aloina, y antraquinonas (libres y en forma de glicósidos), como la barbaloina, la isobarbaloina y la aloemodina de la capa interna de las células epidermiales. Así como la presencia de polisacáridos, glicoproteínas y aminoácidos en el gel incoloro e insípido de las células parenquimales de las hojas de esta planta.

Los investigadores concluyen que el Alóe Vera es una de los vegetales más complejos y que todavía deben ser estudiados los mecanismos de sus múltiples acciones.

#### **2.4.2 MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DEL ALÓE VERA.**

Existen numerosos métodos de extracción del Alóe Vera, dependiendo del uso que se les va a dar; ya sea para uso interno por sus propiedades farmacológicas, como complemento alimenticio y dietético, productos de belleza y cremas medicinales; pero además, el proceso de extracción depende también, del producto que se desea obtener. Es así que tenemos diferentes denominaciones comerciales de Alóe Vera.

**Cuadro 2.6** Denominaciones comerciales del Alóe Vera

NOMBRE	CONCENTRACIÓN
Gel de alóe vera natural	Tejido natural sin diluir y sin procesar que se obtiene directamente de las hojas de alóe vera. No contiene ningún otro ingrediente.
Gel de alóe vera o gel de alóe vera estabilizado	Tejido natural sin diluir, pero procesado.
Alóe vera 100 %	Líquido procesado y conservado de las hojas de alóe vera que no contiene más de 50 ppm de aloína.
Gel completo de alóe vera	Gel de alóe vera con un mínimo del 50 % de la pulpa natural.
Concentrado de alóe vera	Gel de alóe vera al que se le ha extraído el agua natural por medios mecánicos.
Gel de alóe vera reconstituido	Concentrado de alóe vera al que se le ha añadido agua.
Gel de alóe vera pulverizado	Gel que se ha secado mediante pulverización.
Gel de alóe vera pulverizado reconstituido	Gel que se ha secado mediante pulverización y al que se ha añadido un porcentaje de agua.
Zumo de alóe vera	Producto que se puede beber y tiene un contenido mínimo de un 50 % de gel de esta planta.
Bebida de alóe vera	Producto que se puede beber y cuyo contenido en gel de alóe es inferior al 50 % pero superior al 10 %.
Extracto de alóe vera	Alóe vera disuelto con agua u otros disolventes que tiene menos del 10 % de alóe vera.

El producto que deseamos obtener para nuestro estudio es el gel de Alóe Vera natural. Es decir que no contiene ningún otro aditivo.

El método de extracción del gel de Alóe Vera tiene mucha influencia en la composición y propiedades del producto final. Para separar el gel del parénquima de las hojas se utilizan básicamente dos métodos de extracción:

El primero es mediante un proceso automatizado y el segundo mediante un proceso manual.

#### **A.- Proceso automatizado:**

Este método, es utilizado en industrias que procesan grandes cantidades de Alóe Vera, para ello, se seleccionan las hojas frescas previamente caracterizadas, el procedimiento es el siguiente:

Primero el lavado de la penca, esto es en tinas de acero inoxidable, en operación mecanizada mediante el uso de bombas de circulación de lavado que puede estar compuesta solo por agua o además por un agente tensoactivo tipo laurel sulfato de sodio o laurel éter sulfato de sodio.

El enjuague de la penca se realiza en tinas de acero inoxidable en operación mecanizada mediante el uso de bombas de circulación de la solución de enjuague compuesta por agua. Si el producto final será usado en industria farmacéutica o de cosméticos se usa como enjuague un agente bactericida como yodo, peróxido de hidrógeno u otro conveniente.

El despunte y corte de los filos y bordes espinosos se realizan en una mesa de descortezado automático mediante cuchillas de altura ajustables y conducidos por rodillos en la mesa de descortezado.

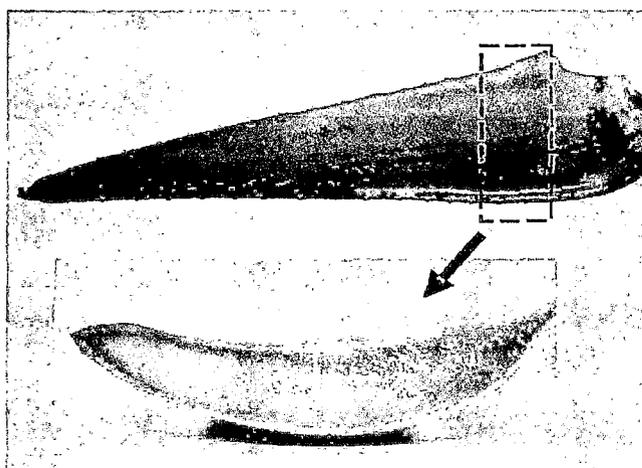
El lavado del gel se realiza por aspersion de agua sobre la pulpa del Alóe Vera y escurrimiento; donde la sustancia amarilla (acíbar) secretado por la corteza al ser cortado, se retira por enjuague al ser totalmente soluble en agua.

Para quitar las fibras que luego serían removidas, se usan una despulpadora que no corta o desmenuza las fibras en exceso, luego, se retiran estas fibras vegetales mediante el empleo de un filtro centrífugo a temperatura ambiente.

Hasta este momento se tiene un gel que puede ser ya usado para nuestro estudio; sin embargo para usarlo en industria farmacéutica o de belleza es necesario continuar con el procedimiento que permita que el gel de Alóe Vera cumpla con los índices de calidad necesarios para su empleo.

El proceso mas utilizado es la esterilización, que puede ejecutarse por los siguientes métodos a temperatura ambiente: Microfiltración, Ultracentrifugación y Radiación ultravioleta. Hasta aquí se ha obtenido un gel fluido con excelentes características en cuanto al contenido de aloína y conteo bacteriológico. Si se desea concentrar el gel se puede usar ultrafiltración por membranas o por evaporación en película descendente a alto vacío.

Las bases, las espinas y la corteza que para nuestro estudio son productos de desecho, son aprovechados para obtener el extracto de Alóe Vera; secando en una estufa de aire reciclado a  $(65 \pm 5) ^\circ\text{C}$  durante 48 horas, removiéndolo aproximadamente una hora, y luego la materia vegetal es molida en un molino de martillo o cuchillas.



**Figura 2.4** Corte transversal de la hoja de Alóe Vera

#### **B.- Proceso manual:**

Las hojas frescas de Alóe Vera previamente seleccionadas son lavadas y escurridas para posteriormente separar el gel de la corteza.

El lavado se realiza con agua corriente y luego con agua desionizada o destilada, se escurre y se pesa; luego se eliminan las puntas y los bordes dentados. Para eliminar el acíbar se puede seguir tres procedimientos:

- Se deja escurrir toda la sabia amarilla y se elimina el resto de la corteza, se lavan los restos del acíbar con agua destilada. Se obtiene un gel líquido, triturando los cristales y luego realizando dos filtraciones en gasa o en centrífuga.

- Luego de lavar las hojas; se dividen en tres partes y se deja remojar en agua destilada por una hora; posteriormente se efectúa dos cortes transversales a cada pedazo y se coloca verticalmente en un recipiente lleno con hipoclorito de sodio 1 %, se cambia el agua cada media hora para eliminar así las antraquinonas durante 3 días, posteriormente se quita la cáscara, dejando la parte gelatinosa en cubitos se deja remojar en agua destilada desechando lo que no fue utilizado, luego de 24 horas se realiza un filtrado en un pedazo de tela o en un papel filtro obteniéndose gel de Alóe Vera.
- Luego de eliminar los bordes y las puntas, se remoja en agua destilada colocándolos verticalmente, el agua se cambia periódicamente. Eliminado todo el acíbar, se realiza el fileteado manual, que consiste en extraer el gel de la hoja raspando la parte interna con un cuchillo manualmente.

Se han diseñado máquinas que simulan el fileteado a mano; en este proceso automatizado, se raspan de forma mecánica la hoja interior para extraer todo el gel de Alóe Vera; sin embargo haciendo una comparación con el procedimiento manual; el producto resultante puede contener una cantidad significativa de aloína; contaminando así el gel. Mientras en el fileteado a mano tradicional se obtiene mayor cantidad de gel libre de contaminantes que es mejor aprovechado.

#### **2.4.3 MÉTODOS DE OBTENCIÓN DEL POLVO DE ALÓE VERA.**

El gel de Alóe Vera puede ser reducido a su forma en polvo, lo cual alarga su vida útil comparado con los productos líquidos, eliminando además el costo por transportar agua. Para obtener Alóe Vera en polvo en la actualidad se realiza de cuatro maneras:

- A- El proceso de polvo seco implica el vaporizado del gel Alóe Vera líquido dentro de una matriz y usando altas temperaturas (usualmente con maltodextrinas de alto peso molecular que normalmente constituyen un 50 % más del producto final). La exposición a las altas temperaturas cambia algunos de los beneficios potenciales de los componentes activos.

- B- El proceso del polvo liofilizado utiliza frío y vacío. En este caso se consigue pulverizar el aloe utilizando frío, aproximadamente  $1/3$  de la presión atmosférica lo cual causa la evaporación y sublimación solamente del agua en el jugo. Los cambios de temperatura son evitados, pero el procedimiento es considerablemente más costoso que el proceso de polvo seco, por lo que este método es poco utilizado.
- C- En el proceso de deshidratación, los filetes del Aloe Vera se reducen a hojuelas deshidratadas al calor en un horno deshidratador para vegetales a temperatura relativamente baja (ligeramente por encima de la temperatura corporal), pero por varias horas. Estas hojuelas deshidratadas se convierten en un polvo muy fino.
- D- En el proceso de secado por atomización, la solución líquida o suspensión de Aloe Vera se dispersa en una corriente de aire caliente, en forma de un rocío de gotas muy finas; en estas condiciones se vaporiza rápidamente la humedad de las gotas, dejando partículas residuales de sólido seco que se separan de la corriente gaseosa (aire). El polvo resultante adquiere una consistencia, y propiedades difíciles de obtener en otro tipo de secadores, un producto que está listo para el empaque.

## CAPÍTULO III

### DESARROLLO EXPERIMENTAL

#### 3.1 OBTENCIÓN DEL PRODUCTO.

##### 3.1.1 OBTENCIÓN DEL GEL DE ALÓE VERA.

###### A.- SELECCIÓN DEL MÉTODO.

Nuestro objetivo es obtener mayor rendimiento en la extracción del gel, para ello se ensayaron diferentes procedimientos de extracción manual; fijando para cada caso la misma cantidad de materia vegetal empleada, el método de extracción seleccionado es el fileteado a mano; dado que el uso del gel no es para fines farmacéuticos ni cosméticos en el procedimiento de lavado y enjuague, no se usarán agentes bactericidas, agentes tensoactivos, ni ninguna otra sustancia que puede intervenir en el uso del gel Alóe Vera como inhibidor.

###### B.- PROCEDIMIENTO.

En el presente trabajo se abordó la obtención del gel de Alóe Vera de la corteza de las hojas enteras.

Para esto, se utilizaron hojas frescas de Alóe Vera (Zábila) de más de un año de plantadas de la zona de Carabayllo.

Las hojas de Alóe Vera que fueron procesadas, tenían las siguientes características físicas, la hoja en promedio pesa unos 160 g, mide 52 cm de largo y 12 cm de ancho en la base y un grosor de 5 cm aproximadamente. Una vez cosechada; las hojas de Alóe Vera se utilizan casi de inmediato, es decir el mismo día que fueron recogidas las hojas; sobre todo en verano para que el calor no influya de forma negativa en la conservación de las hojas.

El método de extracción que usamos fue el manual, se toman las hojas de la planta cortando con un cuchillo a partir de aproximadamente 2 cm desde la base de la hoja, luego, las hojas enteras son lavadas externamente con agua eliminando residuos, tierra y parte de la aloína (zábila amarilla) producto del corte, luego de tener las hojas limpias, se procede a cortar la parte superior de éstas y las partes laterales en las que se encuentran pequeñas espinas.

Cada hoja se divide en 3 partes, y se deja remojar por una hora en un volumen de agua que cubra totalmente las partes cortadas, el agua es cambiada cada hora al inicio por 5 horas, y luego se deja remojar por un día aproximadamente, los pedazos son colocados en el recipiente en forma vertical, para eliminar las antraquinonas (aloína) presente en las hojas.

Se retiran los pedazos de Alóe Vera del remojo y se escurren, luego se procede a introducir un cuchillo en la capa del líquido viscoso que se encuentra pegado en las hojas y se comienza a extraer el gel raspando desde la parte superior hasta la parte inferior; a este procedimiento se denomina comúnmente fileteado. El gel obtenido, se deja reposar al ambiente por aproximadamente 8 horas para obtener un gel líquido más uniforme con el que se pueda trabajar.

#### **C.- RESULTADOS.**

- El gel obtenido usando el método de extracción manual es un líquido viscoso incoloro con opacidad.
- Se obtiene 100 mL de gel de Alóe Vera por cada 3 hojas de Alóe procesadas (160 g/hoja).

#### **D.- RECOMENDACIONES.**

- A partir de la aplicación del gel de Alóe Vera como inhibidor de corrosión en el baño de decapado a nivel laboratorio, se busca conservar sus propiedades de inhibir cuando sea utilizado a nivel industrial.
- Las condiciones de conservación necesarias para mantener el gel de Alóe Vera son muy exigentes, por lo cual, se recomienda como aceptable, para eliminar esas exigencias, convertirlo a su forma en polvo.
- Al ser el gel de Alóe Vera reducido a su forma en polvo, alarga su vida útil comparado con los productos líquidos, eliminando además el costo por transportar agua.

### **3.1.2 OBTENCIÓN DEL POLVO DE ALÓE VERA.**

#### **A.- FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CONSERVACIÓN DEL GEL DE ALÓE VERA.**

Al ser el gel de Alóe Vera un producto de origen biológico el primer factor que interviene en su degradación son las enzimas que contiene, en el momento en que se extrae el gel de la sábila ocurre una gran destrucción celular, hecho que libera las enzimas que son capaces de degradar la mayoría de compuestos de las células y por ende el gel mismo, lo que se traduce en descomposición y/u oxidación del gel de Alóe Vera. Existen además factores externos entre los que se encuentran el oxígeno del aire y el calor.

El oxígeno es el mejor oxidante que existe debido a que la molécula es muy electronegativa y puede reaccionar con algunos componentes del gel. El calor, es capaz de catalizar múltiples reacciones químicas que en sustancias de origen biológico como el gel de Alóe Vera degradan el producto de forma paulatina; así, el gel al ser expuesta a altas temperaturas, se oscurece y toma un color opaco.

#### **B.- SELECCIÓN DEL MÉTODO DE OBTENCIÓN DEL POLVO DE ALÓE VERA.**

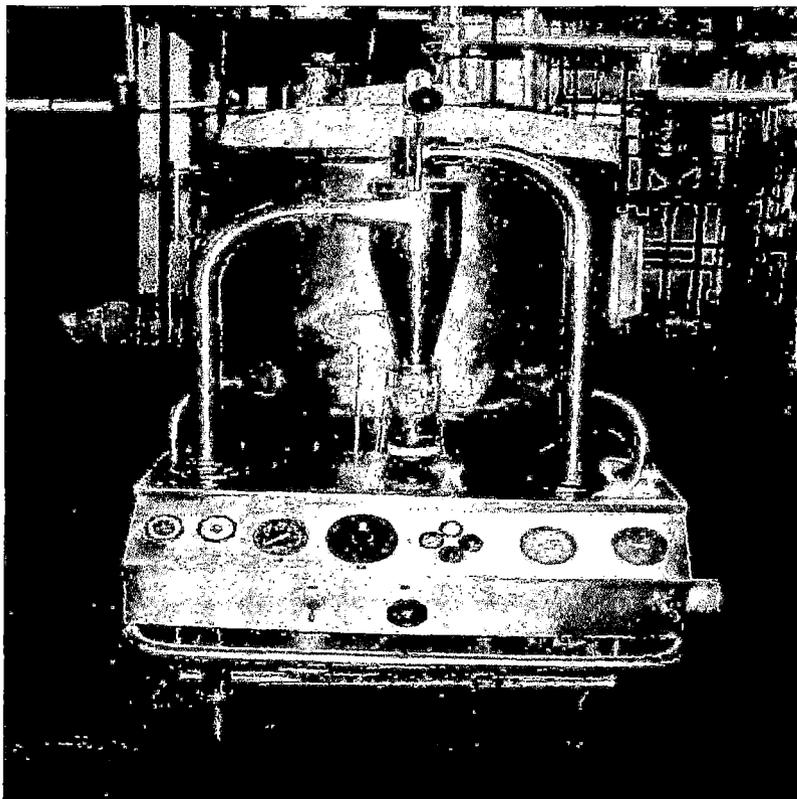
Para obtener el polvo de Alóe Vera se estudiaron 4 métodos (pagina 54) el primero es el proceso de obtención de polvo seco que emplea maltodextrinas, lo cual involucra una inversión y además no se tienen condiciones de operación adecuadas para su aplicación; el segundo es el proceso de obtención del polvo liofilizado, un cambio tecnológico donde el producto liofilizado ya conserva las características del gel Alóe Vera fresco sin embargo es poco rentable para nuestro estudio debido a su alto costo; otro proceso es la utilización de un horno deshidratador de vegetales donde se trabaja con filetes de Alóe Vera y no con el gel que es objeto de nuestro estudio; El método seleccionado que es actualmente el proceso más utilizado y rentable para transformar el gel de Alóe Vera en polvo es el equipo de secado por atomización (Spray Dryer), que nos permite obtener buenos resultados, un producto seco de características aceptables, además de involucrar un corto tiempo de secado.

### **C.- PROCESO DE DESHIDRATACIÓN A NIVEL LABORATORIO (EQUIPO DE SECADO POR ATOMIZACIÓN)**

Para obtener polvo de Alóe Vera a partir del gel líquido de Alóe Vera, se utiliza el equipo de secado por atomización (figura 3.1). Este equipo consiste en una cámara de secado en la cual está montado un rotor atomizador, una unidad para suministrar la solución o dispersión al rotor atomizador, una instalación de aire de secado, una salida para el polvo y un tubo de salida para el aire de secado, un ciclón para separar el polvo del aire de secado extraído y medios para hacer recircular el polvo desde el ciclón a la zona de atomización de la cámara de secado.

El tipo de secado por aspersión, implica la formación de una fase líquida muy dispersa (gotitas minúsculas) en una cámara con atmósfera (gases) caliente. El secado por rociado emplea tiempos extraordinariamente cortos, evitándose de esta forma, que el calor afecte al producto. Ello ocurre al girar, el rotor atomizador que actúa como ventilador y así arrastra por aspiración el polvo y una parte de aire descargado a través de la abertura del ciclón. El polvo obtenido es de forma esférica, porosa, de alta solubilidad, lo que permite la fácil reconstitución de la solución.

El gel de Alóe Vera obtenido previamente, se dosifica al equipo (cámara de secado), desde un pera de decantación a un flujo aproximadamente constante, los parámetros a fijar son la temperatura de trabajo y la presión del equipo que se deben mantener en un rango específico para evitar que el gel se adhiera en las paredes del equipo.



**Figura 3.1** Equipo de Secado por Atomización

#### **D.- RESULTADOS.**

##### **Condiciones de Operación:**

Flujo de Gel líquido de Alóe	: 96 gotas/min
Densidad del gel de Alóe	: 0,97 g/mL – 0,98 g/mL
Temperatura de trabajo	: 140 °C - 145 °C
Presión del equipo	: 4 kg /cm <sup>2</sup>

##### **Cálculo del Porcentaje de Sólidos (% S gel):**

Para el cálculo del porcentaje de sólidos presente en el gel de Alóe Vera, se pesa aproximadamente un gramo de gel de Alóe Vera sobre un papel (el papel previamente pesado), y se procede a secar en una estufa a una temperatura de 140 °C por un tiempo de 10 minutos aproximadamente, luego de los cuales, se obtiene el polvo de Alóe Vera. Se pesa la muestra resultante y se registra como el peso final.

El porcentaje de sólidos se calcula de la siguiente manera:

$$\%S_{gel} = ((W_{al\acute{o}e} + W_{papel})_f - W_{papel}) * 100\% / (W_{al\acute{o}e})_i$$

Donde:

% S<sub>gel</sub> : Porcentaje de sólidos presentes en el gel de Alóe Vera.

W<sub>papel</sub> : Peso del papel

(W<sub>alóe</sub>)<sub>i</sub> : Peso inicial del gel de Alóe Vera.

(W<sub>alóe</sub>+W<sub>papel</sub>)<sub>f</sub> : Peso final obtenido luego del secado.

**Cuadro 3.1** Porcentaje de sólidos en el gel de Alóe Vera

Nº de prueba	W <sub>papel</sub> (g)	(W <sub>aloe</sub> ) <sub>i</sub> (g)	W <sub>(aloe+papel)</sub> <sub>f</sub> (g)	%S <sub>gel</sub>	%S <sub>gel</sub> prom.
1	0,229	1,067	0,235	0,52	0,51
2	0,235	1,142	0,241	0,53	
3	0,199	0,981	0,204	0,49	

#### Cálculo de la eficiencia del Equipo (% Ef):

Eficiencia del Equipo:

La eficiencia del equipo se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$\%E_f = (W_{polvo\ secado}) * 100\% / W_{polvo\ te\acute{o}rico}$$

$$W_{polvo\ te\acute{o}rico} = \%S_{gel\ prom} * D_{gel} * V_{gel}$$

Donde:

% S<sub>gel</sub> prom : Porcentaje de sólidos promedio presentes en el gel de Alóe V.

V<sub>gel</sub> : Volumen de gel de Alóe Vera secado.

D<sub>gel</sub> : Densidad del gel de Alóe Vera.

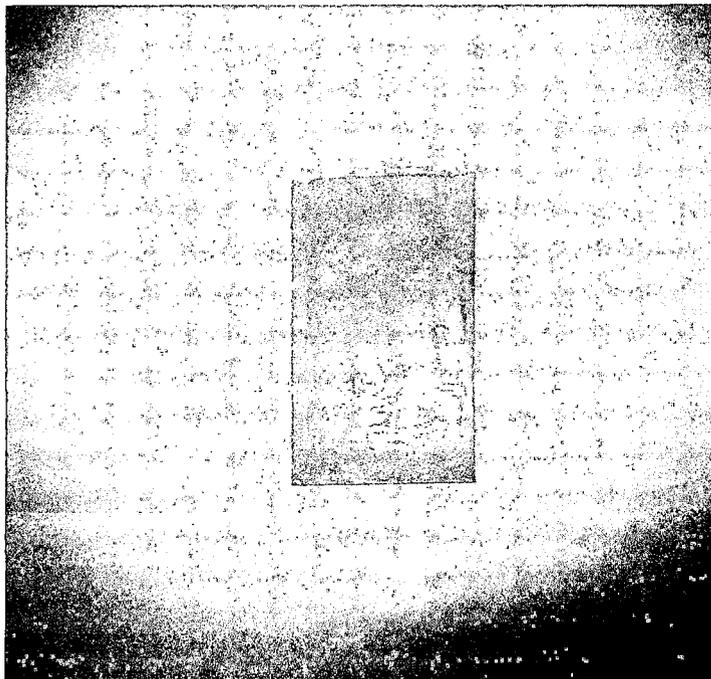
W<sub>polvo</sub> : Peso de polvo de Alóe Vera

**Cuadro 3.2** Eficiencia del equipo de Secado por Atomización

Nº de prueba	V <sub>gel</sub> (mL)	D <sub>gel</sub> (g/mL)	%S <sub>gel</sub> prom.	W <sub>polvo exp.</sub> (g)	W <sub>polvo teo.</sub> (g)	Ef equipo (%)
1	720	0,98	0,51%	1,450	3,599	40,29
2	900	0,97	0,51%	1,750	4,452	39,31
3	700	0,97	0,51%	1,190	3,463	34,36

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- El porcentaje de sólidos presentes en el gel de Alóe Vera es aproximadamente 0,51 %.
- El polvo obtenido al secar el gel usando el método de secado por atomización es de forma esferoidal de color amarillento, muy poroso, de alta solubilidad, lo que permite la fácil reconstitución de la solución (figura 3.2).
- La mayor eficiencia del equipo es de 40,29 %.
- La baja eficiencia es debido que el polvo de Alóe Vera no se recolecta totalmente, ya que éste se pierde en la salida del aire caliente.
- A bajas temperaturas del equipo, el gel se pega en las paredes de la cámara de secado, por lo que se debe mantener la temperatura en el rango entre 140 °C a 145 °C.
- El peso del polvo de Alóe Vera obtenido en promedio procesando 770 mL de gel de Alóe Vera es de 1,46 g.
- Es recomendable conservar el polvo de Alóe Vera en un frasco cerrado.



**Figura 3.2** Polvo de Alóe Vera

### 3.1.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PRODUCTOS DEL GEL DE ALÓE VERA Y DEL POLVO DE ALÓE VERA.

	GEL DE ALÓE VERA	POLVO DE ALÓE VERA
<b>VENTAJAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajos costos de obtención.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil de transportar.</li> <li>• Elimina costos por transportar agua.</li> <li>• Fácil de conservar.</li> <li>• Se mantiene a temperatura ambiente en un recipiente cerrado.</li> <li>• Mejor presentación para uso comercial.</li> </ul>
<b>DESVENTAJAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gastos en transporte.</li> <li>• Condiciones de conservación exigentes.</li> <li>• Se mantiene en frío, recipiente herméticamente cerrado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su obtención involucra un costo mayor</li> <li>• Se debe procesar grandes volúmenes de gel para obtener el polvo que representa alrededor del 0,5 % del volumen total.</li> </ul>

### 3.1.4 CONCLUSIONES.

De lo expuesto anteriormente podemos concluir que:

1. En el procedimiento de extracción fileteado a mano, se obtiene el gel de Alóe Vera, requerido para su estudio como inhibidor de decapado.
2. El procedimiento manual, es fácil de realizar y económico, ya que no involucra grandes gastos en comparación con el procedimiento automatizado.
3. El método manual nos permite controlar todas las etapas del proceso.
4. Para una mejor conservación del producto, se convirtió el gel de Alóe Vera en polvo, observándose muchas ventajas con respecto al gel de Alóe Vera.
5. El polvo de Alóe Vera se conserva varios meses en un recipiente hermético y seco.

## 3.2 EVALUACIÓN DEL ALÓE VERA COMO INHIBIDOR DE DECAPADO.

### 3.2.1 DISEÑO EXPERIMENTAL: APLICACIÓN DEL MÉTODO ORTOGONAL PARA ESTABLECER EL CONJUNTO DE EXPERIMENTOS

El desarrollo del diseño de experimentos, formado por estructuras, tiene ciertos vínculos racionales entre el objetivo, las necesidades y las limitaciones físicas de los experimentos.

Por la información que cada experimento proporciona por ejemplo: Por el número de factores investigados (de un solo factor o de factores múltiples), podemos clasificarlo y resumirlo en dos diseños básicos: Diseño completamente aleatorio (factorial) y Diseño de bloques aleatorios.

Para el tratamiento de nuestros datos, utilizamos el diseño completamente aleatorio (factorial) ya que es un diseño en el cual los tratamientos se aplican completamente al azar y sin restricción a las unidades experimentales

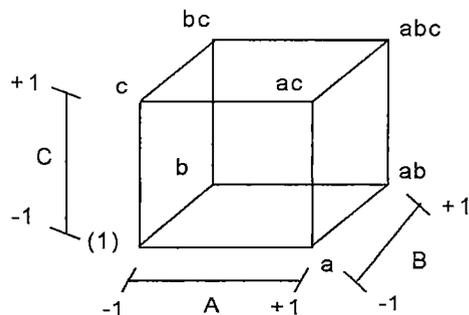
Para este caso, se aplicó el diseño en el experimento para tres variables, por lo que se garantiza la homogeneidad de cada una de las muestras experimentales.

#### A.- APLICANDO EL MÉTODO DE DISEÑO FACTORIAL ( $2^K$ ):

Este diseño factorial para  $K=3$ , cada uno con dos niveles (nivel alto y nivel bajo) tiene 8 combinaciones de tratamiento, nos permite estimar tres factores principales (A, B y C) junto con tres interacciones de dos factores (AB, AC y BC) y una interacción de tres factores (ABC).

Los principales efectos pueden estimarse con facilidad. Hay que recordar que (1), a, b, ab, c, ac, bc y abc representan el total de todas las N replicas en cada una de las ocho combinaciones de tratamiento en el diseño. Respecto del cubo de la figura 3.3, se estima el efecto principal de A promediando las cuatro combinaciones de tratamiento en el lado derecho, donde A esta en el nivel alto, y sustrayendo de esa cantidad el promedio de las cuatro combinaciones de tratamiento en el lado izquierdo del cubo, donde A esta en el nivel bajo. Esto da como resultado.

$$A = \frac{1}{4n} [a + ab + ac + abc - b - c - bc - (1)]$$



**Figura 3.3** Cubo de combinaciones de tratamiento

De la misma manera se calcula el efecto B:

$$B = \frac{l}{4n} [b + ab + bc + abc - a - c - ac - (l)]$$

Y el efecto de C es la diferencia promedio entre las cuatro combinaciones de tratamiento en la cara superior del cubo y las cuatro en su base:

$$C = \frac{l}{4n} [c + ac + bc + abc - b - a - ab - (l)]$$

Considerando ahora la iteración de dos factores AB. Cuando C está en el nivel bajo, AB es justo la diferencia promedio del efecto A en los dos niveles de B:

$$AB(Cbaja) = \frac{l}{2n} [ab - b] - \frac{l}{2n} [a - (l)]$$

En forma similar, cuando C está en el nivel alto, la interacción AB es:

$$AB(Calto) = \frac{l}{2n} [abc - bc] - \frac{l}{2n} [ac - c]$$

La interacción AB es exactamente el promedio de estas dos componentes:

$$AB = \frac{l}{4n} [ab + (l) + abc + c - b - a - bc - ac]$$

Al emplear un planteamiento similar se obtiene los efectos de interacción AC y BC, los cuales son los siguientes:

$$AC = \frac{l}{4n} [ac + (l) + abc + b - c - a - ab - bc]$$

$$BC = \frac{l}{4n} [bc + (l) + abc + a - b - c - ab - ac]$$

El efecto de interacción ABC es la diferencia promedio entre la interacción AB en los dos niveles de C, por tanto se obtiene:

$$ABC = \frac{l}{4n} [abc - bc - ac + c - ab + b + a - (l)]$$

La estimación de cualquier efecto principal o interacción se determina multiplicando las combinaciones de tratamiento en la primera columna del cuadro por los signos de la columna correspondiente de interacción o efecto principal, sumando el resultado para producir un contraste, y dividiendo luego el contraste entre la mitad del número total de ejecuciones en el experimento. Expresado matemáticamente:

$$Efecto = \frac{Contraste}{n2^{k-1}}$$

#### B.- PROCEDIMIENTO:

El método a aplicar es el método factorial  $2^3$ , el cual nos indica el número de variables que se debe considerar para el desarrollo del experimento. Para tres variables en 2 niveles, equivale a 8 ensayos con n=2 réplicas. Estas variables a considerar son:

- Concentración de ácido clorhídrico (M).
- Concentración de gel Alóe Vera (g/mL).
- Tiempo inmersión (min).

Para las pruebas del experimento, se prepararon 16 placas cuyas medidas son:

- Ancho : 2,5 cm
- Largo : 5 cm

Cada placa es colocada un recipiente de vidrio con 25 mL de ácido clorhídrico y alóe, cuyas cantidades y concentraciones son de acuerdo a los niveles tomados, así como el tiempo durante el cual se encontraran sumergidas en la solución ácida. Las placas son pesadas antes de su ingreso al recipiente, registrando

dicho peso inicial ( $w_i$ ), y luego de transcurrido el tiempo indicado, registrando dicho peso como peso final ( $W_f$ ). La variación de pesos nos indica el efecto del Alóe Vera en el sistema como inhibidor.

Se tomaron en cuenta los siguientes factores indicando sus niveles:

FACTOR A: concentración de ácido clorhídrico (M)

Niveles del factor A:

A bajo: Concentración  $HCl$  3 % (0,861 M)

A alto: Concentración  $HCl$  10 % (2,871 M)

FACTOR B: concentración de gel Alóe Vera (g/mL)

Niveles del factor B:

B bajo: 0,05 g/mL

B alto: 0,32 g/mL

FACTOR C: tiempo (minutos)

Niveles del factor C:

C bajo: 5 minutos

C alto: 15 minutos

El siguiente cuadro indica las condiciones de los tres efectos (A, B, C) en sus respectivos niveles, alto y bajo.

**Cuadro 3.3** Condiciones de los tres efectos

NIVELES	A	B	C
Bajo	0,86	0,05	5
Alto	2,87	0,32	15

Condiciones iniciales para realizar los ensayos del experimento:

**Cuadro 3.4** Condiciones iniciales de evaluación de los factores

	A	B	C
A bajo, B bajo, C bajo	0,86	0,05	5
A alto, B bajo, C bajo	2,87	0,05	5
A bajo, B alto, C bajo	0,86	0,32	5
A alto, B alto, C bajo	2,87	0,32	5
A bajo, B bajo, C alto	0,86	0,05	15
A alto, B bajo, C alto	2,87	0,05	15
A bajo, B alto, C alto	0,86	0,32	15
A alto, B alto, C alto	2,87	0,32	15

### C.- ENSAYOS

Para cada condición inicial se realiza 2 ensayos (n=2), los resultados obtenidos de la evaluación se presentan en el siguiente cuadro referente a la pérdida de peso de las placas:

**Cuadro 3.5** referente a la pérdida de peso de las placas

Niveles	Pesos iniciales		Pesos finales	
	wi	wii	Wi	Wii
A bajo, B bajo, C bajo	14,6651	13,9922	14,6629	13,9899
A alto, B bajo, C bajo	14,3275	14,8849	14,3230	14,8804
A bajo, B alto, C bajo	14,6995	13,6144	14,6973	13,6121
A alto, B alto, C bajo	13,5474	13,4141	13,5429	13,4098
A bajo, B bajo, C alto	14,6651	13,9922	14,6613	13,9886
A alto, B bajo, C alto	14,3275	14,8849	14,3221	14,8795
A bajo, B alto, C alto	14,6995	13,6144	14,6962	13,6106
A alto, B alto, C alto	13,5474	13,4141	13,5421	13,4090

### D.- ANÁLISIS DE MAGNITUD DE LOS EFECTOS.

Los signos correspondientes a los efectos principales (columnas A, B y C), se obtienen asociando un signo de más con el nivel alto y un signo de menos con el nivel bajo, los signos para las otras columnas resultan de la multiplicación de las columnas precedentes apropiadas.

**Cuadro 3.6** Cuadro de signos y análisis de Magnitud de los Efectos

Combinaciones	I	A	B	AB	C	AC	BC	ABC	Diferencia de Peso (mg)		Total	Prom.
I	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0,0022	0,0024	0,0046	0,0023
a	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,0045	0,0045	0,0090	0,0045
b	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,0023	0,0023	0,0045	0,0023
ab	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	0,0045	0,0043	0,0088	0,0044
c	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,0038	0,0036	0,0074	0,0037
ac	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0,0054	0,0055	0,0109	0,0054
bc	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	0,0033	0,0038	0,0071	0,0035
abc	1	1	1	1	1	1	1	1	0,0053	0,0052	0,0105	0,0052
											0,0626	0,0039

Para determinar el efecto principal, puede estimarse utilizando las ecuaciones anteriores; obteniendo los siguientes resultados para nuestros datos de experimento:

**Cuadro 3.7** Números de replicas para cada factor

Número de replicas	
a	2
b	2
c	2
n	2

**Cuadro 3.8** Resultado de magnitud de los efectos

Efectos	Magnitud de los Efectos
A	0,00194
B	- 0,00012
AB	- 0,00003
C	0,00112
AC	- 0,00024
BC	- 0,00006
ABC	0,00001

#### E.- ANÁLISIS DE VARIANZA:

Siendo necesario confirmar los resultados se realiza, el análisis de varianza para la clasificación bidireccional de modelo de efectos fijos, en el caso del efecto A:

$$SC_A = \frac{(\text{Contraste}_A)^2}{n2^k}$$

La fórmula de cálculo para la suma de cuadrado es:

$$S^2 = \frac{I}{2^k(n-1)} \sum_{i=1}^{2^k} \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$$

Cuadro 3.9 Análisis de Varianza del Experimento

Fuente de variación	s-cuadrados	Grados de libertad	media cuadrática	Fo
A	$1,50932 \cdot 10^{-05}$	1	$1,50932 \cdot 10^{-05}$	672,67855
B	$5,52250 \cdot 10^{-08}$	1	$5,52250 \cdot 10^{-08}$	2,46128
C	$4,99523 \cdot 10^{-06}$	1	$4,99523 \cdot 10^{-06}$	222,62841
AB	$3,60000 \cdot 10^{-09}$	1	$3,60000 \cdot 10^{-09}$	0,16045
AC	$2,20900 \cdot 10^{-07}$	1	$2,20900 \cdot 10^{-07}$	9,84513
BC	$1,69000 \cdot 10^{-08}$	1	$1,69000 \cdot 10^{-08}$	0,75320
ABC	$2,25000 \cdot 10^{-10}$	1	$2,25000 \cdot 10^{-10}$	0,01003
Error	$1,79500 \cdot 10^{-07}$	8	$2,24375 \cdot 10^{-08}$	
TOTAL	$2,05648 \cdot 10^{-05}$	15		

**RESULTADOS:**

- A partir del examen de la magnitud de los efectos, es claro que la concentración de  $HCl$  (factor A) es dominante seguido por el tiempo (factor C).
- Para confirmar la interpretación de las estimaciones del efecto, se realiza un análisis de varianza que se resume en el cuadro 3.9.

**F.- CÁLCULO DE LOS ERRORES DE LOS EFECTOS:**

Cada estimación del efecto tiene una varianza dada por:

$$V(\text{efecto}) = V \left[ \frac{\text{Contraste}}{n2^{k-1}} \right]$$

Cada contraste es una combinación lineal de  $2^k$  totales de tratamiento, y cada total consta de n observaciones. Por tanto:

$$V(\text{Contraste}) = n2^k \sigma^2$$

Y la varianza de un efecto es:

$$V(\text{efecto}) = V \left[ \frac{\text{Contraste}}{n2^{k-1}} \right] = \frac{1}{(n2^{k-1})} V(\text{Contraste})$$

$$V(\text{efecto}) = \frac{1}{(n2^{k-1})} n2^k \sigma^2$$

El error estándar estimado de un efecto se encontraría sustituyendo  $\sigma^2$  por su estimación  $S^2$  Y tomando la raíz cuadrada.

El error estándar de cada efecto estimado es:

$$e.e.(Efecto) = \sqrt{\frac{1}{n2^{k-2}} S^2}$$

**Cuadro 3.10** Resultado de la varianza y el error estándar

<b>Varianza general :</b>	
$S^2$	$2,24375 \cdot 10^{-08}$
<b>e.e. (efecto)</b>	$7,48958 \cdot 10^{-05}$

Se calcula los errores estándar de los efectos y se comparan la magnitud de éstos con el resultado. El resumen se presenta en el cuadro 3.11.

En consecuencia, los límites de la desviación estándar en las estimaciones del efecto son:

**Cuadro 3.11** Desviación estándar en las estimaciones del Efecto

<b>Efectos</b>	<b>Desviación</b>	<b>Estándar</b>
<b>A</b>	0,00194 ±	0,00015
<b>B</b>	- 0,00012 ±	0,00015
<b>C</b>	0,00112 ±	0,00015
<b>AB</b>	- 0,00003 ±	0,00015
<b>AC</b>	- 0,00024 ±	0,00015
<b>BC</b>	- 0,00006 ±	0,00015
<b>ABC</b>	0,00001 ±	0,00015

### G.- GRÁFICA DE PROBABILIDAD NORMAL DE LOS EFECTOS:

La gráfica de probabilidad normal permite evaluar la importancia de los efectos; para ello, se calcula la probabilidad de los efectos para cada punto de las estimaciones, esto se da ordenando primero los efectos de forma creciente (de menor a mayor), donde  $j=1,2, 3...$  (En ese orden) y  $n = 7$  (número de efectos), el cuadro 3.12 muestra los resultados:

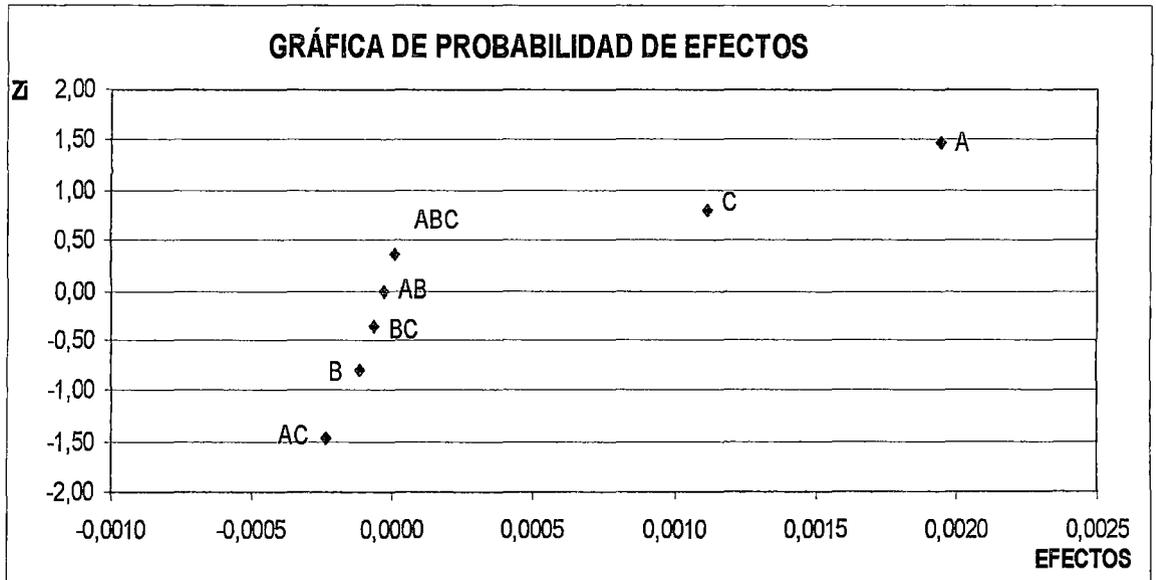
**Cuadro 3.12** La probabilidad de los efectos para cada punto estimado

Efecto	Magnitud	$(j-0.5)/n$	Zi
AC	- 0,000235	0,0714	-1,46
B	- 0,000118	0,2143	-0,79
BC	- 0,000065	0,3571	-0,36
AB	- 0,000030	0,5000	0
ABC	0,000008	0,6429	0,37
C	0,001118	0,7857	0,79
A	0,001943	0,9286	1,46

Para el cálculo de los errores estándar de los efectos, los intervalos de confianza son de aproximadamente 95%.

### RESULTADOS:

- Los intervalos de confianza del cuadro 3.11, nos indica que los efectos principales A y C son importantes así como la interacción AC, pero que los otros no lo son, dado que los intervalos para todos los efectos excepto A, C y AC incluyen el cero.
- Para la evaluación de la significación de los factores en un experimento  $2^k$ , se gráfica la probabilidad normal de las estimaciones de los efectos. Aquellos efectos que no caen sobre la línea recta son factores significativos.
- Si ninguno de los efectos fuera significativo, las estimaciones se comportarán como una muestra aleatoria extraída de una distribución normal con media cero, sin embargo, de la figura de probabilidad normal de las estimaciones del efecto (figura 3.4); se observa claramente que los efectos principales A y C son significativos ya que caen lejos de la línea que pasa a través de los otros puntos; mientras que el efectos AC muestran una leve desviación de la línea.



**Figura 3.4** Probabilidad de los Efectos

#### H.- ANÁLISIS RESIDUAL:

Consideremos para los tres efectos más significativos que son A, C y la interacción AC según los análisis anteriores, el modelo de regresión utilizado empieza con:

Promedio de los datos viene a hacer el  $B_0$ : 0,0039 que se encuentra en el cuadro 3.13; para la siguiente ecuación de regresión lineal:

$$\hat{y} = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_{12} X_1 X_2$$

**Cuadro 3.13** valores para cada constante de la ecuación de regresión lineal

$B_0$ promedio	0,0391500
$B_1 = (A/2)$	0,0009713
$B_2 = (C/2)$	0,0005588
$B_{12} = (AC/2)$	-0,0001175

Y	$B_0$	$B_1$	$B_2$	$B_{12}$
	0,0039	0,000972	0,000559	-0,000118

Al reemplazar los valores en la ecuación, tendremos la siguiente expresión:

$$\tilde{y} = 0,0039 + (0,000972)x_1 + (0,000559)x_2 + (-0,000118)x_1x_2$$

Y los valores predichos se obtendrán mediante la sustracción de los niveles bajo y alto de A y B en esta ecuación.

Para una combinación de tratamiento donde A, B y C están todas en el nivel bajo, el valor predicho es:

$$\tilde{y} = 0,0039 + (0,000972)(-1) + (0,000559)(-1) + (-0,000118)(-1)(-1)$$

$$\tilde{y} = 0,002267$$

Los valores observados en esta ejecución son 0,0022 y 0,00225; por lo que los residuos son  $0,0022 - 0,002267 = -0,000067$  y  $0,00235 - 0,002267 = 0,000083$ .

Los residuos para las otras ocho ejecuciones se obtienen de manera similar.

Como ya se ha mencionado utilizando la probabilidad normal para evaluar la importancia de los efectos; para ello, se calcula la probabilidad de los efectos para cada punto de las estimaciones, esto se da ordenando primero los efectos de forma creciente (de menor a mayor), donde  $j=1,2, 3\dots$  (en ese orden) y  $n = 16$  (numero de efectos), obteniendo los siguientes resultados.

**Cuadro 3.14** Análisis Residual del Experimento

Efectos		E	Reordenando e	$(j-0.5)/n$	Zi
A y B bajos , C bajo	e1	- 0,0000675	- 0,0003200	0,03125	-1,86
A y B bajos , C bajo	e2	0,0000825	- 0,0001775	0,09375	-1,32
A y B bajos , C alto	e3	- 0,0000175	- 0,0001450	0,15625	-1,01
A y B bajos , C alto	e4	0,0000025	- 0,0000675	0,21875	-0,78
A bajos, B alto , C bajo	e5	0,0001800	- 0,0000275	0,28125	-0,58
A bajos, B alto , C bajo	e6	- 0,0000200	- 0,0000200	0,34375	-0,4
A altos , B bajo , C bajo	e7	- 0,0003200	- 0,0000175	0,40625	-0,24
A altos , B bajo , C bajo	e8	0,0001600	0,0000025	0,46875	-0,08
A y B altos, C alto	e9	0,0000650	0,0000250	0,53125	0,08
A y B altos, C alto	e10	0,0000250	0,0000550	0,59375	0,24
A y B altos, C bajo	e11	0,0000550	0,0000650	0,65625	0,4
A y B altos, C bajo	e12	- 0,0001450	0,0000825	0,71875	0,58
A altos, B bajo, C alto	e13	- 0,0000275	0,0000825	0,78125	0,78
A altos, B bajo, C alto	e14	- 0,0001775	0,0001225	0,84375	1,01
A bajo, B alto y C alto	e15	0,0000825	0,0001600	0,90625	1,32
A bajo, B alto y C alto	e16	0,0001225	0,0001800	0,96875	1,86

De los datos obtenidos en el cuadro 3.14, se construye la figura probabilidad normal (figura 3.5) para el análisis residual.

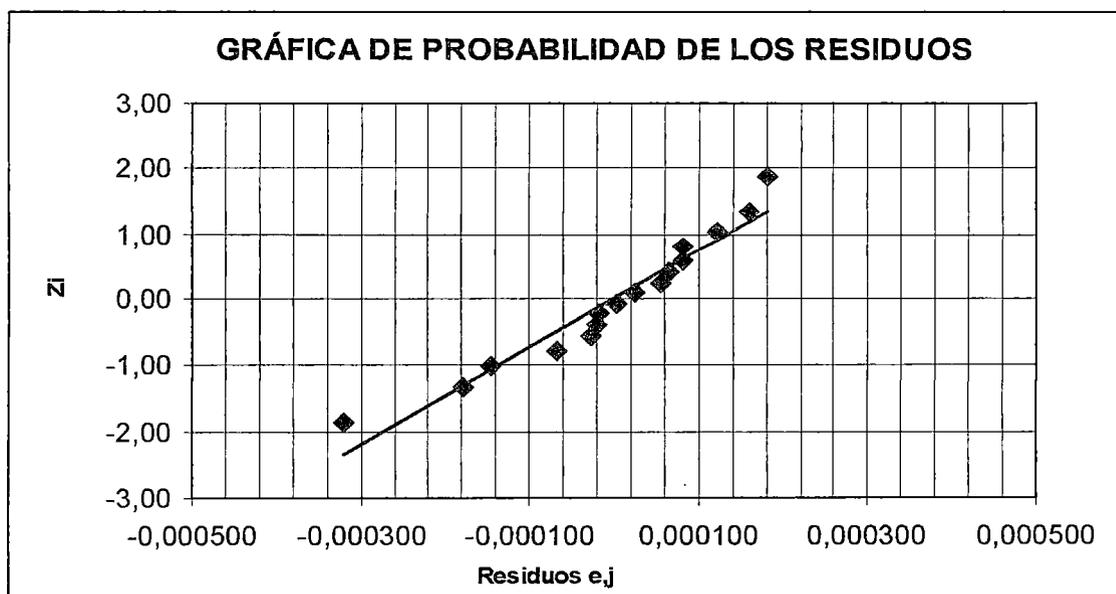


Figura 3.5 Probabilidad de los Residuos

#### RESULTADO:

- Puesto que los errores graficados caen aproximadamente a lo largo de una línea recta; no sospechamos anomalía alguna de importancia en los datos y tampoco hay señales de aislamiento severos, se concluye que la figura es satisfactoria.

#### 3.2.2 DETERMINACIÓN DE LAS PRINCIPALES VARIABLES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE DECAPADO.

Los factores más importantes que influyen al momento de mantener el baño de decapado son: concentración de ácido, temperatura del baño y duración del tratamiento, suelen añadirse inhibidores al baño de decapado, para que no se produzca el ataque del ácido a su superficie del metal (sobredcapado).

Al no ser recomendable utilizar temperaturas altas cuando se trabaja con  $HCl$ , no solo por la emisión de gases tóxicos, sino porque a temperatura ambiente se consiguen buenos resultados siendo innecesario el gasto que involucra elevar la temperatura, no se considera la variable temperatura en el proceso de decapado, se trabaja a temperatura ambiente.

Además, se ha comprobado en la práctica que la velocidad de decapado con  $HCl$ , se incrementa más con elevadas concentraciones de ácido que con una elevación de la temperatura.

*Se debe tener en cuenta que normalmente los inhibidores pierden su eficacia al elevar la temperatura del medio, además cada inhibidor utilizado tiene ciertas condiciones de operación ya que puede variar su comportamiento con la temperatura, disminuyendo su efecto inhibidor.*

En el diseño de experimentos, se considera tres variables, concentración de ácido, concentración de inhibidor y tiempo del tratamiento.

De los resultados obtenidos en el diseño de experimentos, las variables que *influyen significativamente en el proceso de decapado son la concentración de ácido y el tiempo de tratamiento.*

La concentración de ácido es un factor importante por lo que se debe controlar, si bien altas concentraciones de ácido la velocidad de reacción de decapado aumenta, suele darse un ataque al metal base y se utiliza grandes cantidades de ácido, pero a la vez si se trabaja a bajas concentraciones de ácido clorhídrico, el tiempo de decapado es mayor por lo que se debe realizar una gestión óptima de la acidez del baño, según los resultados que se desee obtener.

El inhibidor utilizado en el baño de decapado, es con el objetivo de proteger la capa base del metal luego de eliminado los óxidos de la superficie, mas no debe intervenir en el proceso disminuyendo la velocidad de decapado, luego de eliminar los óxidos, la placa no debería perder peso de manera significativa, es por esto que la pérdida de peso no varía con el tiempo.

Si el inhibidor disminuye la velocidad de decapado implica mayor tiempo de decapado lo cual no es conveniente para los procesos, se debe determina la cantidad a utilizar por cuestiones económicas ya que evita un consumo excesivo de ácido y permite maximizar el consumo de ácido manteniendo una solución más limpia para poder usarse en posteriores decapados, mas no por intervenir significativamente en el sistema.

### 3.2.3 EXPERIMENTOS PARA ESTABLECER LA CALIDAD DEL INHIBIDOR.

El estudio de la inhibición puede afrontarse con dos finalidades diferentes: El conocimiento de su eficiencia protectora o el de su mecanismo de actuación.

Los métodos utilizados para comprobar la eficacia de los inhibidores son todos los usuales para la evaluación de los fenómenos de corrosión.

La eficacia con que actúa un inhibidor,  $\xi_{\%}$ , se expresa mediante un valor numérico que se define de la siguiente manera:

$$\xi_{\%} = \frac{A_o - A_i}{A_o} * 100\%$$

Según el método de medida elegido, alguno de los cuales se usará en el presente trabajo,  $A_o$  representa la pérdida de masa, la cantidad de hidrógeno formado, la intensidad de corriente de corrosión del metal inmerso, durante un cierto tiempo, o la velocidad de corrosión en la disolución libre de inhibidor y  $A_i$ , la magnitud correspondiente cuando la disolución contiene el inhibidor de corrosión.

Se emplearán los métodos gravimétrico, electroquímico y de impedancia electroquímica:

Método gravimétrico.- se basa principalmente en las Normas ASTM G31 y ASTM G1 para la determinación de velocidades de corrosión y eficacia del inhibidor.

Método electroquímico.- se basa principalmente en la Norma ASTM G 61 para la obtención de curvas de polarización en el método potenciodinámico y la Norma ASTM G 59 para la realización de medidas potenciodinámicas de resistencia de polarización; que permitirán: (i) medir velocidades de corrosión y (ii) establecer el tipo de inhibición que realiza, es decir si es un inhibidor anódico, catódico o mixto.

Método de Impedancia Electroquímica.- Está basado principalmente en la Norma ASTM G 106 y permitirá establecer características de actuación del inhibidor relacionados con su mecanismo.

Para el estudio de Aloe Vera como inhibidor de corrosión, se desarrollan pruebas comparativas que permitan comprobar su efectividad para proteger la capa base del metal evitando un sobredecapado, sin disminuir la velocidad de decapado ni la capacidad del ácido clorhídrico de eliminar los óxidos del metal.

Cuadro 3.15 Métodos electroquímicos a emplear para el estudio de Alóe Vera

MÉTODO	OBJETIVO	SISTEMA
MÉTODO GRAVIMÉTRICO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para determinar la eficacia del inhibidor en la protección del metal base.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para Alóe Vera.</li> <li>• Para Urotropina.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para determinar su influencia en el ataque a los productos de corrosión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para Alóe Vera.</li> <li>• Para urotropina.</li> <li>• Para Tenso quat CI 44.</li> <li>• Para Kleen AC 9504.</li> </ul>
<p>MÉTODO ELECTROQUÍMICO</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtención de curvas de polarización con y sin inhibidor de Alóe Vera.</li> <li>• Obtención de la resistencia de polarización (Rp)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para determinar tipo de actuación del inhibidor.</li> <li>• Para medir la velocidad de corrosión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para Alóe Vera.</li> </ul>
<p>MÉTODO DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Obtención del diagrama de impedancia.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para determinar las características del mecanismo de actuación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para Alóe Vera.</li> </ul>

## **A.- ENSAYOS EXPERIMENTALES:**

### **A.1 MÉTODO GRAVIMÉTRICO.**

#### **i.- EQUIPOS Y MATERIALES:**

Los principales equipos y materiales utilizados en el experimento para el análisis de Alóe Vera como inhibidor de la corrosión, mediante el método gravimétrico son los siguientes:

- Balanza de precisión SARTORIUS TE 2145  $\pm$  0,1 mg
- Secadora manual de 1200 W
- Placas de acero (5 cm x 2,5 cm)
- Vasos pírrex de 250 mL, 300 mL, 500 mL
- Probetas de 50 mL, 100 mL, 500 mL
- Pipeta de 1 mL
- Bagueta
- Piceta
- Papel Tisú

#### **Reactivos:**

- Ácido clorhídrico (37,3 %)
- Inhibidor Kleen AC 9504
- Inhibidor Tenso quat CI 44
- Inhibidor Urotropina
- Gel Alóe Vera
- Polvo de Alóe Vera
- Alcohol
- Agua destilada
- Agua potable

#### **ii.- PROCEDIMIENTOS:**

##### **a.- Pruebas de protección a la capa base del metal**

Los análisis gravimétricos se realizan en placas de acero de dimensiones 2,5 cm x 5 cm previo a cada experimento, las placas se lijan hasta el acabado de lija 1000, desengrasados y enjuagados con agua destilada para eliminar las

impurezas adheridas, luego secados totalmente y se procede a pesarlos en una balanza analítica (precisión  $\pm 0,1\text{mg}$ ), registrando el peso como inicial.

Las soluciones de prueba consisten de  $HCl$  al 3 %, 7 % y 10 % en ausencia (solución blanco) y en presencia del gel líquido extraído de la hoja de sábila, para cada concentración de ácido se utilizan concentraciones de 5 %, 15 %, 25 % y 40 % de Alóe Vera.

Las pruebas gravimétricas se realizan a 23 °C, las placas se sumergen en un volumen de solución de 100 mL de  $HCl$  por un minuto, luego de cada minuto, se lavan en una corriente de agua, se secan inmediatamente con aire frío y se procede al pesado usando una balanza analítica, este procedimiento se repite durante 15 minutos para cada cupón.

El mismo procedimiento se realiza para la pruebas en solución de  $HCl$  10 % utilizando como inhibidor urotropina a concentraciones de 0,56 g/L y 0,2 g/L, los resultados se comparan con el gel de Alóe Vera.

El peso perdido de las placas empleadas es el promedio de dos medidas realizadas en cada prueba.

La velocidad de corrosión que se reporta es el promedio de tres pruebas realizadas a las mismas condiciones de concentración de ácido, tiempos y concentración de inhibidor.

#### **b.- Pruebas de ataque a productos de corrosión**

Se realizan ensayos gravimétricos donde se obtienen medidas al comienzo del ensayo y al cabo de 90 minutos de experimentación, para ello se utilizan placas de acero de dimensiones 2,5 cm x 5 cm sin lijar, en cuya superficie se observa productos de corrosión, las placas se lavan para eliminar las impurezas adheridas, luego se secan totalmente y se procede a pesarlas en una balanza analítica (precisión  $\pm 0,1\text{ mg}$ ), registrando el peso como inicial.

Para eliminar los productos de corrosión se utiliza ácido clorhídrico al 10 % y 20 % ya que son las concentraciones que frecuentemente se utilizan en la industria de decapado para la limpieza de superficies metálicas. Las pruebas se realizan en ausencia (solución blanco) y en presencia del polvo de Alóe Vera como inhibidor al 15 % (0,83 g/L).

Las pruebas gravimétricas se realizan a 23 °C, las placas se sumergen en un volumen de solución de 100 mL de  $HCl$  por 15 minutos, luego de los cuales se lavan en una corriente de agua, se secan inmediatamente con aire frío y se procede al pesado usando una balanza analítica, este procedimiento se repite durante 90 minutos para cada cupón.

El mismo procedimiento se realiza para las pruebas comparativas utilizando inhibidores industriales como Tenso quat Cl 44 y Kleen AC 9504, ambos a una concentración de 0,1 % de la solución, y Urotropina al 0,2 g/L, los resultados fueron comparados con el del polvo de Alóe Vera.

Todos los ensayos se realizan por triplicado. Así, los valores reportados son el promedio del valor de tres probetas ensayadas en condiciones experimentales aparentemente idénticas.

### iii.- RESULTADOS:

#### EVALUACIÓN DE LOS INHIBIDORES:

La pérdida de peso de las placas metálicas, es determinada en ausencia y presencia del inhibidor de corrosión de Alóe Vera en una solución de al 3 %, 7 % y 10 % a 23 °C, por un tiempo de 15 minutos.

La velocidad de corrosión se calculada de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V_{corr} = \frac{(3,45 * 10^6 * W)}{AtP}$$

Donde:

$V_{corr}$  : Velocidad de corrosión (mpy < > milipulgadas por año)

$W$  : pérdida de peso (g)

$P$  : densidad del espécimen metálico (g/cm<sup>3</sup>)

$A$  : área del cupón (cm)

$t$  : tiempo de prueba (h)

Los valores calculados se muestran en el cuadro 3.16.

**Cuadro 3.16** Variación de la velocidad de corrosión a partir de diferentes concentraciones de ácido clorhídrico.

Concentración de alóe (%)	0%	5%	15%	25%	40%
Concentración de alóe (ppm)	0	250	830	1620	3250
Concentración de ácido clorhídrico	<b>Velocidad de Corrosión (mpy)</b>				
3%	120	89	76	63	43
7%	316	236	210	165	125
10%	431	342	305	241	173

La eficiencia de los inhibidores ( $E_{\%}$ ) se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$E_{\%} = \frac{(W_0 - W_i)}{W_0} * 100\%$$

Donde:

$W_0$  : peso perdido sin inhibidor (g/min)

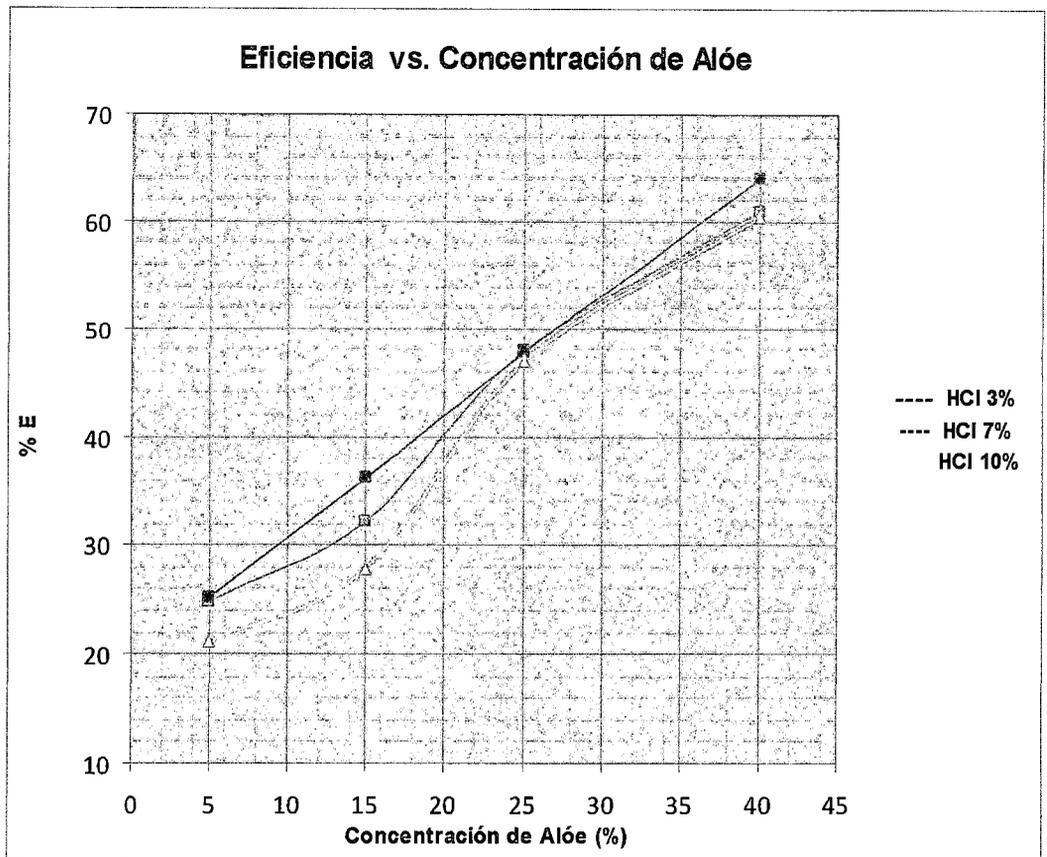
$W_i$  : peso perdido con inhibidor (g/min)

En el cuadro 3.18 se reportan las eficiencias del inhibidor a diferentes concentraciones de Alóe Vera, para una solución de  $HCl$  al 3 %, 7 % y 10 %.

**Cuadro 3.17** Eficiencias de los inhibidores a diferentes concentraciones de ácido

Gel de Alóe (%vol)	0%	5%	15%	25%	40%				
Concentración del gel Alóe	0 g/L	50 g/L	165 g/L	320 g/L	650 g/L				
Concentración de $HCl$	$W_0$ (g/min)	$W_1$ (g/min)	%E1	$W_2$ (g/min)	% E2	$W_3$ (g/min)	% E3	$W_4$ (g/min)	% E4
3 % (0.86 M)	$1,47 * 10^{-4}$	$1,10 * 10^{-4}$	25,17	$0,94 * 10^{-4}$	36,05	$0,77 * 10^{-4}$	47,62	$0,53 * 10^{-4}$	63,95
7 % (2.01 M)	$3,32 * 10^{-4}$	$2,50 * 10^{-4}$	24,70	$2,25 * 10^{-4}$	32,23	$1,73 * 10^{-4}$	47,89	$1,30 * 10^{-4}$	60,84
10 % (2.87 M)	$4,32 * 10^{-4}$	$3,41 * 10^{-4}$	21,08	$3,12 * 10^{-4}$	27,78	$2,29 * 10^{-4}$	46,99	$1,71 * 10^{-4}$	60,42

La figura 3.6 muestra la eficiencia ( $E_{\%}$ ) respecto la concentración de Alóe Vera, estos gráficos revelan que la  $E_{\%}$  se incrementa con el aumento de la concentración del inhibidor, la máxima eficiencia de 63,95 % corresponde a una concentración 40 % del inhibidor en solución de  $HCl$  al 3 %.



**Figura 3.6** Variación de eficiencia del Alóe Vera a diferentes concentraciones de *HCl*

Para soluciones de 3 % *HCl*, se observa que la eficiencia se incrementa de forma casi lineal con el aumento de inhibidor de Alóe Vera, mientras que para soluciones de 7 % y 10 % de *HCl*, se aprecia un incremento considerable en la eficiencia a partir de 15 % de alóe, en ambas soluciones.

### INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN DE ÁCIDO EN EL SISTEMA

La velocidad de la reacción de decapado aumenta en función de la concentración de ácido clorhídrico en la solución. Es así que a alta concentración de ácido (mayores a 10 %  $HCl$ ) el decapado es rápido pero suele darse un ataque al material base cuando no se controla el tiempo del tratamiento, Por debajo de los 10 % de ácido clorhídrico, el tiempo de decapado es mayor pero el acabado puede ser controlado y permite menos gasto de ácido. La figura 3.7 muestra los resultados de las velocidades de corrosión del inhibidor de Alóe Vera a diferentes concentraciones de solución ácida. Se observa que la velocidad de corrosión aumenta considerablemente con la concentración de ácido, así mismo, disminuye con el incremento de la concentración del inhibidor.

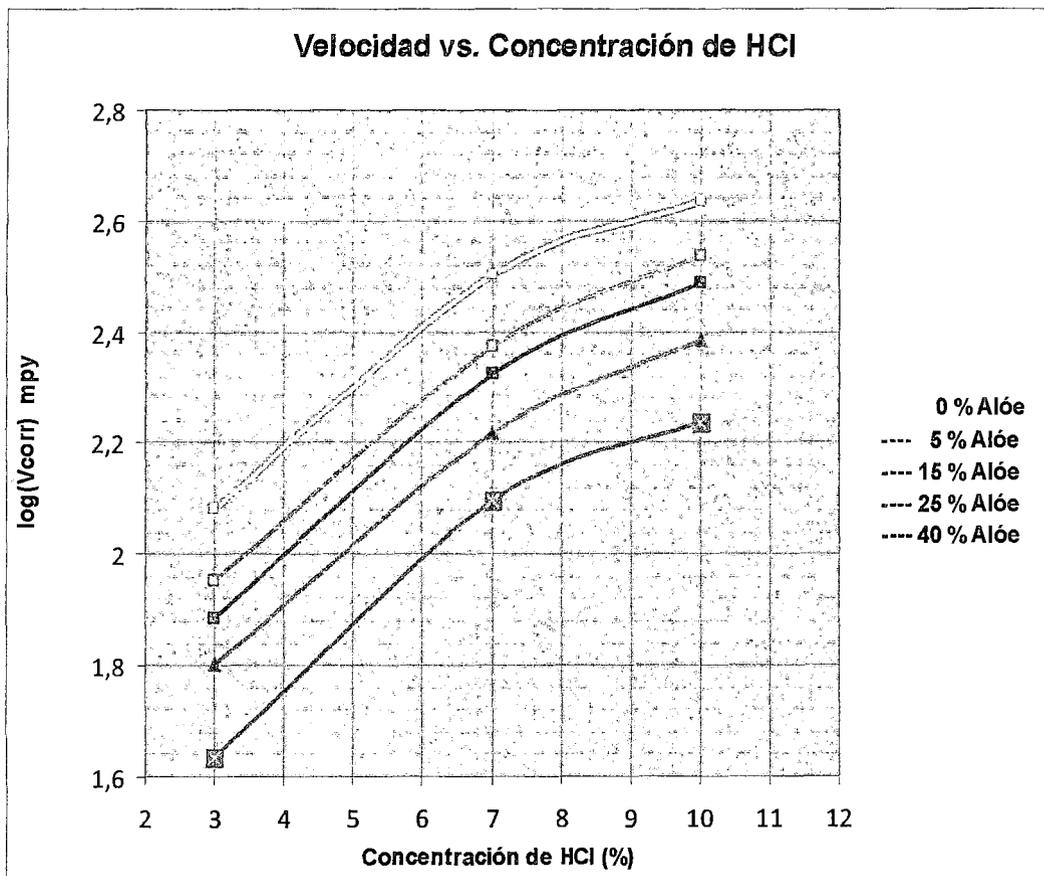
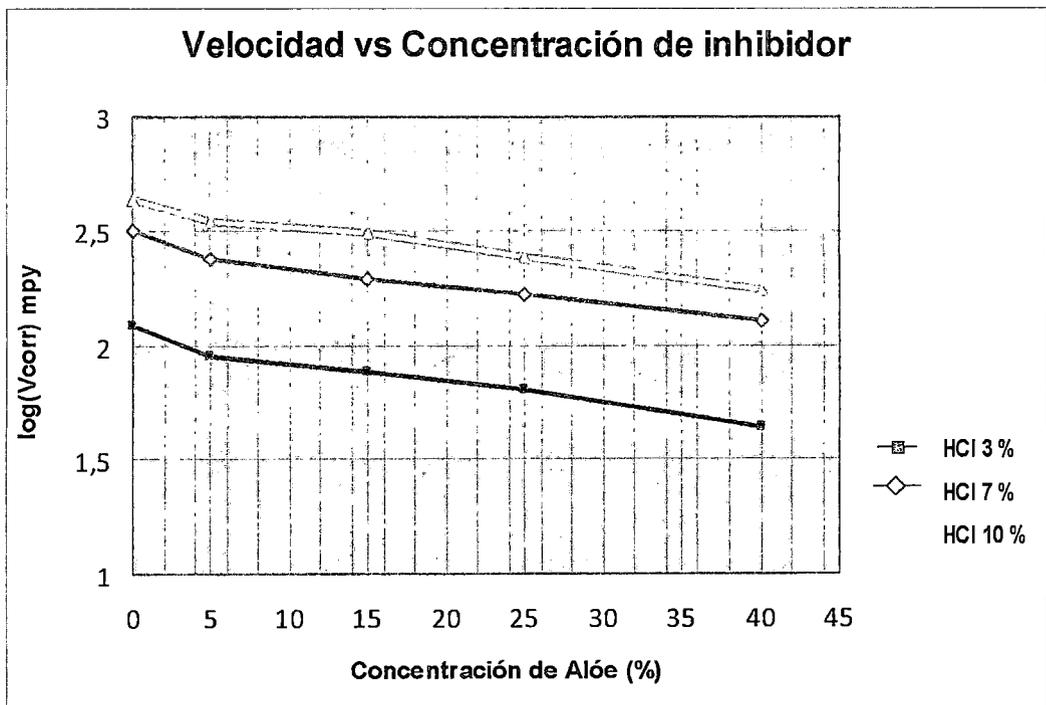


Figura 3.7 Variación de la velocidad de corrosión con la concentración de  $HCl$

### INFLUENCIA DE LA CONCENTRACIÓN ALÓE VERA EN EL SISTEMA

El uso de inhibidores añadidos a la solución de decapado permite maximizar el consumo de ácido, a mayor concentración de inhibidor mayor protección de la superficie del metal, por lo tanto disminuye la pérdida de peso de las piezas decapadas, manteniendo una solución más limpia para poder usarse en posteriores decapados.

En la figura 3.8 se observa que la velocidad de corrosión disminuye con el incremento de la concentración del inhibidor.



**Figura 3.8** Variación de la velocidad de corrosión a diferentes concentraciones de Alóe Vera

De las pruebas previas observamos el comportamiento del inhibidor a diferentes concentraciones de ácido, lo que permite establecer las condiciones aceptables para realizar pruebas comparativas con otros inhibidores; éstas pruebas se realizan con una solución de 10 % de  $HCl$ , y según las eficiencias obtenidas con 15 % de inhibidor de Alóe Vera.

## EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL ALÓE VERA PARA PROTEGER LA CAPA BASE.

- Comparación de las eficiencias del Gel de Alóe Vera con Urotropina para proteger la capa base.

Una de las características de un inhibidor eficiente es que luego de eliminarse los óxidos de la superficie, el inhibidor protege la capa base del metal, evitando el ataque del ácido a su superficie y disminuyendo la pérdida de peso del metal.

Se realizan pruebas comparativas usando el método gravimétrico con y sin inhibidor de Alóe Vera en placas previamente lijadas para eliminar los productos de corrosión y capa de laminación presentes en el metal, y obtener su forma de actuación en la capa base del metal libre de óxidos.

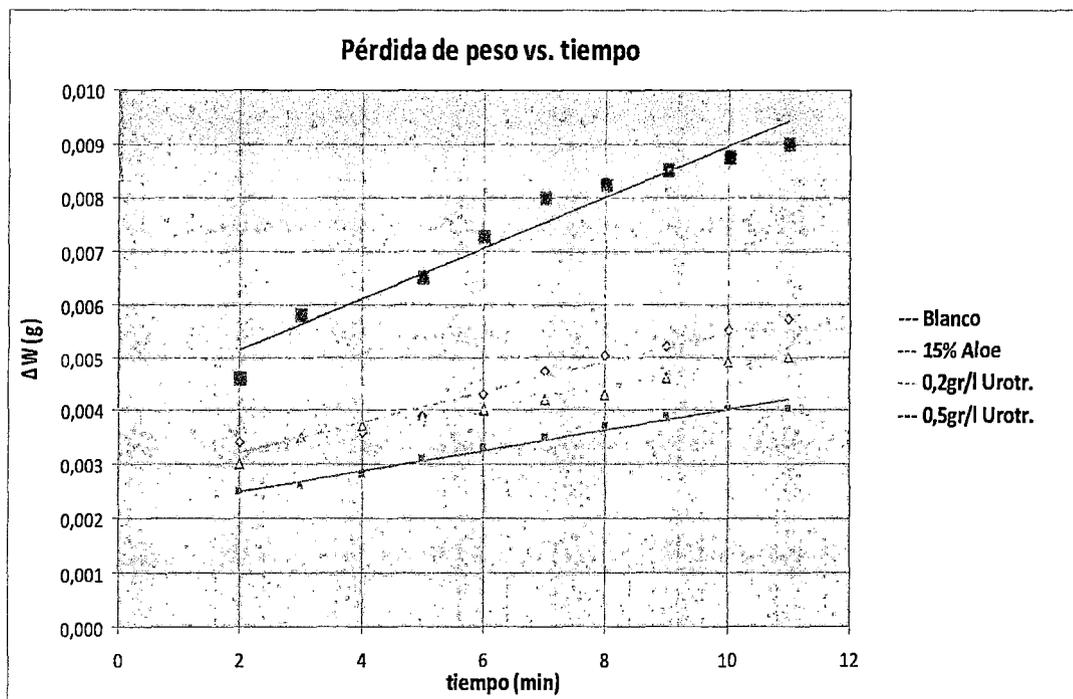
El nivel de protección del gel Alóe Vera se compara con el inhibidor a base de urotropina usado en la industria con  $HCl$ .

**Cuadro 3.18** Comparación de eficiencias con inhibidor Urotropina

Concentración de $HCl$	Concentración Gel de Alóe Vera										Urotropina				
	0%		5% (50 g/L)			15% (165 g/L)		25% (320 g/L)		40% (650 g/L)		0,56 g/L		0,2 g/L	
	$W_0$ (g/min)	$W_1$ (g/min)	% E1	$W_2$ (g/min)	% E2	$W_3$ (g/min)	% E3	$W_4$ (g/min)	% E4	$W_5$ (g/min)	% E5	$W_6$ (g/min)	%		
10 % (2.87 M)	$4,32 \cdot 10^{-4}$	$3,41 \cdot 10^{-4}$	21,08	$3,12 \cdot 10^{-4}$	27,78	$2,29 \cdot 10^{-4}$	46,99	$1,71 \cdot 10^{-4}$	60,42	$2,06 \cdot 10^{-4}$	52,53	$3,06 \cdot 10^{-4}$	29		

Los resultados del cuadro 3.18, sugieren que estos inhibidores retardan la disolución del metal, el proceso inhibitorio se atribuye a la adsorción de estas moléculas en la interfase metal/solución ácida.

A mayor concentración de Alóe Vera, se observa que ofrece una mayor protección a la capa base, de los resultados comparativos, se tiene que la eficiencia de 15 % de gel de alóe, equivale aproximadamente a 0,2 g/L de urotropina en la solución al 10 % de  $HCl$ .



**Figura 3.9** Comparación de pérdida de peso para inhibidor de Urotropina y Alóe Vera

Según la figura 3.9, se observa claramente una disminución de la pendiente de las soluciones con Urotropina y Alóe Vera, comparado con la solución blanco ( $HCl$  10 %).

#### EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL ATAQUE A LOS PRODUCTOS DE CORROSIÓN:

- **Comparación de Eficiencias del Gel de Alóe Vera con Urotropina para eliminar los productos de corrosión.**

Luego de demostrar que el Alóe Vera actúa como inhibidor de corrosión en medio ácido protegiendo la capa base del metal; se evalúa su efecto sobre los productos de corrosión y capa de laminación.

Para una solución de 10 %  $HCl$ , se comparan las eficiencias de inhibición del gel de Alóe Vera al 15 % con 0,2 g/L urotropina, actuando sobre los productos de corrosión presentes en la superficie de las placas sin lijar, se mide la pérdida

de peso de las placas cada 15 min de sumergidas en la solución ácida, los resultados se muestran en el cuadro 3.19.

**Cuadro 3.19** Comparación de eficiencias de los inhibidores de Alóe Vera y Urotropina

Concentración de <i>HCl</i>	Concentración Gel de Alóe Vera			Urotropina	
	0 %	15 % (165 g/L)		0,2 g/L	
	$W_o$ (g/min)	$W_1$ (g/min)	%E1	$W_2$ (g/min)	%E2
10% (2,87 M)	$0,78 \cdot 10^{-4}$	$0,46 \cdot 10^{-4}$	40,64	$0,49 \cdot 10^{-4}$	35,48

Si bien la urotropina, brinda una buena protección a la capa base, se observa que el gel de Alóe Vera es más eficiente al momento de eliminar los productos de corrosión de la superficie del metal que la urotropina.

- **Comparación de Eficiencias del Gel y Polvo de Alóe Vera.**

Se convierte el gel de Alóe Vera en polvo para una mejor aplicación a nivel industrial así como para su mejor conservación (ver 3.1.3), las pruebas se realizan en una solución de 10 % de *HCl*; el objetivo es verificar la aplicación del Alóe Vera en polvo como inhibidor de la corrosión.

La parte sólida del gel de Alóe Vera representa aproximadamente el 0,5 % del peso total del gel, lo demás está compuesto por agua, por lo que de los 165 g/L solo 0,083 g/L representa el peso del polvo de Alóe Vera que vamos a utilizar para comparar las eficiencias, las pruebas se realizan en placas sin lijar. Los resultados se muestran en el cuadro 3.20.

**Cuadro 3.20** Comparación de Eficiencias del gel de Alóe Vera y el Polvo de Alóe Vera

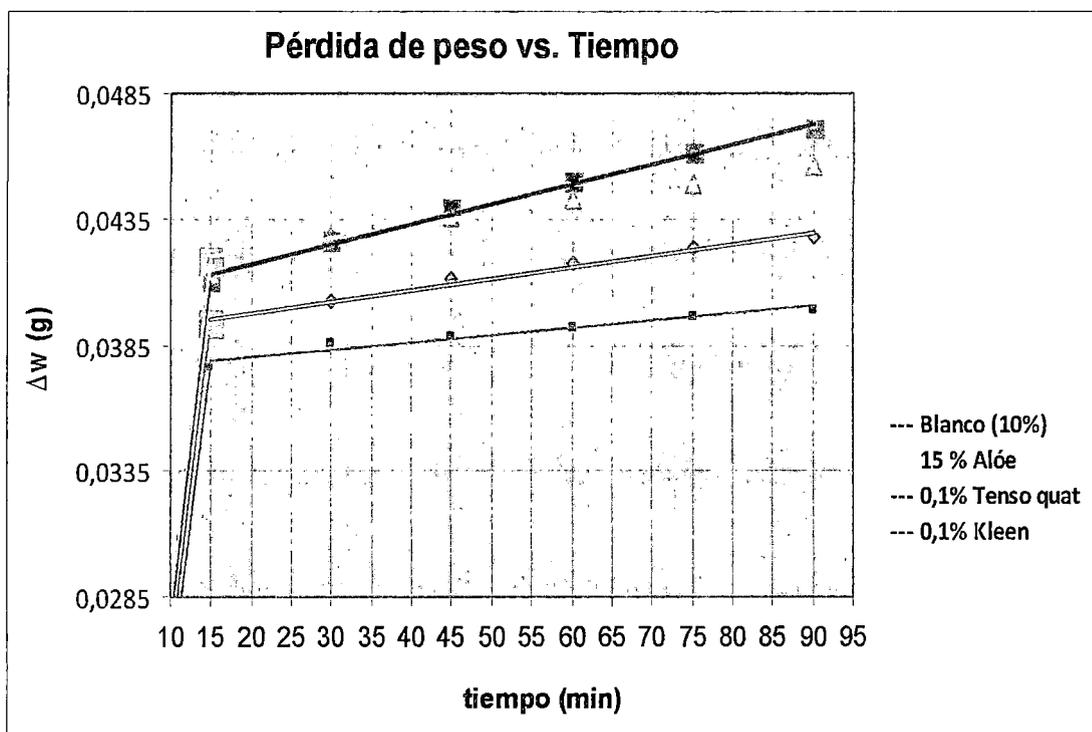
Concentración de <i>HCl</i>	Concentración Gel de Alóe Vera			Polvo de Alóe Vera	
	0 %	15% (165 g/L)		0,083 g/L	
	$W_o$ (g/min)	$W_1$ (g/min)	%E1	$W_2$ (g/min)	%E2
10% (2,87 M)	$0,78 \cdot 10^{-4}$	$0,46 \cdot 10^{-4}$	40,64	$0,47 \cdot 10^{-4}$	39,35

Se observa que el gel de Alóe Vera presenta 40,64 % de eficiencia mientras que el polvo de Alóe Vera 39,35 % de eficiencia, con lo cual se comprueba que al convertir el gel de Alóe Vera en polvo, no pierde sus propiedades como inhibidor de la corrosión en medio ácido.

- **Comparación de Eficiencias del Polvo de Alóe Vera con otros inhibidores utilizados a Nivel Industrial.**

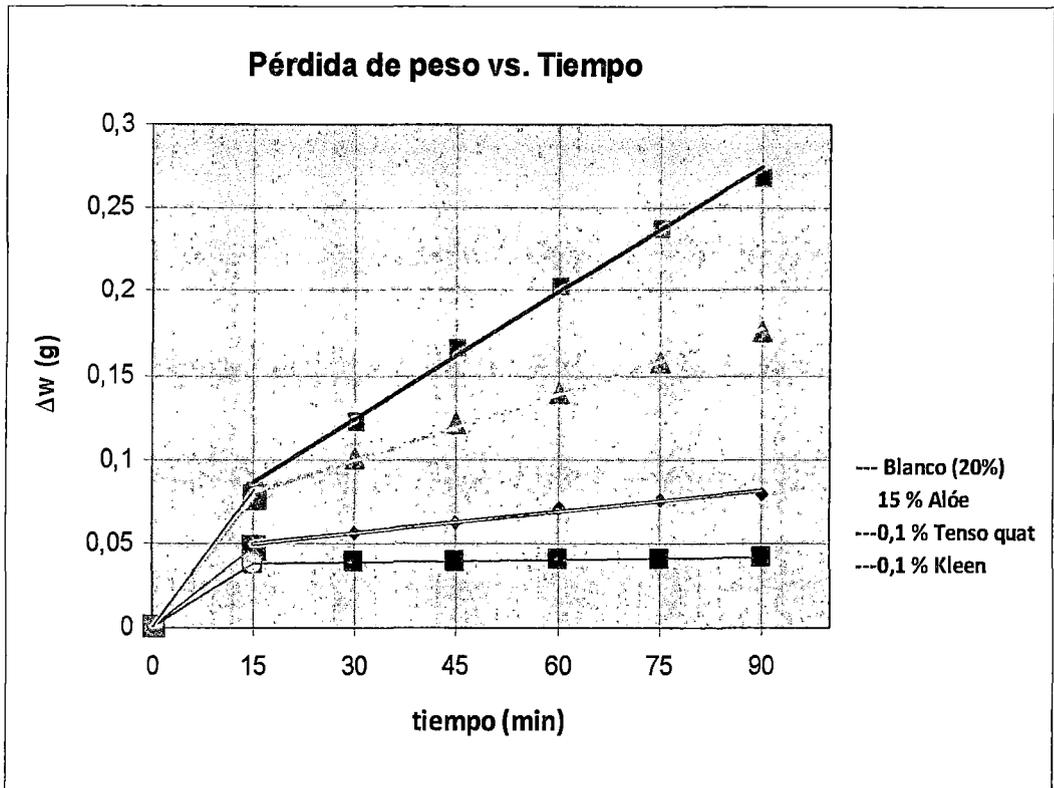
Para comprobar que el polvo de Alóe Vera no disminuye la velocidad de decapado al inicio del proceso sino que permite un buen ataque a los productos de corrosión, y luego de eliminar los óxidos, proteja la capa base, se realizan pruebas usando el método gravimétrico con y sin Alóe Vera a placas oxidadas sin lijar. Las pruebas se realizan en condiciones utilizadas a nivel industrial, por lo que se utiliza el polvo de Alóe Vera como inhibidor de corrosión para el estudio del comportamiento como inhibidor en todo el proceso de decapado, no solo al eliminar los óxidos y productos de corrosión, sino además el nivel de protección a la capa base del metal.

Los resultados se comparan con el comportamiento de los inhibidores comerciales Kleen AC 9504 y Tenso quat Cl 44 usados actualmente en la industria de decapado.



**Figura 3.10** Comparación del Alóe Vera con inhibidores comerciales en  $HCl$

10 %



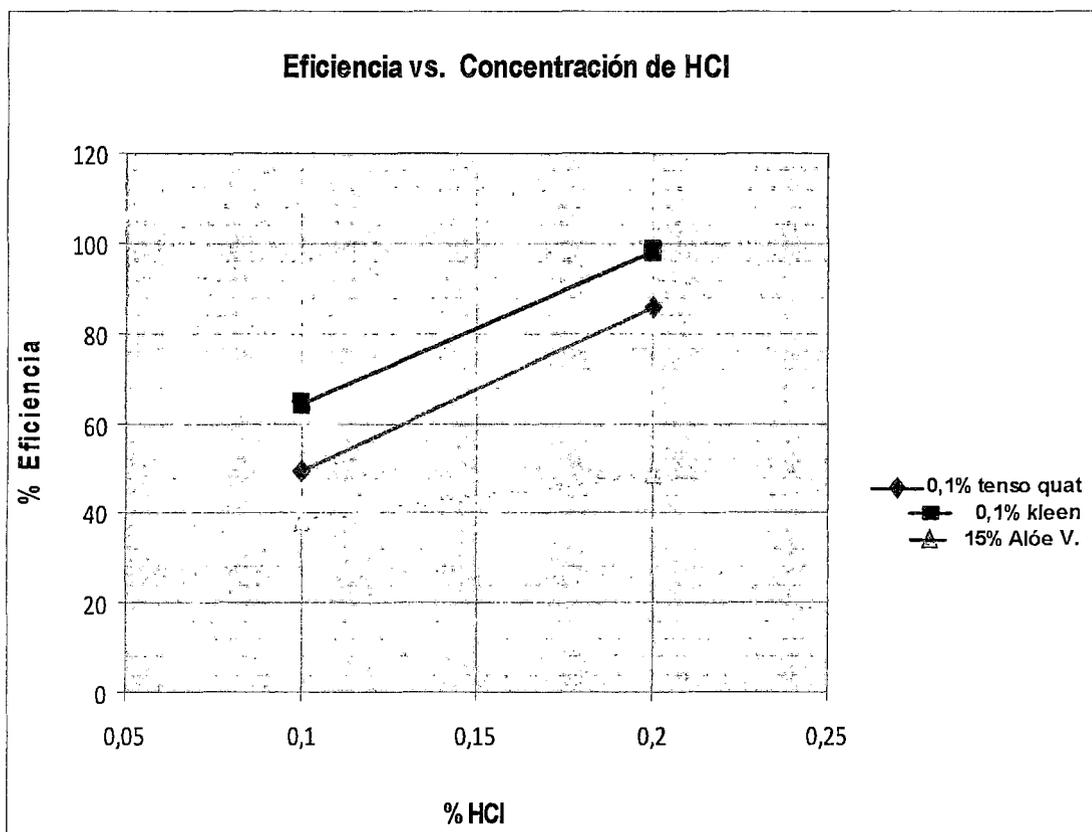
**Figura 3.11** Comparación del Alóe Vera con inhibidores comerciales  
en  $HCl$  20 %

Se observa que la velocidad de corrosión es elevada los primero 15 minutos que corresponden a la eliminación de óxidos, luego se observa una disminución notable de la pendiente, confirmando que el polvo de Alóe Vera, luego de eliminar los productos de corrosión de la superficie, protege la capa base.

Su eficiencia se muestra en el cuadro 3.21, comparada con inhibidores comerciales.

**Cuadro 3.21** Comparación de eficiencias del Polvo de Alóe Vera con inhibidores comerciales

concentración de <i>HCl</i>	SIN INHIBIDOR	TENSO QUAT CI44		KLEEN AC 9504		POLVO DE ALÓE VERA	
	0 %	0,1 % v/v		0,1 % v/v		15 % (0,83 g/L)	
	$W_0$ (g/min)	$W_1$ (g/min)	%E1	$W_2$ (g/min)	%E2	$W_2$ (g/min)	%E2
10 % (2,87 M)	$0,78 \cdot 10^{-4}$	$0,39 \cdot 10^{-4}$	49,25	$0,28 \cdot 10^{-4}$	63,87	$0,47 \cdot 10^{-4}$	39,35
20 % (5,74 M)	$20,07 \cdot 10^{-4}$	$2,89 \cdot 10^{-4}$	85,62	$0,38 \cdot 10^{-4}$	98,09	$10,29 \cdot 10^{-4}$	48,72



**Figura 3.12** Eficiencia del Alóe Vera comparado con inhibidores comerciales

La eficiencia de los inhibidores aumenta notablemente con la concentración de ácido, es decir, que estos inhibidores funcionan mejor a altas concentraciones de ácido. Es importante observar que si bien el inhibidor Kleen AC 9504 presenta altas eficiencias, al ser utilizado en medio ácido, por desprender gran suciedad y óxidos de corrosión, la solución termina opaca como para ser utilizada posteriormente, además de generar gran cantidad de espuma; para eliminar estos problemas, a menudo se complementa el inhibidor con agentes antiespumantes, antiemulgentes, dispersantes entre otros, resultando ser no muy rentables para el proceso; una de las ventajas del inhibidor de Alóe Vera, es que no produce espuma al momento de actuar como inhibidor, manteniendo una solución mas limpia para seguir decapando.

## A.2 MÉTODO ELECTROQUÍMICO.

### i.- EQUIPOS Y MATERIALES:

Son los siguientes:

- Potenciostato / Galvanostato/ZRA Gamry Instrument
- Celda de vidrio 50 mL
- Electrodo auxiliar de platino
- Electrodo de referencia de calomel
- Placas de acero (5,5 cm x 10 cm)
- Papel adhesivo de vinil
- Vasos pirex de 250 mL, 300 mL, 500 mL
- Probetas de 50 mL, 100 mL
- Bagueta
- Piceta
- Papel Tisú

Reactivos:

- Ácido Clorhídrico (37,3 %)
- Polvo de Alóe Vera
- Alcohol
- Agua destilada
- Agua potable

## ii.- PROCEDIMIENTOS:

El metal usado en este estudio son placas de acero de 6 cm x10 cm. Previo a cada experimento las placas se lijan hasta el acabado de lija 1000, se enjuagan con agua destilada y desengrasan con alcohol. Se coloca sobre una de las caras de la placa, papel adhesivo de vinil transparente, de forma cuadrada y con un orificio en el centro de diámetro 1 cm dejando una cara circular expuesta de 0,7854 cm<sup>2</sup> para ser usada como electrodo de trabajo.

Las soluciones de prueba consistieron de *HCl* 3 % en ausencia (solución blanco) y en presencia del polvo obtenido del gel de la hoja de sábila como inhibidor. Se agrega como aditivo al ácido en concentraciones que varían entre 15 % y 40 %.

Para las pruebas electroquímicas se usa un sistema de tres electrodos, consistiendo del electrodo de trabajo, un electrodo auxiliar de platino y un electrodo saturado de calomel como electrodo de referencia; se asegura la placa sobre el soporte del equipo, y se agrega 50 mL de la solución ácida (*HCl* 3 %) a la celda de vidrio. El sistema se arma como se muestra en la figura 3.13.

Las señales electroquímicas generadas por el sistema bajo corrosión se monitorean y se registran utilizando un Potenciostato/Galvanostato/ZRA Gamry Instrument, conectado a una computadora personal (figura 3.15).

Para obtener la curva de polarización global, se realizan los ensayos en un rango de potencial de -1 V a 1 V con una velocidad de barrido de 0,16 mV/s, empezando en el lado catódico. Los rangos de potencial son los mismos para cada ensayo. El procedimiento es el mismo para los ensayos con y sin inhibidor, se repiten los ensayos en condiciones experimentales idénticas, las mediciones se realizan a condiciones normales de aireación a 23 °C.

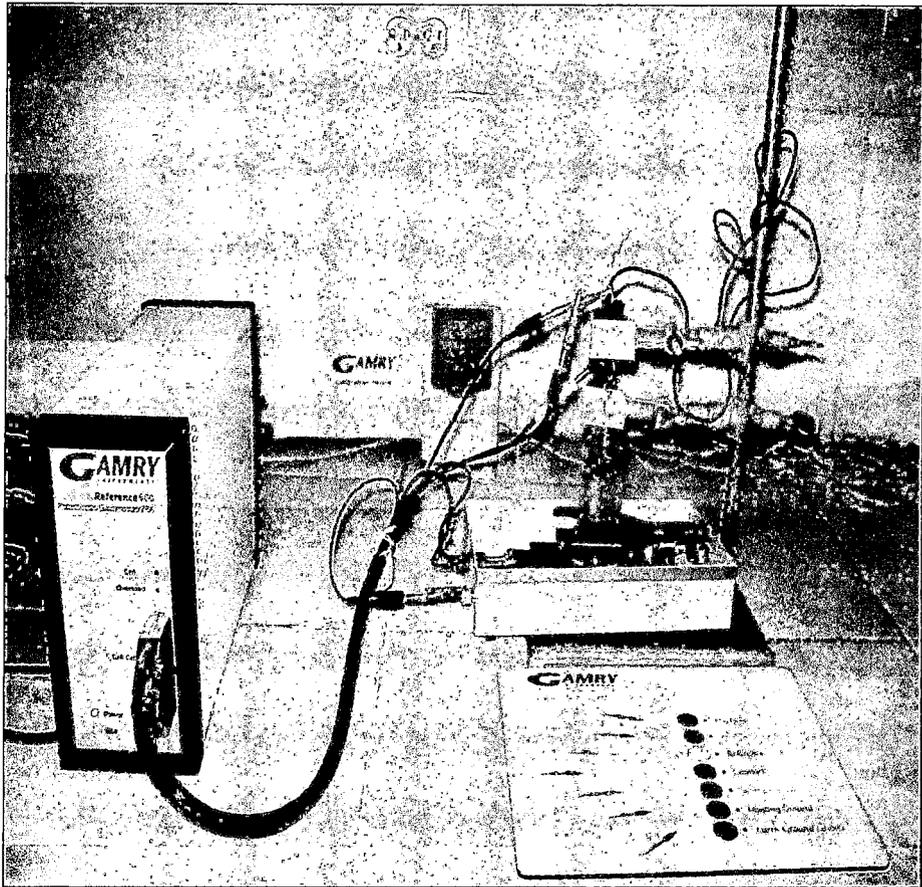
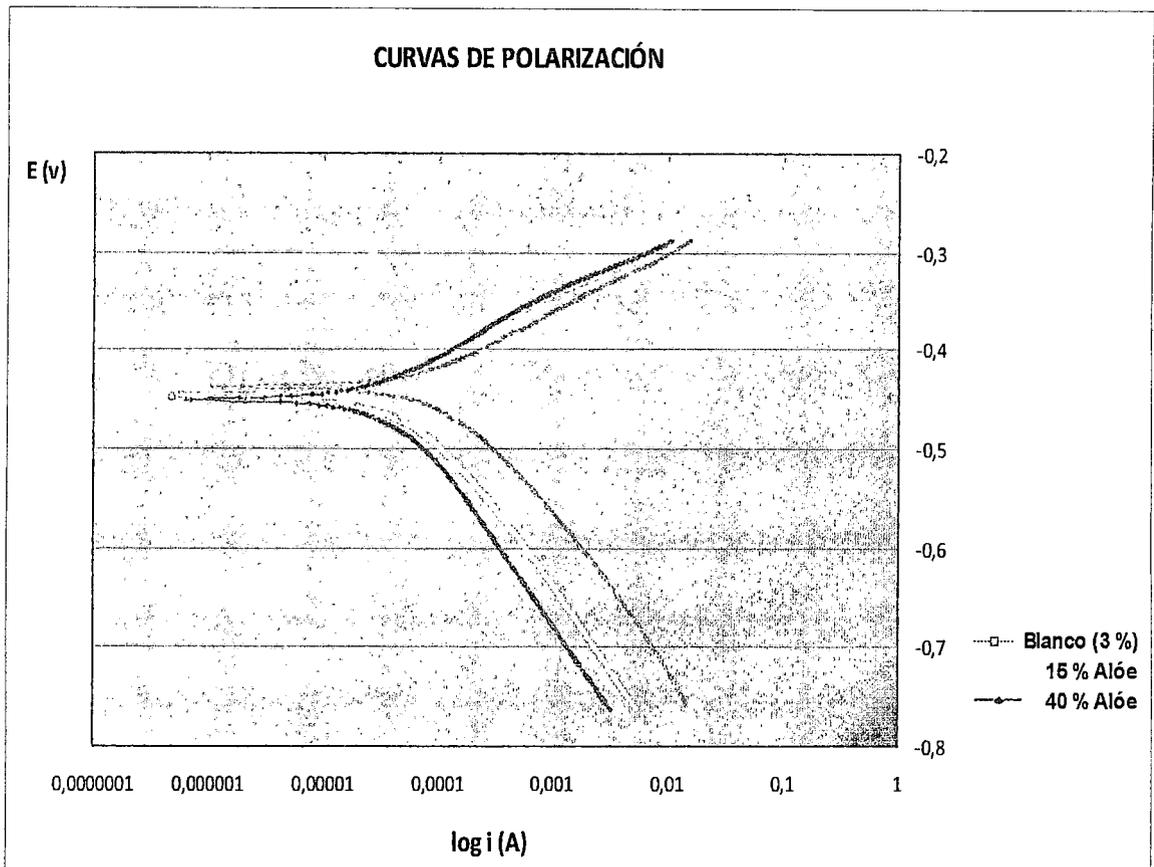


Figura 3.13 Sistema de tres electrodos para mediciones Electroquímicas

### iii.-RESULTADOS:

#### CURVAS DE POLARIZACIÓN

En la figura 3.14, se muestran las curvas de polarización global del acero en las soluciones de  $HCl$  3 % con y sin inhibidor. Se observa que la densidad de la corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) disminuye con el aumento de la concentración de Alóe Vera en la solución, mientras que el potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) cambia de dirección ligeramente hacia el lado catódico en presencia de inhibidor.



**Figura 3.14** Curvas de polarización Global para el acero en  $HCl$  3 % en presencia de Alóe Vera

Se observa claramente que los valores de la  $E_{corr}$  para la solución ácida con Alóe Vera, presenta cambios muy pequeños, manteniéndose alrededor de -450 mV, mientras que para un mismo potencial (tanto del lado anódico como catódico de la curva) se reducen las corrientes, por lo que su efecto corresponde a inhibidores del tipo mixto, aunque su efecto se ve más pronunciado en la parte catódica, consecuentemente el mecanismo de adsorción se favorece en los sitios catódicos.

Los parámetros electroquímicos como son: el potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ), las pendientes de Tafel anódica ( $\beta_a$ ) y catódica ( $\beta_c$ ) y la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) son obtenidos por la extrapolación de las pendientes de Tafel sobre las curvas obtenidas y sus valores se muestran en el cuadro 3.22.

La eficiencia de inhibición  $\xi$  se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\xi = \left( 1 - \frac{i_{corr}^I}{i_{corr}^B} \right) \times 100\%$$

Donde  $i_{corr}^B$  y  $i_{corr}^I$  son las densidades de corriente de corrosión en la solución blanco y con inhibidor, respectivamente.

**Cuadro 3.22** Parámetros de polarización para acero en 3 % *HCl*

Concentración	E (mV)	$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$\beta_a$ mV/decada	$\beta_c$ mV/decada	V (mpy)	% $\xi$ eficiencia
Blanco ( <i>HCl</i> 3%)	-438	$2,47 \cdot 10^{-04}$	31	-85	114	
15 % Alóe	-450	$1,31 \cdot 10^{-04}$	42	-121	60	48
40 % Alóe	-455	$7,63 \cdot 10^{-05}$	52	-210	36	68

En presencia del polvo de Alóe Vera, se observa que el valor de ambas pendientes de Tafel se incrementa al aumentar la concentración de aditivo y los valores de la corriente de corrosión disminuyen con respecto a la del blanco, disminuyendo la velocidad de corrosión.

#### MÉTODO DE LA RESISTENCIA DE POLARIZACIÓN

Mediante el método de resistencia de polarización se obtiene la velocidad de corrosión, que se compara con los resultados obtenidos por el método de extrapolación de Tafel.

Para el cálculo de la velocidad de corrosión mediante el método de resistencia de polarización, se usan los parámetros  $\beta_a$  y  $\beta_c$  del método de extrapolación de Tafel, los resultados obtenidos de la resistencia de polarización ( $R_p$ ) se presentan en el cuadro 3.23.

**Cuadro 3.23** Velocidad de corrosión mediante el método de Tafel y resistencia de polarización.

Concentración	E (mV)	Método de Tafel				Resistencia de polarización	
		$i_{corr}$ (A/cm <sup>2</sup> )	$\beta_a$ mV/decada	$\beta_c$ mV/decada	V (mpy)	$R_p$ (ohm)	V(mpy)
Blanco ( <i>HCl</i> 3 %)	-438	$2,47 \cdot 10^{-04}$	31	-85	114	50	113
15 % Alóe	-450	$1,31 \cdot 10^{-04}$	42	-121	60	129	50
40 % Alóe	-455	$7,63 \cdot 10^{-05}$	52	-210	36	213	34

Se puede notar, que existe muy poca diferencia, entre los valores de la velocidad de corrosión calculados a partir del método de la resistencia de polarización con los resultados obtenidos por el método de Tafel.

### **A.3 MÉTODO DE IMPEDANCIA ELECTROQUÍMICA.**

#### **i.- EQUIPOS Y MATERIALES:**

Los principales equipos y materiales utilizados son:

- Potenciostato/Galvanostato/ZRA Gamry Instrument
- Celda de vidrio 50 mL
- Electrodo auxiliar de platino
- Electrodo de referencia de calomel
- Placas de acero (5,5 cm x 10 cm)
- Papel adhesivo de vinil
- Vasos pirex de 250 mL, 300 mL, 500 mL
- Probetas de 50 mL, 100 mL
- Bagueta
- Piceta
- Papel Tisú

Reactivos:

- Ácido Clorhídrico (37,3 %)
- Polvo de Aloe Vera
- Alcohol
- Agua destilada
- Agua potable

#### **ii.- PROCEDIMIENTOS:**

Se lijan las placas de acero de 6 cm x 10 cm hasta el acabado de lija 1000, se enjuagan con agua destilada y se desengrasan con alcohol. Se coloca sobre una de las caras de la placa, papel adhesivo de vinil transparente, de forma cuadrada y con un orificio en el centro de diámetro 1cm se deja una cara circular expuesta de 0,7854 cm<sup>2</sup> para ser usada como electrodo de trabajo.

Las soluciones de prueba consisten de  $HCl$  3 % en ausencia (solución blanco) y en presencia del polvo obtenido del gel de la hoja de sábila como inhibidor. Se agrega como aditivo al ácido una concentración de 15 %.

Para las pruebas de Impedancia Electroquímica, se usa un sistema de tres electrodos, consistiendo del electrodo de trabajo, un electrodo auxiliar de platino y un electrodo saturado de calomel como electrodo de referencia; se asegura la placa sobre el soporte del equipo, y se agrega 50 mL de la solución ácida al 3 %  $HCl$  a la celda de vidrio.

Las señales electroquímicas generadas por el sistema bajo corrosión se monitorean y se registran utilizando un Potenciostato/Galvanostato/ZRA Gamry Instrument, conectado a una computadora personal. Las mediciones de impedancia electroquímica se realizan usando una señal senoidal de potencial de 10 mV de amplitud en un rango de frecuencias entre 100 KHz y 0,01 Hz tomando 5 puntos por década. En cada prueba se espera 30 minutos para que el potencial de corrosión se estabilice (en condiciones normales de aireación) a 23 °C y a continuación se realizan las mediciones correspondientes.

El procedimiento es el mismo para ensayos con y sin inhibidor, se repiten los ensayos en condiciones experimentales idénticas. La figura 3.15 muestra el sistema con el equipo que se usa para las mediciones electroquímicas.

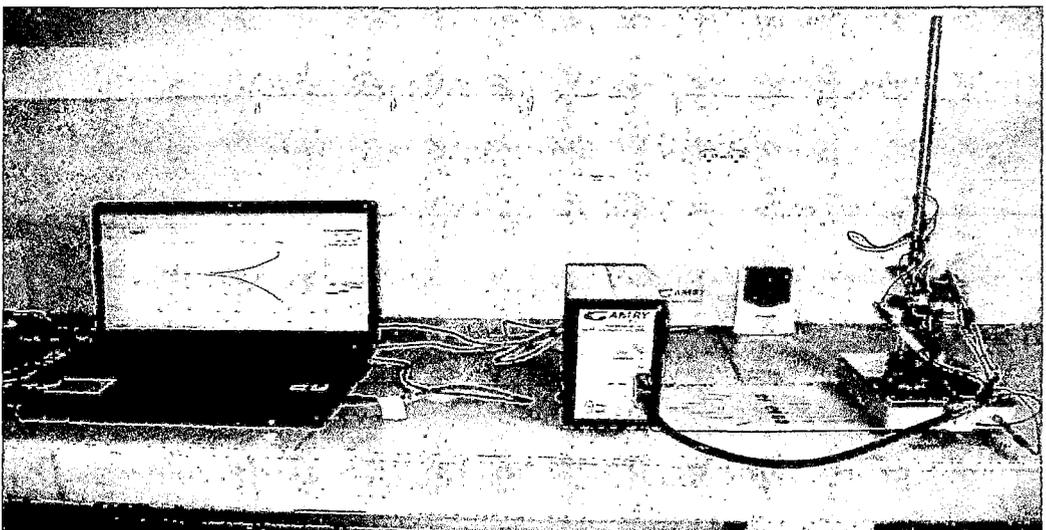


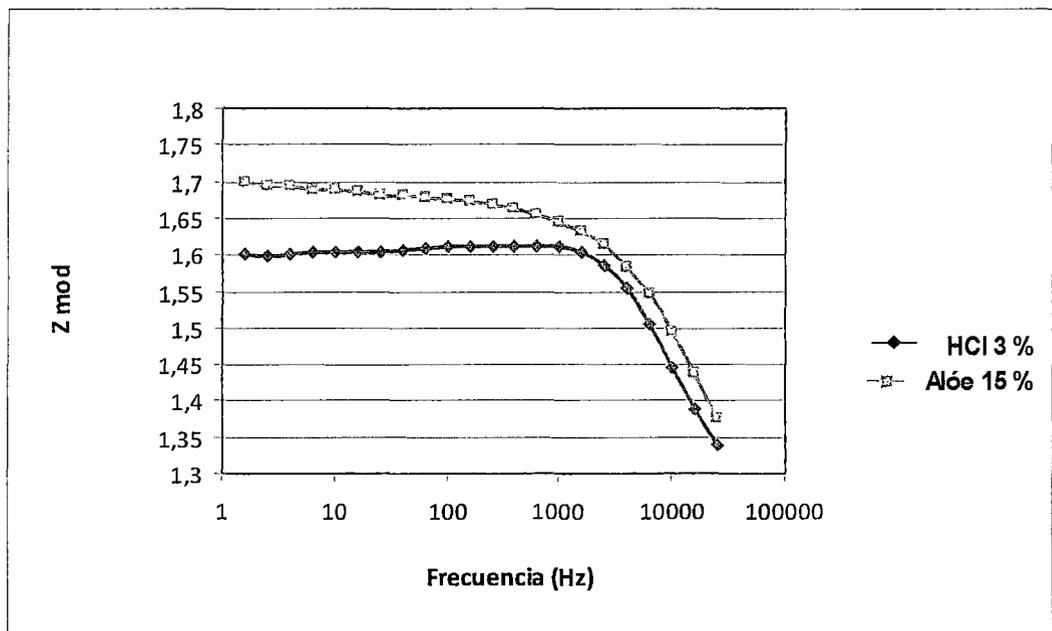
Figura 3.15 Equipo Potenciostato/Galvanostato/ZRA Gamry Instrument.

### iii.- RESULTADOS:

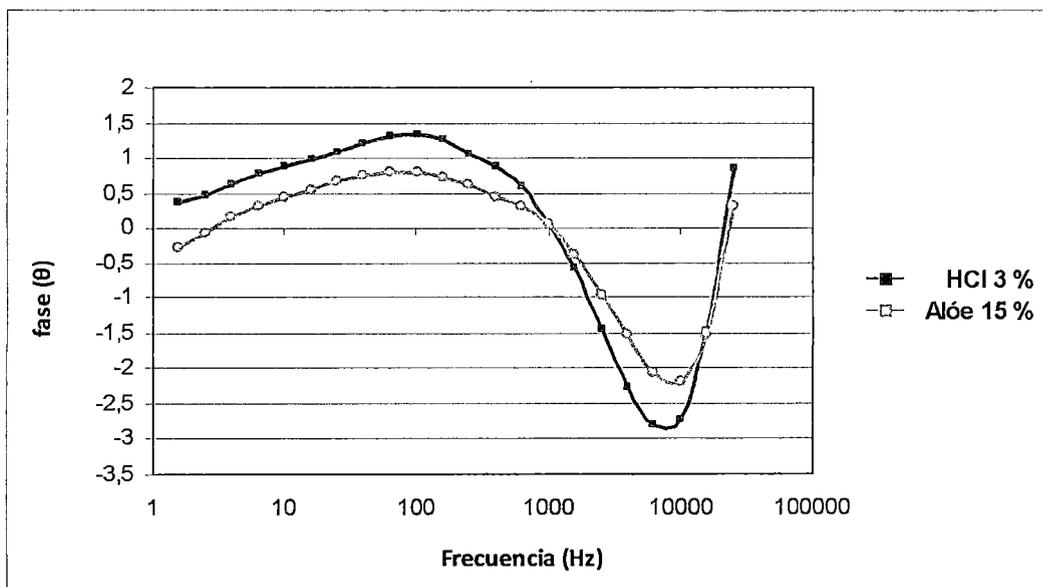
De los estudios de corrosión mediante la técnica de impedancia electroquímica, se obtienen espectros de impedancia que suelen ser analizados mediante circuitos eléctricos compuestos por componentes como resistencias (R), capacitancias (C), inductancias (L), etc. Combinados de tal manera que producen los espectros de impedancia medidos, estos circuitos electrónicos son denominados "circuitos eléctricos equivalentes".

La técnica de impedancia electroquímica, permite distinguir los diferentes procesos que se desarrollan en la interfase electrodo medio corrosivo, como: procesos de transferencia de carga, adsorción de compuestos, fenómenos de transporte de materia, etc.

Al trabajar en un amplio dominio de frecuencias se obtienen los diversos procesos que intervienen en el fenómeno de Corrosión. Las mediciones de impedancia electroquímica se realizan en el intervalo de frecuencias de 100 kHz a 0,01 Hz, se obtuvieron los diagramas de Bode magnitud ( $Z_{mod}$  vs  $\text{Log } f$ ), y Bode fase (fase vs  $\text{Log } f$ ) que se muestran en la figura 3.16 y figura 3.17.



**Figura 3.16** Diagrama de Bode para una solución con y sin Alóe Vera  
Z<sub>mod</sub> vs frecuencia



**Figura 3.17** Diagrama de Bode para una solución con y sin Alóe Vera fase ( $\theta$ ) vs frecuencia

Los diagramas de Bode, se realizan bajo las mismas condiciones que para los diagramas de Nyquist. Las mediciones comparativas, con y sin Alóe Vera muestran cambios en los diagramas de Bode experimental, para  $Z_{mod}$  y fase ( $\theta$ ) versus frecuencia, los cuales se deben a la adsorción del Alóe Vera sobre la superficie del metal y a las características de dicha película.

En los gráficos 3.18 se presentan los diagramas de Nyquist (impedancia real vs impedancia imaginaria) obtenidos para una solución con y sin Alóe Vera respectivamente. Este comportamiento se podría representar con el diagrama de circuito equivalente de la figura 3.19 donde se observa una resistencia ( $R_{ct}$ : resistencia a la transferencia de carga equivalente al  $R_p$ ) y un capacitor en paralelo ( $C_{dl}$ ), además de considerar la resistencia de la solución ( $R_s$ ).

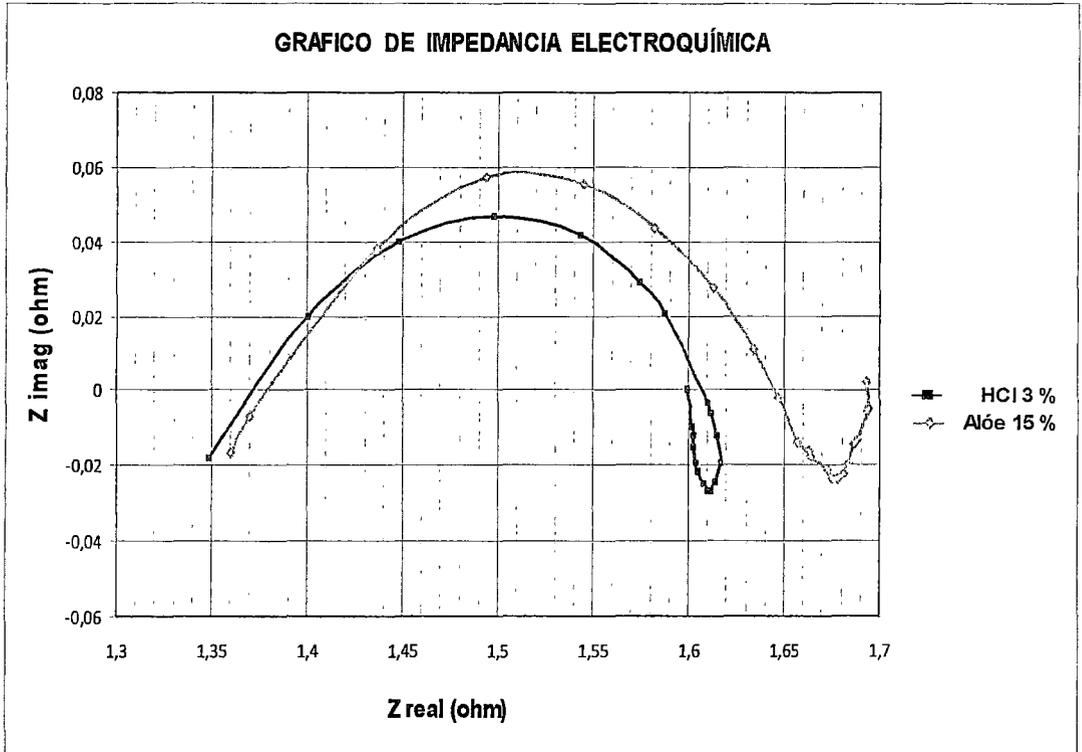


Figura 3.18 Diagrama de Nyquist para una solución con y sin Alóe Vera en HCl 3 %.

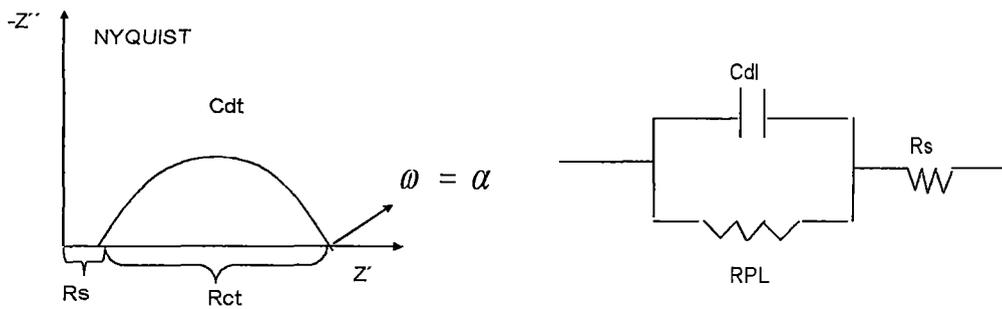


Figura 3.19 Grafico de Nyquist y su circuito equivalente

De los resultados presentes en los diagramas de Nyquist es claro notar que presentan una tendencia a formar un semicírculo a valores muy altos de la parte real de la impedancia, para una solución con Alóe Vera el semicírculo es más abierto en comparación de los resultados de la solución sin Alóe Vera, indicando

que  $R_p$  es mayor y, por tanto, la velocidad de corrosión aparente es menor para la solución con Alóe Vera. En ausencia del inhibidor se observa una gran actividad de burbujas de  $H_{2(g)}$  sobre la superficie del electrodo de acero, que disminuye conforme se incrementa el tiempo. Esto es indicativo de que el flujo de  $H^+$  es menos intenso debido a la formación de productos de corrosión en la superficie. Es importante resaltar que esto no se observó en la solución con Alóe Vera.

En estos diagramas se observa además, la formación de un segundo semicírculo o lazo inductivo a bajas frecuencias; para la solución de  $HCl$  3 % sin Alóe Vera, se debería a la capa de productos de corrosión formados en la superficie, lo cual es diferente a la prueba con inhibidor, debido a un cambio en las propiedades de la interfase en la superficie del metal lo cual se podría atribuir a la intervención del Alóe Vera en el sistema, el arco inductivo se forma aumentando la resistencia, esto se podría explicar considerando la adsorción de la sustancia en la superficie del metal; dado que los efectos de adsorción-desorción se revelan por un segundo semicírculo deformado a bajas frecuencias. Este comportamiento se presenta en todas las pruebas de corrosión realizadas en el presente trabajo.

### 3.2.4 DISCUSIÓN DE RESULTADOS:

De los resultados obtenidos en el diseño de experimentos, los factores más importantes a controlar en el proceso de decapado son la concentración del ácido y el tiempo de decapado, ambos guardan relación ya que si el baño de decapado presenta una alta concentración de ácido, el decapado será muy rápido, sin embargo se utilizará mayor cantidad de ácido y puede atacar la capa base del metal si se excede en el tiempo de decapado, por otro lado, si la concentración de ácido es menor, el tiempo de decapado será mayor, pero se puede tener una buena gestión del decapado, ambos parámetros deben ser determinados y establecidos según los resultados que se deseen obtener.

Los resultados reportados para los inhibidores de corrosión en medio ácido por técnicas gravimétricas, indican que el gel de Alóe Vera actúa protegiendo la capa base del metal, ya que se demostró que la pérdida de peso de la placa lijada, se mantiene casi constante a partir del tercer minuto de inmersión, produciendo una disminución considerable en la velocidad de decapado conforme aumenta la concentración del Alóe Vera.

En la figura 3.6, se muestra la eficiencia en función de la concentración de Alóe Vera, se observa que para una solución de  $HCl$  3 %, la eficiencia tiene un comportamiento casi lineal conforme aumenta la concentración de Alóe Vera; mientras que para las soluciones de 7 % y 10 %  $HCl$ , se observa que a partir de 15 % de Alóe Vera, la eficiencia aumenta notablemente, es así que para 40 % de Alóe Vera, alcanza una eficiencia prácticamente igual a la obtenida para 3 %  $HCl$ , por lo que podríamos decir que el Alóe Vera es más eficiente como inhibidor a mayores concentraciones de ácido.

Para evaluar la eficiencia del inhibidor para proteger la capa base del metal, se comparó, el gel de Alóe Vera, con urotropina, un inhibidor muy usado con  $HCl$  en el decapado de piezas metálicas, los resultados (cuadro 3.18) muestran que la eficiencia obtenida para 15 % (165 g/L) de Alóe equivale a 0,2 g/L de urotropina.

Luego de determinar que el gel de Alóe Vera si se comporta como inhibidor en medio ácido protegiendo la capa base, es importante estudiar su comportamiento frente a los productos de corrosión y capa de laminación, como pruebas preliminares se trabajó en placas sin lijar simulando las condiciones de un decapado real, en una solución de 10 %  $HCl$  y 15 % de gel de Alóe Vera demostrando su ataque sobre los productos de corrosión, bajo las mismas condiciones se realizaron pruebas comparativas con Urotropina, demostrando que con el gel de Alóe Vera se es más eficiente al momento de eliminar los productos de corrosión del metal que la Urotropina (cuadro 3.19).

Viendo las ventajas y desventajas del gel de Alóe Vera (ver 3.1.3) se optó por convertirlo a su forma en polvo para un mejor uso a nivel industrial, para lo cual se utiliza el método de secado por aspersión. A fin de verificar que el gel de Alóe Vera no había perdido sus propiedades inhibidoras al convertirlo a polvo, se realizaron pruebas comparativas con una concentración de 15 % de gel que equivale a 0,083 g/L de polvo de Alóe, obteniéndose una eficiencia de 39,35 % (cuadro 3.20), por lo cual se verifica que el polvo de Alóe Vera también actúa como inhibidor de la corrosión en medio ácido.

De las pruebas comparativas con inhibidores comerciales como son Kleen AC 9504 y Tenso quat Cl 44, se observa claramente el comportamiento del polvo de Alóe Vera en medio ácido, se muestra en las figuras 3.10 y 3.11 que durante los

primeros minutos de decapado, los productos de corrosión, de la superficie del metal son eliminados observando una gran pérdida de peso, sin embargo luego de 15 minutos, la velocidad de corrosión disminuye considerablemente y se mantiene casi constante en el tiempo, lo cual no es observado en la solución sin inhibidor (Blanco), en donde luego de los 15 minutos, la pérdida de peso sigue aumentando, con estas pruebas se comprueba que el Alóe Vera, luego de eliminar los óxidos de la superficie del metal protege la capa base, este comportamiento concuerda con lo observado en las pruebas realizadas con los inhibidores comerciales, lo que permite verificar la efectividad del inhibidor.

Es importante señalar que si bien el inhibidor Kleen AC 9504 presenta alta eficiencia al momento de inhibir en solución ácida, presenta por su gran actividad, formación de espuma en la superficie opacando la solución, además de ser un producto tóxico para la salud, lo que se debe tener en cuenta antes de utilizarlo.

Las técnicas electroquímicas de curvas de polarización e impedancia electroquímica son congruentes entre si ya que ambas definen la tendencia de protección que tiene el Alóe Vera como inhibidor a diferentes concentraciones. Según los resultados obtenidos mediante las curvas de polarización, el Alóe Vera actúa como un inhibidor de tipo mixto (figura 3.14).

La presencia de aminoácidos en el Alóe Vera, explicaría que la molécula se adsorbe sobre la superficie del acero provocando un cierto grado de aislamiento entre el medio corrosivo y la superficie metálica ocasionando que la intensidad de la corrosión disminuya. Esto se refleja en los diferentes parámetros electroquímicos como son la corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ), las pendientes de Tafel y el valor de la resistencia a la transferencia de carga entre otros (Cuadro 3.22).

Las curvas de Tafel permiten calcular los valores de las pendientes  $B_a$  y  $B_c$ , con las que se calcula la velocidad de corrosión para una solución con y sin inhibidor. De los resultados de las pruebas de resistencia de polarización con los valores previamente calculados de  $B_a$  y  $B_c$ , calculamos el  $R_p$ , (el cual va aumentando con el aumento de la concentración de Alóe Vera en la solución) y la velocidad de corrosión (mpy).

Se observa que el polvo de Alóe Vera, produce una disminución en la velocidad de corrosión, ya que la densidad de la corriente ( $i_{corr}$ ) disminuye con la concentración del inhibidor.

Los resultados reportados de las velocidades de corrosión por métodos de Tafel, presentan una gran aproximación con los resultados obtenidos mediante el método de resistencia de polarización (Cuadro 3.23).

Si se compara la técnica de resistencia a la polarización (celda electroquímica) con el método gravimétrico, la velocidad de corrosión medida por método gravimétrico resulta aproximadamente un orden de magnitud mayor que la obtenida por resistencia a la polarización. Este comportamiento se debe a que el área expuesta del electrodo de trabajo es de  $0,7854 \text{ cm}^2$  para un volumen de solución ácida de 50 mL, ubicado en la celda electroquímica de tal forma que la solución ácida representa una columna perpendicular a la superficie de trabajo. Mientras que las placas utilizadas en el método gravimétrico de  $25 \text{ cm}^2$ , se encuentran sumergidos en una solución ácida de 100 mL con ambas caras expuestas provocando de este modo un mayor ataque corrosivo y un desgaste en la superficie de la placa por lo tanto una mayor velocidad de corrosión.

Los diagramas de Nyquist (figura 3.18) muestran semicírculos capacitivos a altas frecuencias, y la tendencia de arcos inductivos en la parte inferior a más bajas frecuencias. El semicírculo capacitivo muestra la influencia de las propiedades de la doble capa eléctrica formada en la interfase. Para la solución ácida sin inhibidor, el arco inductivo puede ser explicado por la disminución de la actividad  $HCl$  en la solución por la formación de productos de corrosión; mientras que en la solución con Aloe Vera, el arco inductivo observado se explicaría como la adsorción de la sustancia en la superficie del metal. En resumen las condiciones superficiales físicas y químicas cambian con la presencia del inhibidor, el cual tiende a cambiar el correspondiente comportamiento electroquímico de la corrosión del metal.

Importante información es la que proporciona la resistencia a la transferencia de carga ( $R_{tc}$ ) con el incremento en la concentración del inhibidor, la cual sugiere una continúa adsorción del inhibidor sobre la superficie del metal debido a una mayor concentración de moléculas, originando un incremento del grosor de la película de inhibidor y la disminución de la porosidad de la película. El incremento del grosor de la película evitará la transferencia de especies electroquímicamente activas del volumen de la solución a la superficie del metal, reduciéndose el número de sitios cinéticamente activos sobre la superficie del metal.

Algunos aminoácidos presentes en el gel de Alóe Vera han sido probados como buenos inhibidores para acero en soluciones de  $HCl$ . Tal es el caso de la metionina, Alanina, Glicina, Leucina Valina y Tirosina. De las pruebas realizadas con aminoácidos, resultó que de los 22 presentes en el gel de Alóe Vera, algunos de ellos no actúan como inhibidores de la corrosión. De aquí se podría decir que probablemente la eficiencia de inhibición con el gel de la hoja de sábila pueda mejorar si se hacen extractos conteniendo a los aminoácidos que mejor actúan como inhibidores y aislando a los que no lo son.

Uno de los beneficios ambientales por la sustitución de inhibidores orgánicos a base de Alóe Vera en el proceso de decapado químico es la disminución de la contaminación por emisiones de gases tóxicos y la reducción en la adquisición de ácido clorhídrico, además de no ser un producto tóxico para la salud.

Se evidenció la importancia y las oportunidades de producción más limpia en el sector de la industria de procesamiento de metales.

## CAPÍTULO IV

### EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL ALÓE VERA COMO INHIBIDOR

#### **Panorama internacional**

Sudáfrica, es considerada la cuna del Alóe Vera. De todas las variedades cultivadas comercialmente en el mundo, crecen espontáneamente en esta región, en China, según estimaciones actuales se cultivan aproximadamente 6 500 Ha. La producción de gel de Alóe Vera es liderada básicamente por compañías estadounidenses, que han convertido al país del norte, en el principal productor a nivel mundial, tanto en materia prima como en los productos elaborados. La razón es, que se ha invertido fuertemente en investigación y en desarrollo de la producción, cosecha y procesamiento. Otros países productores de América son; Venezuela, con más de 5 000 Ha y ambiciosos planes de expansión. México, que suma aproximadamente 10 000 Ha; República Dominicana, 3 500 Ha y en menor escala se sitúan Costa Rica, Guatemala, Honduras, Cuba, Brasil, Chile, Ecuador, Paraguay, Uruguay y Perú.

En Europa el principal país productor es España, seguido por Italia y de menor importancia, Portugal. Con respecto al comercio mundial de los productos obtenidos del alóe, no existen estadísticas oficiales, debido a que no poseen una clasificación arancelaria propia y se encuentran comprendidos junto a otros denominados saborizantes y extractos de plantas varias. Por consiguiente, no es posible determinar, en forma fehaciente, los volúmenes y los valores del comercio internacional.

Por lo general este tipo de cultivo se desarrolla en las zonas costeras al mar; las regiones desérticas y semidesérticas poseen una amplia diversidad de flora compuesta de numerosas especies de uso tradicional, que representan amplias perspectivas respecto a su aprovechamiento económico, además que estas plantas están adaptadas para tolerar las condiciones ecológicas que predominan en esos ambientes naturales. Sin embargo, posee un gran potencial para la producción de áloes, debido a las especiales condiciones tropicales en la cual nos encontramos, donde este cultivo se desarrolla de forma óptima.

Los Precios más competitivos se logran por sus ventajas comparativas actualmente. El precio del producto en el mercado internacional se establece cuando la empresa cumple con los requerimientos técnicos demandantes y eleva la eficiencia mejorando la rentabilidad. La calidad e imagen son fundamentales.

### **Costo total del producto**

Para determinar el costo unitario del producto este se divide el costo total del producto entre la producción total. Comparando este costo unitario con el precio de venta en el mercado, se obtendrá la posible ganancia por unidad. Este costo suele subdividirse en dos categorías: costo de fabricación y gastos generales:

### **Costo de fabricación**

En los costos de fabricación se incluyen todos los gastos directamente relacionados con la fabricación o producción y con los equipos físicos de la planta como:

#### Materia prima

Se refiere a la penca comprada obtenido en el área de Carabayllo. La planta operará al 100 % de su capacidad instalada que viene a ser 14,4 t de polvo de Alóe Vera por año.

#### Mano de obra

Comprende los sueldos de cada obrero incluyendo seguro social, vacaciones y beneficios que viene hacer \$ 3 200 por año por obrero.

Número de obrero: 5

Supervisión directa

En una planta siempre se requiere una supervisión directa que viene hacer \$ 3 800 por año por supervisor.

Número de supervisor: 2

Servicios auxiliares

El costo de servicios auxiliares, como vapor, electricidad, agua para el proceso, etc, así como servicios de control de calidad y alquiler del equipo. Consideramos que el costo de alquiler del equipo cubre los costos de mantenimientos generales.

**Cuadro 4.1** Costo total de los servicios auxiliares

<b>Servicio auxiliares</b>		
Costo de presupuesto de gasto por año		
		soles/año
Vapor ( $10^3$ - $10^4$ kPa)	S/. 0,56/1000 kg	161,28
Electricidad	S/. 0,16/ kWh	51 840,00
Refrigeración - 20 °C	S/. 0,13/ GJ	11 232,00
Agua	S/. 1,39/ m <sup>3</sup>	834,00
Servicio control de calidad		
	• Mano calificado	
	• Jefe de área	
	• Material de laboratorio	
	Total de control de calidad	33 852,72
Otros		2 880,00
Alquiler de equipo		2 016 000,00
Total de servicios auxiliares		2 116 800,00
Total de servicios auxiliares en dólares		\$ 604 800,00

Suministro para las operaciones

En toda operación de producción se requieren suministros tales como reactivos para análisis químicos.

**Cuadro 4.2** Costo total de los Suministro para las operaciones

<b>Suministro de operaciones</b>	
Costo de presupuesto de gasto por año	
	Soles/año
Reactivos para análisis en la línea de operación como por ejemplo papel universal	559,65
Total suministro de operaciones	560,00
Total suministro de operaciones en dólares	\$ 160,00

Depreciación

La depreciación es la pérdida de valor que sufren los bienes del Activo Fijo, a excepción de los terrenos, por el desgaste debido a su utilización, o bien, a razones de obsolescencia por el transcurso del tiempo. Se tiene una depreciación al año para nuestros equipos de \$ 124 767.

Impuestos locales

En la zona menos densamente pobladas los impuestos son arbitrios y prediales.

**Cuadro 4.3** Costo total de los impuestos locales

<b>Impuestos local</b>	
Costo de presupuesto de gasto por año	
	soles/año
Arbitrios e impuesto predial	9 005,50
Total de arbitrios e impuesto predial	9 005,50
Total de arbitrios e impuesto predial en dólares	\$ 2 573,00

Seguros

Es la cobertura de contra cualquier acontecimiento que afecte directamente a la planta.

**Cuadro 4.4** Costo total de seguro

<b>Seguros</b>	
Costo de presupuesto de gasto por año	
	soles/año
Póliza de seguro cuyas cuotas al mes S/. 375,1	4 501,20
Total de seguros	4 501,20
Total de seguros en dólares	\$ 1 286,00

Gastos generales de la planta

Este punto cubre los puntos de la limpieza general, vigilancia, etc.

**Cuadro 4.5** Gastos generales de la planta

<b>Gastos generales de planta</b>	
Costo de presupuesto de gasto por año	
	Soles/año
Limpieza general (2 personas de limpieza)	19 440
Vigilancia (8 vigilantes)	86 400
Total de gastos generales de la planta	105 840
Total de gasto generales de la planta en dólares	\$ 30 240

### Gastos generales

Se refiere a los gastos de administración, distribución, marketing y de investigación.

#### Gastos de administración

Considera salarios y jornales del personal administrativos que se requieran, secretarias, contadores, etc.

**Cuadro 4.6 Gastos administrativos**

<b>Gastos administrativos</b>	
Costo de presupuesto de gasto por año	
	soles/año
Luz (área administrativa)	3 456,00
Teléfonos (numero de teléfonos 3 y costo de llamada al mes S/. 70)	2 520,00
Útiles de oficina	2 000,00
Nomina (tres personas administrativos)	43 944,00
Suscripciones	1 000,00
Total de gastos administrativos	52 920,00
Total de gastos administrativos en dólares	\$ 15 120,00

#### Gastos de distribución

Este gasto considera los gastos producidos por distribución de los productos, y transportes en general.

**Cuadro 4.7 Gastos de distribución**

<b>Gastos de distribución</b>	
Costo de presupuesto de gasto por año	
	soles/año
Gastos de fletes y transportes	105 840,00
Total gastos de fletes y transportes	105 840,00
Total gastos de fletes y transportes en dólares	\$ 30 240,00

#### Gastos de investigación

Estos gastos incluyen salarios de todo el personal directamente relacionado con este tipo de tarea.

**Cuadro 4.8 Gastos de investigación**

<b>Gastos de investigación</b>	
Costo de presupuesto de gasto por año	
	Soles/año
Investigación encargada a terceros	26 460,00
Investigación propia	26 460,00
Total de gastos de investigación	52 920,00
Total de gastos de investigación en dólares	\$ 15 120,00

## COSTO DE TOTAL DEL PRODUCTO

	US\$ por año
<b>COSTO DE FABRICACIÓN (CF)</b>	
A) Costo directo de fabricación (CDF)	
• Materia prima	664 094,00
• Mano de obra	16 000,00
• Supervisor directa	7 600,00
• Servicios auxiliares	604 800,00
• Suministro para las operaciones	160,00
Total costo directo	1292 654,00
B) Gasto fijos (CF)	
• Depreciación	124 767,00
• Impuesto locales	2 573,00
• Seguros	1 286,00
Total costo fijos	128 626,00
C) Gastos generales de planta (GP)	
• Gastos generales de planta	30 240,00
Total gastos de planta	30 240,00
<b>GASTOS GENERALES (GG)</b>	
• Gastos administrativos	15 120,00
• Gastos de distribución	30 240,00
• Gastos de investigación	15 120,00
Total de gastos generales	60 480,00
Costo total de producción	1 512 000,00

Donde:

$$\text{Costo unitario del producto} = \frac{\text{costo total de producción}}{\text{Producción total}}$$

Obteniendo como resultado:

**Costo unitario del producto \$ 105,00 por kg de polvo de Alóe Vera**

**Consideraciones de cálculo económico:**

- Se considera producción al año de polvo de Alóe Vera 14,4 t a partir de 2 kg/h.
- Horas de trabajo 24 h.
- Se considera un año de 300 días productivos.
- Se toma como precio de penca \$ 0,1 por kg
- Se considera densidad del gel de Alóe Vera 0,98 g/mL
- Se considera como porcentaje de gel de Alóe Vera en la penca 43 %.
- Precio del alquiler del equipo: US\$ 80 por h.
- Peso de la penca de Alóe Vera 160 g.
- El cambio de dólares a soles es de S/. 3,5 / dólares.

Donde la terminología para cada punto que se definirá:

CF : costo fijo

CT : costo total de producción

CDF: Costo directo de fabricación

GG : Gastos generales.

GP : Gastos generales de planta.

### **Comparación de costos del polvo del gel de Alóe Vera con otros inhibidores de decapado**

Para producir un kilo de polvo de Alóe Vera, es necesario usar 200 kilos de gel de Alóe Vera, los polvos ocupan poco espacio de almacenamiento, varios jugos procesados de Alóe Vera pueden ser reducidos a su forma en polvo, alargando su vida útil comparado con los productos líquidos, eliminando el costo de transportar agua.

El precio de polvo de Alóe Vera puede variar dependiendo del mercado y los factores que influyen en este costo unitario del producto. Como referencia podemos indicar que el costo del producto en el mercado es \$ 230,00 por kg según dato obtenido del Instituto de Recursos Naturales de los Estados Unidos. En el siguiente cuadro se presenta precio de otros inhibidores de corrosión en mercado internacional:

	dólares/ kg
<b>Urotropina</b>	98,27
<b>Kleen AC 9504</b>	8,00
<b>Tenso quat CI 44</b>	72,09
<b>Nox Rust 9300</b>	200,00
<b>Vapro-748</b>	176,67
<b>VCI-1010 Polvo inhibidor</b>	133,79

Al comparar el precio del polvo de Alóe Vera como inhibidor de la corrosión, respecto a los inhibidores de Urotropina, kleen AC 9504 y Tenso quat CI44; si bien el costo es mayor, se debe tener en cuenta que mientras que el polvo de Alóe Vera no produce efectos adversos; los riesgos que representan el uso de éstos inhibidores químicos industriales para el hombre y el medioambiente es alto. Comparando con otros inhibidores comerciales biodegradables como son Nox Rust 9300, Vapro-748 y VCI 1010 polvo de inhibidor actualmente utilizados como productos ecológicos, el polvo de Alóe Vera es más barato que estos inhibidores.

## CAPÍTULO V CONCLUSIONES

Los principales resultados obtenidos del estudio del Alóe Vera como inhibidor de decapado, conducen a las siguientes conclusiones:

- 1.- De los resultados obtenidos mediante las pruebas gravimétricas, se evidencia, que el Alóe Vera, actúa como inhibidor de la corrosión en medio ácido, brindando protección a la capa base luego de eliminar los productos de corrosión de la superficie del metal.
- 2.- La eficiencia del Alóe Vera como inhibidor se incrementa considerablemente al aumentar su concentración; la máxima eficiencia obtenida fue de 63,95 % con una concentración de 40 % de Alóe Vera en la solución de  $HCl$  3 %, mientras que para una solución de  $HCl$  10 % la máxima eficiencia fue de 60,42 %.
- 3.- De las pruebas electroquímicas, el inhibidor de corrosión de Alóe Vera se puede clasificar como inhibidor de tipo mixto ya que influye en la reacción anódica y catódica; esto se ve reflejado al modificar para un mismo potencial, las densidades de corriente tanto de la rama anódica como catódica de las curvas de polarización.
- 4.- Con la técnica de impedancia electroquímica se comprueba que el sistema es afectado por la presencia del Alóe Vera actuando como inhibidor ya que en términos generales provoca un aumento en la resistencia a la polarización ( $R_p$ ), disminuyendo la velocidad de corrosión.
- 5.- La eficiencias obtenidas sobre el efecto inhibidor del Alóe Vera, pueden mejorar, si se logran aislar del gel solo los aminoácidos identificados que mejor actúan como inhibidores de corrosión de sus demás componentes.
- 6.- El uso de inhibidores orgánicos a base de Alóe Vera del proceso de decapado químico, demuestra una gran posibilidad de producción más limpia, que favorece la reducción de un gran número de impactos sobre el ambiente y la obtención de beneficios económicos para la empresa.

## **CAPÍTULO VI**

### **RECOMENDACIONES**

En base a los resultados obtenidos, se sugiere para futuros trabajos de investigación relacionados al uso del Alóe Vera como inhibidor de decapado a nivel industrial las siguientes propuestas:

1. Realizar un estudio del comportamiento del Alóe Vera como inhibidor de la corrosión aplicado a otros medios corrosivos y sobre otros metales.
2. Realizar un estudio sobre la cinética de reacción del Alóe Vera sobre el acero en solución ácida, que puedan contribuir a esta investigación.
3. Con el fin de establecer la composición de la película superficial de Alóe Vera formada, se plantea efectuar experiencias mediante espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XSP), esta técnica nos permite tener una idea más clara del comportamiento del Alóe Vera en medio ácido sobre la superficie del metal.
4. Realizar un estudio de factibilidad de la implementación de una planta de producción de polvo de Alóe Vera, para llevar a cabo este proyecto propuesto sería conveniente tomar en cuenta algunos puntos de base como un estudio de mercado y un balance económico del proceso.
5. Se recomienda investigar sobre otras posibles aplicaciones del Aloe Vera contra la corrosión; por ejemplo como aditivo en recubrimientos y pinturas anticorrosivas.

## CAPÍTULO VII

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **González Hernández José A.**, Madrid 1989. Control de la corrosión estudio y medida por técnicas electroquímicas, consejo superior de investigaciones científicas centro nacional de investigaciones metalúrgicas, impreso en España y editorial grafipen sa
- **González Hernández José A.**, Madrid 1984, Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión (tiene un montón de colaboradores), obra realizada por la U.E.I de corrosión y protección del centro nacional de investigaciones metalúrgicas, y editorial grafipen sa.
- **Hines William w., Montgomery Douglas C., Goldsman David M., Borrer Connie M.**, México 2005, Probabilidad y estadística para ingeniería, tercera edición en español, compañía editorial continental
- **Bregman J.I.**, Marcel Dekker 1987, Mecanismo de Corrosión, editorial Florian Mansfeld Department of materials science university of southern California los Angeles California.
- **Barsoukov Evgenij, Macdonald J. Ross**, Canada 2005, Impedance spectroscopy theory, experiment, and applications, editorial Jhon Wiley & Sons, inc., Hoboken, New Jersey.
- **McCoy James W.**, New York, N.Y. 1984, Industrial chemical cleaning, editorial Chemical Publishing Co.

## APÉNDICE A

### PRODAC SA

PRODUCTOS DE ACERO CASSADÓ S.A., PRODAC, nace en 1994 como resultado de la unión de los dos más grandes fabricantes de alambre en el Perú, INDUSTRIAS CASSADÓ S.A. y PROLANSA. Conscientes de la globalización del comercio mundial y de la apertura que se dio en el Perú en la década de los 90, capitales peruanos conformados por los accionistas de INDUSTRIAS CASSADÓ S.A. unieron esfuerzos y recursos con el consorcio belga NV BEKAERT, el mayor fabricante de productos de alambre y productos derivados en el mundo, quien representado por sus empresas asociadas IDEAL ALAMBREC de Ecuador e INCHALAM de Chile, dieron forma a PRODAC.

#### Proceso de decapado

Dentro del proceso de obtención de alambres, se tiene una sección de proceso de limpieza del alambroón, que se da por ataque químico, esto se lleva a cabo principalmente por la inmersión del alambroón en las dos primeras tinas, ya que presentan en ellas ácido clorhídrico, este proceso permite eliminar óxidos e impurezas de la superficie, favoreciendo así la adherencia de algún revestimiento para el proceso posterior de galvanizado. La sección de limpieza de alambroón esta compuesta por siete tinas, cuyas dimensiones de cada tina es 2800 mm\* 1630 mm\* 1703 mm de volumen efectivo, que viene hacer aproximadamente 7000 L. Un punto importante es que emplea como inhibidor de corrosión el "Tenso quat Cl 44".

**Cuadro descripción del proceso de limpieza de alambroón**

<b>Tinas</b>	<b>Descripción del proceso</b>
Tina 1	Tina de predecapado, en esta etapa la concentración de ácido clorhídrico va de 20 g/L a 40 g/L, y con un tiempo de inmersión dentro 5 min a 10 min.
Tina 2	Tina de decapado, en esta etapa la concentración en ácido clorhídrico es de 180 g/L y un tiempo de inmersión 5 min a 10 min.
Tina 3	Tina de enjuague, se sumerge el alambroón en agua por un tiempo de 2 min.
Tina 4	Tina de enjuague, se sumerge el alambroón en agua por un tiempo de 2 min.
Tina 5	Tina compuesta por 1 % de inhibidor de corrosión "Tenso quat Cl 44" en agua, con tiempo de inmersión de 5 minutos
Tina 6	Tina compuesta por fosfato a 75 °C a 85 °C y un tiempo de inmersión de 5 min.
Tina 7	Tina que presenta Bórax a 85 °C a 95 °C y un tiempo de 4 min a 5 min.

Una vez ya concluido con las siete tinajas. Pasará a una cámara de vapor a una temperatura 125 °C por un lapso de tiempo de 15 minutos a 20 minutos. Con el objetivo de dejar el alambón completamente seco. Cada tiempo de exposición en las tinajas depende del grado del acero que presenta cuando, es decir desde primer grado tiene poco óxido hasta cuarto grado que presenta óxido total y de color rojizo. El rollo cuyas características son de un peso promedio 2 t y de diámetro de 5,50 mm demora de 30 minutos a 45 minutos el proceso de limpieza, decapando así por un turno de 8 horas un promedio de 40 t. Durante el uso de la tina de decapado se le va agregando 1/4 litro de inhibidor “tenso quat CI 44” al inicio de cada turno de 8 horas por la variación de la concentración de ácido y del inhibidor en la tina.

## APÉNDICE B

### FICHA TÉCNICA

#### **Kleen\* AC 9504**

Kleen AC 9504 es un inhibidor de corrosión para las soluciones ácidas usadas en la limpieza de superficies metálicas. Kleen AC 9504 presenta alto grado de dispersabilidad en soluciones ácidas, ofreciendo excelente protección en las concentraciones normales de ácido clorhídrico empleadas en limpiezas industriales.

#### **Composición Básica**

Kleen AC 9504 es un inhibidor fílmico basado en compuestos orgánicos no saturados nitrogenados.

#### **Dosificación y Aplicación**

Las dosis dependen principalmente de las condiciones operacionales (temperatura, estado del equipo, tiempo de limpieza, etc.), y concentración de ácido. Dosificación orientativa: 0,1 % al 0,5 % en una solución de ácido clorhídrico. Se recomienda emplear Kleen AC 9504 en las operaciones de limpieza con ácido clorhídrico, con una acción de inhibición de los procesos corrosivos que ocurrirían debido al contacto del ácido con las superficies metálicas. El producto deberá ser aplicado directamente en la solución a ser utilizada en la limpieza y homogeneizado para dispersión total.

#### **Envasado**

Kleen AC 9504 es una mezcla líquida, disponible en una gran variedad de contenedores individualizados.

#### **Seguridad y Manejo**

Kleen AC 9504 es un producto inflamable y moderadamente tóxico.

**FICHA TÉCNICA****BYC OXA S****DECAPADO PARA METALES FERROSOS**

BYC OXA S es un producto ácido desarrollado para el decapado de metales ferrosos, eliminando en forma rápida los óxidos sin atacar el metal base, debido a los inhibidores que contiene.

**Condiciones de operación**

Concentración	Listo uso
Temperatura	25 °C a 50 °C
Tiempo de inmersión	Dependiendo del óxido o incrustación a remove

Para evitar la emanación de vapores producidos por el agotamiento del inhibidor, se recomienda adicionar POLICID S 2 (4 cm<sup>3</sup>/kg - 8 cm<sup>3</sup>/kg de BYC OXA S)

**Controles analíticos****Determinación de acidez**

- Tomar 10 cm<sup>3</sup> de muestra y llevarlos a un erlenmeyer de 250 cm<sup>3</sup>
- Adicionar 4 a 6 gotas de fenolftaleína al 1 %.
- Titular con soda cáustica 1,0 N hasta punto final rosa.

Puntuación ácida = cm<sup>3</sup> de soda cáustica 1 N

Para aumentar en un punto la acidez de la solución se requieren 20 cm<sup>3</sup>/L de BYC OXA S concentrado.

**Propiedades físico químicas**

Aspecto líquido incoloro

Estado físico líquido

Color incoloro

Peso específico 1,2 N/m<sup>3</sup> – 1,4 N/m<sup>3</sup>

Solubilidad en agua completa

Naturaleza química ácido

## FICHA TÉCNICA BYCLEN B – 22

BYCLEN B-22 es un inhibidor que adicionado a los decapados convencionales y por acción de los tensoactivos incorporados en su formulación imprime a las piezas un alto poder desengrasante, que permite eliminar grasas, aceites livianos y pesados en una sola operación, además de los óxidos, calaminas y herrumbres del material con el tratado previo a los procesos electrolíticos, galvanizado en caliente, pintura, esmaltado y fosfatado.

BYCLEN B-22 en piezas como tubería, con cavidades profundas ejerce una excelente acción desengrasante y desincrustante, ya que llega hasta las zonas más difíciles asegurando la calidad del proceso de limpieza.

Condiciones de operaciones de los baños de decapado:

<b>Decapado hierro y acero (acción media)</b>	
Agua	45 % V/V
Ácido clorhídrico	45 % V/V
BYCLEN B-22	10 % V/V
Temperatura	AMBIENTE

### **Propiedades físico químicas**

Aspecto Líquido rojo

Estado físico Líquido

Color rojo

Densidad 1,01cm<sup>3</sup>/L – 1,03 cm<sup>3</sup>/L

Viscosidad Copa Zahn 22 s - 26 s

Solubilidad en agua completa

Naturaleza química ácido

**FICHA TÉCNICA****INIBEX 500****INHIBIDOR PARA BAÑOS DE DECAPADO**

INIBEX 500 es un compuesto orgánico formulado como aditivo inhibidor de corrosión en baños de decapado con ácido clorhídrico o ácido sulfúrico, cuya función es inhibir el ataque químico e hidrogenación sobre todos los metales especialmente el Hierro, sin reducir el efecto desoxidante dando lugar a piezas libres de carbón, poros y picaduras durante el decapado INIBEX 500 reduce la emanación de gases corrosivos que normalmente se generan durante el proceso de decapado o desoxidado, los cuales afectan las mucosas en perjuicio de la salud de los operadores y deterioro de los equipos que se encuentren en los talleres galvanicos.

Condiciones de operación de los baños de decapado:

<b>decapado en medio de ácido clorhídrico</b>	<b>decapado en medio de ácido sulfúrico</b>
Ácido Clorhídrico 50 % V/V	Ácido Sulfúrico 20 % V/V
Agua 50 % V/V	Agua 80 % V/V
Inibex 500 5 cm <sup>3</sup> /L	Inibex 500 5 cm <sup>3</sup> /L
Temperatura Ambiente	Temperatura de 40 °C a 50 °C

**Propiedades físico químicas**

Aspecto líquido amarillo

Estado físico líquido

Color amarillo

PH 4 - 6

Densidad 0,99 cm<sup>3</sup>/L – 1,01 cm<sup>3</sup>/L

Solubilidad en agua completa

Naturaleza química ácido

## FICHA TÉCNICA

### POLISID C – 30

#### INHIBIDORES DE ATAQUE ÁCIDO

POLISID C - 30 son productos líquidos formados por compuestos que reducen el ataque del ácido sobre el metal base en líneas pretratamiento previo a pintura, favoreciendo la disolución de los óxidos, calaminas y herrumbres en función de el ácido empleado, concentración, temperatura y tiempo de decapado. Hay gran cantidad de procesos como el recocido, temple y tratamientos térmicos, entre otros que producen sobre la superficie del material de hierro una formación de óxidos y cascarillas que es preciso eliminar antes de aplicar cualquier tipo de acabado (fosfatación, tratamientos galvánicos, galvanizado en caliente, etc.), mediante un baño de decapado, normalmente ácido clorhídrico (50 % en volumen y temperatura ambiente). El ácido tiene tendencia a reaccionar y disolver la capa exterior formada por óxidos ricos en oxígeno  $Fe_2O_3$  y  $Fe_3O_4$  que son poco solubles, penetrando a los poros y herrumbres del metal base, disolviéndolos fácilmente.

#### Ventajas

Al emplear POLISID C - 30 en los baños de decapado, se tienen las siguientes ventajas:

- Disminuye el ataque sobre el metal base reduciendo la disolución del material.
- Aumenta el rendimiento del ácido empleado, alargando la vida del baño.
- Reduce la emanación de gases o vapores producidos a al atmósfera que afectan la salud de los operadores y los equipos o estructuras metálicas cercanas al baño de decapado.
- Modera el ataque del ácido sobre el metal sin reducir la acción desoxidante, evitando la hidrogenación y fragilidad posterior del metal base.
- Se utiliza únicamente en decapados con ácido clorhídrico.

#### Condiciones de operaciones

POLISID C-30	5 cm <sup>3</sup> /kg - 10 cm <sup>3</sup> /kg de ácido concentrado
Temperatura	25 °C - 30 °C

## **FICHA TÉCNICA**

### **POLISID 100**

#### **Inhibidor de corrosión para decapados con ácido clorhídrico**

El POLISID 100 es un inhibidor total para baños de decapado. Su poder inhibidor permite trabajar en cubas de acero sin revestimiento antiácido y elimina todo riesgo de fragilización sobre las piezas. Este nuevo inhibidor elimina todo riesgo de ataque por escurridos imprevistos y ofrece una eficacia máxima a muy bajas concentraciones.

#### **Propiedades**

Alto poder inhibidor > 99 %

Baja carga orgánica

Eficacia máxima a baja concentración

Elimina todo riesgo de fragilización

Permite trabajar en cuba de acero sin revestimiento

Baja formación de espuma.

#### **Características técnicas**

Aspecto. Líquido naranja fácilmente soluble en ácido clorhídrico.

PH producto concentrado 6,00

PH producto diluido: corresponde al PH del baño es el que se incorpora.

#### **Condiciones de trabajo**

##### **Concentración:**

La concentración ideal de uso de este compuesto para trabajo en cuba:

Revestida: 1L a 2 L por 1000 litros de baño / equivalentes a 2-4 ‰ sobre la concentración en *HCl*. Acero no revestido: 3 litros por 1000 litros de baño/ equivalentes a 2-4 ‰ sobre la concentración en *HCl*. Estas concentraciones están determinadas en relación a un baño montado a 50 % *HCl* y 50 % de agua.

##### **Temperatura:**

Este producto está formulado para funcionar a la misma temperatura que la del baño en la que se incorpora. En función del caso, puede ser usado hasta 35 °C.

##### **Metales a tratar**

Este tipo de producto permite trabajar sobre acero.