



Universidad Nacional  
**SAN LUIS GONZAGA**



## **[Reconocimiento-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)**

Esta licencia permite a otras combinar, retocar, y crear a partir de su obra, incluso con fines comerciales, siempre y cuando den crédito y licencia a las nuevas creaciones bajo los mismos términos. Esta licencia suele ser comparada con las licencias copyleft de software libre y de código abierto. Todas las nuevas obras basadas en la suya portarán la misma licencia, así que cualesquiera obras derivadas permitirán también uso comercial.

<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



EVALUACION DE ORIGINALIDAD

CONSTANCIA

El que suscribe, deja constancia que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud al **BORRADOR DE TESIS** cuyo título es:

**"DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE AGITACIÓN PARA EL PROCESO QUÍMICO - METALÚRGICO DE CIANURACIÓN DEL ORO"**

Presentado por:

**AVILA MEZA RAÚL GERARDO**

De la **MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA** mención **PROCESOS QUÍMICOS Y AMBIENTALES**.

Que, se ha recibido del operador del programa informático evaluador de originalidad de la Escuela de Posgrado de la UNICA, el informe automatizado de originalidad, el mismo que concluye de la siguiente manera:

**El documento de investigación APRUEBA los criterios de originalidad con un porcentaje de similitud de 3%.**

Para dar fe, se adjunta al presente el reporte de similitud de las bases de datos de iThenticate. En Ica 01 de julio del 2022

Atentamente

UNIVERSIDAD NACIONAL "SAN LUIS GONZAGA"  
ESCUELA DE POSGRADO  
  
Dr. ROBERTO H. CASTAÑEDA TERRONES  
DIRECCIÓN DE LA ESCUELA DE POSGRADO

UNIVERSIDAD NACIONAL “SAN LUIS GONZAGA” DE ICA  
ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA  
MENCIÓN PROCESOS QUÍMICOS Y AMBIENTALES



---

***“Diseño y evaluación de un sistema de agitación  
para el proceso químico –metalúrgico de  
cianuración del oro”***

---

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN ENGENIERÍA  
QUÍMICA

**Raúl Gerardo Avila Meza**

**ASESOR:**

Dr. Humberto Santos Olivera Machado

**Mayo, 2022**

## DEDICATORIA

*A Dios*

*A Justina Rojas, y*

*Aida Meza, mi madre*

*A mis hijos, nietos y  
hermanos por su constante  
apoyo*

## AGRADECIMIENTOS

*Debo expresar mi enorme agradecimiento al personal de laboratorio de la Facultad de Ingeniería Química y Petroquímica de la Universidad Nacional "San Luis Gonzaga" por las facilidades prestadas en el uso de sus instalaciones para realizar el presente estudio.*

*Asimismo, dar el reconocimiento al que en vida fue mi estimado amigo el Mag. Marco Antonio Mendoza Melgar; así como también a la Sra. Ada Buitrón Coria quien me apoyó moralmente y en la redacción del informe final.*

*Finalmente, agradezco a mi Asesor, el Dr. Santos Humberto Olivera Machado, por sus valiosas orientaciones en el desarrollo de la presente tesis.*

## INDICE

DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	viii
INTRODUCCIÓN.....	x
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Antecedentes .....	1
1.1.1. Antecedentes Internacionales.....	1
1.1.2. Antecedentes Nacionales.....	2
1.1.3. Antecedentes Regionales.....	5
1.2. Bases teóricas.....	6
1.2.1. El oro, propiedades y yacimientos.....	6
1.2.2. Procesos del tratamiento del oro.....	11
1.2.3. Agitación.....	19
1.3. Marco conceptual.....	21
CAPÍTULO II: PLATEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	23
2.1. Situación problemática.....	23
2.2. Formulación del problema.....	24
2.2.1 Problema general.....	24
2.2.2 Problemas específicos.....	24
2.3. Justificación e importancia de la investigación.....	24
2.3.1. Justificación.....	24
2.3.2. Importancia.....	25

2.4	Objetivos de la investigación.....	25
2.4.1	Objetivo general.....	25
2.4.2	Objetivos específicos.....	25
2.5	Hipótesis de la investigación.....	26
2.5.1	Hipótesis general.....	26
2.5.2	Hipótesis específicas.....	26
2.6	Variables de investigación.....	26
2.6.1	Identificación de variables.....	26
2.6.2	Operacionalización de variables.....	27
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....		28
3.1.	Tipo, nivel y diseño de la investigación.....	28
3.2.	Población y muestra.....	29
CAPÍTULO IV: TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN.....		30
4.1.	Técnicas de recolección de datos.....	30
4.2.	Instrumentos de recolección de datos.....	30
4.3.	Técnicas de procesamiento, análisis e interpretación de resultados.....	31
CAPÍTULO V: CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS.....		32
5.1.	Contrastación de las hipótesis específicos.....	32
5.2.	Contrastación de la hipótesis general.....	32
CAPÍTULO VI: PRESENTACIÓN, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....		35
6.1.	Presentación e interpretación de resultados.....	35
6.1.1.	Resultados del estudio del proceso de cianuración del oro.....	35

6.1.2. Resultados de diseño del sistema de agitación.....	38
6.2. Discusión de resultados.....	55
CONCLUSIONES.....	57
RECOMENDACIONES.....	58
FUENTES DE INFORMACIÓN.....	59
ANEXOS.....	62

## RESUMEN

La investigación se desarrolló con la finalidad de diseñar un sistema de agitación para el proceso de cianuración del oro, proveniente de minerales sulfurados de la región Ica, partiendo de la necesidad de contar con el dimensionamiento y características específicas para una operación eficiente y que promueva el proceso productivo de las plantas metalúrgicas respectivas. Para este propósito se planteó la comprobación de la hipótesis general: “El diseño y evaluación de un sistema de agitación para el proceso químico – metalúrgico de cianuración del oro depende de la velocidad de agitación, del tipo de agitador y volumen de líquido a tratar”. Así, mediante las técnicas de dimensionamiento de equipos de proceso se determinó un sistema de agitación compuesto de un tanque cilíndrico de 2.942 m de diámetro, 3.825 m de altura, 23 % de volumen de seguridad, 4 placas deflectoras, un agitador con impulsor de turbina de disco con seis placas planas de 0.981 m de diámetro (0.196 m de ancho de placa y 0.245 m de longitud de placa). Además, mediante la aplicación de correlaciones experimentales referenciadas se estimaron las viscosidades de la solución cianurada y de la suspensión para establecer la velocidad de rotación del agitador en 155.76 rpm y un motor de 134.834 HP para poner en funcionamiento el sistema de agitación.

Palabras clave: cianuración, agitación, lixiviación, impulsor.

## ABSTRACT

The research was developed with the purpose of designing an agitation system for the cyanidation process of gold, coming from sulphide minerals of the Ica region, based on the need to have the dimensioning and specific characteristics for an efficient operation that promotes the production process of the respective metallurgical plants. For this purpose, the verification of the general hypothesis was proposed: "The design and evaluation of an agitation system for the chemical-metallurgical process of gold cyanidation depends on the speed of agitation, the type of agitator and the volume of liquid to be treated". Thus, by means of process equipment sizing techniques, an agitation system was determined consisting of a cylindrical tank with a diameter of 2,942 m, a height of 3,825 m, a safety volume of 23%, 4 deflector plates, an agitator with a turbine impeller disk with six flat plates of 0.981 m in diameter (0.196 m plate width and 0.245 m plate length). In addition, by applying referenced experimental correlations, the viscosities of the cyanide solution and of the suspension were estimated to establish the rotation speed of the stirrer at 155.76 rpm and a 134,834 HP motor to start the stirring system.

UNIVERSIDAD NACIONAL “SAN LUIS GONZAGA” DE ICA  
ESCUELA DE POSGRADO  
MAESTRIA EN INGENIERÍA QUÍMICA  
MENCIÓN PROCESOS QUÍMICOS Y AMBIENTALES



---

***“Diseño y evaluación de un sistema de agitación  
para el proceso químico –metalúrgico de  
cianuración del oro”***

---

TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN ENGENIERÍA  
QUÍMICA

**Raúl Gerardo Avila Meza**

**ASESOR:**

Dr. Humberto Santos Olivera Machado

**Mayo, 2022**

## INTRODUCCIÓN

Un sistema de agitación y mezclado de líquidos está definido como un conjunto de dispositivos que actuando en conjunto ponen en movimiento circulatorio un líquido de tal manera que uniformizan el contacto de dos masas de líquidos diferentes, ya sean miscibles o inmiscibles. Este tipo de operación un sistema muy utilizado en los procesos de planta piloto y planta industrial; asimismo, se considera que el éxito de muchos procesos industriales depende principalmente del funcionamiento adecuado del sistema de agitación y mezcla, lo cual se traduce finalmente en una buena calidad del producto.

En su mayoría, existe una tendencia a confundir agitación y mezcla líquida, están relacionados, pero no significan lo mismo. La agitación se refiere al movimiento de materiales inducido de una manera específica, generalmente con un patrón circulatorio dentro de un tanque o recipiente; en contraste, una mezcla líquida es una distribución aleatoria de dos o más fases inicialmente separadas.

Comúnmente un sistema de agitación de líquidos consiste de un recipiente cilíndrico o tanque (cerrado o abierto), y un agitador mecánico, montado en un eje vertical y accionado por un motor eléctrico. Las proporciones del tanque varían ampliamente dependiendo del volumen de líquido a procesar, el fondo del tanque es redondeado con la finalidad de eliminar los bordes rectos o regiones en las cuales no penetran o se estacan masas del fluido.

Sin embargo, la agitación de líquidos, a pesar de su aplicación frecuente en los procesos industriales, es un fenómeno de transporte complejo y, por ello, difícil de analizar y caracterizar. Al respecto muchos estudios sobre esta operación han generado información importante sobre los tipos de patrones de flujo que se manifiestan durante el proceso, como también sobre la relación entre la potencia necesaria para el desarrollo efectivo de la operación con la velocidad de rotación del impulsor, las propiedades del fluido y las dimensiones del sistema. En cambio, hasta la actualidad no se dispone de un método sistemático para orientar el diseño de estos sistemas, más aún si se pretende conseguir un mezclado óptimo de líquidos. En este sentido, para contribuir con resolver esta situación es que se propone llevar a cabo la

investigación titulada: *“Diseño y evaluación de un sistema de agitación para el proceso químico –metalúrgico de cianuración del oro”*, cuya finalidad principal consiste en desarrollar un método sistémico y práctico para realizar el diseño de un sistema de agitación de acuerdo con las necesidades específicas del proceso de lixiviación del oro.

# CAPÍTULO I:

## MARCO TEÓRICO

### 1.1. Antecedentes

#### 1.1.1 Antecedentes internacionales

- Santamaría, J. I. (2013). *Comparación de cianuro y tiourea como agentes lixiviantes de un mineral aurífero colombiano*, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia. “Se trata de un estudio preliminar de la lixiviación del oro a partir de un mineral de oro procedente de Marmato (Caldas); como agentes lixiviantes se aplicaron tiourea y cianuro de sodio. El estudio se llevó a cabo en tres etapas: 1) caracterización del mineral por medio de difracción de rayos X (DRX), ensayo al fuego y cuantificación de oro por absorción atómica (AA); 2) desarrollo de lixiviación con los agentes en muestras minerales de 100 g, durante 8 horas, con una agitación de 800 rpm y a temperatura ambiente, tomando muestras de solución en intervalos controlados de tiempo, y 3) análisis de rendimientos de extracción de oro. Se encontró que las lixivitaciones con tiourea arrojaron mayor rendimiento que las de cianuro” [16].

- Arias L., T; Fernández C., D.; Sánchez R., Y. y Lasserra P., A. (2016). *Influencia de la lixiviación en la recuperación de oro en la Mina Oro-Barita de Santiago de Cuba*, Facultad Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba. En Santiago de Cuba existe un yacimiento de barita aurífera donde se obtiene oro por lixiviación con cianuro y precipitación de polvo de zinc. La tasa de recuperación de oro no fue tan buena como se esperaba, por lo que se evaluó el proceso de lixiviación, estudiando el período de diciembre de 2014 a marzo de 2015 para identificar todas las variables que podrían afectar negativamente las tasas de recuperación de oro. Los resultados muestran que el cobre metálico es el metal que afecta fundamentalmente la recuperación de oro durante la lixiviación, ya que se observó un aumento significativo en la concentración de cobre de 100 a 160 g/m<sup>3</sup> debido a la cinética de disolución del

cobre con el cianuro y al cobre que se incorpora a la lixiviación durante la recirculación de la solución de irrigación [2].

- Carrillo, M.; Delgado, J. y Córdova, E. (2017). “*Lixiviación con tiourea de dos minerales auroargentíferos santandereanos*, Facultad de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. El objetivo de este trabajo fue evaluar la eficiencia del proceso de lixiviación con tiourea en comparación con la reacción de cianuración de dos tipos diferentes de muestras de mineral de oro-plata de Santander, California: oxidativo y sulfídico. La caracterización química y mineralógica de los minerales mediante técnicas de FRX y DRX. Las muestras también fueron caracterizadas metalúrgicamente mediante ensayo al fuego, distribución de la red de oro, pruebas de diagnóstico de lixiviación y determinación del grado de lixiviación en botella de cianuración. Se determinó la influencia sobre la disolución de oro de las variables: concentración de agente lixivante (tiourea), relación molar oxidante ( $\text{Fe}^{3+}$ )/lixivante y potencial redox. La lixiviación con tiourea demostró ser mucho más rápida que la cianuración, además mucho más selectiva, pues no fue afectada en gran medida por los agentes causantes de la refractariedad a la cianuración en el mineral sulfurado, llegando a niveles de disolución de oro de 96 % luego de diez horas de lixiviación, valor muy superior al 46 % obtenido mediante la lixiviación con cianuro durante 35 horas” [3].

### **1.1.2 Antecedentes nacionales**

- Guzmán P., S. (2015). Estudio del proceso de lixiviación de oro en la Planta AURELSA, Universidad Nacional San Agustín, Arequipa, Perú. Los trabajos de exploración incluyen la planta de AURELSA, donde se lleva a cabo la extracción intensiva de oro. El método de amalgama gravimétrica se utiliza para beneficiar los minerales de oro de alta ley, mientras que el método de cianuración se utiliza para los minerales de baja ley. En la Gravimetría se usa el "quimbaleta" y para la cianuración se usan los métodos de "cianuración vat leaching" y carbón en columna. “Es bien sabido que los procesos metalúrgicos en estas explotaciones auríferas se llevan a cabo, en su mayoría, de forma tecnológica y con poca información teórica y práctica. Además, hay que tener en cuenta la falta de

evaluación económica del proceso de extracción de oro y la comercialización del oro en forma de relaves y oro refogado, lo que ha llevado al cierre de muchas explotaciones mineras. Dar prioridad a la formación en todos estos aspectos relacionados con la extracción de oro, la protección de la salud y el medio ambiente y la consecución de operaciones económicamente viables. Por lo tanto, deben estudiarse los conceptos básicos, los procedimientos, el control de calidad, la evaluación metalúrgica y la seguridad de la cianuración en el procesamiento del mineral de oro” [4].

- Rivera, H., J. F. (2018). *Optimización del pH en la cianuración de oro a partir de minerales arsenopiríticos en la Minera Aurífera Retamas S.A.*, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú. El objetivo principal fue “Optimizar el pH en la cianuración de oro a partir de minerales arsenopiríticos” y como objetivos específicos: “Evaluar el consumo de cianuro en función del pH”; “Evaluar la solubilidad del arsénico en función del pH” y “Determinar el tiempo de agitación con respecto a la extracción”. “Se realizaron pruebas con mineral de la remolienda con una granulometría –m400 entre 95-98%, y una concentración de NaCN al 0.25%, a diferentes pH (11, 12 y 12.5), variando los tiempos de agitación (24, 48 y 72 h) y a 750 RPM. Se tomaron alícuotas de muestra, para controlar pH, concentración de cianuro, % extracción; al igual que los relaves de cada prueba, fueron enviados al ensayo químico. Se concluyó que, al trabajar a pH alto, conlleva a un menor consumo de NaCN; por otro lado, al aumentar el pH disminuye significativamente la disolución de arsénico, y a tiempos de lixiviación comprendidos entre 48 y 72 h se obtuvieron recuperaciones favorables” [15].

- Huarza H., J. I. (2018). *“Estudio de mejoras y adecuamiento metalúrgico en la etapa de lixiviación para recuperar Oro y Plata del concentrado aurífero en la Empresa Minera Aurífera Retamas – MARSAS”*, Universidad Nacional San Agustín, Arequipa, Perú. Para efectos de este trabajo de investigación, el mineral en estudio corresponde a la Mina Minera Aurífera Retamas S. A. ubicada en el anexo de Llacuabamba, distrito de Parcoy, provincia de Pataz. El mineral en estudio es del tipo sulfuro, el cual ha sido concentrado por flotación, previamente a partir de este concentrado se realizaron una serie de pruebas

para determinar la influencia de tres variables operativas en la lixiviación por agitación como son la concentración de cianuro de sodio, pH y oxígeno. “Se realizó el muestreo y preparación de muestra del concentrado y se determinó su ley de oro, plata, se le realizó la remolienda a una granulometría requerida, con cianuro, y cal, luego se realizó la lixiviación con cianuro por agitación con los parámetros requeridos de pH, fuerza de cianuro, concentración de oxígeno, y otros parámetros se mantuvieron constantes como, por ejemplo, granulometría, densidad de pulpa y velocidad de agitación. Los resultados de las pruebas experimentales determinaron la significancia de cada variable, encontrando que la concentración de cianuro en la solución lixivante de 0,2 y 0.25% es el más adecuado para el proceso obteniéndose una disolución de oro mayor de 96% y menor disolución de otros metales, la máxima extracción de plata (78,76%), estos valores se obtienen con inyección de oxígeno puro y en la prueba de pH se evaluó la disolución de arsénico en la cual resultó que a pH 13 la disolución baja a 0,74%; por otro lado, resultó que el menor ratio de consumo de cianuro de sodio se obtuvo al variar el pH a 13 con un ratio de 4,59 kg/TM el cual representa una reducción de consumo de cianuro de aproximadamente 50%, todo esto fue realizado en las instalaciones del laboratorio metalúrgico de la Minera Aurífera Retamas-Marsa S.A” [5].

### **1.1.3 Antecedentes regionales**

A nivel regional no se han hallado estudios recientes sobre el procesamiento metalúrgico del oro; sin embargo, es pertinente citar los siguientes:

- Alarcón E., A. M. (1987). *Estudio de la lixiviación en pilas como alternativa de recuperación de oro y plata en el Sur Medio*, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional san Luis Gonzaga, Ica, Perú. El estudio se ejecutó siguiendo un diseño experimental para las pruebas de lixiviación por percolación y aireación a partir de mineral fino en – 12 mallas, en donde por aglomeración se obtuvo una disolución de 80,1 % y 60 %, en oro y plata respectivamente; asimismo, aplicando la precipitación Merrill Crowe se alcanzó una eficiencia de 97% [1].

- Quijandría L., J. C. (1994). “*Anteproyecto de una planta de cianuración por percolación (Vat leaching) para recuperación de oro a partir de los relaves de amalgamación*”, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional San Luis Gonzaga, Ica, Perú. El estudio se inicia con un estudio de mercado a nivel nacional y regional de la Provincia de Ica, se determina la localización y el tamaño de la planta en 150 ton/mes, a partir de una alimentación consistente en 80 ton de relave con una ley de 0,4 oz/ton. Dicho estudio resulta justificado económicamente en lo que respecta la inversión y financiamiento, como en la proyección de los ingresos y egresos, VANE, VANF, TIRE y TIRF” [14].

- Lara, M., F. H., (1995). *Estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta metalúrgica para el tratamiento de minerales auríferos*, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional san Luis Gonzaga, Ica, Perú. El estudio determina la ingeniería de la planta para desarrollar el proceso de lixiviación en pilas (heap leaching) por cianuración, en donde la operación comienza con la clasificación del mineral, seguido de chancado, aglomeración y apilamiento, después se lava y se procede a la cianuración. La solución rica en oro se bombea hacia las columnas de adsorción con carbón activado, para después proceder a la desorción y refinación final. Los indicadores económicos positivos obtenidos determinan la factibilidad del proyecto [7].

## 1.2. Bases teóricas

### 1.2.1 El oro, propiedades y yacimientos

#### Generalidades del oro

El nombre del oro proviene del latín: *aurum*, que significa “brillante”. El oro es uno de los metales preciosos más conocidos. En su estado puro, el oro es un metal amarillento y brillante, apariencia que sostiene incluso al ser aleado con otros metales. Debido a que presenta escasos pocos estados de oxidación, no suele perder su lustre con el tiempo.

Se conoce que desde la edad de cobre el oro fue empleado por el hombre con fines ornamentales y comerciales; así, por ejemplo, se han encontrado utensilios, joyas y monedas en zonas arqueológicas de la China antigua. Actualmente, el oro tiene muchas aplicaciones en la industria electrónica, por su alta conductividad eléctrica y su resistencia a la corrosión; además, se utiliza en la fabricación de prótesis y amalgamas dentales, como también en la composición de medicamentos para el tratamiento específico de ciertas enfermedades, como la artritis.

El oro en su estado puro es inofensivo para la salud debido a que es poco reactivo, por lo cual no representa un peligro de por sí.

#### Origen

Generalmente el oro se encuentra bajo tierra, en depósitos aluviales en forma de pepitas o pequeñas acumulaciones, ya sea en estado de pureza o junto a otros minerales en formaciones aluviales. Los depósitos de oro se forman cuando el agua caliente fluye a través de las rocas, la cual disuelve cantidades diminutas de oro que luego se concentran en las grietas de la corteza terrestre.

Los estudios realizados sobre el origen del oro consideran que es producto de la fusión nuclear de elementos metálicos como el hierro en metales más pesados.



Figura 1. Oro nativo y mineral de oro

### **Propiedades físicas y químicas**

El oro es un elemento químico que se representa con el símbolo “Au” en la tabla periódica de los elementos. “Se ubica entre los metales de transición, en el grupo IB de la tabla, entre el platino y el mercurio”.

“El oro posee número atómico 79, un peso atómico de 196.967 u.m.a y un peso específico de aproximadamente 19,3 kg/m<sup>3</sup>. Sus números de oxidación principales son +1 y +3 y tiene una electronegatividad de 2.54 en la escala de Pauling”.

“Su estructura atómica es el oro es el metal más dúctil y maleable que se conoce, por lo que resulta idóneo para la joyería y su moldeado en diversas formas ornamentales. Su punto de fusión es a los 1064.18°C y su punto de ebullición es 2856°C, es un buen conductor del calor y de la electricidad. Por otro lado, el oro en estado de pureza es sumamente blando, por lo que suele

alearse con otros metales para endurecerlo y emplearlo comercial, industrial o decorativamente; asimismo, es muy resistente a la corrosión y la oxidación”. [5]

“El oro presenta muy baja reactividad química, en cambio es muy reactivo frente a cianuros ( $\text{CN}^{-1}$ ), cloruros ( $\text{Cl}^{-1}$ ) y bromuros ( $\text{Br}^{-1}$ ). Muchos de estos compuestos son empleados en la minería para identificar la presencia de este metal. También se le puede disolver en ciertas mezclas de ácidos y álcalis específicos, como por ejemplo en agua regia ( $\text{HNO}_3$  y  $\text{HCl}$ ) y soluciones de cianuros”. [6]

“El oro presenta un único isótopo (variedad atómica) estable, el  $^{197}\text{Au}$ , único además de origen natural. Se han logrado numerosos radioisótopos del oro en laboratorio, ninguno de los cuales supera los 186,1 días de vida”.

### **Aleaciones de oro**

Se tienen siete aleaciones del oro, cada una con un nombre distintivo por el color:

- 1) “Oro amarillo. Producto de la mezcla de oro (75%), plata (12,5%) y cobre (12,5%)”.
- 2) “Oro rojo. Compuesto por oro (75%) y cobre (25%)”.
- 3) “Oro rosado. Compuesto por oro (75%), cobre (20%) y plata (5%)”.
- 4) “Oro blanco. Producto de la aleación del oro (75%), paladio (16%) y plata (9%)”.
- 5) “Oro gris. Formado a partir de oro (75%), níquel (15%) y cobre (10%)”.
- 6) “Oro verde. Compuesto por oro (75%) y plata (25%)”.
- 7) “Oro azul. Aleación de oro (75%) y de hierro (25%)”.

## **Yacimientos importantes en el Perú**

Para la ubicación de un yacimiento de oro se utiliza la información pública del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), mapas geológicos, imágenes satelitales, etc. Las áreas para explorar en terreno se definen recolectando muestras para análisis químico y realizando el reconocimiento geológico respectivo.

El Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM) establece que la producción de oro está concentrada en las regiones de Arequipa, Puno, Madre de Dios y Piura; no obstante, hay intensa actividad en otras regiones e incluso en lugares cercanos a la zona de influencia de mineras auríferas y cupríferas [6].

Los principales yacimientos de oro del Perú son los siguientes:

- Minera Yanacocha (Cajamarca)
- Minera Buenaventura (Arequipa)
- Minera Laguna del Norte (La Libertad)
- Minera Hochschild Mining (Ayacucho)
- Minera Cerro Corona (Cajamarca)

## **Yacimientos de oro en el Departamento de Ica**

“En la provincia de Ica existen muchas minas de cobre, entre ellas las más reconocidas son las minas Canza, Tingue y Yauca, que dan minerales muy variados de este metal asociado con oro, en donde abundan la cuprita, chalcosina, covellina, chalcopirita, fillipsita, atacamita, malaquita, azurita, cuprocalcita, crisocola y varias mezclas íntimas de chalcosina con atacamita, limonita, etc. Estos minerales van frecuentemente acompañados de pirita, cuarzo, calcita, yeso, etc., y en muchos casos con pequeñas cantidades de oro nativo”. [9]




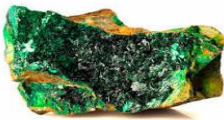
“Asimismo, en la provincia de Chincha tenemos el yacimiento del cerro Cinco Cruces con minerales del mismo que los de Canza y Tingue y sólo en donde aparecen piedras con oro nativo muy visible a la simple vista. Además, en la

provincia de Nazca hay un cerro aurífero conocido con el nombre de Cerro Blanco. En este yacimiento el oro se encuentra diseminado, e invisible a simple vista asociado al cuarzo con óxido de fierro; la riqueza en oro de este mineral varía muchísimo, habiendo dado en ciertos casos 22 gramos de oro por tonelada métrica”.

En la figura 2 se muestran los principales minerales de los yacimientos mineros del departamento de Ica.

Figura 2. Minerales del departamento de Ica

MINERALES DEL DEPARTAMENTO DE ICA		
MINERAL	IMAGEN	FÓRMULA
Phillipsita		$(CaKNa)_6(Si_{10}Al_6)O_{32} \cdot 12H_2O$
Cuprocalcita		$CaCO_3 + Cu$
Covellina		$CuS$
Calcosina		$Cu_2S$
Calcopirita		$CuFeS_2$

<b>Malaquita</b>		$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$
<b>Azurita</b>		$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$
<b>Crisocola</b>		$(\text{Cu,Al})_4\text{H}_4(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10} \cdot n\text{H}_2\text{O}$
<b>Atacamita</b>		$\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$

### 1.2.2 Procesos de tratamiento del oro

Los procesos de tratamiento metalúrgico del oro más aplicados a nivel mundial son:

- Amalgamación
- Cianuración
- Flotación

#### **Amalgamación**

“La amalgamación es un proceso de concentración en el cual los metales nativos son separados de los minerales no metálicos que forman la ganga, en razón de su mojabilidad selectiva a los minerales no metálicos”.

“Entre los metales amalgamables figuran el zinc, estaño, cobre, cadmio, plomo, bismuto y sodio”.

“La amalgamación es un proceso que se aplica para recuperar oro y plata nativa de materiales auríferos o argentíferos. El oro, la plata y otros metales y sus compuestos pueden formar aleaciones con el mercurio. La amalgama en las minas de oro se utiliza para extraer el oro en forma de amalgama para separarlo de los minerales asociados. El oro libre (nativo) en un tamaño de

grano entre 20-50 mm y 1-2mm es apropiado para la amalgamación. El oro grueso se puede recuperar fácilmente con métodos gravimétricos”.

“La amalgama se forma por el contacto entre el mercurio y el oro en una pulpa con agua. El mercurio puede estar presente en forma de "perlas" dispersas en la pulpa o extendido sobre una superficie (planchas amalgamadoras). Hasta el día de hoy la pequeña minería aurífera utiliza esta técnica de manera generalizada” [20].



Figura 3 Amalgamación del oro

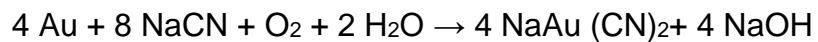
### **Cianuración**

“El proceso de lixiviación con cianuro es el método más importante desarrollado para extraer el oro de sus minerales. Las razones para su aceptación generalizada, son económicas, así como metalúrgicas. Por lo general por este método se obtiene una mayor recuperación de oro que la amalgamación y es más fácil de operar. Se obtiene el producto final en forma de metal prácticamente puro. Así, mediante este proceso la producción de una gran planta estará representado por una barra de oro comparativamente pequeña, que es fácil de transportar”. [9]

“La base del proceso de cianuración radica en el hecho que las soluciones de cianuro de potasio o sodio tienen una disolución preferencial por las

partículas de oro metálico y plata que sobre la mayoría de otros materiales que normalmente conforman los minerales de oro. Sin embargo, también se pueden encontrar minerales conocidos como cianocidos que tienen efectos negativos en el proceso de cianuración”.

“El cianuro es el término descriptivo general generalmente aplicado al cianuro de sodio, NaCN; en este caso, la ecuación de Elsner es generalmente aceptada como una expresión de la real reacción del oro en soluciones de cianuro diluido”:



“De esta manera, cuando las superficies frescas de oro están expuestas a la acción del cianuro en solución acuosa conteniendo oxígeno libre, se forma un compuesto de cianuro de oro y un hidróxido”. [9]

La concentración de la solución de cianuro adecuada para el proceso es de una libra de cianuro (NaCN) por una tonelada de solución (agua). Esto generalmente es lo suficientemente fuerte para la mayoría de los circuitos de cianuración, y el trabajo experimental ha demostrado que de este modo se obtiene el máximo poder de disolución.

“La fuerza de las soluciones está generalmente expresada en kilos de cianuro de sodio por tonelada equivalente de solución. La temperatura de la solución es también importante en el mantenimiento de la eficaz acción de disolución. Especialmente en climas fríos, las soluciones suelen ser calentada a una temperatura aproximada de 21°C. Por encima de esta temperatura la pérdida de cianuro por la descomposición se convierte en un factor importante. Teóricamente, el oro se disuelve en una solución más rápida a una temperatura de 59°C”. [10]

Son aspectos fundamentales en el proceso de cianuración los siguientes:

**a) Aireación y suministro de oxígeno**

“Uno de los principales requisitos de la cianuración exitosa es el oxígeno. El oxígeno puro es demasiado caro, por esta razón se usa el aire atmosférico como la fuente del gas oxígeno. Para una disolución eficiente, es necesario que el aire entre en contacto físico con las partículas de oro. Como las partículas están muy distribuidas a través de la pulpa, significa que las burbujas de aire deben estar completamente dispersas y es necesario un exceso de aire, más allá de los requisitos teóricos establecidos”.

**b) Agentes oxidantes**

“Es importante la aplicación de oxidantes como el peróxido de sodio, permanganato de potasio o de dióxido de manganeso. Estos agentes actúan acelerando el proceso de la disolución de oro, oxidando las impurezas perjudiciales que pueden estar presentes en el mineral o solución”.

**c) Efecto del pH**

“Con la finalidad de reducir la cantidad de cianuro neutralizado, se agrega cal a la solución para mantener una “alcalinidad protectora”. Para obtener un buen nivel de alcalinidad se requiere desde 0.25 a 1.00 kilos de cal por tonelada de solución. Por otro lado, la cal tiene un efecto beneficioso de acelerar la sedimentación de la pulpa en el espesador, y además permite precipitar determinadas sustancias indeseables”.

**d) Molienda y tamaño de partícula**

“La molienda se realiza normalmente en un molino de bolas con el propósito de reducir el mineral a la suficiente finura requerida para que las partículas de oro puedan estar expuestas a la acción de disolución de la solución de cianuro. Esta disolución puede comenzar en el molino de bolas o en los agitadores. En el primer caso, la molienda se realiza en presencia de una solución de cianuro. Sin embargo, algunos minerales contienen cianicidas que requieren pre-tratamiento, lo cual se realiza moliendo en agua alcalina. Estas soluciones son espesadas para quitar

este material nocivo antes de que el cianuro sea añadido. Esto es a menudo necesario cuando se tratan concentrados”.

Por lo general, se requiere una molienda más fina que en el oro en estado dividido. Esto es especialmente cierto en el caso de los minerales en los que el oro está estrechamente asociado a los sulfuros. También se acepta generalmente que cuanto más fina sea la molienda, mayor será el porcentaje de extracción.

El tamaño de las partículas se ajusta mediante el clasificador. La finura de la molienda suele determinarse por el porcentaje de material que pasa por un tamiz estándar. La finalidad del clasificador es controlar el tamaño del material que entra en el bucle de disolución o mezcla. El efluente del molino de bolas se envía al clasificador donde se separa en fracciones gruesas y finas; las partículas gruesas se devuelven al molino de bolas y las partículas finas o reboses se devuelven al ciclo de lixiviación. Este paso, denominado "moler en circuito cerrado", aumenta significativamente la eficiencia de la muela en general. Esto se debe a que las partículas finamente molidas salen del anillo de molienda y se envían para su posterior procesamiento, mientras que las partículas más gruesas vuelven al anillo de molienda. Por lo tanto, se controla la energía consumida por el molino de bolas y los factores importantes en cada ciclo de molienda [10].

#### **e) Flotación**

“El proceso de flotación es una etapa de la concentración de minerales que ocurre en tres fases (líquido, sólido y gas). Se separa el mineral valioso de aquel material no valiosos aprovechando sus características físico - químicas mediante la adición de reactivos; esto propicia la generación de espumas y su posterior colección mediante canaletas o launders, para lo cual se utilizan equipos mecánicos, y/o neumáticos, denominadas celdas de flotación”. [11]

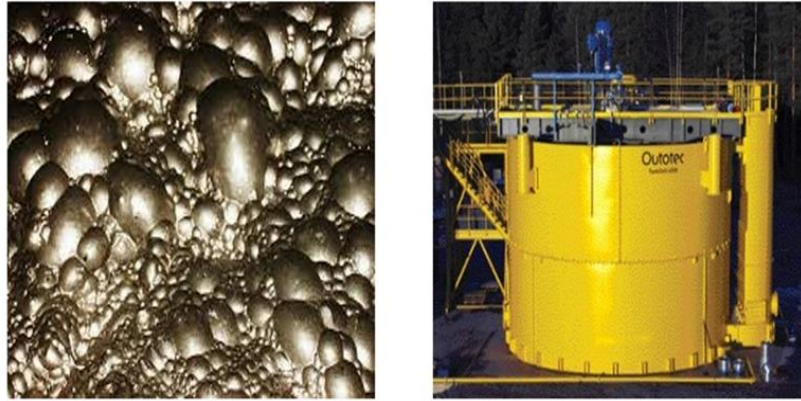


Figura 4. Mineral flotado y celda de flotación

El corazón de la celda de flotación está constituido por el mecanismo de mezclado (rotor y estator). Además, algunos componentes fundamentales son: eje (lower shaft), reductor y motor.

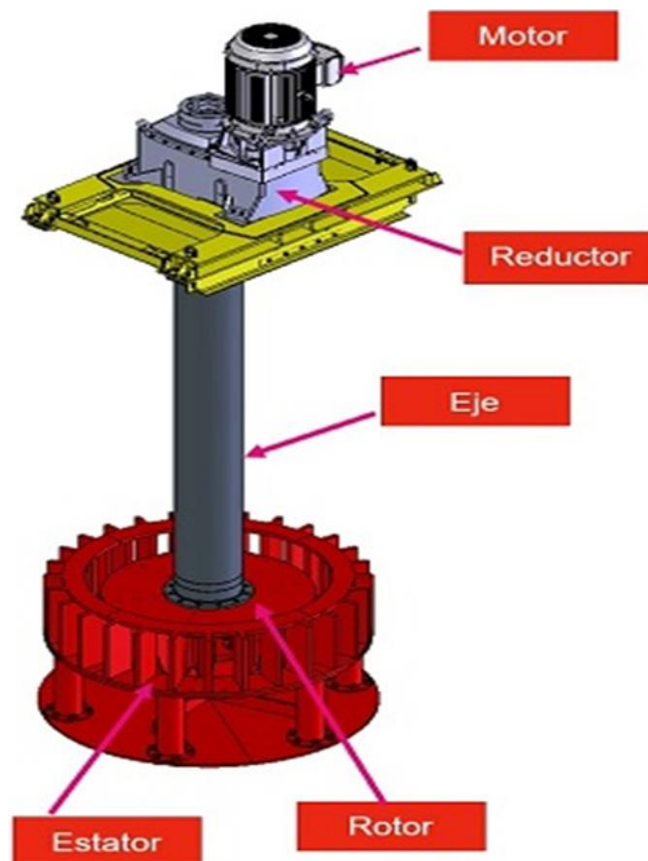


Figura 5. Componentes básicos de la celda de flotación

Existen numerosos elementos que pueden afectar el rendimiento del proceso de flotación, entre ellos los fundamentales son los siguientes:

- “Tipo de mineral y condiciones de operación (diagnósticos de proceso, niveles de pulpa, cantidad de aire en el proceso)”
- “Capacitación/ Entrenamiento del personal”
- Mantenibilidad de los equipos de flotación (procedimientos, repuestos, inspecciones)”
- “Modernización de equipos y sistemas de control” [11].

“Con el desarrollo de la flotación y el hecho de que el oro puede estar libre o finamente diseminado en los minerales, y que presentaba la posibilidad de ser flotado, muchas posibilidades aparecieron para el tratamiento y concentración de minerales de oro. Asimismo, este desarrollo determinó la manera de tratar cuerpos de mineralizados considerados metalúrgicamente imposibles para el tratamiento con cianuro. Como ejemplo de este tipo de minerales tenemos los minerales de baja ley que requiere de molienda fina, y los minerales refractarios que tienen que ser concentrados y tostados para exponer oro a la acción del cianuro”. [11]

Actualmente se han desarrollado muchos arreglos y combinaciones para llevar a cabo el proceso de flotación para el tratamiento de minerales de oro. En la figura se muestran dos de los diagramas de los procesos de flotación más aplicados en la metalurgia del oro.

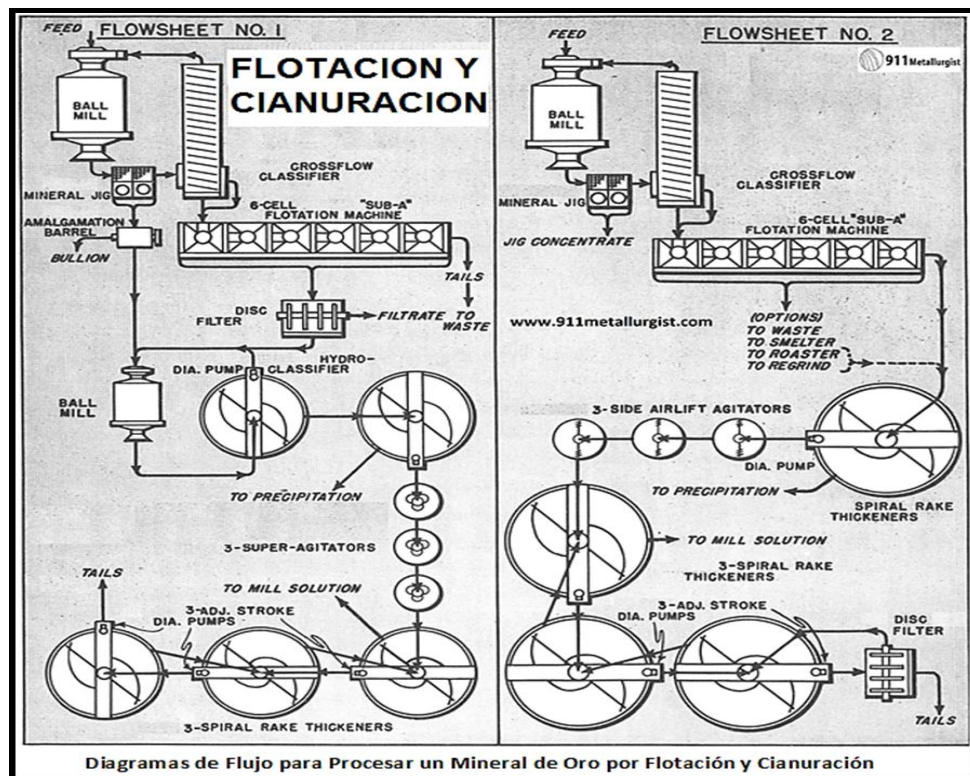


Figura 6. Diagramas de flujo del proceso de flotación del oro

“En la figura N° 6 el mineral es molido a un tamaño que permita liberar los minerales suficientemente y producir un relave de bajo contenido de oro. Aquí, los concentrados de flotación requieren de un tratamiento para reducir el contenido de agua, por lo que es finamente remolido para la máxima exposición de oro antes de ser enviado al circuito de cianuración. La remolienda se hace preferentemente con la adición de la solución de cianuro”.

“El diagrama de flujo N°2 los relaves de flotación son cianurados, los concentrados de la flotación son remolidos. El relave de flotación es deslamado, espesado y se puede juntar con el concentrado remolido para el tratamiento. Esto requiere de un conjunto de tanques más pequeños” [12].

### 1.2.3 Agitación

#### Definición general de agitación

La mezcla puede definirse como el movimiento circular de un fluido en un recipiente, que en su mayoría es circular y produce corrientes de Foucault. El objetivo de la agitación puede ser aumentar la transferencia de calor en un fluido o aumentar la transferencia de materia, es decir, mezclar. A diferencia de la mezcla, el propósito de la agitación es lograr una distribución espacialmente homogénea de dos o más fases inicialmente separadas. En este caso, una de las fases debe ser fluida y la otra puede ser cambiante. La mezcla es una operación importante en muchos procesos industriales. Es el movimiento inducido de un material con propiedades físicas conocidas, generalmente en un movimiento circular en un recipiente.

El esquema de un agitador típico puede observarse en la siguiente figura.

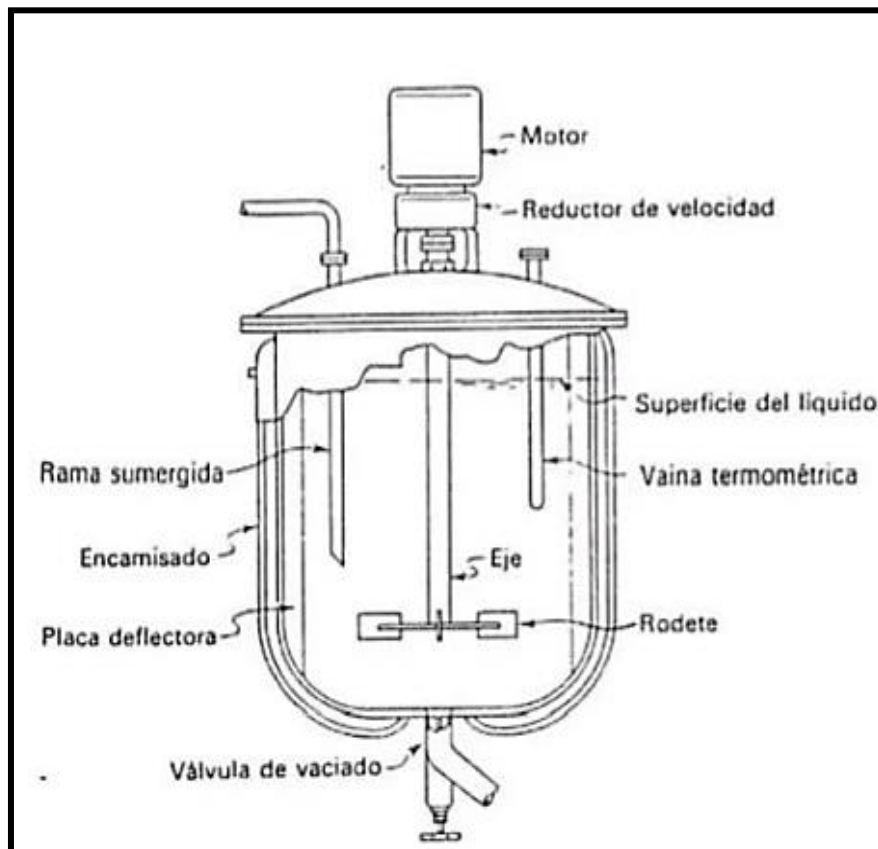


Figura N° 7 Esquema general de un agitador

En general, los cuencos para mezclas son recipientes redondos que pueden estar cerrados o abiertos por la parte superior. Para evitar las zonas de baja velocidad, utilice un fondo casi redondeado para eliminar las esquinas. Para mejorar la eficacia de la mezcla, se pueden colocar deflectores en las paredes del depósito para evitar que el fluido gire como un cuerpo rígido y reducir los remolinos o el colapso. El rotor o hélice suele estar unido a un eje vertical convencional. La excentricidad y la inclinación de este eje pueden variar para lograr una mayor eficacia.

- **Tipos de rodetes**

Existen comercialmente para distintas aplicaciones específicas en la industria diferentes tipos de rodetes, así, por ejemplo, tenemos: paleta, hélice, turbina, ancla, discos, entre otros, tal como se muestra en la figura [13].



Figura 8 Tipos de rodetes

### **1.3. Marco conceptual**

#### **Agitación**

Poner en movimiento circulatorio por medios mecánicos un líquido contenido en un recipiente.

#### **Deflector**

Placa rectangular que se ubica perpendicularmente a la pared de un tanque con la finalidad de reducir o impedir la formación de remolinos y vórtice durante la agitación de un líquido.

#### **Cianuración**

Es el proceso metalúrgico de tratamiento de los minerales de oro y plata para extraer el metal precioso mediante una solución de cianuro de potasio o de cianuro de sodio.

#### **Correlación**

Modelo matemático que explica la dinámica de un sistema a través de la relación adecuada de sus variables.

#### **Impulsor**

Elemento del sistema de agitación que al girar pone en movimiento circulatorio un líquido contenido en un tanque.

#### **Lixiviación**

La lixiviación es un proceso mediante el cual se extrae uno o varios solutos de un sólido, con la utilización de un disolvente líquido.

#### **Mezclado**

Poner en contacto físico directo y de manera uniforme dos líquidos miscibles o inmiscibles.

**Patrón de flujo**

Forma o arreglo específico en que se mueve la corriente de líquido dentro de un recipiente o ducto.

**Régimen de flujo**

Intensidad del movimiento de un fluido. Se mide o cuantifica por medio del número adimensional de Reynolds, Re.

**Rodete**

Es sinónimo de impulsor.

**Vórtice**

Depresión o hundimiento que se forma en un líquido cuando se mueve en forma rotacional e intensa.

## CAPÍTULO II: PLATEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 2.1. Situación problemática

El mezclado de sustancias líquidas, sólidas o de líquidos con sólidos es una operación fundamental y muy común en casi todos los procesos químicos industriales; además, esta operación es también de gran importancia cuando se trata de la fabricación de productos debido a que el inicio de dicho proceso consiste en poner en contacto las materias primas mezclándolas, ya sean líquidos o sólidos.

Dentro de los procesos químicos destacados que se desarrollan en la Región de Ica, en donde el mezclado de líquidos es importante, se encuentra la metalurgia del oro, específicamente en la etapa de cianuración, que comprende la preparación de ciertos volúmenes de solución acuosa de cianuro de sodio, la cual se obtiene mediante una operación denominada técnicamente agitación, la cual se lleva a cabo en un sistema compuesto por un tanque y un dispositivo agitador que es accionado por un motor; sin embargo, según los ingenieros de este proceso, aquí se determina una real problemática basada en las siguientes cuestiones generales:

¿Cuáles son las características básicas del sistema de agitación para obtener una solución cianurada uniforme?

¿Cuáles son los parámetros de operación del sistema de agitación para obtener una solución cianurada uniforme?

¿Cuál es el diseño del sistema de agitación para una operación óptima en la preparación de una solución cianurada uniforme?

Todo esto significa que poner en funcionamiento el tanque y el agitador no es suficiente para obtener una óptima solución cianurada para el proceso químico metalúrgico del oro, es necesario considerar algunos aspectos como

la velocidad de agitación, el tamaño del tanque, el tipo de agitador, los espacios libres y el tiempo de operación, entre otros.

## **2.2. Formulación del problema**

### **2.2.1. Problema general**

De acuerdo con la problemática expuesta anteriormente se formula el siguiente problema general de investigación:

¿De qué aspectos depende el diseño y evaluación de un sistema de agitación para el proceso químico – metalúrgico de cianuración del oro?

### **2.2.2. Problemas específicos**

#### **Problema específico 1**

¿Cuáles son los parámetros de diseño de un sistema de agitación para el proceso químico – metalúrgico de cianuración del oro?

#### **Problema específico 2**

¿De qué factores depende la intensidad de la agitación en la obtención de una solución cianurada?

## **2.3. Justificación e importancia de la investigación**

### **2.3.1. Justificación**

La realización del proyecto de investigación se justifica por las siguientes razones:

- Expone de modo sistematizado la teoría referente a la operación de agitación y mezcla de líquidos.
- Desarrolla un método sistemático de diseño de un sistema de agitación para el proceso químico metalúrgico de cianuración del oro.

- Da cumplimiento a uno de los fines de la universidad peruana: la investigación científica y tecnológica.

### **2.3.2. Importancia**

El desarrollo del proyecto de investigación es importante por lo siguiente:

- Contribuye con los estudiantes universitarios y profesionales de ingeniería química poniendo a disposición información sistematizada y actualizada sobre la operación de agitación y mezcla de líquidos.
- Pone a consideración de los ingenieros de diseño y operación de procesos químico metalúrgico un método práctico para el diseño de sistemas de agitación y mezcla de líquidos.

## **2.4. Objetivos de la investigación**

### **2.4.1. Objetivo general**

Diseñar y evaluar un sistema de agitación para el proceso químico – metalúrgico de cianuración del oro.

### **2.4.2. Objetivos específicos**

#### **Objetivo específico 1**

Determinar los parámetros de diseño de un sistema de agitación para el proceso químico – metalúrgico de cianuración del oro.

#### **Objetivo específico 2**

Establecer los factores que influyen en la intensidad de la agitación para la obtención de una solución cianurada de oro.

## **2.5. Hipótesis de la investigación**

### **2.5.1. Hipótesis general**

El diseño y evaluación de un sistema de agitación para el proceso químico – metalúrgico de cianuración del oro depende de la velocidad de agitación, del tipo de agitador, régimen de flujo y volumen de líquido a tratar.

### **2.5.2. Hipótesis específicas**

#### **Hipótesis específica 1**

Los parámetros de diseño de un sistema de agitación para el proceso químico – metalúrgico de cianuración del oro son el volumen del líquido a tratar, tipo de impulsor, las propiedades físicas de la mezcla líquida a tratar (viscosidad y densidad).

#### **Hipótesis específica 2**

La intensidad de la agitación en la obtención de una solución cianurada depende de la velocidad de rotación, el diámetro del impulsor y la viscosidad del líquido a procesar.

## **2.6. Variables de investigación**

### **2.6.1. Identificación de variables**

Son variables de la investigación las siguientes:

- **Variable independiente**  
El diseño del sistema de agitación
  
- **Variable dependiente**  
La eficiencia del sistema de agitación
  
- **Variables intervinientes**  
La procedencia del mineral de oro  
La ley del mineral de oro

Además, son **variables del proceso** las siguientes:

- La velocidad de agitación
- La potencia del impulsor
- El volumen de líquido a procesar
- El tipo de impulsor
- El régimen de flujo

### 2.6.2. Operacionalización de variables

Las variables de investigación y sus indicadores se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Variables e indicadores

Tipo de variable	Variables	Indicadores
Independiente	Diseño del sistema de agitación	<ul style="list-style-type: none"><li>- Volumen de líquido</li><li>- Dimensiones del tanque</li><li>- Régimen de flujo</li><li>- Velocidad de agitación</li><li>- Tipo de impulsor</li></ul>
Dependiente	La eficiencia del sistema de agitación	<ul style="list-style-type: none"><li>- Potencia del impulsor</li><li>- Intensidad de la agitación</li><li>- Tiempo de proceso</li></ul>

## CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

### 3.1. Tipo, nivel y diseño de la investigación

#### - Tipo de investigación

Debido a que la finalidad del estudio consistió en el diseño y evaluación de un sistema de agitación para un determinado proceso químico metalúrgico, entonces se trata de una investigación aplicada.

#### - Nivel de investigación

Como el estudio se concreta en la elaboración y pruebas de funcionamiento para determinar su eficiencia en el procesamiento, en consecuencia, la investigación es de nivel tecnológica operativa.

#### - Diseño de la investigación

La investigación se llevó a cabo siguiendo un diseño experimental comparativo de post prueba, según el siguiente esquema:

GE1: X1 – O1

GE2: X2 – O2

GE3: X3 – O3

GE4: X4 – O4

GE5: X5 – O5

GE6: X6 – O6

---

O1 = O2 = O3 = O4 = O5 = O6

O1 ≠ O2 ≠ O3 ≠ O4 ≠ O5 ≠ O6

En donde:

GE1, GE2, GE3, GE4, GE5, GE6: es la unidad experimental (el sistema de agitación) en diferentes pruebas de evaluación.

X1, X2, X3, X4, X5 y X6: condiciones o los distintos valores de la variable independiente del proceso.

O1, O2, O3, O4, O5 y O6: resultados o efectos de la variable independiente en respuesta del proceso (eficiencia del sistema de agitación).

### **3.2. Población y muestra**

#### **Población**

La población de la investigación está compuesta por los numerosos sistemas y procesos de agitación y mezcla de líquidos en el área de la ingeniería química.

#### **Muestra**

La muestra de investigación se eligió de manera determinista y está compuesta por un caso típico de agitación de líquidos de ingeniería química: proceso químico metalúrgico de cianuración del oro.

## CAPÍTULO IV: TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

### 4.1. Técnicas de recolección de datos

En el desarrollo de la investigación se aplicaron las siguientes técnicas de recolección de información:

Tabla 2. Técnicas de recolección de información

<b>Técnicas</b>	<b>Objetivos</b>
<b>La clasificación matricial</b>	Recoger y clasificar datos
<b>El análisis de contenidos</b>	Estudiar contenidos
<b>El análisis comparativo</b>	Comparar datos y resultados
<b>Investigación bibliográfica</b>	Elaboración del marco teórico
<b>El análisis químico</b>	Evaluar la concentración de las soluciones

### 4.2. Instrumentos de recolección de datos

En concordancia con las técnicas indicadas anteriormente se aplicaron los siguientes instrumentos de recolección de información:

Tabla 3. Instrumentos de recolección de información

<b>Objetivos</b>	<b>Instrumentos</b>
Elaboración del marco teórico	<b>Fichas bibliográficas</b>
Comparación de datos	<b>Matrices de clasificación</b>
Estudio de contenidos	<b>Fichas de resumen</b>
Registro de datos	<b>Fichas de registro y cotejo</b>
Medir la concentración de las soluciones	<b>Equipo de valoración</b>

#### 4.3. Técnicas de procesamiento, análisis e interpretación de resultados

Las técnicas de análisis de resultados que se aplicaron en el estudio fueron las siguientes:

Tabla 4. Técnicas de análisis de resultados

<b>Técnicas</b>	<b>Objetivos</b>
<b>Modelamiento matemático</b>	Formular y evaluar modelos de correlación de variables
<b>Métodos numéricos</b>	Resolver ecuaciones trascendentales
<b>Software estadístico SPSS</b>	Procesamiento de datos y cálculos estadísticos
<b>Software aplicativo: Microsoft Excel</b>	Procesamiento de datos y cálculos numéricos.

## CAPÍTULO V

### CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

Las hipótesis formuladas en la sección 2.5 se comprueban mediante el análisis comparativo de los resultados obtenidos del diseño del sistema de agitación para el proceso de cianuración de oro con los supuestos establecidos en cada enunciado respectivo.

#### 5.1. Contrastación de las hipótesis específicas

##### Hipótesis específica 1

Enunciado de la hipótesis	Resultados de la investigación	Decisión
Los parámetros de diseño de un sistema de agitación para el proceso químico – metalúrgico de cianuración del oro son el volumen del líquido a tratar, tipo de impulsor, las propiedades físicas de la mezcla líquida a tratar (viscosidad y densidad).	<ul style="list-style-type: none"><li>- El sistema de agitación se ha diseñado para tratar un volumen de mezcla líquido-sólido: <math>V = 20 \text{ m}^3</math></li><li>- Para llevar a cabo el proceso de agitación del volumen a tratar se ha determinado la aplicación de un impulsor de tipo turbina de disco con seis (6) placas planas rectangulares y sus correspondientes dimensiones específicas.</li><li>- La determinación del tipo de impulsor necesario para el sistema está basada en los datos de las viscosidades de los componentes del producto a obtener. Para lo cual por medio de correlaciones experimentales se</li></ul>	Habiéndose comprobado los resultados obtenidos se acepta la hipótesis

	<p>estimaron las viscosidades de la mezcla a obtener</p> $\mu_s = 4.808 \times 10^{-4} Pa.s$ <p>y de la solución de cianuro</p> $\mu_s = 4.616 \times 10^{-4} Pa.s$ <p>- La estimación de las viscosidades se realiza en base a los datos de la densidad de la mezcla a obtener</p> $\rho_s = 1.00004 g/cm^3$ <p>de la densidad del mineral</p> $\rho = 6 g/cm^3$ <p>y de la densidad del NaCN</p> $\rho = 1.6 g/cm^3$	
--	--	--

### Hipótesis específica 2

Enunciado de la hipótesis	Resultados de la investigación	Decisión
La intensidad de la agitación en la obtención de una solución cianurada depende de la velocidad de rotación, el diámetro del impulsor y la viscosidad del líquido a procesar.	<p>- Para obtener por medio del sistema de agitación un producto con la consistencia requerida se ha determinado un agitador con una velocidad de giro</p> $N = 155.76 rpm$ <p>una potencia</p> $P = 91.442 kW$ <p>y un motor, considerando un 10% de sobredimensionamiento para vencer la inercia, con una potencia</p> $P = 100.586 kW$ <p>- Para determinar la velocidad de giro del agitador y la potencia</p>	Habiéndose comprobado los resultados obtenidos se acepta la hipótesis

	<p>respectiva las correlaciones utilizadas están en función del diámetro del impulsor</p> $D_i = 0.981 m$ <p>de las viscosidades de la mezcla a obtener</p> $\mu_s = 4.808 \times 10^{-4} Pa.s$ <p>y de la solución de cianuro</p> $\mu_s = 4.616 \times 10^{-4} Pa.s$	
--	--	--

## 5.2. Contratación de la hipótesis general

Enunciado de la hipótesis	Resultados de la investigación	Decisión
El diseño y evaluación de un sistema de agitación para el proceso químico – metalúrgico de cianuración del oro depende de la velocidad de agitación, del tipo de agitador y volumen de líquido a tratar.	La contrastación de las hipótesis específicas 1 y 2 ha permitido comprobar que el diseño y evaluación de un sistema de agitación para el proceso de cianuración de oro depende de la velocidad de giro, del tipo de agitador y del volumen de mezcla líquido-sólido.	Habiéndose comprobado las hipótesis específicas 1 y 2 se acepta la hipótesis general.

## CAPÍTULO VI

### PRESENTACIÓN, INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### 6.1. Presentación e interpretación de resultados

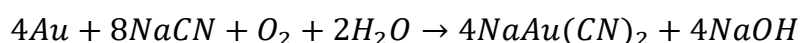
##### 6.1.1. Resultados del estudio del proceso de cianuración del oro

###### 1) El mineral de oro para el proceso

En el Perú existen muchas menas refractarias de oro, siendo éstas más abundante que las no refractarias y se estima que la tercera parte de la producción total de oro en el mundo proviene de minerales refractarios. En las menas refractarias de oro este metal está íntimamente asociado a sulfuros insolubles, como la pirita y arsenopirita. Dichos sulfuros impiden el contacto entre el cianuro y el oro en el proceso de cianuración, a pesar de aplicar una molienda fina, lo que resulta en bajas recuperaciones del metal. Así, debido a la dificultad, ya sea química o física de extraer el oro del mineral refractario, se requiere de un pretratamiento que permita destruir la matriz de sulfuros que contienen, ya sea encapsulado o en solución sólida, al oro.

###### 2) El proceso químico de cianuración del mineral de oro

El tratamiento de la mena refractaria de oro con matriz de arsenopirita se lleva a cabo mediante el proceso de lixiviación cianurada directa, más conocido como cianuración. La cianuración se realiza en tanques utilizando soluciones diluidas de cianuro de sodio, NaCN, con concentraciones menores de 0,3%, y en medio básico. El proceso químico de cianuración del oro se desarrolla por medio de la siguiente reacción química:



Para concretar este proceso el mineral de oro se somete a los siguientes pasos:

1. El mineral se somete a una molienda convencional en varias etapas.
2. El mineral molido se somete a lixiviación en tanques agitados o en reactores denominados “pachuca”, aplicando disoluciones diluidas de cianuro, oxígeno y cal.
3. La pulpa resultante de la lixiviación se hace pasar a un sistema de decantación en contracorriente o se filtra mediante filtros de banda o de tambor.
4. Finalmente, el oro disuelto como complejo cianurado ( $NaAu(CN)_2$ ), se procede a recuperar mediante otros procesos sucesivos.

Para que el proceso de cianuración se dé eficientemente el oro a extraer debe estar libre y limpio, la solución no debe contener impurezas que inhiban la reacción y tiene que haber un suministro de oxígeno adecuado durante todo el período que dure la reacción.

### **3) El sistema de agitación para el proceso de cianuración**

La agitación de la mezcla heterogénea líquido-sólido (solución de cianuro y el mineral molido) es la etapa central del proceso de tratamiento del mineral refractario de oro. En este caso, el agitador mecánico es el componente más importante en el sistema de agitación o reactor en donde se produce una mezcla de sólidos y líquidos, y también la reacción de cianuración. La agitación tiene además el propósito de aumentar la velocidad de la transferencia de calor, mantener las partículas en suspensión y mantener mezclado el contenido del tanque.

El sistema de agitación para el proceso de cianuración del oro básicamente está constituido por un taque equipado como se

muestra en la figura en donde también se muestran también los patrones de flujo que se desarrollan durante el funcionamiento o movimiento giratorio del agitador, que es concretado por el impulsor o rodete. En dicha figura 6.1 se presenta la disposición común del agitador en el interior del tanque, los deflectores, y el patrón de circulación generado. La mezcla se produce por la circulación del volumen de líquido y, a escala microscópica, por el movimiento de remolinos turbulentos creados por el agitador. El flujo global es el mecanismo de mezcla predominante requerido para la mezcla de líquidos miscibles y para sólidos en suspensión.

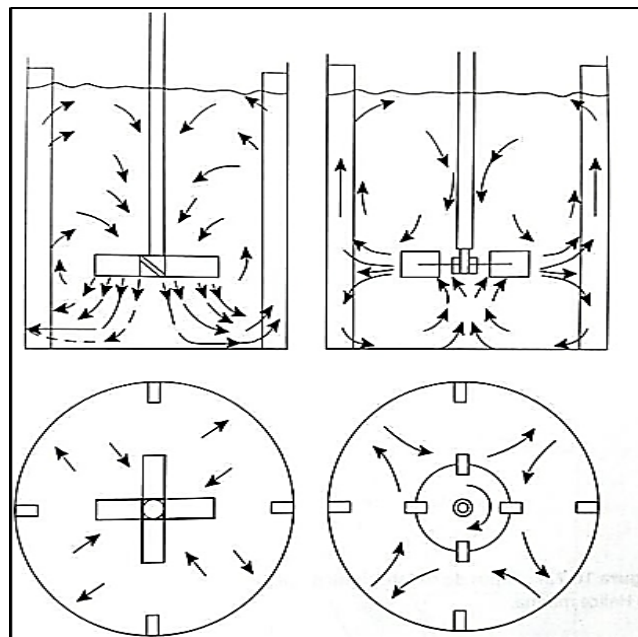


Figura 9. El sistema de agitación (disposición normal del tanque, el agitador y los patrones de flujo)

En el sistema de agitación el agitador es accionado por un motor que está conectado a un eje el cual lleva montados en su extremo inferior uno o más impulsores o rodetes constituidos mayormente por álabes o paletas. Sin embargo, comercialmente se disponen de una variedad de formas y tipos de rodetes para distintas aplicaciones específicas.

Como el proceso de cianuración del oro comprende el tratamiento de una

mezcla líquido-sólido de baja viscosidad, es decir con número de Reynolds elevado, se utilizan por lo general tres tipos de rodetes: paletas o palas, álabes y hélices, tal como se muestra en la figura 6.2.

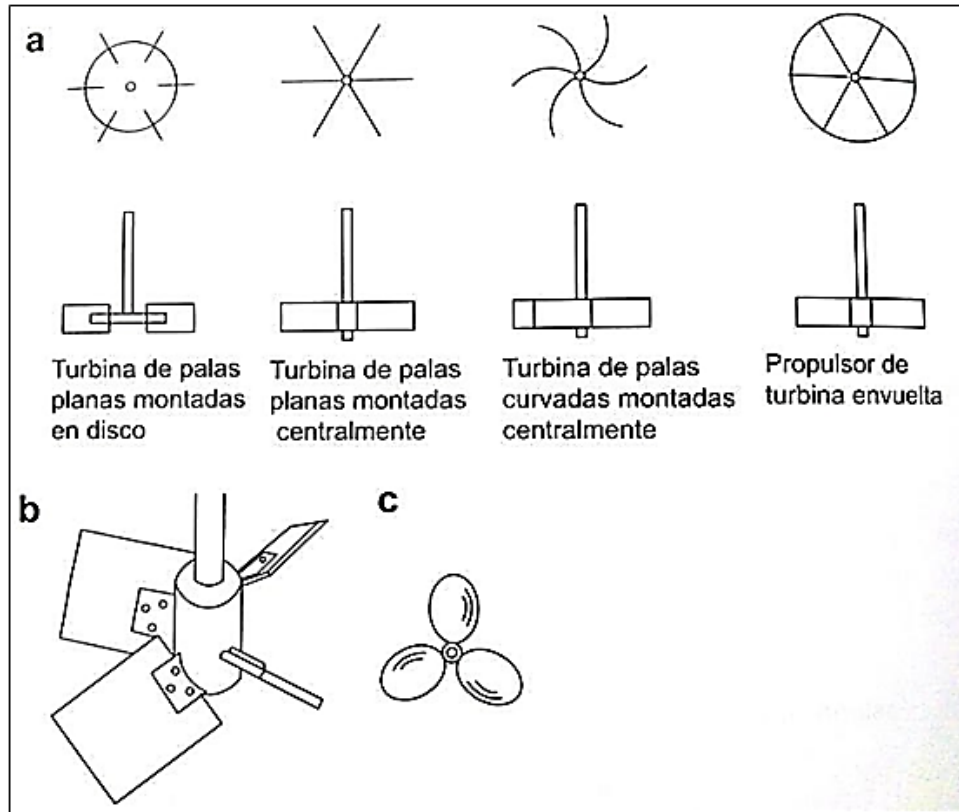


Figura 10. Tipos de rodetes: a) paletas, b) álabes, c) hélice

### 6.1.2 Resultados de diseño del sistema de agitación

#### 1) Datos básicos del proceso

Volumen a tartar en el proceso de cianuración: 20 m<sup>3</sup>.

#### 2) Diseño del sistema de agitación

##### a) Forma del tanque básico del sistema de agitación:

Tanque cilíndrico de sección transversal recta y fondo plano.

##### b) Forma final del tanque del sistema de agitación:

Tanque cilíndrico se sección transversal recta y fondo esférico. La finalidad del fondo esférico consiste en evitar el estancamiento de la mezcla durante la agitación en la zona del borde del fondo, hecho que se produce siempre en un tanque de fondo plano. Además, un fondo esférico en el tanque de agitación favorece el mezclado de los materiales y contribuye con la efectividad del proceso de reacción química de la solución de cianuro con el oro.

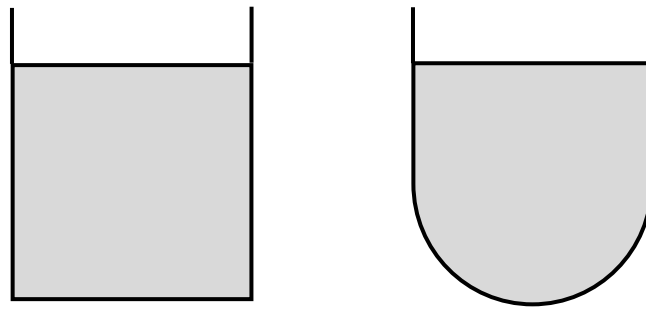


Figura 11. Tanque cilíndrico de fondo plano y de fondo esférico

### c) Cálculo del diámetro del tanque

Para determinar el diámetro del tanque se considera en principio la relación:

$$\frac{D}{H} = 1 \text{ o también } D = H \quad (6.1)$$

Y la ecuación para el cálculo del volumen de un cuerpo cilíndrico recto:

$$V = \frac{\pi D^2 H}{4} \quad (6.2)$$

En donde:

V: volumen de la mezcla a tratar en el proceso de cianuración

D: diámetro del tanque

H: altura inicial del tanque

Ahora, combinando las dos ecuaciones anteriores se obtiene la expresión:

$$V = \frac{\pi D^3}{4}$$

En donde se reemplaza el volumen de la mezcla tratar

$$20m^3 = \frac{\pi D^3}{4}$$

Que da como resultado la medida del diámetro del tanque

$$D = H = 2.942m$$

#### **d) Cálculo de la altura del tanque**

Para el cálculo de la altura final del tanque se debe considerar un espacio libre sobre la parte superior de la mezcla. Este es un aspecto de seguridad en el diseño, que va a permitir la elevación del líquido cuando se introducen en él el dispositivo de agitación (eje e impulsor) y va evitar el derramamiento de la mezcla durante el funcionamiento del sistema de agitación. De modo general, el espacio libre se logra sobredimensionando la altura inicial H desde 20 a 30 % de su longitud.

Según lo establecido anteriormente, se adopta el 30 % de sobredimensionamiento la altura inicial:

$$H_f = 1.30H$$

Luego, reemplazando el valor de H, tenemos:

$$H_f = 1.30H = 1.30(2.942m)$$

$$H_f = 3.825m$$

Que es el valor de la altura final del tanque del sistema de agitación.

#### **e) Cálculo del volumen total del tanque**

El volumen final del tanque se determina con el diámetro y altura

final calculados:

$$V_f = \frac{\pi D^2 H_f}{4} = \frac{\pi (2.942m)^2 (3.825)}{4}$$
$$V_f = 26.002m^3 \approx 26m^3$$

**f) Cálculo de la fracción de volumen de la mezcla en el tanque**

La fracción de volumen que ocupa la mezcla del proceso de cianuración durante el funcionamiento del sistema de agitación se determina relacionando ambos volúmenes:

$$\frac{V}{V_f} = \frac{20m^3}{26.002m^3} = 0.769$$

Es decir, que la mezcla de reacción del proceso de cianuración ocupa 76.9%  $\approx$  77% del volumen del tanque del sistema de agitación.

**g) Material del tanque**

El tanque del sistema de agitación, según las propiedades de los materiales a tratar durante el proceso (mineral y solución de cianuro de sodio), es de acero austenítico de grado 213, que es resistente a los fluidos corrosivos.

**h) Espesor de la pared del tanque**

El espesor de la plancha metálica de acero austenítico 213, considerando el diámetro del tanque de 2.942 m y la tabla del anexo B, es de 10 mm.

i) **Tabla de especificación del diseño del tanque del sistema de agitación**

Las especificaciones de diseño del tanque de agitación se muestran en la tabla 5:

Tabla 5. Especificaciones del tanque de agitación

<b>Especificaciones del tanque del sistema de agitación para el proceso de cianuración del oro</b>	
Diámetro	2.942 m
Altura	3.825 m
Altura de la mezcla de reacción	2.942 m
Volumen de la mezcla de reacción	20 m <sup>3</sup>
Volumen total del tanque	26 m <sup>3</sup>
Porcentaje de volumen ocupado	77 %
Porcentaje de volumen de seguridad	23 %
Material de la pared del tanque	Acero austenítico 213
Espesor de la pared del tanque	10 mm

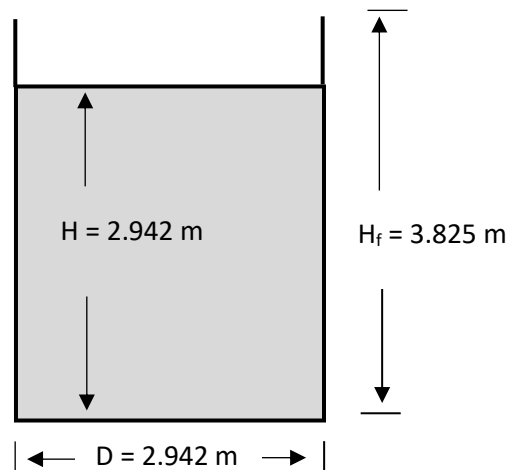


Figura 12. Dimensiones principales del tanque de agitación

### j) Dimensionamiento de las placas deflectoras

Para reducir al máximo el vórtice y remolino que se produce en el volumen del líquido dentro del tanque durante el movimiento rotacional del agitador, lo que puede generar salpicaduras, derrame o inestabilidad del sistema de agitación, se aplicarán placas deflectoras o “baffles”. Estas placas deflectoras tienen como función cortar las líneas de flujo durante la rotación del líquido con lo que se reduce o elimina el vórtice.

Por lo general los sistemas de agitación de líquidos consideran cuatro (4) placas deflectoras ubicadas sobre dos diámetros perpendiculares, tal como se muestra en la figura 6.3. Dichas placas deflectoras se sueldan de manera perpendicular a la pared del tanque y tienen una longitud equivalente a la altura de líquido que contiene el tanque durante el proceso de agitación. El ancho de la placa deflectora se determina con la siguiente relación [9]:

$$a = \frac{1}{12}D \quad (6.3)$$

Con  $D = 2.942 \text{ m}$ , el ancho de cada placa deflectora es

$$a = \frac{1}{12}(2.942\text{m}) = 0.245\text{m} = 24.5\text{cm}$$

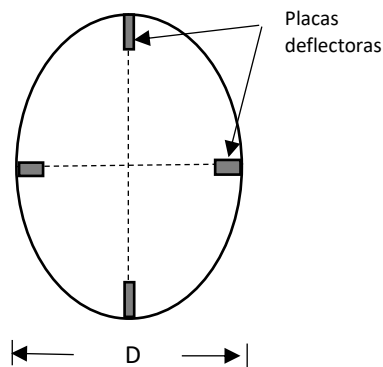


Figura 13. Disposición de las placas deflectoras

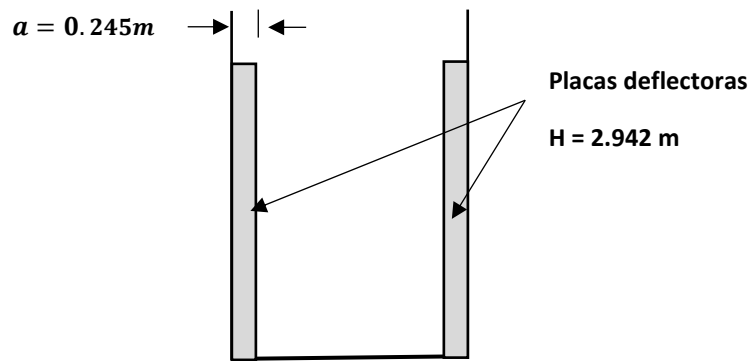


Figura 14. Placas deflectoras

**k) Determinación de la viscosidad de la mezcla producto obtenida por el sistema de agitación**

Para determinar el tipo de impulsor es necesario conocer la viscosidad de la mezcla que se va a preparar en el sistema de agitación,  $\mu_s$ , es decir la suspensión formada por el mineral molido con la solución de cianuro. La finalidad de esta información está basada en la estrecha relación que tiene dicha propiedad de la mezcla con el tipo de impulsor, de acuerdo con el diagrama que se muestra en la figura 6.5 [17].

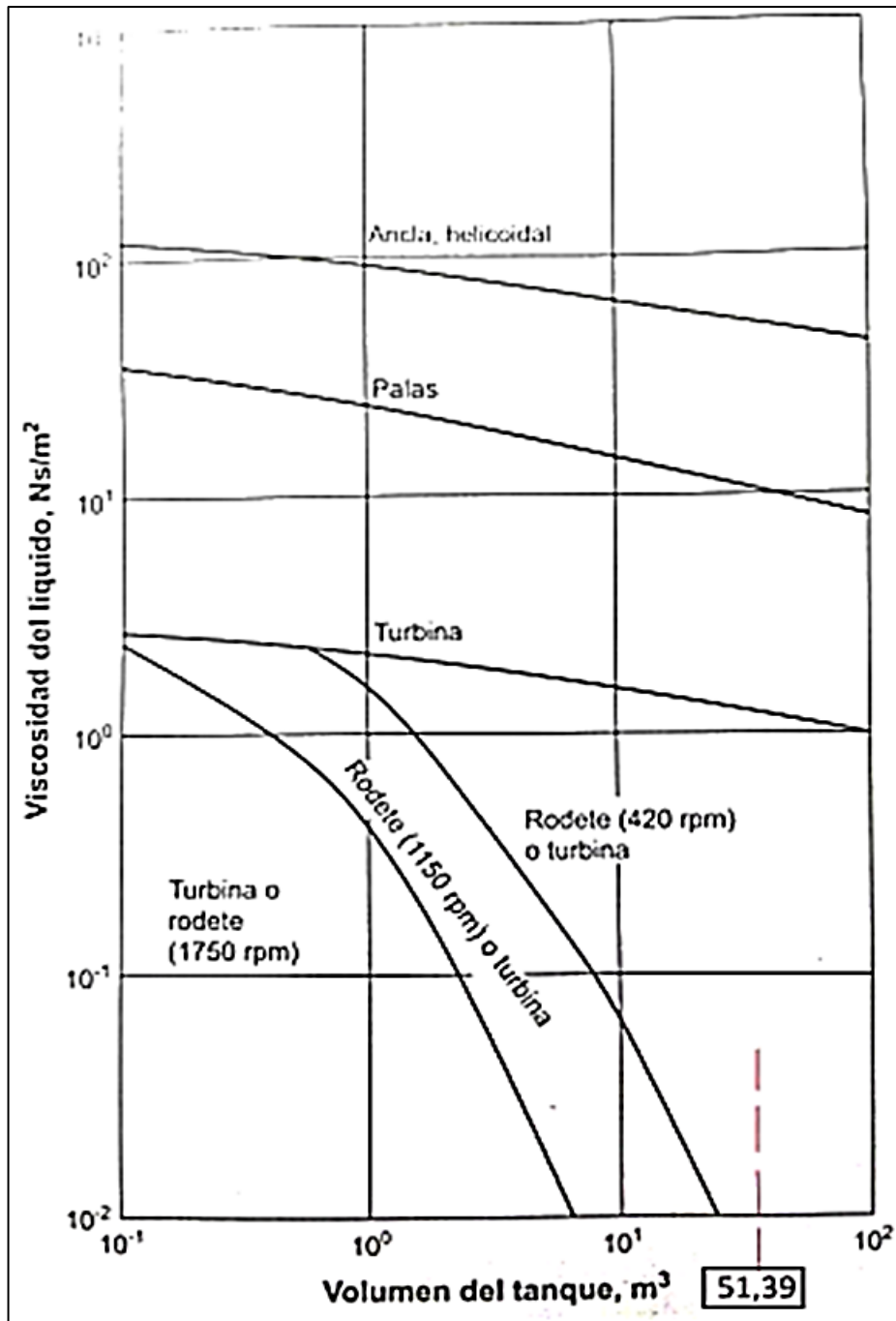


Figura 15. Diagrama de selección del tipo de rodete o impulsor de un agitador

La viscosidad  $\mu_s$  se halla por medio de la siguiente ecuación para mezclas líquido-sólido con un porcentaje de sólidos menor o igual al 10 % [18]:

$$\mu_s = \mu_f(1 + \gamma\phi) \quad (6.4)$$

En donde:

$\mu_s$  = viscosidad de la mezcla a preparar por el sistema de agitación

$\mu_f$  = viscosidad de la solución de cianuro

$\gamma$  = viscosidad intrínseca

$\varphi$  = fracción volumétrica del sólido

Considerando las partículas de mineral molido como esferas rígidas suspendidas en la solución, entonces la viscosidad intrínseca [18] es  $\gamma = 2.5$ . Por otro lado, teniendo en cuenta que el producto que se obtiene en el sistema de agitación tiene en promedio 10 g de mineral sulfurado de hierro por cada 100 ml de suspensión (en este caso, la base es mineral  $\text{FeAsS}_2$  cuya densidad es 6 g/ml), en consecuencia se determina la fracción volumétrica del sólido:

$$\frac{10 \text{ g}}{100 \text{ ml suspensión}} \left( \frac{1000 \text{ ml suspensión}}{1 \text{ L suspensión}} \right) \left( \frac{1}{6 \frac{\text{g}}{\text{ml}}} \right) \left( \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} \right)$$
$$1.667 \times 10^{-2} \frac{\text{L}}{\text{L suspensión}}$$

$$\text{Fracción volumétrica} = \varphi = 1.667 \times 10^{-2}$$

Esto significa que 1.667 % del volumen de la mezcla corresponde al sólido, por lo tanto, se comprueba la aplicación de la ecuación 6.4.

Ahora, para el cálculo de la viscosidad de la solución de cianuro de sodio en Pa.s se aplica la siguiente ecuación basada en el modelo de Arrhenius desarrollada por Chevrier, Ulrich y Altheide para soluciones de sulfato férrico:

$$\mu = 10^{-3} e^{ac^b} e^{\frac{\Delta E}{R} \left( \frac{1}{273.15} - \frac{1}{T} \right)} \quad (6.5)$$

En donde:

C: concentración de la solución en kg/kg

$\Delta E$ : energía de activación en J/mol

T: temperatura absoluta (K)

a y b: constantes

Los valores de las constantes a y b se han tomado del diagrama que se muestra en la figura 6.6:

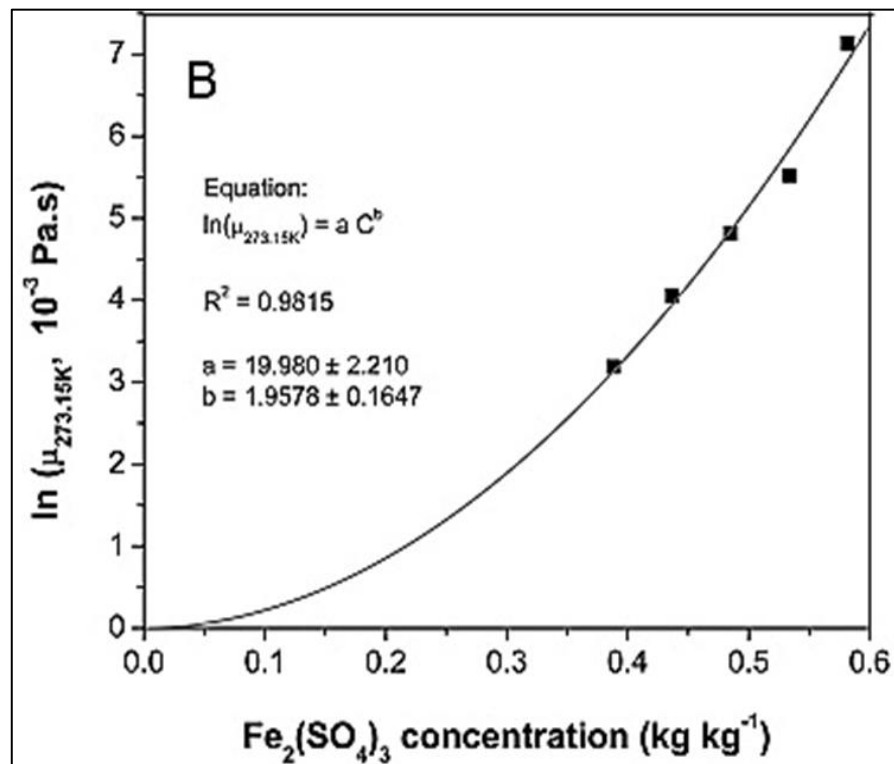


Figura 16. Diagrama de regresión al modelo de Arrhenius para la viscosidad, según la ecuación  $\ln(\mu_{272.15} 10^{-3}) = aC^b$

De donde, los valores de a y b promedio son los siguientes:

$$a = 19.980 \text{ y } b = 1.958$$

En cambio, de acuerdo con la naturaleza del proceso de cianuración de oro, se utilizan los datos propios del cianuro de sodio, NaCN, y de la solución respectiva en el sistema de agitación:

- Peso molecular: 49.0072 g/mol
- Densidad: 1.6 g/cm<sup>3</sup>
- Concentración cianuro estándar en el proceso de cianuración

de oro: 1 lb/Tonelada = 1 lb/1000 kg = 4.536x10<sup>-4</sup> kg/kg

- Temperatura promedio del proceso: 35 °C = 308.15 K

La energía de activación en kJ/mol se determina a partir de la relación hallada por Chevrier, Ulrich y Altheide para soluciones de sulfato férrico en kg/kg, tal como se muestra en la figura 6.7; sin embargo, el cálculo final se efectúa con la concentración propia de la solución de NaCN:

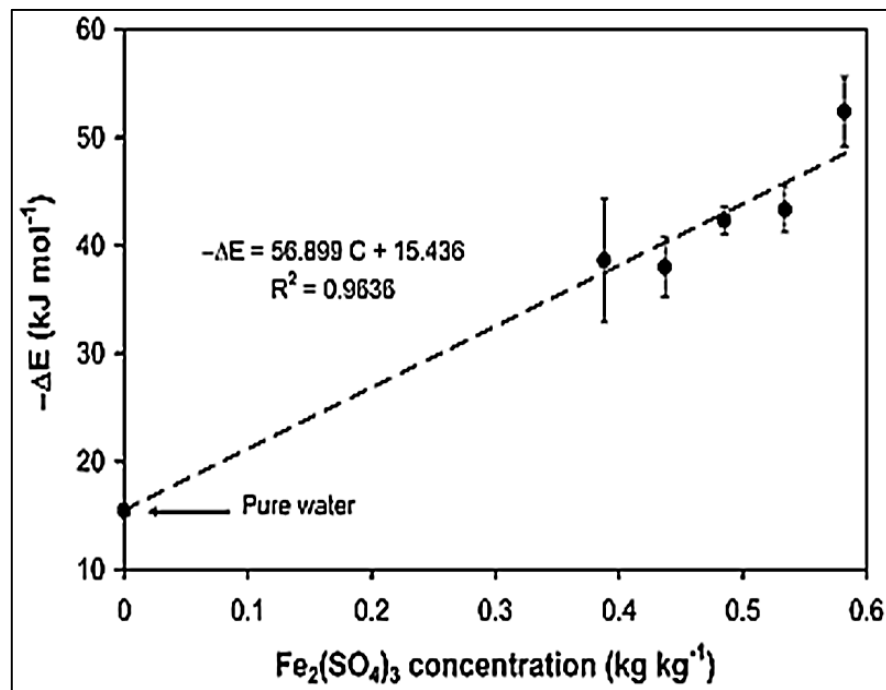


Figura 17. Diagrama de regresión para la energía de activación de la solución de sulfato férrico

$$-\Delta E = 56.899C + 15.436 \quad (6.6)$$

$$-\Delta E = 56.899(4.536 \times 10^{-4}) + 15.436$$

$$-\Delta E = 15.462 \frac{kJ}{mol} = 15462 J/mol$$

Ahora, reemplazando valores en la ecuación 6.5 se tiene que la viscosidad de la solución de NaCN es:

$$\mu = 10^{-3} e^{19.980(4.536x10^{-4})^{1.958}} e^{\frac{-15462}{8.314}(\frac{1}{273.15} - \frac{1}{308.15})}$$

$$\mu = \mu_f = 4.616x10^{-4} Pa.s$$

Finalmente, reemplazando en la ecuación 6.4 tenemos que la viscosidad de la mezcla obtenida como producto del sistema de agitación es:

$$\mu_s = 4.616x10^{-4}(1 + 2.5x1.667x10^{-2})$$

$$\mu_s = 4.808x10^{-4} Pa.s$$

#### I) Selección del tipo de rodete o impulsor del sistema de agitación

Con el volumen a tratar por el sistema de agitación de 20 m<sup>3</sup> y la viscosidad de la mezcla obtenida durante el proceso, de 4.808x10<sup>-4</sup> Pa.s, en el diagrama de la figura 6.5 se determina que el tipo de impulsor que se debe utilizar es de **turbina**.

En es caso se elige un impulsor de turbina de seis placas planas rectangulares soldadas perpendicularmente en un disco plano horizontal, tal como se muestra en la figura 6.8.



Figura 18. Impulsor de turbina de disco con seis placas planas rectangulares

#### m) Dimensionamiento y posición del agitador

Las dimensiones principales del impulsor son las siguientes:

$D_i$ : diámetro del impulsor

$D_d$ : diámetro del disco

$W$ : ancho de la placa plana

$L$ : longitud de la placa plana

$B$ : altura desde el fondo del tanque

Las relaciones para el cálculo se han tomado de Chohey y Hicks [8], que son las siguientes en donde  $D_T$  es el diámetro del tanque del sistema de agitación:

$$D_i = \frac{1}{3} D_T \quad (6.7)$$

$$W = \frac{1}{5} D_i \quad (6.8)$$

$$L = \frac{1}{4} D_i \quad (6.9)$$

$$D_d = \frac{2}{3} D_i \quad (6.10)$$

$$B = \frac{1}{3}D_T \quad (6.11)$$

Considerando el valor del diámetro del tanque  $D_T = 2.942 \text{ m}$  las dimensiones y ubicación del impulsor del sistema de agitación se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Especificaciones del impulsor de turbina compuesta por un disco con seis placas planas rectangulares

Especificación	Medida
Diámetro del impulsor	$D_i = 0.981 \text{ m}$
Ancho de la placa plana	$W = 0.196 \text{ m}$
Longitud de la placa plana	$L = 0.245 \text{ m}$
Diámetro del disco	$D_d = 0.654 \text{ m}$
Altura desde el fondo del tanque	$B = 0.981 \text{ m}$

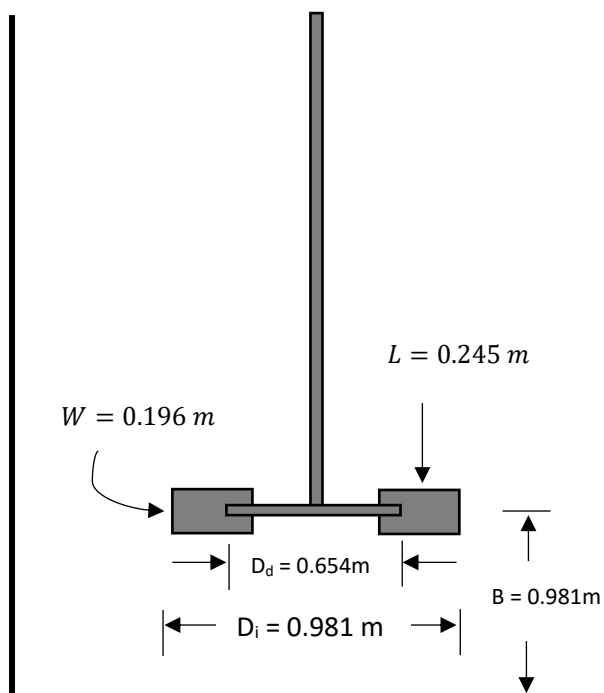


Figura 19. Dimensiones y posición del impulsor del sistema de agitación

## n) Cálculo de la velocidad de agitación

La velocidad de agitación se determina con la siguiente ecuación [8]:

$$N = \frac{V_p}{\pi D_i} \quad (6.12)$$

En donde:

N: velocidad de agitación en rps

V<sub>P</sub>: velocidad periférica en m/s

D<sub>i</sub>: diámetro del impulsor

La velocidad periférica se halla teniendo en cuenta la información presentada en la tabla 7. [19 ], para dispersión L-S, de la cual se considera el valor de 8 m/s.

Tabla 7. Velocidad periférica y caudal para mezclas producidas por un sistema de agitación

Tipo de mezcla	Velocidad (m/s)	Caudal (lotes/h)
Mantener en suspensión, circulación, sed. Lenta	0,5 – 1,5	50 – 200
Mantener en suspensión, Circulación, sed. Rápida	1,5 – 2,5	200 – 300
Homogeneización L-L	2,5 – 4	300 – 400
Homogeneización L-L con densidades similares	4 – 5	400 – 700
Disolución a concentraciones ligeras: 10-20% máximo	4 – 5	400 – 700
Homogeneización L-L con densidades muy diferentes	5 – 8	700 – 1000
Disolución a concentraciones fuertes: hasta 50%	5 – 8	700 – 1000
Dispersión L-S (fácil)	8 – 10	80 – 100
Dispersión difícil, emulsión y empastados	15 – 25	80 – 100

Reemplazando datos en la ecuación 6.12, la velocidad de agitación desarrollada por el sistema de agitación es:

$$N = \frac{8 \text{ m/s}}{\pi(0.981\text{m})}$$

$$N = 2.596 \text{ rps} = 155.76 \text{ rpm}$$

**o) Determinación de la potencia del agitador**

La potencia del agitador se calcula con la ecuación siguiente [9]:

$$P = K_T N^3 D_i^5 \rho \quad (6.13)$$

En donde:

P: potencia del agitador en W

$\rho$ : densidad de la mezcla en  $\text{kg/m}^3$

$K_T$ : constante para tanque con cuatro deflectores

El valor de la constante  $K_T$  se determina de la tabla 6.4 considerando el tipo de turbina seleccionada para el sistema de agitación [9] (turbina con disco de seis placas planas rectangulares).

Tabla 8. Constantes  $K_L$  y  $K_T$  para tanques con cuatro placas deflectoras

Tipo de impulsor	$K_L$	$K_T$
Impulsor hélice, tres palas		
Paso 1.0	41	0,32
Paso 1.5	48	0,87
Turbina		
Disco de seis palas	65	5,75
Seis palas inclinadas	---	1,63
Cuatro palas inclinadas	44,5	1,27
Paleta plana, dos palas	36,5	1,70
Impulsor HE-3	43	0,28
Ancla	300	0,35

De donde, el valor de la constante  $K_T$  es 5.75; luego, la potencia del agitador reemplazando valores en la ecuación 6.13 considerando que la densidad de la solución de 1 lb NaCN/Tonelada de solución es 1000 kg/m<sup>3</sup>, tenemos:

$$P = 5.75(2.596 \text{ rps})^3(0.981\text{m})^5(1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})$$

$$P = 91441.991W = 91.442kW$$

La potencia del agitador en HP:

$$P = \frac{91441.991W}{746 \text{ W/HP}} = 122.576 \text{ HP}$$

Finalmente, la potencia del motor necesario para accionar el agitador del sistema de agitación, teniendo en cuenta un gasto de 10% para poner en movimiento los componentes mecánicos del agitador (eje e impulsor), se tiene:

$$P = 1.10(122.576 \text{ HP}) = 134.834 \text{ HP}$$

### 3) Especificaciones del sistema de agitación del proceso de cianuración

Los resultados finales del diseño del sistema de sistema de agitación se presentan en la tabla 9.

Tabla 9. Especificaciones de diseño del sistema de agitación

<b>Especificaciones de diseño del sistema de agitación para el proceso de cianuración del oro</b>	
Diámetro	2.942 m
Altura	3.825 m
Altura de la mezcla de reacción	2.942 m
Volumen de la mezcla de reacción	20 m <sup>3</sup>
Volumen total del tanque	26 m <sup>3</sup>
Porcentaje de volumen ocupado	77 %

Porcentaje de volumen de seguridad	23 %
Material de la pared del tanque	Acero austenítico 213
Espesor de la pared del tanque	10 mm
Número de placas deflectoras	4
Ancho de la placa defleitora	0.245m
Altura de la placa defleitora	2.942 m
Tipo de impulsor	Turbina de disco con seis placas planas rectangulares
Diámetro del impulsor	$D_i = 0.981 m$
Ancho de la placa plana del impulsor	$W = 0.196 m$
Longitud de la placa plana del impulsor	$L = 0.245 m$
Diámetro del disco del impulsor	$D_d = 0.654 m$
Altura desde el fondo del tanque para la posición del impulsor	$B = 0.981 m$
Velocidad de agitación producida por el agitador	155.76 rpm
Potencia del agitador	122.576 HP
Potencia del motor para accionar el agitador	134.834 HP

## 6.2 Discusión de resultados

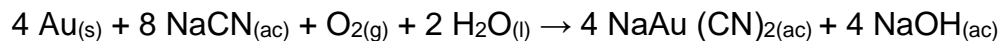
Los resultados del diseño y del análisis de los parámetros de operación del sistema de agitación para el proceso de cianuración del oro dejan establecido que dicho sistema permite procesar en modo de operación de régimen estacionario y discontinuo 20 m<sup>3</sup> de mezcla o suspensión líquido-sólido, de un mineral arsenopirítico finamente molido que contiene oro y una solución de cianuro de sodio, NaCN. En este sentido, el sistema de agitación diseñado está caracterizado para procesar 2000 kg de mineral en un volumen de mezcla líquido-sólido de 20 m<sup>3</sup> conteniendo 9.072 kg

de cianuro de sodio. Asimismo, se determina que los parámetros de operación son: velocidad de agitación de 155.76 rpm, potencia de agitación de 122.576 HP y una temperatura promedio de 35 °C.

La concentración de la solución de cianuro de 1 lb/ tonelada de solución que se aplicó es concordante con la utilizada por Arias, Fernández, Sánchez y Laserra [ 2 ] en la lixiviación de mineral oro-barita en  $4.536 \times 10^{-4}$  kg/kg, valor que se aproxima al indicado por Rivera H., J.[15] en la cianuración de minerales arsenopiríticos de oro.

Los cálculos de diseño para la selección del tipo de impulsor del agitador del sistema de agitación determinaron para que movilizar 20 m<sup>3</sup> de mezcla producto en condiciones de suspensión de 10 g de mineral arsenopirítico, FeAsS con oro por cada 100 ml, se requiere un impulsor de turbina de disco con seis placas planas perpendiculares. Este tipo de impulsor obtenido es utilizado por Santamaría, J. [16] en su estudio de comparación de cianuro y tiourea en lixiviación de oro, habiendo obtenido resultados favorables en la recuperación posterior del oro con zinc.

El sistema de agitación diseñado opera el proceso de cianuración de oro poniendo en circulación 20 m<sup>3</sup> de mezcla producto con una velocidad de rotación neta de 155.76 rpm, de modo que durante el proceso entran en contacto el NaCN a nivel molecular con el oro del mineral finamente molido dando lugar a la reacción química:



Esta velocidad de rotación del volumen de producto líquido-sólido se halla dentro de los rangos establecidos por Guzmán P., S. [4] y Huarza H., J. [5] para obtener una concentración adecuada de NaCN con menos gasto de este reactivo en el tratamiento de diversos minerales sulfurados que contienen oro.

## CONCLUSIONES

1. El sistema de agitación se ha diseñado para tratar un volumen de mezcla líquido-sólido  $V = 20 \text{ m}^3$  para el que se ha determinado la aplicación de un impulsor de tipo turbina de disco con seis (6) placas planas rectangulares y sus correspondientes dimensiones específicas.
2. La determinación del tipo de impulsor necesario para el sistema de agitación depende fundamentalmente de los datos de las viscosidades de los componentes del producto a obtener. Por lo cual, mediante correlaciones experimentales referenciadas se estimaron las viscosidades de la mezcla a obtener  $\mu_s = 4.808 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$  y de la solución de cianuro  $\mu_s = 4.616 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$ .
3. La operación del sistema de agitación se efectiviza con una velocidad de rotación del impulsor de  $N = 155.76 \text{ rpm}$ , una potencia neta de  $P = 122.576 \text{ HP}$  y una potencia un motor, considerando un 10% de sobredimensionamiento para vencer la inercia de  $134.834 \text{ HP}$ .
4. Los parámetros fundamentales del sistema de agitación para el proceso de cianuración de oro son el volumen de mezcla líquido-sólido a tratar, la temperatura, las viscosidades de los componentes, el tipo de impulsor, la velocidad de rotación del impulsor y la potencia de agitación.

## RECOMENDACIONES

1. Para mezclas de tipo suspensión de partículas finas se recomienda un impulsor de turbina con álabes o con paletas planas.
2. Para un mejor resultado de la mezcla obtenida por el sistema de agitación se recomienda colocar otro impulsor en la mitad del eje de rotación.
3. Se debe sobredimensionar el tanque entre un 20 – 30 % de su volumen como factor de seguridad para contrarrestar el aumento de volumen de la mezcla al introducir los componentes mecánicos del sistema de agitación y de los vórtices que se forman durante el proceso de agitación.
4. Para determinar la potencia del motor que pondrá en funcionamiento el sistema de agitación se debe sobredimensionar la potencia neta del agitador de un 10 a 20 % con la finalidad de proporcionarle capacidad para vencer la inercia de la estructura física del sistema.

## FUENTES DE INFORMACIÓN

1. ALARCÓN E., A. M. (1987). *Estudio de la lixiviación en pilas como alternativa de recuperación de oro y plata en el Sur Medio*, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional san Luis Gonzaga, Ica, Perú.
2. ARIAS L., T; FERNÁNDEZ C., D.; SÁNCHEZ R., Y. y LASSERRA P., A. (2016). *Influencia de la lixiviación en la recuperación de oro en la Mina Oro-Barita de Santiago de Cuba*, Facultad Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.
3. CARRILLO, M.; DELGADO, J. y CÓRDOVA, E. (2017). *Lixiviación con tiourea de dos minerales auroargentíferos santandereanos*, Facultad de Ingeniera Metalúrgica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
4. GUZMÁN P., S. (2015). *Estudio del proceso de lixiviación de oro en la Planta AURELSA*, Universidad Nacional San Agustín, Arequipa, Perú.
5. HUARZA H., J. I. (2018). *Estudio de mejoras y adecuamiento metalúrgico en la etapa de lixiviación para recuperar Oro y Plata del concentrado aurífero en la Empresa Minera Aurífera Retamas – MARSÁ*, Universidad Nacional San Agustín, Arequipa, Perú.
6. J. URIORTE “Oro características” Colombia. 2021.
7. LARA, M., F. H., (1995). *Estudio de prefactibilidad para la instalación de una planta metalúrgica para el tratamiento de minerales auríferos*, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional san Luis Gonzaga, Ica, Perú.
8. NICHOLAS P. CHOPEY, TYLER G. HICKS, P. E. Manual de cálculos de Ingeniería Química. Octubre, 1968.
9. NOÉ BAUTISTA, ARIADNA MARTÍNEZ, KELVYN SÁNCHEZ. Diseño mecánico de equipos. Instituto Tecnológico de Orizaba. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/101093358/35272890-Calculo-de-Tanque-Agitador>.

10. Pág. Web. <http://www.911metallurgist.com/metalurgia/ciannacion-oro-plata/>
11. Pág. Web. <https://mundodominero.com.pe/la-importancia-del-proceso-de-flotación-de-minerales-metso/>
12. Pág. Web. <https://www.911-metallurgist.com/metalurgia/recuperación-sulfuros-oro-flotación-cianuramacion/>
13. Pág. web. <https://es.slideshare.net/yuricomartinez/labosagitacin>
14. QUIJANDRÍA L., J. C. (1994). *Anteproyecto de una planta de cianuración por percolación (Vat leaching) para recuperación de oro a partir de los relaves de amalgamación*, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional San Luis Gonzaga, Ica, Perú.
15. RIVERA, H., J. F. (2018). *Optimización del pH en la cianuración de oro a partir de minerales arsenopiríticos en la Minera Aurífera Retamas S.A.*, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
16. SANTAMARÍA, J. I. (2013). *Comparación de cianuro y tiourea como agentes lixiviantes de un mineral aurífero colombiano*, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia.
17. RAY SINNOTT, GAVIN TOWLER. *Diseño en ingeniería química*. Traducción de la quinta edición original; versión española traducida por José Costa López, Jordi Bonet Ruiz, Antonio Pinto Lona y Francisco José España Maraver. Barcelona: Reverté, 2012. ISBN: 978-84-291-7199-0.
18. VICENT F. CHEVRIER, RICHARD ULRICH, TRAVIS S. ALTHEIDE. *Jornal of Geophysical Research* 2009.
19. EUROMIX- BACHILLER (MÉXICO). *Alta Tecnología Europea. Conceptos básicos de agitación*. <http://www.euromix.com.mx>. Disponible en: [http://euromix.com.mx/pdf/files/conceptos\\_basicos.pdf](http://euromix.com.mx/pdf/files/conceptos_basicos.pdf)
20. Z. Chanbichura "Optimización de la amalgamación del oro en la planta concentradora B y Z lunar de oro rinconada Puno" Puno Perú. 2013.

# ANEXOS

## Anexo A: Plantas de cianuración de oro

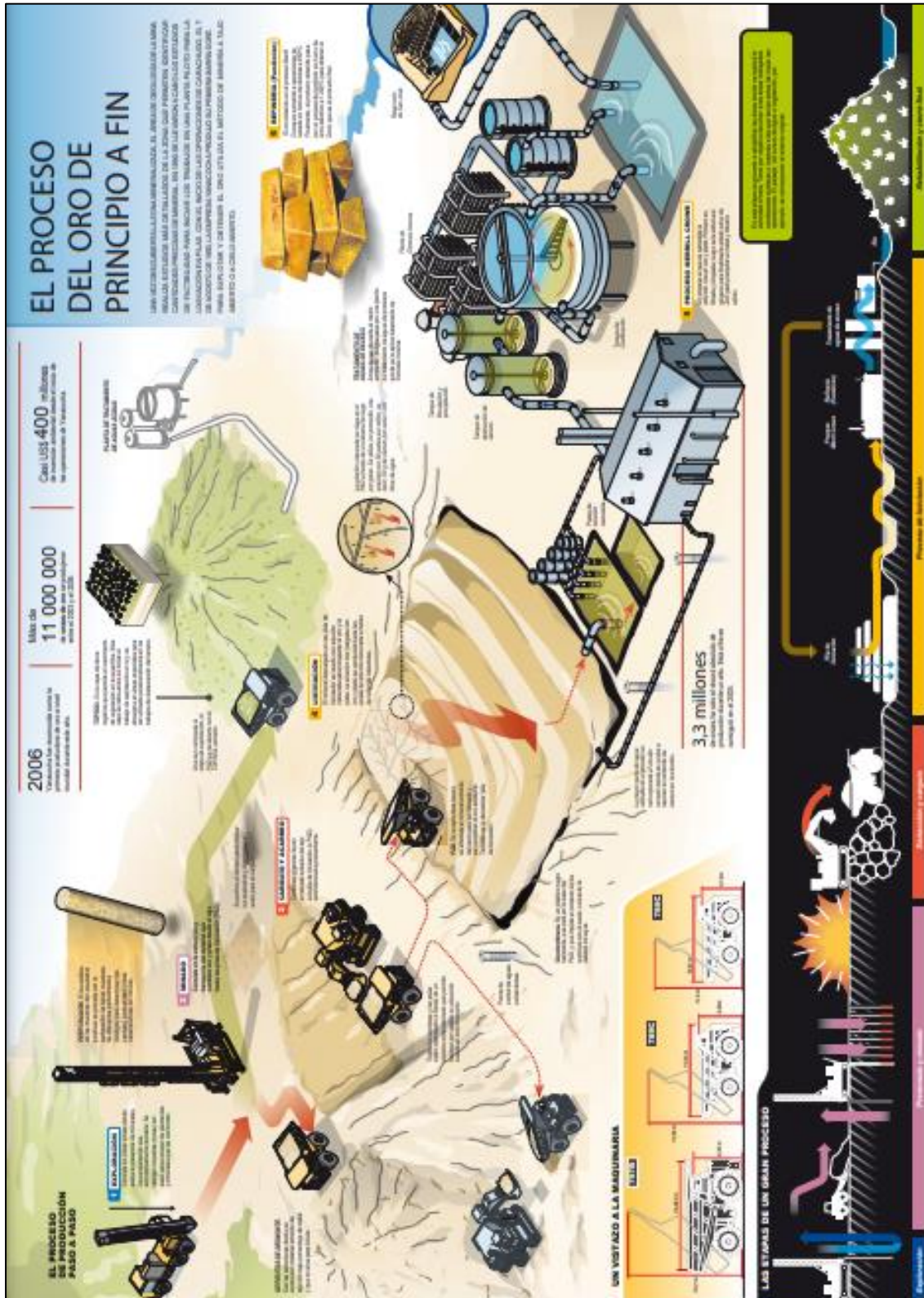


Fig.20 Proceso del oro

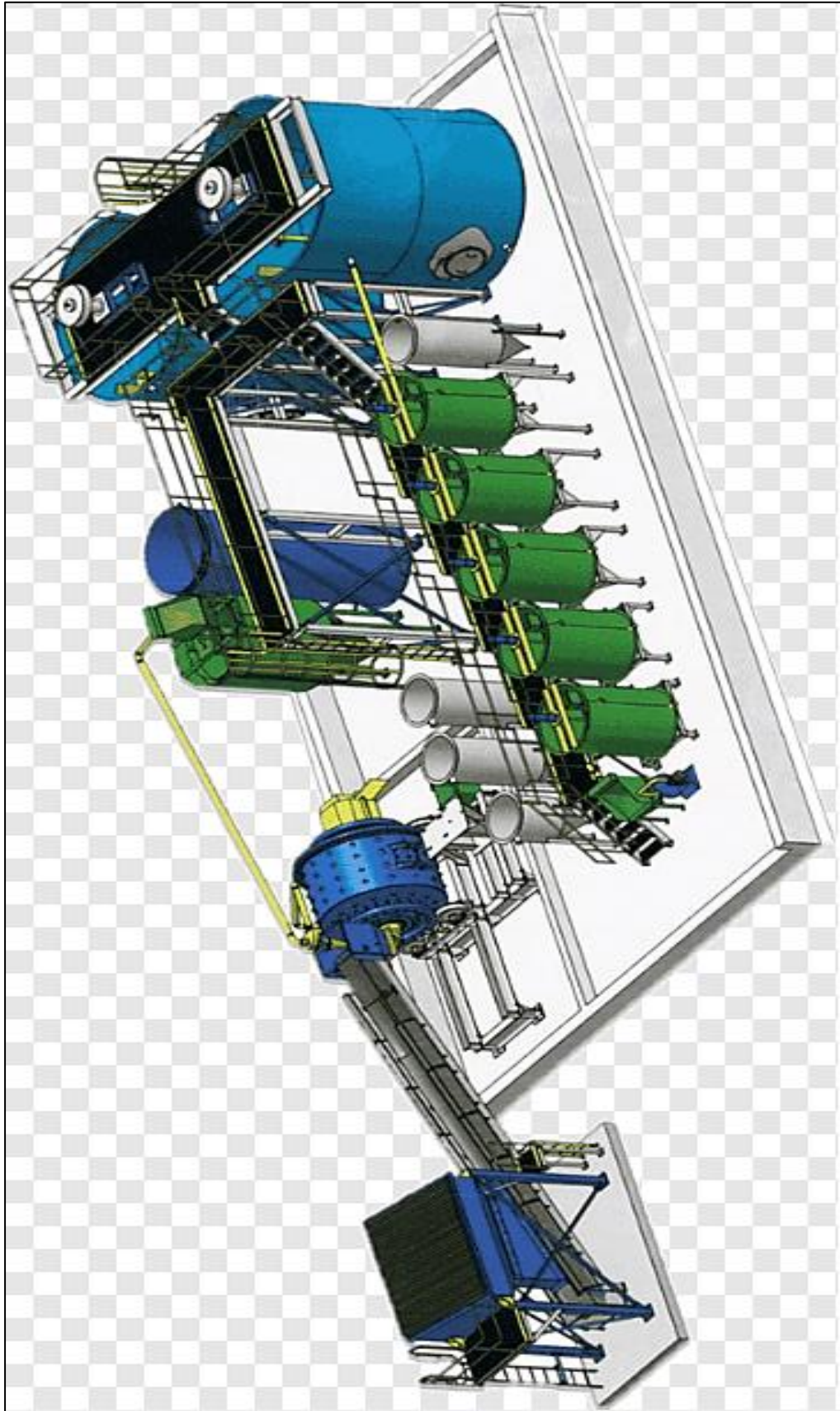


Fig. 21. Planta de cianuración de oro

Anexo B: Tabla 10. Especificaciones de la plancha metálica de acero

<h2 style="margin: 0;">Planchas de Acero Inoxidable ASTM A240, calidad 304, 316 y 430</h2>			
Espesor		Peso Teórico (Kg)	
pulg	mm	4' x 8'	5' x 10'
	0.3	7.14	11.15
1/64	0.4	9.53	14.68
1/64	0.45	10.72	16.72
1/16	0.50	11.81	18.09
	0.55	13.09	20.44
1/40	0.6	14.29	22.90
	0.7	16.67	26.01
1/32	0.8	18.05	28.73
1/27	0.8	21.43	33.45
1/20	1.2	28.58	44.59
1/16	1.5	36.72	56.74
5/64	2.0	47.57	74.39
3/32	2.5	58.45	92.83
1/8	3.0	71.25	111.48
	3.5	83.94	130.26
5/32	4.0	96.13	148.64
3/16	4.76	113.21	176.80
1/4	6.35	151.02	235.97
3/8	9.53	226.65	354.15
1/2	12.70	302.65	471.85
5/8	15.00	356.75	557.42
	18.00	428.10	668.90
3/4	19.05	453.67	707.82
1	25.40	604.69	943.89
1 1/4	31.75	755.12	1179.87
1 1/2	38.10	906.14	1415.84
2	50.80	1208.19	1887.79



PLANCHAS DE ACERO INOXIDABLE A240 / A480

Planchas de acero inoxidable calidad 304, 316 y 430; para uso petroquímico, industrial, equipamiento médico, utensilios de cocina, etc.

Anchos de 4' (1200 mm) y 5' (1500 mm).

Largos de 8' (2400 mm) y 10' (3000 mm).

Materiales: ASTM A240, A480

Resistentes a la corrosión y la oxidación. Acabados 2B, N°1 y N°4

Se mide en espesor x ancho x largo

**Características de Acabados:**

**2B** Laminado en frío, recogido y decapado. Conocido como acabado MATE.

**N°1** Laminado en caliente, recogido y decapado. Conocido como acabado INDUSTRIAL.

**N°4** Pulido con cintas abrasivas de grano 150 a 400. conocido como acabado SATINADO.